

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ МЕДИЦИНСКИХ НАУК УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ИНСТИТУТ  
ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДОРОВЬЯ им. А.Н. МАРЗЕЕВА НАМН УКРАИНЫ"

На правах рукописи

ГЕРМАН ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА

УДК 613.648.4 : 614.876

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОТИВОРАДОНОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ  
ДЛЯ ЗДАНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА РАДОНООПАСНЫХ  
ТЕРРИТОРИЯХ УКРАИНЫ

14.02.01 – гигиена и профессиональная патология

Диссертация на соискание научной степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук, профессор  
Павленко Татьяна Александровна

Киев – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 РАДОН В ЗДАНИЯХ КАК ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	12
1.1. Источники поступления радона в воздух зданий и помещений.....	14
1.2. Уровни активности радона в помещениях.....	26
1.3. Биологическое действие радона.....	27
1.4. Нормирование радона в воздухе жилых и общественных зданий...	32
1.5. Картирование радоновых рисков.....	34
1.6. Противорадоновые мероприятия и опыт их реализации в ЕС.....	38
ГЛАВА 2 ПРОГРАММА, МЕТОДЫ И ОБЪЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	42
2.1. Выбор объектов измерений.....	44
2.2. Измерение активности радона в помещениях.....	45
2.3. Измерения эманации радона в грунте.....	48
2.4. Измерения концентрации ЕРН в подстилающих грунтах.....	50
2.5. Методы математической обработки результатов исследования.....	51
2.6. Расчет эффективных доз от радона.....	53
ГЛАВА 3 ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА УРОВНЕЙ РАДОНА В ВОЗДУХЕ ЗДАНИЙ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ И ПОДСТИЛАЮЩИХ ГРУНТАХ.....	54
3.1. Анализ результатов измерения радона в воздухе помещений.....	55
3.2. Анализ результаты измерений активности радона и гамма- спектрометрического анализа грунтов.....	62
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ	

УРОВНЕЙ РАДОНА В СЕЛЬСКИХ ЗДАНИЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО АКТИВНОСТИ В ГРУНТЕ.....	70
Глава 5 НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА, ВНЕДРЕНИЕ И ОЦЕНКА ПРОТИВОРАДОНОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ.....	77
5.1 Оценка целесообразности создания карт радоновых потенциалов в контексте оптимизации противорадоновых мероприятий.....	77
5.2. Обоснование и выбор противорадоновых мероприятий для типовых односемейных зданий.....	83
5.3. Обоснование и выбор противорадоновых мероприятий для зданий, построенных по индустриальным технологиям и типовым проектам, на примере детских дошкольных и школьных учреждений.....	92
ГЛАВА 6 АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	100
6.1 Оценка эффективности реализации противорадоновых мероприятий в детских дошкольных и школьных учреждениях Кировоградской области .....	101
6.2. Рекомендации по проведению противорадоновых мероприятий в зависимости от источников поступления радона в воздух зданий...	107
6.3 Рекомендации по противорадоновым мероприятиям для новых зданий.....	119
ВЫВОДЫ.....	125
РЕКОМЕНДАЦИИ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ,  
СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

ДПР	– дочерние продукты распада радона
ЕРН	– естественные радионуклиды
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии
МДА	– минимально детектируемая активность
МКРЗ (ICRP)	– Международная комиссия по радиологической защите (International Commission on Radiological Protection)
МРТЧ	– модель респираторного тракта человека
НКДАР ООН	– Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций
ПВХ	– Поливинилхлорид
ПрМ	– противорадоновые мероприятия
ЭД	– эффективная доза
ЭРОА	– эквивалентная равновесная объемная активность
Бк	– беккерель, единица измерения радиоактивности вещества в системе СИ
Зв	– зиверт, единица измерения эквивалентной дозы ионизирующего излучения в системе СИ

## ВВЕДЕНИЕ

Радон в воздухе зданий является основным дозоформирующим фактором на территории всех стран умеренного климата, а его вклад в суммарную дозу облучения может достигать 70 % от величины среднегодовой эффективной дозы облучения [1, 2]. За последние 10 лет в разных странах было проведено более 20 исследований, посвященных влиянию радона на здоровье населения. Результаты этих исследований были проанализированы в пулинговых региональных исследованиях [3-9], которые объединили данные, полученные разными группами ученых из Европейской стран, США, Канады и Китая. Выводы авторов привели к переоценке величины радиационных рисков, обусловленных этим источником.

В 2015 году Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) издала новые рекомендации (Публикация 126 [10]) как дополнение к более ранней Публикации 115, которая была презентована научной общественности несколькими годами ранее [11], что свидетельствует о повышенном внимании к проблеме радона и, анализируя данные пулинговых исследований, МКРЗ пришла к выводу, что риск от радона для бронхолегочной системы человека недооценен в 1,5 раза, и увеличила соответствующие оценки радиационных рисков. В рамках научных дискуссий остался вопрос зависимости возникновения спонтанной лейкемии у детей [12, 13], данные исследования будут продолжены.

Осознание важности данной проблемы привело к изменениям в ряде регламентов "Основных стандартов безопасности" Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [14], которые были дополнены требованиями по уменьшению уровней радона в жилых зданиях и на рабочих местах. Соответствующие изменения были внесены и в Директивы Евратома [15] с требованием от всех государств-членов Евросоюза наличия национальных "Планов действий" по радону.

Проблема радона в Украине изучается с 1989 года. За это время была создана методическая и метрологическая база измерений радона в воздухе жилых помещений [16], проведен первоначальный скрининг уровней радона в домах различных областей страны и созданы соответствующие базы данных [17-19], установлены основные закономерности формирования уровней радона в домах [20] разработаны и имплементированы основные радиационно-гигиенические регламенты [21], сделаны оценки оправданности вмешательства для радона [22]. Однако, для успешной реализации национального плана действий по радону должны быть проанализированы национальная нормативная база и положения Евратома.

*Актуальность работы.* В феврале 2015 года Кабинет Министров Украины утвердил Постановление № 110-р об имплементации Директивы 2013/59/Евратома и, таким образом, взял на себя обязательства по разработке и внедрению плана действий по уменьшению радиационных рисков для населения Украины.

Анализ состояния проблемы радона в Украине показал, что все исследования, которые проводились в Украине, в первую очередь, связаны с организацией и научно-методическим обеспечением работ по измерению радона, а также научным обоснованием величины нормативов и требований к национальным регламентам по ограничению доз облучения от этого источника. Однако, уменьшение уровней радона в зданиях – это не только мониторинг уровней радона, но и, прежде всего, противорадоновые мероприятия, которые должны быть выбраны таким образом, чтобы при минимальных экономических затратах давать максимальный эффект по уменьшению дозы облучения. Подобных исследований в Украине не проводилось, поэтому данная проблема является, несомненно, актуальной в контексте разработки плана действий по уменьшению доз от радона и имплементации в Украине Директивы 2013/59/Евратома, а также гармонизации национальной нормативной базы с требованиями Евросоюза.

*Связь работы с научными программами, планами, темами.* Данная работа выполнялась в рамках следующих научно-исследовательских работ:

– "Наукове обґрунтування реальних шляхів зменшення поточних доз опромінення населення в різних регіонах України", государственный регистрационный номер 0104U002529;

– "Радіаційно-гігієнічна оцінка залишків видобутку та переробки корисних копалин з високим вмістом природних радіонуклідів", государственный регистрационный номер 0110U001463.

– раздел "Проведення вимірювань середньорічної еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) радону-222 у повітрі приміщень", государственный регистрационный номер 0111U009250 (Кировоградская региональная программа "Стоп-радон").

*Цель и задачи исследования.*

Целью работы является научное обоснование, разработка и внедрение противорадоновых мероприятий в зданиях, расположенных на радоноопасных территориях Украины, для уменьшения рисков радиационного влияния радона - 222 на детей и взрослых.

Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Определить уровни радона в подстилающих грунтах и домах на радоноопасных территориях Украины.

2. Определить закономерности формирования уровней радона в воздушной среде зданий для его основного источника поступления – подстилающих грунтов.

3. Научно обосновать и разработать методы снижения уровней радона в воздушной среде сельских зданий, типовых для пилотных регионов Украины.

4. Оценить эффективность проведенных санитарно-гигиенических противорадоновых мероприятий.

*Объект исследований:* закономерности формирования уровней радона в воздушной среде зданий для основного источника поступления – грунта и величины радиационных рисков, обусловленных радоном.

*Предмет исследований:* радиационно-гигиенические параметры состояния воздуха в помещениях и подстилающих грунтах.

*Методы исследования:* Аналитический - для обобщения информации о результатах научных исследований проблемы радона, его биологического воздействия на организм человека, методов его уменьшения в воздухе жилых помещений; физические – для исследования активностей радона в воздухе грунта и жилых помещений: метод пассивной трековой радонометрии для измерения радона в воздухе помещений; искровой метод считывания количества треков; гамма-спектрометрический метод – для определения содержания активности радона и других природных радионуклидов в грунте; математические – для статистической обработки и анализа полученных результатов: дескриптивный, корреляционный, дисперсионный. Математические модели МКРЗ для расчета эффективных доз облучения.

*Научная новизна полученных результатов.* Впервые установлены закономерности формирования уровней радона в воздушном пространстве типичных сельских зданий для основного пути поступления этого радионуклида в воздух помещений из подстилающих грунтов Украины.

На основе полученных данных о содержании радона в воздухе зданий и грунтах, комплексного анализа конструктивных решений типовых украинских зданий и геоморфологических особенностей подстилающих грунтов впервые научно обоснован комплекс противорадиационных мероприятий для существующих односемейных домов и типовых зданий детских дошкольных и школьных учреждений.

*Теоретическое значение полученных результатов.* Установлены пространственно-временные зависимости формирования уровней радона в воздухе типичных зданий для основного пути поступления этого радионуклида в воздушное пространство помещений – подстилающих грунтов. Данные



закономерности стали теоретической базой при обосновании и разработке методов противорадоновой защиты для существующих односемейных жилых домов и типовых зданий для детских школьных и дошкольных учебных заведений.

*Практическое значение работы* заключается в реализации противорадоновых мероприятий в 189 детских учреждениях, оценке их эффективности и разработке рекомендаций по их коррекции.

На базе этих материалов создан научно-популярный буклет “Радон. Что нужно знать, чтобы защитить свою семью”, 2014.

Результаты исследований были использованы при разработке материалов для программ научно-практических семинаров, которые были проведены для специалистов практических служб с целью повышения квалификации, а также курса лекций для студентов и аспирантов. В целом разработано и прочитано 5 курсов лекций по теме: “Радон (базовый)”; “Радон – измерения”; “Естественные радионуклиды в воде”; “Противорадоновые мероприятия”; “Картирование радоновых рисков”.

*Внедрение результатов исследований осуществлено:*

а) на отраслевом уровне: разработаны методические рекомендации МР 6.6.1. 6.2.-000-14 “Здійснення радіаційно-гігієнічного моніторингу установами Державної санітарно-епідеміологічної служби України”, 2014.

б) на региональном уровне: материалы диссертации о закономерностях формирования уровней радона в воздухе зданий в зависимости от его основного пути поступления – подстилающей почвы, а также материалы о противорадоновых мероприятиях были использованы в учебном процессе НПИ “Институт геологии” Киевского национального университета им. Тараса Шевченко при прочтении лекций по курсу “Ядерная геофизика”, 2014-16 гг. (акт внедрения от 14.09.2016) и для работы специалистов Радиологической лаборатории Отдела эпидемиологического надзора и профилактики неинфекционной заболеваемости ГУ “Ровенский лабораторный центр МЗ Украины” (акт внедрения от 10.02.2016).

*Личный вклад соискателя.* Автором лично выполнен патентно-информационный поиск и аналитический анализ литературы, определены

актуальность проблемы и цели работы, разработана программа исследований, поставлены задачи и выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Соискатель принимала личное участие во всех натуральных и лабораторных исследованиях, лично выполняла расчёты, анализ и статистическую обработку данных, формулировала рекомендации по противорадоновым мероприятиям.

Личный вклад соискателя составляет порядка 80 % объема работы. Автор выражает благодарность руководителю и специалистам лаборатории радиационной защиты ГУ ИГЗ им. А.Н. Марзеева НАМН Украины, Госсанэпидслужбе Украины в Кировоградской области, а также руководству Кировоградской областной администрации и Шведского Управления Радиационной Безопасности за консультативную и практическую поддержку в организации и проведении измерений уровней радона на объектах исследования и внедрения противорадоновых мероприятий.

*Апробация результатов диссертации.* Основные положения и результаты диссертационного исследований были апробированы в виде докладов на международных и национальных научно-практических конференциях, таких как:

– третий Европейский конгресс Международной Ассоциации Радиационной Защиты (IRPA), Хельсинки, Финляндия, 2010 г.;

– научно-практическая конференция "Актуальные вопросы гигиены и экологической безопасности Украины (седьмые марзеевские чтения)", Киев, 2011 г.;

– международная конференция "Радиоэкология и радиоактивность в окружающей среде", Барселона, Испания, 2014 г.;

– научно-практическая конференция "Актуальные вопросы гигиены и экологической безопасности Украины (девятые марзеевские чтения)", Киев, 2015 г.

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе: 5 статей в специализированных профессиональных изданиях ГАК, из которых 1

статья опубликована самостоятельно; других журналах и сборниках – 5 статей, из них 3 в зарубежных реферируемых журналах, 3 монографии, тезисы докладов на научно-практических конференциях – 4, учебные пособия – 1, методические рекомендации – 1, научно-популярная брошюра – 1.

*Структура и объем диссертации.* Диссертационная работа изложена на 160 страницах, в том числе объем основного текста составляет 138 страниц, и состоит из введения, аналитического обзора научной литературы, описания методов и объемов исследований, трех разделов собственных исследований, анализа и обобщения полученных результатов, выводов, списка использованных литературных источников (всего 115 наименований, из них украинских и российских 20, 86 – англоязычных, 9 – на других иностранных языках), 2 приложений.

# ГЛАВА 1

## РАДОН В ЗДАНИЯХ КАК ГИГИЕНИЧЕНСКАЯ ПРОБЛЕМА.

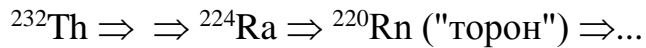
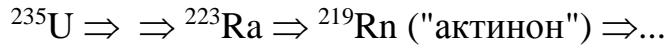
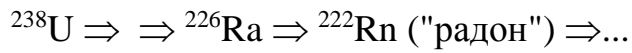
### ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В соответствии с выводами Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН), более 60 % годовой эффективной дозы население земли получает от источников естественного происхождения. На сегодняшний день существует ряд международных рекомендаций и требований, устанавливающих пределы уровней вмешательства и действий для уменьшения уровней облучения радоном в жилых помещениях и на рабочих местах, включая подземные.

Как показывает результат проведенного литературного поиска, существенные продвижения по изучению радона за последние 30 лет были выполнены в области дозиметрии радона. Выявлен огромный массив данных и публикаций по измерению активности радона в помещениях. Но существует весьма ограниченное количество публикаций как по методам противорадоновых мероприятий для устранения или снижения действия данного источника облучения населения, так и по методам определения участков потенциальных высоких активностей радона.

То небольшое количество работ, доступных для пользователя, было выполнено в Финляндии, Швеции и Чехии [23, 24], а, соответственно, методы, предложенные в них, рассчитаны на скандинавские климатические условия, геологические и почвенные условия и способ строительства жилых зданий. Такие методы требуют обработки, адаптации и верификации в условиях Украины.

Радионуклиды, образующиеся в результате радиоактивного распада трех семейств естественных радионуклидов, являются преимущественно радиоизотопами тяжелых металлов, таких как уран, торий, радий, полоний, висмут, свинец. Однако в каждом из этих трех семейств существует одно звено, которое является радиоизотопом благородного газа радона (Rn):



Уран, торий, радий содержатся практически во всех естественных материалах: на поверхности любых горных пород, почв и строительных конструкций и выделяют в воздух радон.

Особое значение имеет эманирование радиоактивных радона, который имеет период полураспада 3,84 суток, и торона ( $^{220}\text{Rn}$ , Tn) с периодом полураспада 55 сек. По сравнению с ними вклад от актинона ( $^{219}\text{Rn}$ ) незначителен, так как период полураспада этого радионуклида короткий (всего 3,9 с) и, кроме того, мало соотношение в естественном уране атомов  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ , равное 0,00725. Вследствие этого ингаляция актинона и его дочерних продуктов распада, как правило, не рассматривается [25].

Радон, эксхалирующий с земной поверхности в свободную атмосферу, быстро рассеивается в ней в результате вертикальной конвекции и турбулентного перемешивания. В тех случаях, когда радон-222 поступает в замкнутое воздушное пространство, например, в подземные шахты и дома, встречаются высокие уровни радона-222. В таких местах уровень радона-222 возрастает по мере уменьшения скорости вентиляции [26].

Исследования, проведенные в различных странах, показали, что средняя по времени активность радона-222 в воздухе помещения сильно варьирует от дома к дому, изменяясь в диапазоне от очень незначительной величины до нескольких тысяч  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [1].

Радон-222 последовательно распадается до короткоживущих радионуклидов, так называемых дочерних продуктов распада (ДПР) радона, как показано на рис. 1.1. Следовательно, распад радона-222 приводит к накоплению его короткоживущих ДПР в воздухе. Так как эти нуклиды являются радиоизотопами полония, висмута и свинца, большая их часть присоединяется к частичкам пыли субмикронного размера, образуя радиоактивный аэрозоль.

Благодаря осадению на поверхности и вентиляции, в замкнутых воздушных пространствах, таких как шахты или дома, не достигается радиоактивное равновесие между радоном и его ДПР.

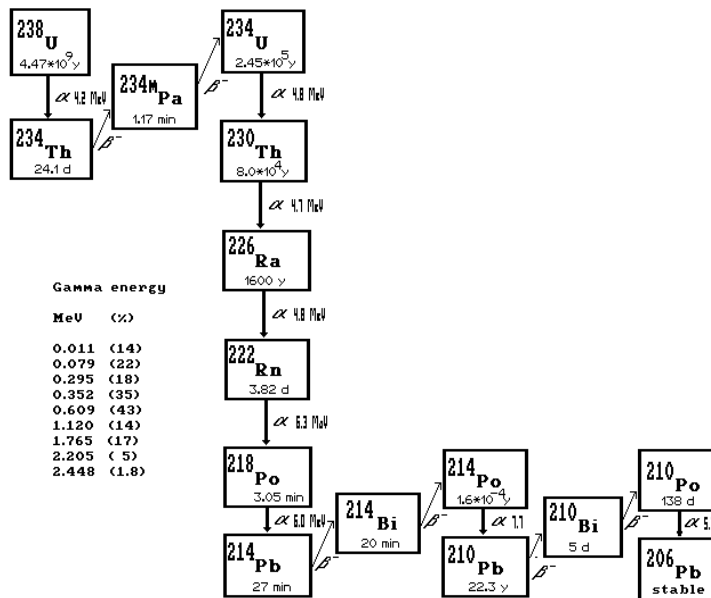


Рис. 1.1 Цепочка распадов уранового ряда

### 1.1. Источники поступления радона в воздух зданий и помещений

Источниками поступления радона-222 внутрь помещений являются:

- эксхалация из строительных материалов;
- поступление из почвы или грунта под зданием;
- инфильтрация из воздуха, поступающего снаружи в результате вентиляции;
- поступление из водопровода.

Далее в работе для обозначения почвенного слоя или слоя горной породы будет использоваться термин "грунт". По определению почва – это плодородный слой, который при строительстве снимается и переносится в другие места, либо отсутствует на участках с малой мощностью почвенного слоя и выходом на поверхность горных пород.

Обычно имеют значение лишь первые три из вышеупомянутых источников. Поступление радона-222 из воды необходимо рассматривать, если водоснабжение ведется из артезианских скважин.

Интенсивность поступления радона-222 из какого-либо источника выражается в форме притока радиоактивности в воздух внутреннего пространства помещения за единицу времени в единице объема воздуха данного помещения. Это связано с тем, что в природе уран и радий присутствуют во всех почвах и горных породах в той или иной концентрации. Радон-222 является продуктом распада радия и эманурует из минеральных зерен грунта или горных пород, попадая в воздух или воду межпорового пространства. Содержание радона в грунтовом воздухе обычно составляет от 5 000 до 2 000 000 Бк·м<sup>-3</sup> в зависимости от типа подстилающей материнской породы, типа грунта и их механических характеристик.

В воздух жилых помещений радон поступает несколькими путями: из строительных материалов основных конструкций или подсыпки под фундамент здания, воды, грунта под домом, в редких случаях - природного газа. Рассмотрим некоторые особенности поступления радона от этих источников.

Поскольку все горные породы содержат некоторое количество урана, то и все почвы, сформированные на данных горных породах, также содержат уран и дочерние продукты распада. Его содержание в различных почвах и грунтах варьирует в зависимости от генотипа и, соответственно, варьирует и активность радона в воздухе почв.

Существуют породы, содержание урана в которых выше среднего, например, светлые вулканические породы, граниты, черные сланцы, осадочные породы, содержащие фосфаты, а также метаморфические породы, сформированные из вышеуказанных пород.

Чем выше содержание урана в горных породах, грунтах и почвах, тем выше вероятность того, что активности радона в помещениях будут повышенными. На этом и ряде других факторов основана методика картирования радонового риска. По сути, эти карты отражают потенциальную

радоноопасность территорий и позволяют прогнозировать повышенное содержание радона в домах на этих территориях.

Однако на практике довольно распространены случаи, когда на участках с высоким содержанием радона его активности в помещениях незначительны и, наоборот, – на участках с низким содержанием радона в почве его уровни в помещениях повышены. Это связано с тем, что кроме прямой зависимости активности радона от его содержания в грунте под зданием, немаловажное влияние оказывает конструкция и режим эксплуатации самого здания [27].

Между типом грунта и активностью радона в почвенном газе существует прямая зависимость. Так же, как и уран, в грунте присутствует радий, который является продуктом его распада и родоначальником радона. Ядра атомов радия, распадаясь, испускают альфа-частицы. При этом ядро образовавшегося атома радона и альфа-частица разлетаются в противоположные стороны – этот процесс описан в работах многих авторов. В зависимости от того, где в минеральном зерне (близко к поверхности или в глубине), составляющем грунт, находился атом радия во время радиоактивного распада, радон будет либо покидать минеральное зерно, перемещаясь в воздух межпорового пространства, либо оставаться в нем, становясь, таким образом, недоступным для переноса грунтовым воздухом. Если скорость ядра атома радона, которое вылетает из минерального зерна, достаточно высока, то это ядро пролетает через все межпоровое пространство и попадает в прилежащее зерно, где атом радона с этим ядром становится недоступным для переноса. Таким образом, доступными для дальнейшего переноса в грунте становятся только те атомы радона, которые попали в межпоровое пространство, наполненное воздухом, водой или иным газом. Явление выделения атомов радона из минерального зерна в поровое пространство называется эманацией, а отношение количества атомов радона, попавших в поровое пространство, к общему числу образовавшихся атомов радона называется коэффициентом эманации. Исследования показали, что чем меньше размер минерального зерна и чем больше в нем микротрещин, тем больше оно подвержено выветриванию, и тем



больше атомов радия потенциально находятся на его поверхности, и, соответственно, тем больше атомов радона попадает в межпоровое пространство горной породы и грунта [28].

Для большинства грунтов только 10-50 %, а в глине – до 70 % образовавшихся атомов радона покидают минеральные зерна и остаются в поровом пространстве.

В табл. 1.1 приведены данные по содержанию ЕРН для ряда типичных почв, которые классифицированы по механическому составу [29].

Коэффициент эманации в сочетании с данными по содержанию радия в грунте позволяет провести расчет максимально доступного радона в грунте для тех случаев, когда прямые измерения активности радона провести невозможно, например, при переувлажненности грунта, высокой плотности грунта или отсутствии специального измерительного оборудования – эманометра.

Передвижение радона в грунтовом воздухе или воде возможно благодаря тому факту, что это инертный газ. Он обладает гораздо большей подвижностью, чем радий или уран, которые могут образовывать комплексы с другими химическими элементами и осаждаться на разных типах геохимических барьеров. То, что радон свободно передвигается в поровом пространстве, делает его легко доступным для попадания в воздух помещений [30].

При радиоактивном распаде радия-226 часть образовавшихся атомов радона покидает минеральное зерно и попадает в межпоровое пространство. В среднем около 40 % образовавшихся атомов радона эмануют в межпоровое пространство, но эта величина может быть и гораздо больше и достигать 60 % в глинах, или быть значительно меньше – порядка 20 % в валунах. Другими словами, эманация радона из материала зависит от размера минерального зерна [31]. Далее из межпорового пространства грунта радон перемещается либо диффузией (пассивный транспорт), либо путем активного переноса с потоками грунтового воздуха или воды. Таким образом, концентрация радона в

грунтовым воздухе определяется наличием и количеством атомов радия в грунте, его типом, пористостью, наличием воды в грунте или воздуха.

Таблица 1.1

**Содержание естественных радиоактивных элементов для типичных почв степной и лесостепной географических зон [29]**

Почвы	Удельная активность радионуклида, Бк·кг <sup>-1</sup>		
	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Земная кора	33	39	656
	28	41	740
	44	53	818
Почвы в среднем	10	7	100
	50	50	700
	ср. 25	ср. 25	ср. 370
Сероземы	31	48	670
серо-коричневые	28	41	700
Каштановые	27	37	550
Черноземы	22	36	410
серые лесные	18	27	370
дерново-подзолистые	15	22	300
Подзолистые	9	12	150
Торфянистые	6	6	90
Диапазон значений	6	7	100
	50	53	700
Среднемировые	26	26	370

Практика показала, что активность радона в грунтах может варьировать от 5 до 90 кБк·м<sup>-3</sup>. Если предположить, что в грунтах скорость воздухообмена равна нулю, а потеря радона является результатом его диффузии с поверхности

грунта, то концентрацию радона в грунтовом воздухе можно рассчитать согласно следующей формуле:

$$C_{\max} = A \cdot e \cdot \rho \cdot \frac{1-p}{p}, \quad (1.1)$$

где  $C_{\max}$  – активность радона в поровом пространстве грунта при воздухообмене 0 обменов  $\cdot \text{ч}^{-1}$ , Бк $\cdot\text{м}^{-3}$ ;

$A$  – концентрация радия-226 в породе, Бк $\cdot\text{кг}^{-1}$ ;

$e$  – коэффициент эманации;

$\rho$  – плотность (среднее значение для рыхлых грунтов 2 700 кг $\cdot\text{м}^{-3}$ );

$p$  – пористость (отношение объема пор к общему объему).

Кроме того, скорость передвижения радона в грунте зависит от его увлажненности, ее пористости и наличия связей между порами, или так называемой воздухопроницаемости.

Если перенос происходит только путем диффузии, то его продолжительность относительно невелика. В грунтах с высокой воздухопроницаемостью радон передвигается легко, например, в песчаных, гравийсодержащих и моренах. В плотных грунтах с низкой воздухопроницаемостью, например, в увлажненных глинах, радон переносится медленно.

В воде радон передвигается медленнее, чем в воздухе. Расстояние, на которое радон переместится до того, как 90 % его распадется в увлажненных грунтах составляет около 2-5 см. В сухом грунте радон за этот же период времени переместится на расстояние около 2 метров, а в воздухе – на 5 метров [32].

Однако перенос радона с потоками грунтового воздуха может осуществляться и на большие расстояния. Если изменить градиент давления, например, понизить давление в воздухе грунта, то перенос возможен на 20-40 и более метров, при условии высокой проницаемости грунта (гравий, щебень).

Радон может легко переноситься вдоль водопроводных труб и прочих подземных коммуникаций.

В воде перенос радона очень медленный, поэтому радон, образовавшийся в слоях грунта ниже уровня грунтовых вод, как правило, не достигает поверхности грунта и практически полностью поглощается водой [34]. Влияние кристаллического щита и магматических горных пород на активности радона в грунтах при мощности осадочного чехла в несколько десятков метров обусловлено не его прямым переносом из этих слоев в верхний горизонт, а генетически, то есть богатые ураном и радием породы формируют при различных геологических процессах вышележащие горизонты грунтов и почв.

Таким образом, высокие активности радона в воздухе могут содержать дома, построенные на участках с сухими и хорошо воздухопроницаемыми грунтами, а также здания, построенные на склонах или же на грубых обломочных породах и пустотных образованиях [33]. Необходимо отметить, что даже при относительно небольших активностях радона в грунтовом воздухе и при наличии в фундаменте трещин и щелей, в домах также могут фиксироваться повышенные активности радона.

Высокие активности радона в воздухе помещений могут быть обусловлены также явлением диффузии. Этот процесс активного переноса радона из воздуха в грунте в воздух помещений обусловлен разницей температур и давления внутри здания и под ним, повышенной проницаемостью грунта вдоль фундамента (применение подсыпки, неплотности между сваями и грунтом, коммуникационные отверстия и т.д.) [34].

Таким образом, если говорить о грунтовом радоне, риски его высокого содержания обуславливают следующие факторы:

- негерметичные участки фундамента;
- низкое давление в помещении: чем ниже давление, тем больше грунтового воздуха попадает во внутреннее пространство дома (этот процесс зависит от воздухообмена в помещении или специфической системы вентиляции, которая может приводить к разрежению воздуха в доме);

- проницаемость дренажного слоя под зданием или грунтового слоя, который находится в непосредственном контакте со зданием;
- активность радона в грунтовом воздухе и объем грунтового воздуха, который может просочиться в здание;
- строительные особенности фундамента здания (например, если фундамент построен прямо на горной породе, то влияние концентрации радия в породе и объем радона, который высвобождается и распространяется из поверхности горной породы, также могут оказывать существенное влияние на его активности во внутреннем пространстве здания);
- другие конструктивные особенности зданий, например, наличие печи с вытяжной трубой [31].

Если подытожить вышесказанное, радон из подстилающего грунта всегда будет перемещаться в зону нарушенных структур или гравийную подсыпку под зданием. Наполнитель в нарушенной зоне обычно состоит из пород и грунта участка застройки и тоже может являться мощным генератором радона. Активность радона в воздухе здания будет зависеть от содержания урана и радия в материале, типа и проницаемости подстилающего и соприкасающегося грунта, их проницаемости и влажности.

Давление под большинством домов обычно выше давления внутри зданий, поэтому воздух стремится переместиться во внутреннее пространство дома, чтобы уравновесить разницу этого давления. Проходя через фундамент, стены, полы с материалами и наполнителями, содержащими радон, воздух переносит его во внутреннее пространство здания. Необходимо отметить, что любое строение, даже современное, всегда имеет небольшие неплотности в основании, а также трещины, зазоры для подвода труб, подпольное пространство, зачастую без изоляции от грунта и т.д.

Исследования отдельных факторов показали, что даже радонозащищенные здания засасывают из грунта порядка 1 % общего объема внутреннего воздуха, а остальной – поступает из атмосферного [35]. В домах с низким внутренним давлением, плохо изолированными полами и несколькими

точками входа для грунтового воздуха объем последнего может составлять до 20 % от общего воздухообмена даже при наличии мощных систем вентиляции. В этом случае, даже если грунт под зданием содержит умеренные активности радона, его активность внутри помещения может стать очень высокой [36].

Дополнительным источником радона в помещениях могут стать строительные материалы, изготовленные из минерального сырья, содержащего радий. В некоторых случаях источником радона может быть вода, потребляемая в домашнем хозяйстве, если она поступает из скважин водоносного горизонта, обогащенного радоном [37].

Существует ряд британских, немецких, норвежских, финских, шведских, датских и чешских исследований о вкладе строительных материалов в содержание радона в воздухе помещений. В данных работах подробно рассмотрено влияние комбинаций различных строительных материалов и скорости воздухообмена на активности радона и его ДПР в воздухе зданий [37-39].

Рассмотрим несколько примеров, которые являются наиболее показательными в контексте исследований данной работы.

При строительстве жилых домов обычно используют несколько различных стройматериалов, поэтому трудно подсчитать, какой вклад различные материалы вносят в контексте дозы облучения проживающих в здании людей. Авторы работ [34, 35, 40] приводят оценки доз облучения жителей от радона на примере домов, построенных из бетонных плит как наиболее распространенного решения при строительстве зданий индустриальными методами. В таких зданиях все несущие стены, пол и потолки выполнены из одного и того же стройматериала, а внутренняя отделка выполняется из гипсокартона.

Авторы определяли скорость эксхалации радона ( $\text{Бк}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$ ) на необработанных поверхностях различных образцов строительных материалов. Результаты приведены в сводной табл. 1.2 [42].

### Типичная скорость эксхалиции для различных типов материалов

Строительный материал	Активная концентрация радия, Бк·кг <sup>-1</sup>	Эксхалиция радона, Бк·м <sup>-2</sup> ·ч <sup>-1</sup>
Бетон	26-60	0,45-63
Кирпич	87	1,1
Шлакоблочный кирпич	–	0,29
Гипсокартон	10	0,4
Цемент	30-33	–

Как видно из табл. 1.2, радон легко эксхалирует с поверхности бетонных строительных материалов – усредненные данные для стен толщиной 15 см соответствуют примерно скорости эксхалиции 0,39 Бк·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup> на 1 Бк·кг<sup>-1</sup> для радия-226. Уровни эксхалиции радона с поверхности гипсокартона и прочих шламодержащих материалов довольно низкие и составляют порядка 0,06 и 0,15 Бк·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup> на 1 Бк·кг<sup>-1</sup> радия-226 [27, 31].

Ряд публикаций посвящен результатам исследований скорости эксхалиции радона с поверхности строительных материалов, а оценки его содержания соотносятся с объемной активностью радона в зависимости от скорости воздухообмена в конкретном помещении. Для этого метода необходимо знать отношение площади строительных материалов, которые выделяют радон, к объему помещения ( $F/V$ ) и внутреннюю объемную активность радона ( $C_0$ ). Рассчитанное таким образом среднее значение скорости эксхалиции радона в домах с бетонными стенами равно 20 Бк·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup>, а в домах из кирпича – 7,3 Бк·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup>. Стоит упомянуть, что разброс этих значений для

каждой отдельной квартиры или дома может быть большим, поэтому для усреднения значений обычно использовалось отношение  $F/V = 1,3 \text{ м}^{-1}$  [40].

О'Бриан К. и Sanna R [41] провели расчет внутренних доз на органы и эффективных доз для мужчин и женщин от внешних источников гамма-излучения, обусловленного естественными радионуклидами. Согласно этим расчетам, переходный коэффициент от абсорбированной дозы в воздухе для калия-40 и радионуклидов цепочки распада урана и тория к эффективной дозе равен  $0,66 \text{ Зв} \cdot \text{Гр}^{-1}$  для мужчин и  $0,70 \text{ Зв} \cdot \text{Гр}^{-1}$  – для женщин. Либо используем усредненный коэффициент  $0,68 \text{ Зв} \cdot \text{Гр}^{-1}$ . Если предположить, что человек проводит порядка 80 % времени внутри помещения, то его средняя эффективная доза облучения от гамма-излучения в среднестатистической комнате из бетонных плит будет составлять порядка  $0,57 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ . В зданиях, построенных из кирпича или ракушечника, дозы будут составлять  $0,95 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$  и  $0,40 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ , соответственно [42]. Отсюда, рассчитанная на основании модели Мустонена, средняя воздушная компонента вклада радона в облучение проживающих в доме с бетонными конструкциями равна  $45 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , что создает эффективную дозу порядка  $1,3 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$  [43]. Для жилых помещений, построенных из кирпича, вклад в годовую эффективную дозу будет равен примерно половине этой величины.

В статье Павленко Т. А. и соавторов, опубликованной на конгрессе IRPA 2010, представлены результаты анализа 95 % всех карьеров Украины по добыче сырья для строительных материалов. Этот анализ показал, что 88 % стройматериалов может свободно использоваться для строительства жилых и общественных зданий. А их вклад в активности радона в домах составит не более  $15\text{-}25 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  [44].

Третий возможный источник радона в помещении – это вода, используемая в домашнем хозяйстве. Все грунтовые воды горных пород и слоев грунта содержат большую или меньшую активность радона, урана и радия. Высокие концентрации этих радионуклидов характерны для регионов, где горные породы состоят из богатых ураном пород. По данным



Бузынного М. Г. и соавторов, на территории Украины имеется ряд регионов, где вода содержит высокие активности радона, например, Кировоградская, Черкасская, Киевская области [45, 46].

Часть радона, растворенного в воде, выделяется при выходе воды из водопровода. Остальная часть газа выделяется при использовании и нагреве воды, например, при мытье посуды или принятии душа. Чем больше вода разделяется на струи и подвергается действию воздуха, тем больше из неё выделяется радона. В табл. 1.3 приведены данные о выделении радона из воды при ее использовании для хозяйственных нужд.

Вода может стать причиной повышенной, а иногда очень высокой активности радона в помещении, если воду добывают из артезианских скважин. Для случаев коммунального водоснабжения, когда используется поверхностный водозабор и вода проходит предварительную обработку на станциях водоочистки, а затем длительный путь по трубопроводу, радоновой проблемы быть не может.

*Таблица 1.3*

**Процент выделения радона из воды при ее различном использовании в хозяйстве [47]**

Применение	Количество радона, выделяемого в воздух, %
Душ	60-70
Ванна	30-50
Туалет	30
Стирка	90-95
Посудомоечная машина	95
Бытовая вода	10-45

## 1.2. Уровни активности радона в помещениях

Активности радона в воздухе помещений конкретных зданий могут варьировать в достаточно широких пределах, а их величина зависит от нескольких факторов [48-50]. По данным Шведского и Финского государственного управления по радиационной защите, значение средней годовой активности радона в жилых помещениях этих стран варьирует от  $110 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  до  $80\,000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [51-53].

Уровни радона в украинских домах значительно меньше. Средневзвешенное значение активности радона в одноэтажных жилых помещениях составляет  $130 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , достигая максимальных значений в  $1500 - 2000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [54, 55].

Исследования показали, что наибольший вклад в активности радона в помещениях типичных украинских домов дает грунтовый воздух. Эти данные были подтверждены в ходе исследований на территории Киевской, Одесской и Кировоградской областей.

Подобные исследования проводились на территории республики Беларусь (Гомельский, Могилевский и Витебский районы) и в России (республика Калмыкия). В каждом случае было показано, что строительные материалы не имеют значительного вклада в активности радона в помещениях, а вода, используемая в домашнем хозяйстве, давала значительный вклад в активность радона лишь в нескольких случаях [56, 57].

Исследования также показали, что активности радона в воздухе помещений варьируют как в течение сезона, так и в течение суток. Эта величина зависит от нескольких факторов: режима вентиляции, планировочных решений зданий, воздействия ветра, наличия осадков, перепада температур, наличия зоны промерзания грунта, режима эксплуатации вытяжки, наличие камина и прочих источников поступления и удаления внешнего воздуха, а

также места расположения здания относительно градиента воздушных масс и температур. Необходимо отметить, что в домах с механической вентиляцией, которая работает круглосуточно с неизменной мощностью, скоростью и кратностью воздухообмена, уровни радона более постоянны, чем в домах с естественной вентиляцией [58].

### 1.3. Биологическое действие радона

Биологическое воздействие радона на организм человека изучается с 90-х годов прошлого столетия [59-61]. Первые результаты исследований были получены в Германии и США при обследовании состояния здоровья работников урановых шахт [25]. Было установлено, что радон и его дочерние продукты распада являются причиной образования рака легкого, латентный период развития которого составляет 15-30 лет при хроническом облучении [62].

В 90-е годы прошлого столетия и 2000-е годы в США, Китае, Великобритании, Швеции были проведены эпидемиологические исследования влияния радона на здоровье населения. Эти данные были обобщены в так называемых пулинговых исследованиях в регионах [5-8].

За период с 1990 по 2006 год были опубликованы результаты более 20 эпидемиологических исследований "случай-контроль" рака легких при облучении радоном в жилых помещениях. Каждое исследование содержало данные о 200 и более случаях рака легких [3]. Результаты таких эпидемиологических исследований были объединены в пулинговое исследование), и для их анализа была использована стандартная методология анализа.

По данным пулинговых исследований, риск возникновения рака легкого при облучении радоном в жилых помещениях был зафиксирован уже при активностях в  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Увеличение относительного риска возникновения

рака легкого на каждые  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  было оценено в коэффициент радиационного риска 1,02. При оценках учитывались региональные, возрастные и половые особенности изучаемых когорт. Дополнительно был проведен анализ данных для курящих. В этом случае значения соответствующих рисков возросли до 1,05 (семь категорий курильщиков). Данные исследования также установили, что кумулятивный риск для курильщиков (при учете таких факторов как возраст, когда человек начал курить, стаж курения, количество выкуриваемых сигарет в день) возрастает до 1,08 на каждые  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [4].

Изучение и понимание механизмов и оценки воздействия радона и его ДПР важны для правильной оценки коэффициентов дозовых переходов для различных групп населения. Большое количество исследований биологического действия радона и его ДПР позволили ученым понять, что основным путем поступления в организм человека короткоживущих ДПР радона-222 и торона-220 является вдыхание с воздухом и последующее отложение ДПР на стенках воздушных путей и бронхиального тракта. Облучение легких обусловлено в основном альфа-частицами, образующимися при распаде ДПР, но есть и небольшое воздействие бета-частиц и гамма-излучения.

Механизм инициирования радоном рака легкого до сих пор однозначно не определен, как и не известна однозначная причина синергического механизма действия радона с табакокурением. Среди ученых сегодня существует некое общее согласие, что воздействие альфа-частиц на секреторные и базальные клетки в верхних дыхательных путях является причиной риска рака легкого у шахтеров, хотя и существует неопределенность: повреждение каких именно клеток наиболее важно для инициирования рака легкого [2].

Доза облучения легких, обусловленная ингаляционным поступлением радона и его короткоживущих продуктов распада, как правило, рассчитывается по моделям МКРЗ [10] или другим моделям респираторного тракта человека.

Из-за короткого периода распада ДПР радона (менее получаса), эти радионуклиды формируют дозу в легочных тканях до их выведения абсорбцией

через кровь. Два из короткоживущих дочерних продукта радона, а именно: полоний-218 и полоний-214 распадаются с испусканием альфа-частиц, и именно энергия этих альфа-частиц обуславливает относительно высокую дозу облучения легких. В сравнении с ними дозы в системных органах и отделах пищеварительного тракта малы, и в эффективной дозе доминирует вклад эквивалентной дозы на легкие [11].

Эволюция значений эффективной дозы на единицу экспозиции ДПР радона (мЗв на РУМ или мЗв на  $\text{мДж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$ ), рассчитанных с использованием различных моделей представлена в табл. 1.4 [63-67].

МКРЗ пришла к выводу, что в радиационной защите к радону и его ДПР необходимо относиться как к любым другим радиоактивным элементам. В современной системе радиационной защиты (МКРЗ, 103) для расчета доз от радона и его ДПР используются как биокинетические и дозиметрические модели, так и метод "условного дозового перехода" [68].

Альфа-частицы радона генерируют свободные радикалы и оксидативный стресс, которые могут вызывать прямое повреждение ДНК в клетках. Но есть ряд свидетельств того, что присутствует так называемый "bystand effect" в прилегающих клетках, который приводит к их повреждению даже при отсутствии прямой экспозиции [69, 70].

Геномная нестабильность и "bystand" эффекты в клетках наблюдаются уже в зоне малых доз (менее 200 мЗв). В работах Кламмера и Кадхим [71, 72] было показано, что альфа-частицы способны создавать хромосомную нестабильность даже в дочерних культивируемых клетках человека. Такие исследования фактически являются индикатором того, что относительный вклад этих непрямых воздействий ионизирующего излучения, по сравнению с прямым воздействием и повреждением клеточного материала, может быть более значимым.

**Оценки эффективных доз облучения взрослого мужчины при ингаляционном поступлении радона и его ДПР, рассчитанные с использованием дозиметрических моделей МКРЗ [11]**

Публикация	Тип модели	Сценарий облучения	Эффективная доза, мЗв на РУМ	Эффективная доза, мЗв на мДж·ч·м <sup>-3</sup>
ICRP 50, 1987	NEA, 1983	Помещения	6,4	1,8
		Вне помещения	8,9	2,5
UNSCEAR, 2000	NEA, 1983	Внутри и вне помещения	5,7	1,6
Harley et al., 1996		Помещения и шахты	9,6 <sup>1)</sup>	2,7
Porstendorfer, 2001	Zock et al., 1996	Жилище <sup>2</sup>	8	2,3
		Рабочее место	11,5	3,2
		Вне помещения	10,6	3
Winkler-Heil and Hofmann, 2002	Детерминистская модель дыхательных путей	Жилище	7,6	2,1
Winkler-Heil et al., 2007	Детерминистская модель дыхательных путей	Шахта	8,3	2,3
	Стохастическая модель дыхательных путей	Шахта	8,9	2,5
	МКРЗ (ICRP, 1994)	Шахта	11,8	3,3
Marsh and Birchall, 2000	МКРЗ (ICRP, 1994)	Жилище	15	4,2
James et al., 2004	МКРЗ (ICRP, 1994)	Шахта <sup>3</sup>	20,9	5,9
		Жилище <sup>2</sup>	20,1	6,0
Marsh et al., 2005	МКРЗ (ICRP, 1994)	Шахта	12,5	3,5
		Жилище <sup>2</sup>	12,9	3,6

Примечания:

1. Значение поглощенной в воздухе дозы 6 мГр на РУМ<sup>-1</sup> (1,7 мГр на мДж·ч·м<sup>-3</sup>) рассчитано для бронхиального отдела. Эффективная доза на единицу экспозиции получена с использованием взвешивающего коэффициента излучения 20 для альфа-частиц и тканевого взвешивающего коэффициента 0,08 (=2/3×0,12), для рассмотренных отделов легкого (ICRP, 1993).

2. Жилище без сигаретного дыма.

3. Для предположения, что гироскопический рост отсутствует.

Так как "bystand" и геномная нестабильность проявляются как наследуемые (мутагенные), так и ненаследуемые (летальный) эффекты, баланс этих двух клеточных эффектов может приводить как к повышению, так и к понижению радиационных рисков. Некоторые ученые утверждают, что такие радиационные эффекты являются свидетельством адапционных механизмов и, соответственно, являются полезными.

В любом случае, исследования механизмов канцерогенного эффекта радона и его ДПР должны быть продолжены [73].

Ранние исследования, проведенные в странах Европы и Америки, пытались установить вероятность возникновения лейкемии у детей [74, 75]. В первоначальных публикациях такая зависимость была получена. Однако в последующих публикациях [76, 77] авторы такую связь подтвердить не смогли в основном из-за не репрезентативности выборки для статистического анализа.

В 2012 году китайские ученые под руководством Тонг сделали обзор опубликованных экологических исследований, а также исследований "случай-контроль" об ассоциации радона и острой лейкемии у детей [78]. Из 12 экологических публикаций 11 утверждали позитивную связь между уровнями радона и повышением частоты лейкемии у детей, причем 8 из них подтверждали значительную зависимость. Несколько исследований "случай-контроль" были отобраны для дальнейшего анализа, и большинство из них показали слабую зависимость. По мнению авторов, основной слабой стороной таких работ и, соответственно, оценки рисков, является оценка дозы от радона. Различия в методах или неполнота измерения радона в домах "случай-контроль" – основная причина, влияющая на точность оценки риска в исследуемых случаях.

В 2014 году МКРЗ опубликовала новую "радоновую" рекомендацию, которая содержит новые уточненные рекомендации по защите от облучения радоном [10]. В этой публикации МКРЗ рекомендует интегральный подход к контролю облучения радоном, полагаясь на контроль строительных материалов и место расположения зданий, по отношению к территориям повышенного

радонового потенциала. Такой подход основан на принципе оптимизации и ступенчатого регулирования ответственности основных вовлеченных сторон: регулирующих органов, местных органов контроля, производителей и потребителей строительных материалов и т.д. [10].

#### 1.4. Нормирование радона в воздухе жилых и общественных зданий

Такой важный источник облучения населения как радон и тот факт, что его можно контролировать, не мог остаться незамеченным, и в 1993 году МКРЗ, в рамках общей системы радиологической защиты, опубликовала первые рекомендации по противорадоновой защите в Публикации 65 (ICRP, 1993) [79]. Система рекомендаций по радону исходила из установки величины годовой эффективной дозы от облучения радоном порядка  $10 \text{ мЗвгод}^{-1}$ , при которой вмешательство считается оправданным. Для практики (радиационный контроль) величина годовой эффективной дозы, как правило, переводится в практические уровни вмешательства (уровни действий), которые можно выразить в активностях радона на единицу объема (объемная активность,  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ). Такой подход используется в большинстве европейских стран. В некоторых странах, включая Украину, используется другая величина – эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА), которая учитывает воздействие дочерних продуктов распада радона [21]. При этом коэффициент равновесия между радоном и его дочерними продуктами распада, по рекомендациям МКРЗ, принимается равным 0,4. В реальных условиях эта величина может варьировать от 0,1 (на улице) до 0,8 (плохо проветриваемые помещения) [25]. Соответственно, будет меняться и величина ЭРОА.

Например, в Швеции, в соответствии со строительными санитарными нормами, предельно допустимой объемной активностью радона (ОА) является величина  $200 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  для эксплуатируемых жилых помещений. Такая же величина принята для новостроящихся зданий и общественных помещений [80]. В Украине уровни вмешательства для радона определены в единицах



ЭРОА для существующих жилых помещений и составляют  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  или  $250 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  в единицах объемной активности, для новостроящихся и реконструированных зданий эта величина составляет  $50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  или  $125 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  (ОА), соответственно [21].

Необходимо отметить, что понятия "существующие" и "вновь построенные" здания часто истолковываются неверно. Это выражается в том, что практические службы, принимая здания в эксплуатацию и проводя установленные регулируемыми документами измерения радона, применяют норматив в  $50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , а проводя повторные измерения в тех же зданиях спустя несколько лет, применяют норматив в  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . На самом деле, под понятиями "существующие" и "новостроящиеся" здания подразумевается дома, которые построены до введения в силу данного норматива и после этого. Вероятно, этот факт стоит учесть при пересмотре Норм радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) и дать уточняющее пояснение.

В 2011 году МАГАТЭ [14] опубликовало новые стандарты радиационной безопасности, которые отражают систему радиационной защиты МКРЗ Публикации 103 [68]. В этом документе, кроме ряда других новшеств, были введены требования к системе регулирования облучения радоном в домах и на рабочих местах. В документе также появилось требование к правительствам иметь план действий по радону, включая систему реализации противорадоновых мероприятий [81]. Кроме того, в "Основных стандартах безопасности" МАГАТЭ впервые формулирует требования по ограничению облучения естественными источниками излучения, которые содержатся в строительных материалах [82]. В декабре 2013 года требования этого документа были имплементированы в Директивах 2013/59/Евратом [15].

Необходимо отметить, что в постсоветских странах регламенты для строительных материалов действует с 1976 года [82]. Соответственно, в НРБУ-97 они представлены в разделе радиационно-гигиенических регламентов четвертой группы: ограничение облучения техногенно-усиленными источниками естественного происхождения. Подчеркнем, что особенности

украинского законодательства в области радиационной защиты населения от источников естественного облучения как наследие советского союза, позволяют максимально ограничить поступление радона в дома из строительных материалов. В Швеции и Финляндии, например, нормативов на содержание радия и урана в строительных материалах нет, поэтому в 70-е годы было построено множество многоквартирных и отдельных односемейных домов из так называемого голубого легкого бетона, который содержит сланцы и является источником радона и гамма-излучения во многих жилищах [83].

Европейские страны имплементировали новые требования МАГАТЭ, и в декабре 2013 года были приняты новые директивы Евратома, которые предусматривают обязательное наличие государственных программ в странах ЕС по уменьшению доз облучения от радона. Также этим документом впервые в европейских странах установлены регламенты содержания ЕРН в строительных материалах и минеральном строительном сырье.

Согласно новым европейским стандартам безопасности [15], каждая страна должна иметь механизмы и специалистов для оценки и картирования радоновых рисков, а также проведения противорадоновых мероприятий.

### 1.5. Картирование радоновых рисков

Целью картирования радоновых рисков (радонового потенциала) является определение территорий с потенциально высокими активностями радона в домах или радоноопасных территорий. По определению Глоссария Основных стандартов безопасности Евратома (Art. 4, Def. 71) [15], к радоноопасным территориям относятся географические ареалы или административные регионы, выделенные на основании исследования уровней радона в домах и показывающие, что количество жилищ с объемными активностями радона выше национальных референтных уровней значительно превышает соответствующее значение в других регионах страны. В разных странах используют разные методы построения таких карт [6, 15, 84].

Основным подходом к картированию радонового риска является графическое отображение комбинированных геологических данных и данных об измерениях радона в домах либо грунтах [38]. Анализ национальных радоновых программ показал, что наиболее обширные измерения грунтового радона проводят в Чехии, Швеции и Германии [85]. В США, Великобритании, Франции карты радоновых рисков отражают в первую очередь активности радона в домах [85].

Первым шагом в создании карт радонового риска является сбор всей доступной информации о геологических, гидрологических характеристиках грунта, их типах. Ценной информацией служат также результаты измерений ОА радона в домах и воде. Эта информация служит основой для планирования полевых исследований по картированию радона.

Далее, используя систему позиционирования GPS и топографические карты, выполняются гамма-спектрометрические измерения содержания ЕРН в почве и активностей радона в грунтовом воздухе. При отборе радиологических проб в протокол измерений вносят ряд параметров, включая генетический тип почв, механический состав грунта и т.д.

Все данные обрабатываются комплексно, и по результатам анализа изучаемую территорию относят к одной из трех основных градаций зон риска: высокого радонового риска, нормального радонового риска или низкого радонового риска [86].

Как правило, зоны высокого радонового риска состоят из таких грунтов как:

- горные породы, богатые ураном (граниты, черные сланцы, пегматиты и участки минерализации урана с активностью выше  $100 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  и мощностью гамма-излучения в интервале  $0,15\text{-}0,50 \text{ мЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$  или выше);
- морены, содержащие горные породы, богатые ураном;
- грунты с высокой воздухопроницаемостью, например, гравий, крупнозернистые морены, грубые пески с содержанием радия более  $50 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  и активностью радона в грунтовом воздухе выше  $50\,000 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

- пески, супеси, суглинки и глины (особенно с содержанием сланцев);
- некоторые участки открытых разломов или перепадов.

К зонам низкого радонового риска относятся, как правило, горные породы, которые содержат мало урана. Например, известняки, песчаники и сланцы (за исключением черного сланца), алуниты, кварциты, гнейсы и граниты, содержащие радий-226 с активностью не более  $35 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Мощность гамма-излучения таких пород составляет менее  $0,10 \text{ мЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Как правило, пески и морены, активность радона в воздухе которых менее  $10000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , а также глины и илы также относятся к породам, которые потенциально не являются радоноопасными.

Если проанализировать геологические особенности территории Украины, можно прогнозировать, что большинство регионов будут относиться к зонам с нормальными активностями радона в грунтах, и только отдельные территории будут относиться к высокорадоновым или низкорадоновым категориям.

В таблицах представлены основные радиологические параметры грунтов с высокой (табл. 1.5) и низкой (табл. 1.6) радоновой опасностью. Параметры приведены для измерений ОА радона в грунтовой атмосфере на глубине 1 м. Именно на глубине одного метра устанавливается равновесие между радоном и его ДПР, так как эта глубина не продувается атмосферным воздухом.

На этой глубине также проводят измерение гамма-спектрометрических параметров как наиболее верных в зоне, не подвергающейся интенсивным геологическим процессам выветривания. Следует учесть, что при застройке территорий верхние слои плодородной почвы снимают, и они не вносят вклад в ЭРОА радона в воздухе под зданием непосредственно.

Таблица 1.5

**Радиологические параметры грунтов с повышенным содержанием  
радона [87]**

Монолитная горная порода или грунт	Содержание радия, Бк·кг <sup>-1</sup>	Мощность гамма-излучения, мЗв·ч <sup>-1</sup>	Активность радона на глубине 1 м, Бк·м <sup>-3</sup>
Взорванные или разломанные породы	> 200	> 0,20-0,30	–
Наполнитель из твердых размельченных пород <sup>1</sup>	> 80	> 0,15-0,25	–
Гравий и крупные морены <sup>2</sup>	> 50	> 0,10-0,15	> 50 000
Пески, супеси <sup>2</sup>	> 50	> 0,10-0,15	> 50 000
Суглинки <sup>2</sup>	> 70	> 0,10-0,15	> 60 000
Глина и валунные глины	> 100	> 0,12-0,20	> 100 000

Примечания:

1. Породы, содержащие богатые ураном гранит, пегматит и сланцы.
2. Грунты, содержащие фрагменты черных сланцев, кварцевых сланцев, относят к группе с повышенной радоноопасностью.

Таблица 1.6

**Радиологические параметры грунтов с низким содержанием радона в  
грунтовой воздухе [87]**

Горная порода или грунт	Содержание радия, Бк·кг <sup>-1</sup>	Мощность гамма-излучения, мЗв·ч <sup>-1</sup>	Активность радона на глубине 1 м, Бк·м <sup>-3</sup>
Монолитные горные породы с низким содержанием урана, например, известняк, песчаник, кварцит, бедные ураном граниты, гнейсы и вулканические породы	< 60	< 0,08-0,12	–
Размельченные наполнители из вышеперечисленных пород, гравий, пески <sup>1,2</sup>	< 25	< 0,05-0,08	< 10 000
Увлажненные суглинки мощностью более 2 метров	< 50	< 0,10-0,15	< 20 000
Увлажненные глины мощностью более 2 метров	< 80	< 0,12-0,16	< 60 000

Примечания:

1. Породы, содержащие богатые ураном гранит, пегматит и сланцы.
2. Грунты, содержащие фрагменты черных сланцев, квасцовых сланцев, относят к группе с повышенной радоноопасностью.

### 1.6. Противорадоновые мероприятия и опыт их реализации в ЕС

Анализ литературных данных показал, что научно обоснованных противорадоновых мероприятий существует не так уж много, в первую очередь, это шведские и финские исследования для традиционных для этих стран зданий. Применение противорадоновых мероприятий, разработанных для

жилищного фонда скандинавских стран, не всегда приемлемо для украинских зданий: сказываются различия в геологических условиях, конструктивно-планировочных решениях зданий, строительных материалах и т.д. Кроме того, на уровни радона в домах могут оказывать влияние особенности инженерных коммуникаций и традиционного режима эксплуатации зданий.

Проанализировав информацию о противорадоновых мероприятиях, можно сделать вывод, что выбор защитных мер в каждом отдельном случае зависит от ряда факторов: подстилающих грунтов, климатических условий, конструкции фундамента, используемых строительных материалов, системы вентилирования помещения, источника водоснабжения, а также режима эксплуатации здания. От этих же показателей будет зависеть и среднегодовая активность радона в каждом отдельно взятом помещении [88].

Все перечисленные различия будут влиять на выбор противорадоновых мероприятий, поэтому прямое перенесение шведских или финских методик снижения уровней радона для украинских зданий будут некорректными, так как они были разработаны для скандинавских геолого-климатических условий и традиционных методов строительства, а также местных строительных материалов.

Необходимо также отметить, что противорадоновые мероприятия для существующих и новых зданий также будут различны. Анализ некоторых европейских источников [31, 48, 88] показывает, что затраты на радонозащищенность здания на стадии проектирования составляют не более 3 % от стоимости их реализации для уже существующего здания.

Можно прогнозировать, что основными принципиальными методами снижения радона в воздухе украинских зданий будут следующие направления:

- изоляция и герметизация подпольных перекрытий;
- изменение скорости и направления давления воздуха внутри здания.

Эффективность этих мероприятий будет зависеть от ряда факторов, выяснить которые можно только экспериментальным путем.

Выводы к главе.

1. Анализ литературных источников показал, что исследования, проведенные в Украине, касаются системы гарантий качества измерений радона (метрологическая база), методик его измерений в воздухе жилых зданий (методическая база), а также научного обоснования радиационно-гигиенических регламентов, которые имплементированы в НРБУ-97 и других действующих нормативных документах. Основной задачей для реализации национального Плана действий по снижению радоновых рисков является выбор наиболее эффективных противорадоновых мероприятий для существующих зданий.

2. Установлено, что в разных странах мира используются разные подходы к оценке радоноопасности территорий. Кроме того, каждая страна разрабатывала и реализовывала на практике свою систему контрмер по снижению уровней радона в зданиях, которая напрямую связана с технологическими особенностями строительства и традиционными конструктивно-планировочными решениями зданий каждой конкретной страны. Эти отличия не позволяют прямо переносить их опыт на решение аналогичной проблемы в Украине, поэтому необходимо оценить эффективность традиционных противорадоновых мероприятий для условий Украины.

Для решения этой задачи необходимо определить активности радона в грунтах, а также определить концентрации радия-226 в грунтах, продуктом распада которого является радон. Определить геоморфологические характеристики грунтов и составить карты указанных радионуклидов в грунтах. Полученные данные необходимо сравнить с прогнозными картами радона в грунтах и активностями радона в домах с целью выяснения корреляции между этими факторами. Выбрать противорадоновые мероприятия до и после реализации контрмер, а также оценить их эффективность.



Основные результаты исследований по главе 1 опубликованы в следующих статьях:

1. Касьяненко А. А. Радон и радоновая опасность / А. А. Касьяненко, В. Р. Ахмедзянов, О. А. Герман // Актуальные проблемы экологии и природопользования : Сб. науч. тр. ; Вып. 5, Ч. 2. – М. : РУДН, 2005. – С.71-73.

2. Review of Legislation and Regulatory Framework in Ukraine with Regard to Environmental Radiation Monitoring : Publication of SSM / Wolfgang Goldammer, Borislava Batandjieva, Oleg Nasvit, Olga German. – Stockholm, 2009. – 140 p.

3. Åkerblom G. Radon in Dwellings in the Republic of Kalmykia. Results from the National Radon Survey 2006-2007 : Publication of SSM / Gustav Åkerblom, Ivan Stamat, Olga German. – Stockholm, 2009. – 40 p.

5. Классификационные признаки для картирования радонового риска на территории Гомельской и Могилёвской областей Республики Беларусь / Л. Чунихин, А. Карабанов, А. Беляшов, Д. Дроздов, О. Герман // Вестник Львовского Университета. – 2010. – № 45. – С. 70-77.

6. Павленко Т. А. Основные принципы новой системы противорадиационной защиты / Т. А. Павленко, В. Ф. Рязанцев, О. А. Герман // Довкілля та здоров'я. – 2011. – № 1 (56). – С. 17-22.

7. Ukrainian Experience of Monitoring of Radiation Exposure of Population Determined by Building Materials / T. Pavlenko, O. German, A. Serdyuk et al. // Processing of Third European IRPA Congress. – Helsinki, Finland, 2010. – P. 1070-1077.

8. Методи протирадонового захисту будівель (огляд) / Т. О. Павленко, М. В. Аксьонов, М. А. Фризюк, О. І. Турос, О. О. Герман // Гігієна населених місць. – 2012. – № 60. – С. 218-222.

## ГЛАВА 2

### ПРОГРАММА, МЕТОДЫ И ОБЪЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная часть данной работы выполнялась в рамках украинско-шведского проекта "Reduction of risks caused by exposure to radon gas and natural radiation" (2009-2014 гг.) и региональной программы "Стоп-радон" (2010-2014 гг.). Исследования проводились на территории Одесской и Кировоградской областей и на первом этапе включали: измерения радона в воздухе жилых помещений методом пассивной трековой радонометрии, измерения активности радона в грунте, определения геоморфологических параметров грунтов и гамма-спектрометрический анализ грунтов. На втором этапе исследований экспериментальная часть включала: экспресс-измерения радона в воздухе подпольных пространств, повторные измерения ЭРОА радона в воздухе зданий, где были проведены противорадоновые мероприятия.

Объемы каждого вида исследований приведены в табл. 2.1.

На основании полученных данных о концентрациях ЕРН в грунте, активностях радона в грунтовом воздухе, радона в воздухе жилых помещений определялись территории потенциально высоких активностей радона в помещениях.

На следующем этапе исследований для 100 зданий с высокими уровнями радона обосновывался комплекс противорадоновых мероприятий и выбирались наиболее приемлемые меры для украинских условий с учетом финансовых возможностей областной администрации Кировоградской области. Затем, в рамках Кировоградской программы "Стоп-радон", в домах и общественных зданиях были реализованы противорадоновые мероприятия, а после их реализации проводились повторные измерения радона в воздухе соответствующих зданий с целью выяснения эффективности проведенных контрмер.

**Материалы, методы и объемы исследований, проведенных в рамках  
данной работы**

з/п	Этап	Объект	Методы	Объемы
1	Изучение мирового опыта по уменьшению уровней радона в воздухе зданий	Воздушная среда жилых и общественных зданий, грунт, заболеваемость населения, противорадоновые мероприятия	Анализ литературных источников	115 источников
2.	Измерение ЭРОА радона в воздухе жилых зданий, общественных детских дошкольных и школьных учреждений	Воздушная среда жилых и общественных зданий	Пассивная трековая радонометрия	368 измерений
3.	Измерение объемной активности радона в грунтах	Грунтовый воздух, грунты	Эманационная съемка	более 1700 измерений
4.	Исследование содержания ЕРН в грунтах	Грунт	Гамма - спектрометрические измерения, измерения мощности экспозиционной дозы	1688 измерений
5.	Разработка и внедрение противорадоновых мероприятий в зданиях школ и детских дошкольных учреждений, оценка их эффективности	Воздушная среда детских учреждений	По математическим моделям МКРЗ Публикаций 55, 103, 108, 115 и 126.	189 детских учреждений

## 2.1. Выбор объектов измерений

Выбор точек для измерения активностей радона в грунтовом воздухе и гамма-спектрометрического анализа почв и грунта проводился в соответствии с требованием равномерного покрытия исследуемой территории для всех населенных пунктов пропорционально их размерам. Кроме того, измерения проводились для всех геоморфологических типов ландшафта, то есть речных пойм, долин, возвышенностей, плоских участков и лесных массивов и т.д.

При выборе зданий для измерения активности радона в конкретных населенных пунктах определялась доля каждого типа здания в жилищном фонде населенного пункта и в соответствующей пропорции проводился отбор домов для проведения исследований. Например, в данном населенном пункте 50 % зданий кирпичные, 30 % – деревянные, 10 % – каменные, 10 % – саманные. Соответственно определяется доля каждого типа зданий при 30 измерениях: 15 – кирпичных, 9 – деревянных, 3 – каменных, 3 – саманных. Кроме того, здания выбирались таким образом, чтобы измерения позволяли максимально охватить территорию населенного пункта.

Для многоэтажных зданий измерения проводились, в основном, в квартирах, расположенных на первом этаже, критическом с позиции активностей радона в воздухе.

В детских садах и школах измерения проводились в тех помещениях, где дети находятся больше всего времени.

В выбранных зданиях радонометры устанавливались в тех помещениях, где время пребывания жителей максимально: спальня, жилая комната. Как правило, радонометр подвешивался к светильнику, расположенному в центре комнаты. В этом случае выполнялось основное требование к экспонированию: радонометр должен находиться на расстоянии не менее одного метра от возможных источников поступления радона: стен, пола, потолка и т.д. С жителями квартиры проводился инструктаж. При установке заполнялся

сертификат, в котором проставлялась дата установки. После снятия радонметра в сертификат заносилась соответствующая дата.

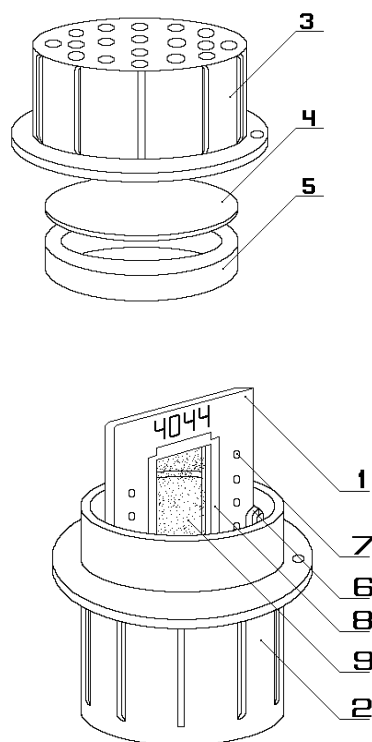
Снятые радонметры упаковывались в полиэтиленовые пакеты на все время хранения, которые плотно завязывались или заваривались и доставлялись в лабораторию на обработку.

## 2.2. Измерение активности радона в помещениях

Для определения активности радона в помещениях использовался метод пассивной трековой радонометрии [89]. Методика измерений утверждена Главным государственным санитарным врачом Украины постановлением № 63 от 08.08.2000 г.

*Принцип метода.* Воздух естественным путем проходит в камеру известного объема через диффузионный фильтр, который предотвращает попадание влаги и аэрозолей. Среднее время диффузии через фильтр составляет около 2 часов, что намного больше периода полураспада торона ( $T_{1/2} = 55$  сек) и практически исключает его влияние на результат измерения. Альфа-частицы, испускаемые при распаде  $^{222}\text{Rn}$  и его ДПР, образуют треки повреждений в детекторе, помещенном в радонметр. В качестве детектора обычно используют нитратцеллюлозную (НЦ) пленку. После экспонирования в течение нескольких недель (месяцев) детектор извлекается из радонметра и после стандартной процедуры химического травления определяется количество треков. Количество треков пропорционально средней объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  в окружающем воздухе. Чувствительность метода при месячной экспозиции составляет около  $8-10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Эффективность регистрации определяют путем экспонирования партии радонметров в атмосфере с известной объемной активностью  $^{222}\text{Rn}$ . Считывание информации, определение количества треков на пленке проводится методом искрового счета.

Основным средством измерения в данном случае является пассивный трековый радонметр. Он представляет собой камеру калиброванного объема, в которую помещается НЦ детектор. Конструкция радонметра приведена на рис. 2.1.



- 1 – корпус рамки;
- 2 – корпус камеры;
- 3 – крышка;
- 4 – диффузный фильтр;
- 5 – кольцо зажима;
- 6 – направляющие;
- 7 – отверстия;
- 8 – рамка зажима;
- 9 – трековый детектор.

Рис. 2.1 Конструкция пассивного трекового радонметра

Радонметр представляет собой камеру, объемом  $100 \text{ см}^3$ , которая состоит из корпуса (2) и крышки (3). В крышку камеры (3) вкладывается диффузионный фильтр (4) и закрепляется прижимным кольцом (5).

НЦ пленка (9) размещена в окне корпуса устройства-держателя - рамки (1) и закреплена прижимным кольцом (8). Рамка (1) установлена в центре корпуса камеры (2) в направляющих (6). Для автоматического считывания результатов рамка (1) маркирована отверстиями (7), количество и расположение которых определяет номер детектора и соответствует числу, нанесенному на поверхность рамки. Использование рамки позволило минимизировать контакт оператора с детекторами. Фактически оператор касается детектора только один раз в момент отделения НЦ пленки от основы и помещения ее в рамку. Во время всех остальных операций оператор касается только рамки.

После экспонирования радонметра детектор в рамке вынимался из камеры и помещался в специальную емкость для химической обработки.

Стандартная методика обработки включала травление в шестимольном растворе щелочи. Оптимальные параметры режима травления для НЦ пленок приведены ниже:

Тип пленки	ДНЦ
Температура травления, °С	50±0.1
Реагент	NaOH
Плотность раствора	1.22 (6M)
Время травления, мин	90

Метод искрового счета предполагает выполнение двух этапов:

– пленочный детектор толщиной 10-20 мкм подвергается предварительному пробую при высоком напряжении 700-900 В (т.е. пробиваются наклонные и подповерхностные треки, не протравленные насквозь);

– подсчет количества сквозных треков при высоком напряжении около 500 В.

Подробное описание данного метода измерений радона приведено в [89].

Для обеспечения системы гарантии качества измерений активности радона в воздухе помещений трековые детекторы калибруют в "радоновой атмосфере". Эффективность регистрации пленочного детектора и коэффициенты перехода от числа треков к объемной активности радона определялись в радоновой атмосфере с известной активностью, которая аттестована Госстандартом Украины в качестве рабочего эталона единицы объемной активности радона-222 (Свидетельство № 114 от 21.01.04 г.). Для каждой партии трековых детекторов проводился стандартный контроль процедур химического травления.

Подробное описание системы гарантий качества измерений радона приведено в [90, 91].

### 2.3. Измерения эманации радона в грунте

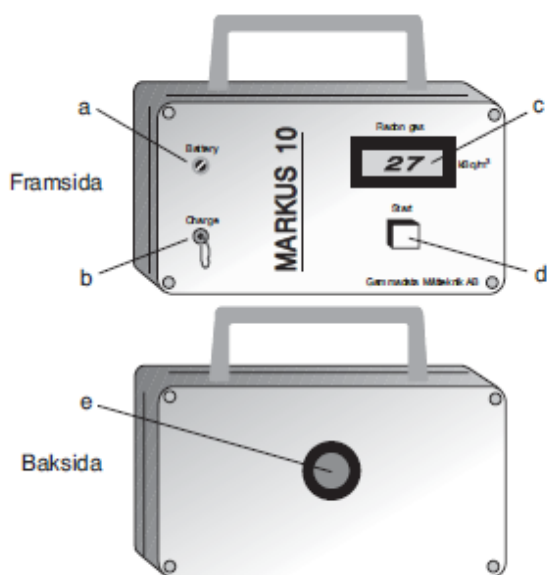
Измерения радона в грунтовом воздухе выполнялись эманометром MARKUS 10 (рис. 2.2). Это портативный измерительный прибор, который позволил проводить измерения активности радона в полевых условиях, непосредственно на месте выбранных точек измерения.

Измерения радона в грунтовом воздухе проводились следующим образом: в грунт на глубину 80 см забивался металлический щуп, диаметром примерно 1,5 см. Сверху через переходники на него накручивался прибор, который содержит помпу для прокачки грунтового воздуха, поступающего в измерительную камеру прибора. Сенсор давления автоматически отключает насос, когда давление в щупе падает ниже определенного значения, и включается вновь при возобновлении давления в помпе. Время прокачки определяется давлением воздуха в грунте и может варьировать от 30 секунд до 3 минут.

Детектор в измерительной камере активируется и начинает регистрацию альфа-излучения от ДПР радона; импульсы усиливаются и фильтруются в одноканальном анализаторе, который пропускает только импульсы полония-



218 с периодом полураспада порядка трех минут. При этом происходит "отрезание" импульсов полония-214.



- а – индикатор батареи;
- б – подключение зарядного устройства;
- в – дисплей;
- г – кнопка пуск;
- д – место подсоединения водного замка

Рис. 2.2 Конструкция эманометра радона МАРКУС-10

Далее, пульсы подсчитываются счетчиком, и по окончании процесса результат активности радона выводится на дисплей прибора в  $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Необходимо отметить, что данный инструмент измеряет импульсы только от короткоживущего полония-218, поэтому следующее измерение можно начать уже через 18 минут, когда этот радионуклид от предыдущего измерения в камере детектора успеваеет распастья.

## 2.4. Измерения концентрации ЕРН в подстилающих грунтах

Измерение калия-40, тория-232 и радия-226 выполнялись портативным гамма-спектрометром Exploranium GR-130 (США).

В качестве детектора в приборе используется 0,07 л натриевый детектор [NaI (Тl)] специальной сборки для полевых условий. Этот прибор позволяет проводить измерения в трех режимах: исследование, мощность экспозиционной дозы и идентификация – определение радионуклида по анализу его спектра.

В режиме исследования спектрометр работает как сцинтилляционный счетчик, выдавая информацию о мощности экспозиционной дозы. Прибор имеет встроенную GPS систему навигации, которая позволяет определить координаты точки измерения для дальнейшего нанесения соответствующих точек на карту.

В режиме "мощность дозы" прибор позволяет измерять в удобных для задачи единицах мощность экспозиционной дозы. Измерения могут быть как одномоментными, так и накопленными с момента включения специального режима.

В режиме идентификации радионуклидов (гамма-спектрометрия) измерительный прибор накапливает спектрометрические данные от образца и выполняет соответствующий анализ спектра. Энергии, выделяемые образцом, сравниваются с данными заложенной в память прибора библиотеки, и результаты анализа выводятся на экран в табличной форме.

В режиме исследования Exploranium GR130 автоматически выбирает интервал энергий 0-1,5 MeV и устанавливает минимальный порог сигнала 25 keV.

Для проведения спектрометрического измерения калия-40, тория-232 и радия-226 прибор устанавливается на поверхность грунта на время измерения 300 секунд. Если активности очень низкие, то точность измерения можно увеличить, изменив время измерения до 500 секунд, и, таким образом, уменьшить ошибку измерения.

Второе измерение радионуклидов проводится на глубине 80 см в шурфе. Это позволяет провести измерение концентрации естественных радионуклидов на уровне стандартной глубины фундамента, а также сделать поправку на привнесенные с удобрениями радионуклиды, сравнив их с соответствующими концентрациями на поверхности.

Полученные результаты измерений заносились в протокол измерений и при дальнейшей их обработке значения концентрации калия-40, тория-232 и радия-226 на глубине 80 см пересчитывались с поправкой на  $2\pi$  геометрию с учетом калибровочных факторов.

Для перерасчета значений концентраций радионуклидов, представленных в количестве частиц на миллион (ppm) или процентах, использовались следующие пересчетные соотношения [92]:

$$K \ 1 \% = 313 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1} (K-40) = 0,01505 \text{ мкЗв}\cdot\text{час}^{-1}$$

$$U \ 1 \text{ ppm} = 12,3 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1} (Ra-226) = 0,00653 \text{ мкЗв}\cdot\text{час}^{-1}$$

$$Th \ 1 \text{ ppm} = 4,1 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1} (Th-232) = 0,00278 \text{ мкЗв}\cdot\text{час}^{-1}.$$

При заполнении протоколов натурных исследований помимо значений концентраций радионуклидов в грунте, записывались координаты точек измерения, погодные условия, механический и генетический тип почв, их увлажненность и топографическое положение.

## 2.5. Методы математической обработки результатов исследования

Для количественных показателей первичная статистическая обработка результатов измерений включала расчеты среднеарифметического значения ( $M$ ), ошибки среднеарифметического значения ( $m$ ), среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ).

Отличия между выборками, которые распределены по нормальным законам, оценивались по параметрическим критериям Стьюдента ( $t$ ):

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  средние значения переменных шкалы отношений или процента выборки, для которых  $S_1$  и  $S_2$  – соответствующие показатели отклонения единичных значений от соответствующих им средних величин (процентов).

Для корреляционного анализа результатов измерений использовался также критерий Фишера ( $F$ ):

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение для выборок, которые сравниваются.

Достоверность отличий оценивалась по уровню значимости  $p$ . Для оценки влияния ряда факторов (например, тип грунта, наличие вентиляции, тип перекрытий, уровни радона в грунтовой среде) на изменчивость показателей (уровни радона в воздухе жилых помещений) и расчета вклада каждого фактора в изменчивость показателей использовался однофакторный (ANOVA) дисперсионный анализ. Для однофакторного анализа влияния каждого отдельного фактора в общей совокупности всех потенциальных факторов воздействия использовалась следующая формула:

$$d = \frac{DD_x}{DD_x + DD_e} 100\%, \quad (2.3)$$

где  $DD_x$  – девиата, которая обуславливается воздействием фактора;

$DD_e$  – девиата, связанная с действием случайных факторов.

## 2.6. Расчет эффективных доз от радона

Расчет эффективных доз облучения проводился по дозовым коэффициентам и математическим моделям МКРЗ Публикаций 103 [68], 118 [93], 115 [11] и 126 [10].

Для расчета использовалась формула

$$\bar{E}_{Rn} = 5,56 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot 1,1 \cdot \bar{C}_{Rn} = 6,1 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot \bar{C}_{Rn}, \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}, \quad (2.4)$$

где  $\bar{C}_{Rn}$  – среднегодовая ЭРОА радона, Бк·м<sup>-3</sup>;

$5,56 \cdot 10^{-6}$  – коэффициент пересчета, мДж·м<sup>-3</sup>;

$T$  – время пребывания в помещении в течении года ( $T=7000$  час);

1,1 – дозовый коэффициент для населения, мЗв·(мДж·год·м<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup>.

### ГЛАВА 3

## ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА УРОВНЕЙ РАДОНА В ВОЗДУХЕ ЗДАНИЙ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ И ПОДСТИЛАЮЩИХ ГРУНТАХ

Картирование радоновых рисков базируется на результатах измерений эманаций радона в грунтовом воздухе, содержании естественных радионуклидов в грунтах, а также геоморфологических особенностях грунтов и поверхностных почв. Как правило, картирование уровней радона в грунте применяется с целью прогнозирования содержания радона в воздухе зданий, которые планируется построить на конкретном участке или для анализа применимости тех или иных противорадоновых мероприятий для домов, которые уже эксплуатируются. В первом случае прогноз является основанием для выбора конкретных защитных мер на стадии проектирования и их эффективность достаточно высока при более низкой стоимости.

В случае эксплуатируемых зданий уровни радона в воздухе помещений зависят не только от его количества в грунтовом воздухе или особенностей подстилающего грунта, но и в значительной мере от архитектурно-планировочного решения конкретного здания, а также режима вентилирования его внутреннего пространства [90]. Особенности планировочного решения конкретного здания, а именно: тип перекрытий, наличие подпольного пространства или подвала, тип пола, наличие принудительной вентиляции и т.д. определяют противорадоновые мероприятия, которые должны применяться для снижения в нем активностей радона. Жилищный фонд Украины в значительной степени отличается от традиционных американских и европейских домов, поэтому выбор конкретных контрмер также может отличаться.

Одной из задач данной работы является определение, каким образом и в какой степени перечисленные параметры влияют на уровни радона в домах характерной для Украины постройки. Для решения этой задачи проводись

измерения радона в воздухе разных типов зданий, а также воздухе подстилающих грунтов населенных пунктов Одесской и Кировоградской областей. По результатам этих измерений был проведен дисперсионный и корреляционный анализ влияния различных факторов на ЭРОА радона и определены основные закономерности влияния перечисленных параметров на уровни радона в домах.

### 3.1. Анализ результатов измерения радона в воздухе помещений

В рамках работы были проведены измерения радона-222 в воздухе зданий 10 сел Савранского района Одесской области и 34 сел Кировоградского района Кировоградской области. Статистический анализ результатов измерений представлен в табл. 3.1 и 3.2.

*Таблица 3.1*

#### **Анализ результатов измерения ЭРОА радона в воздухе зданий Савранского района Одесской области, Бк·м<sup>-3</sup>**

Населенный пункт	Средне-арифметическое ЭРОА радона-222	Средне-геометрическое ЭРОА радона-222	Стандартное отклонение ЭРОА радона-222	% превышений значения 50 Бк·м <sup>-3</sup>	% превышений значения 100 Бк·м <sup>-3</sup>
Байбузовка	72	64	31	60	20
Бакша	127	98	99	88	50
Глыбочок	59	51	32	44	22
Дубиново	66	66	6	100	0
Йосиповка	72	61	41	75	25
Каменное	111	88	66	82	64
Капустянка	85	74	48	71	29
Ольшанка	42	37	21	20	0
Полянецкое	60	53	30	64	9
Слюсареве	59	44	46	50	17

**Статистические параметры ЭРОА радона в воздухе домов  
Кировоградского района Кировоградской области, Бк·м<sup>-3</sup>**

Населенный пункт	Средне-арифметическое ЭРОА радона-222	Средне-геометрическое ЭРОА радона-222	Стандартное отклонение ЭРОА радона-222	% превышения значения 50 Бк·м <sup>-3</sup>	% превышений значения 100 Бк·м <sup>-3</sup>
1	2	3	4	5	6
Аджамка	87	63	56	69	38
Алексеевка	158	116	107	90	70
Алено-косогородка	51	48	16	50	0
Бережинка	229	165	202	91	77
Великая Северинка	91	65	88	56	22
Веселовка	134	86	116	73	36
Вишняковка	286	238	137	92	92
Владимировка	135	85	102	60	60
Вольное	50	41	29	60	0
Высокие Байраки	156	142	58	100	83
Гаевка	70	48	65	60	20
Грузское	77	58	68	33	17
Ивано-Благодатное	74	38	82	33	33
Ивановка	146	125	74	100	60
Калиновка	131	99	99	75	67
Катериновка	81	50	78	33	33
Кировоград	84	55	87	55	28

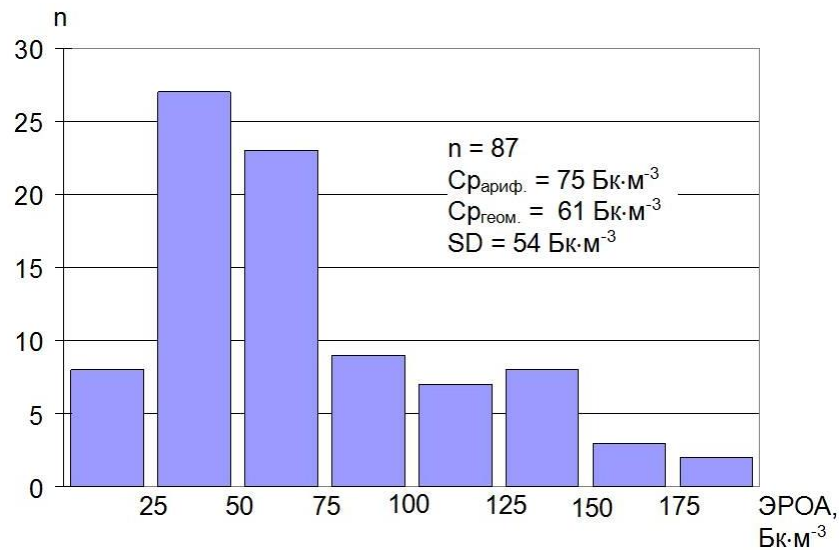


Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
Клинцы	163	105	231	88	50
Крупское	61	33	73	33	22
Миколаивка	109	70	91	63	38
Могутнее	119	99	55	71	71
Назаровка	150	123	102	100	50
Новоалександ- ровка	101	97	25	100	66
Овсяниковка	134	76	97	60	60
Оситняжка	113	78	86	80	50
Первозвановка	173	144	97	100	80
Покровское	59	34	58	39	15
Созоновка	67	56	34	75	8
Соколовское	140	120	82	90	60
Солнечное	43	42	8	50	0
Степовое	158	102	104	80	60
Федоровка	186	143	145	86	71
Червоний Яр	143	66	166	33	33
Черняховка	50	37	34	33	0
Шостаковка	85	79	33	100	33

Установлено, что активности радона в воздухе зданий варьируют в достаточно широких пределах как на уровне населенных пунктов, так и на уровне отдельных домов в пределах одного населенного пункта. Так, среднегеометрическое значение ЭРОА радона варьирует от 37 до 98 Бк·м<sup>-3</sup>, то

есть отличается почти в 2,5 раза. При этом стандартное отклонение составило от 6 Бк·м<sup>-3</sup> в с. Дубиново до 99 Бк·м<sup>-3</sup> в Бахше. Частотное распределение ЭРОА радона в домах Савранского района приведено на рис. 3.1, характер этого распределения (логнормальное) также подтверждает значительную вариабельность уровней радона.



$n$  – количество зданий;

$Cp_{ариф.}$  – среднеарифметическое значение ЭРОА радона-222;

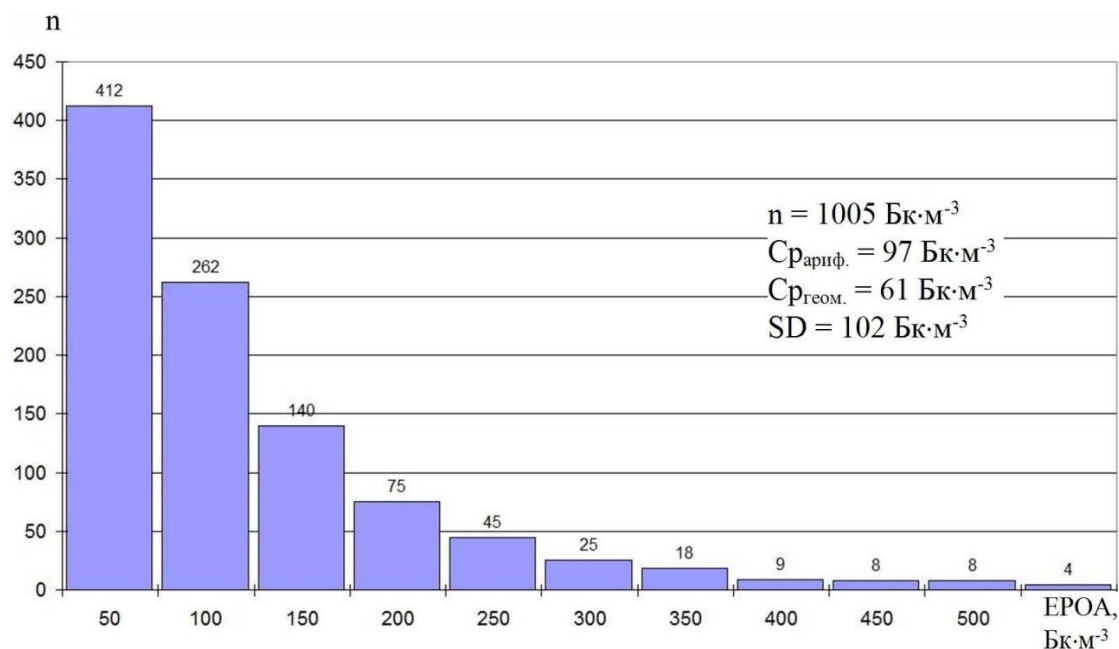
$Cp_{геом.}$  – среднегеометрическое значение ЭРОА радона-222;

$SD$  – стандартное отклонение.

Рис. 3.1 Частотное распределение ЭРОА радона-222 для Савранского района Одесской области

Для сравнения в таблицах приведен процент превышения нормативных значений ЭРОА радона в воздухе зданий, а именно: уровень в 50 (новые дома) и 100 (эксплуатируемые) Бк·м<sup>-3</sup>. Анализ этих величин свидетельствует, что даже в пределах одного населенного пункта дозы облучения могут отличаться на порядок.

В табл. 3.2 приведены аналогичные параметры статистического анализа для сел Кировоградского района Кировоградской области, а на рис. 3.2 – частотное распределение ЭРОА радона в воздухе зданий по всему массиву данных для этого района.



$n$  – количество зданий;

$\text{Ср}_{\text{ариф}}$  – среднеарифметическое значение ЭРОА радона-222;

$\text{Ср}_{\text{геом}}$  – среднегеометрическое значение ЭРОА радона-222;

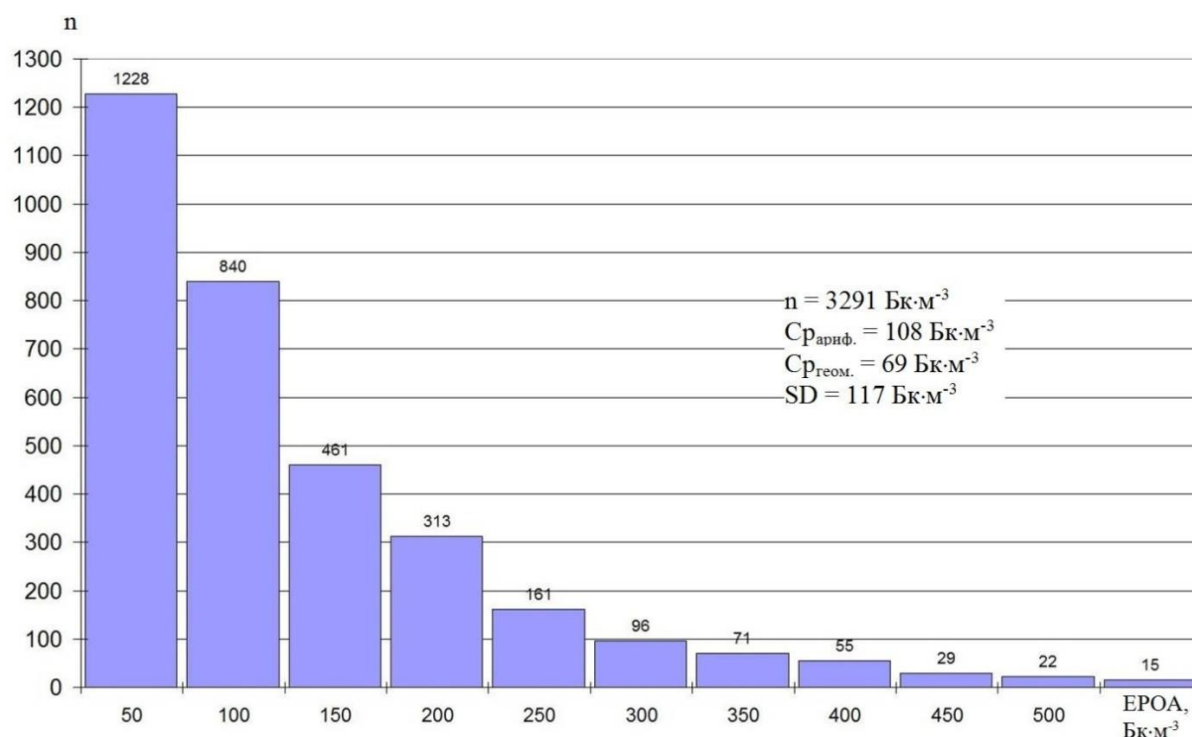
$SD$  – стандартное отклонение.

Рис. 3.2 Частотное распределение ЭРОА радона в воздухе зданий Кировоградского района

Анализ статистических параметров частотного распределения установил, что вариабельность уровней радона в Кировоградском районе значительно выше, чем в Савранском, при практически равных среднегеометрических значениях ЭРОА радона. Так, величина стандартного отклонения составила  $102 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  и почти вдвое превысила среднегеометрическое значение ЭРОА радона. В табл. 3.2 также приведен процент домов, где превышен норматив 100

Бк·м<sup>-3</sup>, для различных сел. Для 5 сел нормативные значения превышены во всех без исключения обследованных домах. В 30 % случаев уровни радона в пределах одного села отличаются в несколько раз, а максимальные значения превышают норматив в 5-7 раз (села Клиницы и Червоный Яр). В трех селах (Солнечное, Аленокосогоровка, Черняхово) превышение норматива зафиксировано не было.

Для сравнения на рис. 3.3 представлено частотное распределение ЭРОА радона-222 в воздухе зданий Кировоградской области в целом. Частотное распределение также носит логнормальный характер, однако его параметры отличаются.



$n$  – количество зданий;

$C_{p\text{ариф}}$  – среднеарифметическое значение ЭРОА радона-222;

$C_{p\text{геом}}$  – среднегеометрическое значение ЭРОА радона-222;

$SD$  – стандартное отклонение.

Рис. 3.3 Частотное распределение ЭРОА радона в воздухе зданий Кировоградской области

Среднегеометрическое значение ЭРОА радона-222 в воздухе обследованных зданий по области составило  $69 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  при среднеарифметическом значении этой величины  $108 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  и стандартном отклонении  $117 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Значения основных статистических параметров немного выше, чем по Кировоградскому району, тем не менее, характер распределения сохраняется, что позволяет в дальнейшем перенести основные выводы об очередности и типе противорадоновых мероприятий на всю область в целом.

На втором этапе исследований были проведены измерения радона в почвенном воздухе и гамма-спектрометрия грунтов и почв для сел Савранского и Кировоградского районов. Параллельно с измерениями определялся тип почв на поверхности (первое измерение) и на глубине 70 сантиметров. Параллельно был проведен геоморфологический анализ грунтов. В табл. 3.3 представлены основные типы грунтов для некоторых сел, типичные для этих регионов. Как правило, грунты составляли суглинки, песок, супесь, глина и лесс, а почву – в большинстве случаев чернозем.

*Таблица 3.3*

**Основные типы почв и грунтов в исследуемых населенных пунктах**

Село	Грунт	Почвы
Ивановка	Суглинок	Чернозем
Бережинка	Песок, супесь	Чернозем
Веселовка	Супесь	Чернозем
Владимировка	Лесс	Чернозем
Новоалександровка	Суглинок	Чернозем
Овсяниковка	Глина	Чернозем
Алексеевка	Суглинок	Чернозем слабощный

### 3.2. Анализ результатов измерений активности радона и гамма-спектрометрического исследования грунтов

Данные о грунтах по населенным пунктам хорошо отображают результаты измерений радона в воздухе грунтов. Слагаемые породы обладают низким содержанием радия и, соответственно, радона, но благодаря своей структуре содержат довольно большой объем свободного грунтового воздуха. Этот легко доступный воздух активно переносит радон в грунтах, который при перепаде давления и температуры в больших количествах поступает в здания.

В табл. 3.4 приведены усредненные результаты измерения радона в грунтовом воздухе для исследуемых территорий.

Таблица 3.4

#### Среднее содержание радона-222 и радия-226 в грунтах на глубине 80 сантиметров для сел Кировоградского района Кировоградской области

Село	Среднее содержание в грунтах	
	Радон-222, кБк·м <sup>-3</sup>	Радий-226, Бк·кг <sup>-1</sup>
1	2	3
Аджамка	30	31
Алексеевка	24	35
Бережинка	20	34
Большая Северинка	22	14
Веселовка	28	23
Вишняковка	29	33
Владимировка	22	35
Высокие Байраки	29	36
Гаевка	16	35

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3
Грузское	18	35
Ивано-Благодатное	25	35
Ивановка	22	31
Калиновка	21	31
Катериновка	30	29
Клинцы	24	26
Крупское	37	30
Могутное	18	28
Назаровка	15	37
Николаевка	20	39
Новоалександровка	23	38
Овсяниковка	28	32
Оситняжка	20	18
Первозвановка	22	32
Покровское	18	32
Созоновка	58	24
Соколовское	28	31
Степовое	24	31
Федоровка	24	30
Червоный Яр	15	33

Среднее арифметическое значение активности радона в грунте в Кировоградском районе составило  $25 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ , с разбросом значений от 15 до  $30 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ , т.е. отличия составили 2 раза. При этом среднегодовые значения ЭРОА радона варьировали от 10 до  $1030 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , т.е. отличия в некоторых

случаях составляли два порядка, при этом среднегеометрическое значение ЭРОА составило  $130 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Если сравнить средние активности радия-226 в грунтах и почве, продуктом распада которого является радон-222, то его активности варьировали в пределах  $14\text{-}39 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  при среднем содержании на поверхности  $29 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  и на глубине 80 сантиметров –  $30 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , то есть практически не отличались. Такое содержание радия-226 на несколько беккерелей превышает среднее значение по стране и, по сути, является низким содержанием по международной классификации.

Можно сделать вывод, что именно конструктивные решения зданий, при которых отсутствует изоляция внутреннего пространства помещения от грунта, в результате чего градиент давления воздуха направлен внутрь здания, способствуют активному накоплению радона в воздухе помещения, что приводит к повышенным значениям ЭРОА радона.

Результаты измерений радона-222 и радия-226 в грунтах Савранского района представлены на рис. 3.4 и 3.5 в виде карт, которые позволяют наглядно оценить вариабельность концентраций данных радионуклидов в разных типах грунтов. В табл. 3.5 представлены основные статистические данные активностей радона для разных типов грунтов, а табл. 3.6 – соответствующие параметры для радия-226.

*Таблица 3.5*

**Средние активности радона в типичных грунтах Савранского района  
Одесской области,  $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$**

Параметр	Глины	Суглинки	Пески
Среднеарифметическое значение	34,1	39,5	7,7
Среднегеометрическое значение	31,5	38,0	7,0
Максимальное значение	79,0	108,0	23,0



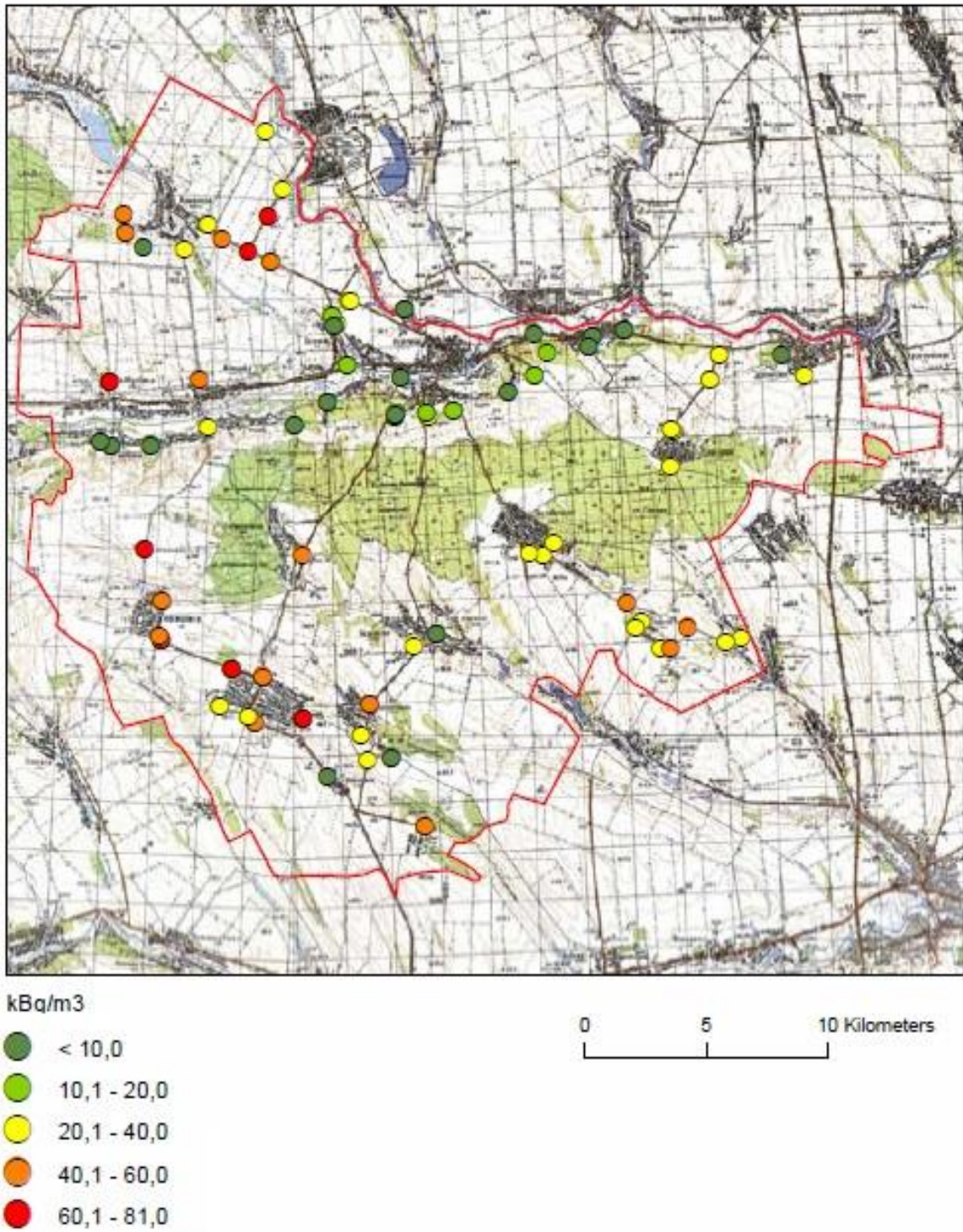


Рис. 3.4 Активности радона-222 в воздухе грунтов Савранского района Одесской области на глубине 80 сантиметров

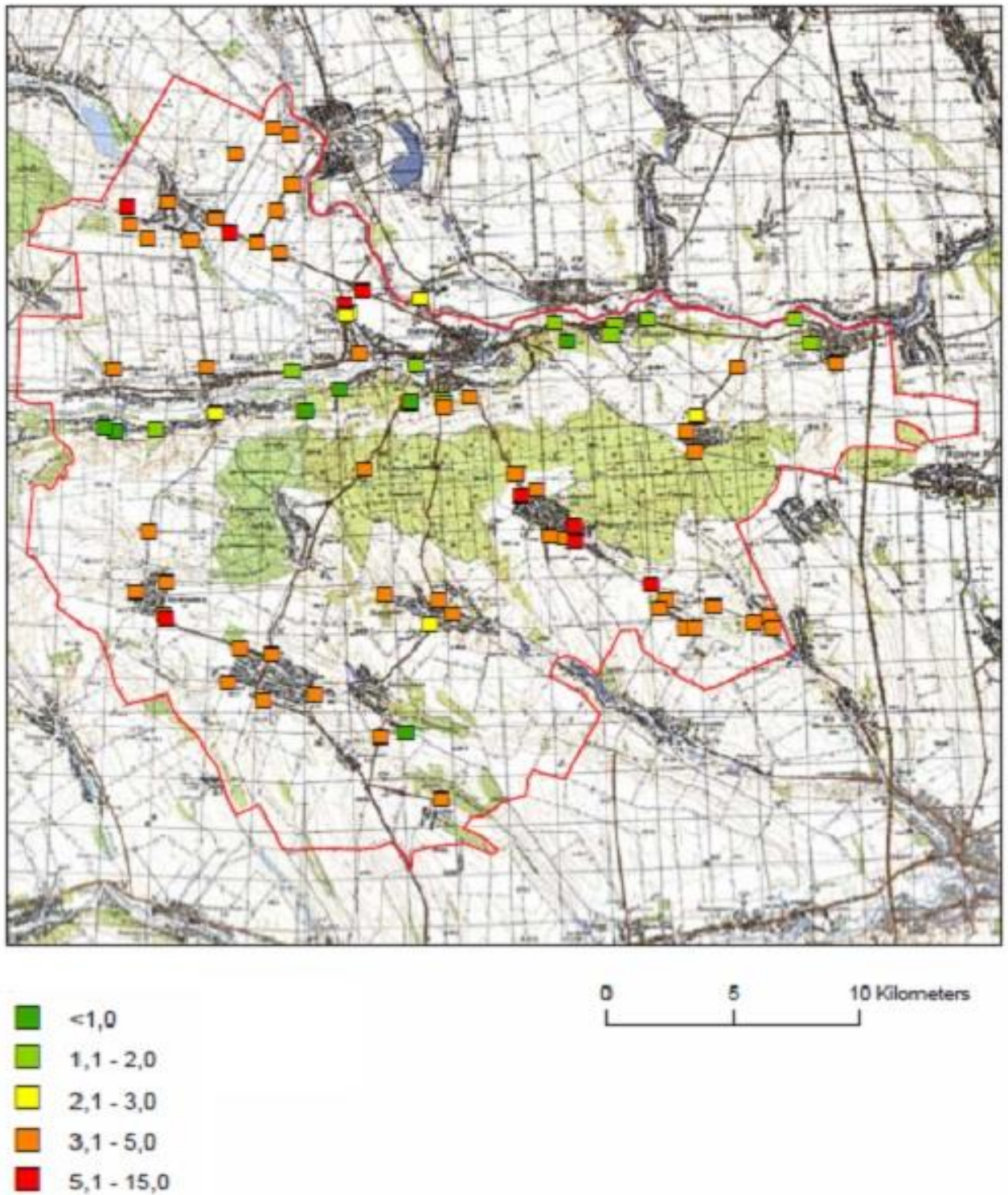


Рис. 3.5 Концентрации радия-226 в грунтах Савранского района Одесской области на глубине 80 сантиметров

**Удельные активности ЕРН в грунтах Савранского района на глубине  
70-80 см, Бк·кг<sup>-1</sup>**

	Количество проб	Средне-арифметическое значение	Средне-геометрическое значение	Максимальное значение	Минимальное значение
<b>Глины</b>					
Калий-40	41	908	908	1221	438
Радий-226	41	52	48	115	31
Торий-232	41	73	74	91	50
<b>Суглинки</b>					
Калий-40	27	876	939	1096	313
Радий-226	26	47	40	67	11
Торий-232	27	71	77	89	19
<b>Пески</b>					
Калий-40	20	501	501	845	313
Радий-226	19	20	16	51	5
Торий-232	20	30	26	69	9

Анализ результатов измерений радия-226 показал, что его удельные активности в суглинках и глинах примерно одинаковы и варьируют на уровне 40-50 Бк·кг<sup>-1</sup>. В полевых условиях не всегда можно отличить эти два типа грунта из-за их внешней схожести, а также перекрывающего их чернозема, поэтому необходимы дополнительные исследования в лабораторных условиях. В песчаных отложениях измеренные активности радия-226 составили 12 - 25 Бк·кг<sup>-1</sup>.

Таким образом, анализ результатов измерений показал, что структурные особенности участков с высокой доступностью воздуха в грунтах определяют его способность к свободному перемещению и дальнейшей диффузии с поверхности, что приводит к накоплению радона, если он поступает в замкнутое пространство.

Минимальные значения активностей радона зафиксированы в песчаных грунтах по берегам реки и около прудов. Установлено, что пескам в этом районе присуще низкое содержанием радия-226, а, следовательно, и содержание радона-222 в грунтовом воздухе невелико. Кроме того, пески обладают высокой воздухопроницаемостью, при которой радон легко переносится и выветривается из грунта.

Однако если в песчаных грунтах фиксируется повышенное содержание радона, то проекты домов, построенных на таких участках, должны заранее предусматривать мероприятия по герметизации подпольного пространства, либо содержать проектные решения по отводу радона из-под здания. Потенциально участки с песчаными грунтами являются участками с низкой степенью радоноопасности, судя по величинам ЭРОА радона в воздухе уже существующих зданий. Анализ влияния различных факторов на уровни радона-222 в воздухе эксплуатируемых зданий приводится в следующем разделе.

Выводы к главе.

1. Установлено, что активности радона в воздухе различных типов грунтов радоноопасных территорий Украины варьируют от 14 до 40 кБк·м<sup>-3</sup>.
2. Геоморфологический анализ грунтов показал, что вариабельность уровней радона в почве обусловлена ее структурой и наличием больших объемов свободного воздуха, который легко переносится и при перепаде давления и температуры.

3. Установлено, что концентрации радия-226 не отличаются от средних значений по стране и в различных типах грунтов варьируют от 16 до 41 Бк·кг<sup>-1</sup>.

4. Среднегеометрическое значение ЭРОА радона в домах Савранского района Одесской области составило 75 Бк·м<sup>-3</sup> при стандартном отклонении 54 Бк·м<sup>-3</sup>, для Кировоградской области – 108 Бк·м<sup>-3</sup> и 117 Бк·м<sup>-3</sup>, соответственно.

Основные результаты исследований по главе 3 опубликованы в следующих статьях

1. Картирование радонового риска - необходимый инструмент в области радиационной защиты населения / О. Герман, Т. Павленко // Гігієна населених місць : Зб. наук. праць. - 2008. - № 51. - С. 302-306.

2. Классификационные признаки для картирования радонового риска на территории Гомельской и Могилёвской областей Республики Беларусь / Л. Чунихин, А. Карабанов, А. Беяшов, Д. Дроздов, О. Герман // Вестник Львовского Университета. - 2010. - № 45. - С. 70-77.

3. Radon mapping in Savran region Odessa Oblast, Ukraine / Britt-Marie Ek, Olga German // SGU-rapport 2012:9 Diarie-nr: 08-221/2010. – 45 p.

## ГЛАВА 4

### АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ УРОВНЕЙ РАДОНА В СЕЛЬСКИХ ЗДАНИЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО АКТИВНОСТИ В ГРУНТЕ

Приведенные выше геоморфологические особенности грунтов и результаты измерений радона-222 в грунтовом воздухе, частотное распределение которых стремится к "нормальному", позволяют в дальнейшем использовать методы дисперсионного и корреляционного анализа для определения степени влияния этого фактора на уровни радона в домах, анализируя различные конструктивные решения зданий.

Анализ зависимостей уровней радона в домах от его активностей в подстилающих грунтах проводился по стандартным методикам дисперсионного и корреляционного анализа. К исследуемым параметрам, прежде всего, относятся: активность радона в грунте, концентрации радия-226, тория-232, калия-40, мощности экспозиционных доз, геоморфологические характеристики грунтов, строительные характеристики зданий. Все эти параметры в той или иной степени потенциально влияют на уровни радона в здании и определяют выбор противорадоновых мероприятий в случае превышения нормативных значений ЭРОА радона.

Степень влияния каждого из перечисленных параметров на активности радона в жилых помещениях позволяет определить дисперсионный и корреляционный анализ соответствующих зависимостей. Например, определить влияние планировочных характеристик здания (тип перекрытий, материал подсыпок под фундамент здания, тип покрытия стен, наличие подвала под зданием, тип вентиляционной системы и т. д.) или активностей радона в грунтовом воздухе на уровни радона в домах. Анализ основных параметров: уровня значимости ( $p$ ) или вклада в изменчивость приведенных выше характеристик здания и грунтов, а также их вариативности (критерий Фишера)

позволяют проанализировать степень их значимости в процессе формирования активностей радона в домах.

Основные результаты данного анализа приведены в табл. 4.1. Для анализа строительных параметров использовались данные сертификатов измерения радона в воздухе зданий и геоморфологические параметры карт радоновых рисков.

Таблица 4.1

**Влияние строительных и геоморфологических параметров и их вклад в изменчивость ЭРОА радона в воздухе зданий**

Исследуемый параметр	<i>F</i> - критерий Фишера	<i>p</i> - уровень значимости параметра <sup>1</sup>	Вклад, %
Населенный пункт	1,455	0,052	18,64
Тип дома	8,229	< 0,001	5,750
Строительный материал	3,012	0,007	6,360
Вентиляция	11,947	0,001	4,220
Тип покрытия стен	3,838	0,023	4,370
Проветривание подпольного пространства	0,954	0,387	1,120
Материал покрытия пола	2,966	0,034	5,060
Наличие перекрытий	2,262	0,083	3,900
Проветриваемость подвала	0,434	0,648	0,550
Наличие подвала	0,224	0,637	0,140
Грунт	3,652	0,003	6,860
Почва	2,276	0,037	5,240
Влажность грунта	3,180	0,014	4,860

Примечание. При значениях  $p < 0,05$  влияние параметров считается достоверным. При значениях  $0,1 > p > 0,05$  – влияние считается на уровне тенденции.

Дисперсионный анализ результатов измерений показал, что существенное влияние на изменчивость значений ЭРОА оказывают следующие параметры:

- тип дома, т.е. одноэтажный или многоэтажный ( $F=8,23$ ;  $p<0,001$ ; вклад 5,8 %);
- тип вентиляции дома, т.е. наличие или отсутствие принудительной вентиляции ( $F=11,95$ ;  $p<0,001$ ; вклад 4,2 %);
- тип подстилающего грунта под домом ( $F=3,65$ ;  $p=0,003$ ; вклад 6,9 %).

Проанализируем полученные результаты. Тип дома определяет в первую очередь тип строительства. Как правило, существующие многоэтажные здания строились индустриальным способом (стандартные блоки и панели перекрытий) и стандартные проекты. Существующий одноэтажный жилищный фонд – это частные дома, которые строились по традиционным планировочным решениям из местных строительных материалов. Причем, для индустриального строительства с 1979 года использовались только сертифицированные стройматериалы, а в индивидуальном строительстве – доступные для хозяев постройки стройматериалы. При строительстве таких домов приобретались местные глина и песок, а для подсыпки под фундамент иногда использовались строительные отходы (например, шлаки), которые потенциально могут содержать повышенные концентрации радия-226, продуктом распада которого является радон.

Тип вентиляции как параметр скорее относится к многоэтажным зданиям, для которых потенциально в проектах предусматривались такие системы. Вентиляционные шахты объединяют дом в единую систему. Если основной источник поступления радона в дом – подстилающий грунт, то активности радона в квартирах должны экспоненциально уменьшаться, чем дальше от фундамента находится квартира. На рис. 4.1 приведено графическое отображение математической модели для оценки уровней радона в многоэтажных домах. Если данная модель нарушается, то это свидетельствует



о том, что нарушена система вентиляции в доме, на что нужно обратить первоочередное внимание.

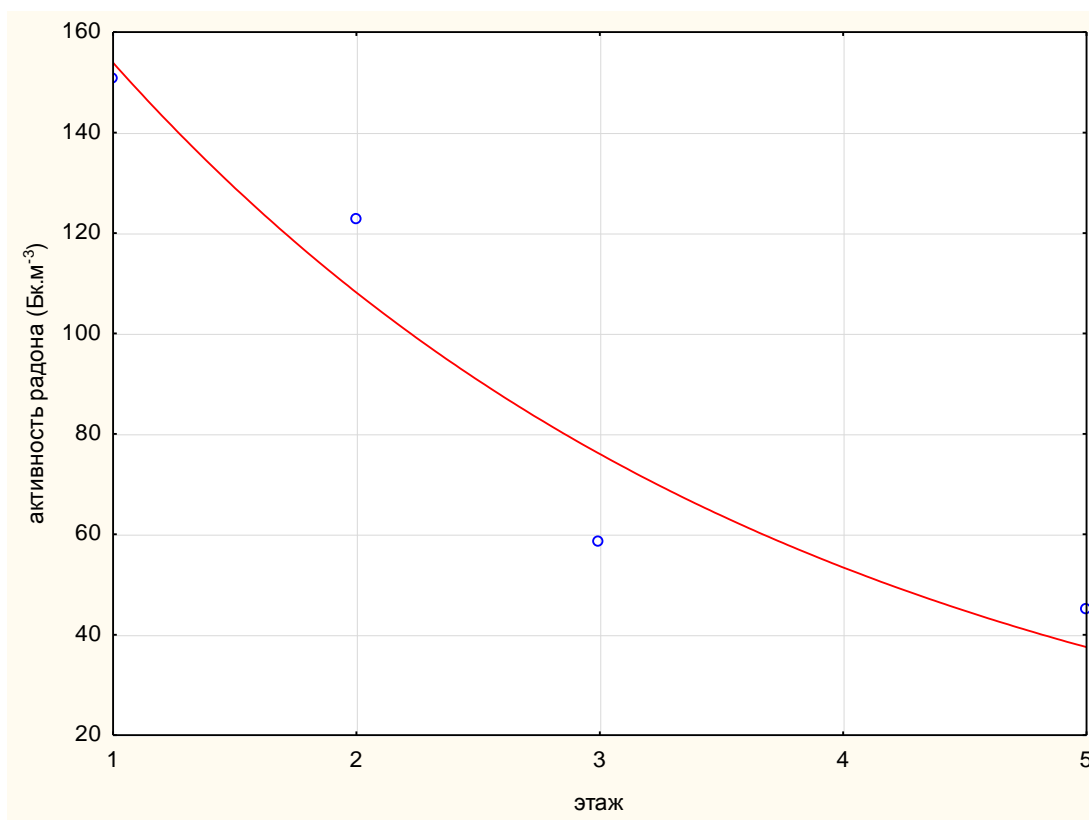


Рис. 4.1 Математическая модель зависимости поступления радона в воздух помещений многоэтажного дома из подстилающих грунтов

В односемейных домах в большинстве случаев вентиляция сводится к проветриванию помещений естественным путем, либо периодическим открыванием-закрыванием форточек. В новых домах в кухнях устанавливаются вытяжки, которые могут создать совершенно противоположные эффекты. Если внутреннее пространство кухни плохо изолировано от подстилающих грунтов, периодическое включение вытяжки может приводить к дополнительному засасыванию радона в помещение.

Дисперсионный анализ результатов измерений установил, что подстилающие грунты ( $F=3,7$ ;  $p=0,003$ ; вклад 6,9 %) также оказывают существенное влияние на уровни радона в доме. Причем содержание радия в грунте имеет менее выраженное влияние ( $F=2,9$ ;  $p=0,014$ ; вклад 5,2 %), чем

концентрация радона в грунтовом воздухе ( $F=4,2$ ;  $p<0,001$ ; вклад 7,6 %). Необходимо учитывать, что на уровни радона в грунтовом воздухе будет влиять не только вид грунта (структура, зернистость и т.д.), но и его влажность. Но влажность как параметр скорее будет влиять на методические требования к измерениям радона в грунтовом воздухе. По всей вероятности, необходимо устанавливать перерасчетные коэффициенты для нивелирования влияния этого параметра.

Еще один параметр, который потенциально влияет на уровни радона в грунтовом воздухе, это тип почвы ( $F=7,1$ ;  $p<0,001$ ; вклад 14,2 %). Этот параметр может оказывать существенное влияние на выбор противорадоновых мероприятий. При строительстве дома верхний слой почвы снимается. На территории обследованных регионов толщина слоя почвы (в основном чернозема) варьирует от 10 до 70 сантиметров. Если проанализировать эти два крайних варианта, то среднеарифметическое значение ЭРОА радона в домах, которые стоят на грунтах со слоем чернозема не более 10 сантиметров, составило порядка  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , при этом уровни радона в грунте составили  $23 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Для слоя почвы 70 и более сантиметров эта величина составила  $135 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  и  $20 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ , соответственно.

Грунт, на котором лежит слой чернозема, это глина, суглинок, супесь, песок. При строительстве дома верхний слой почвы, как правило, снимается под фундамент или подвальные помещения.

Заглубление фундамента может варьировать от дома к дому и зависит от его планировочного решения. Необходимо помнить, что старые дома (саманные), как правило, не имеют фундамента, а изоляцию пола заменяет слой глины, который укладывался прямо на почву. Глина быстро растрескивается и практически не является препятствием для потока радона. По данным источников, в таких домах фиксируются максимальные значения ЭРОА радона. Такие дома становятся редкостью. Анализ данных сертификатов измерения радона и соответствующих баз данных показал, что большинство обследованных зданий имеют фундамент. Если фундамент заглублен и стоит на

грунтах, а не почве, скорость поступления радона в здание будет зависеть от геоморфологических особенностей именно грунта. В этом случае, в контексте выбора противорадоновых мероприятий, тип почвы как влияющий параметр можно исключить. Исключение будут составлять дома из ракушечника. Пористость этого материала может существенно повлиять на перераспределение потока радона из почвы. Чтобы избежать этого эффекта, мы рекомендуем изолировать блоки ракушечника от фундамента пленкой, как и в случае изоляции подпольного пространства.

Как уже упоминалось в предыдущем разделе, характер распределения активностей радона в грунтовом воздухе стремиться к "нормальному", что позволяет использовать для анализа коэффициенты Стьюдента.

Корреляционный анализ зависимостей уровней радона в домах от концентрации радона в грунтовом воздухе показал, что среднеарифметическое значение ЭРОА радона в домах, которые стоят на песчаных грунтах, составило  $75 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , для уровней радона в грунтовом воздухе –  $25 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Для других типов грунтов, например, глины и суглинка, эта величина составила  $151 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  и  $18 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ , соответственно. Анализ факторов, которые повлияли на эти значения, установил, что на степень проникновения радона в воздух домов достоверно оказывали влияние два параметра: система вентиляции помещений ( $F=11,97$ ,  $p<0,001$ ), тип перекрытий (на уровне тенденции) и, как и предполагалось ранее, – тип грунта ( $F=3,65$ ,  $p=0,003$ ). Все эти параметры напрямую связаны со скоростью поступления радона в воздух здания.

Выводы к главе.

1. Установлено, что накопление радона в воздухе помещений зависит от конструктивного решения здания, и в первую очередь, от степени изоляции внутреннего пространства помещений от грунта.

2. Дисперсионный анализ результатов измерений показал, что существенное влияние на изменчивость значений ЭРОА радона оказывают следующие параметры:

- тип дома, т.е. одноэтажный или многоэтажный;
- тип вентиляции дома, т.е. наличие или отсутствие принудительной вентиляции;
- тип подстилающего грунта под домом.

Основные результаты исследований по главе 4 опубликованы в следующих статьях:

1. The Ukrainian pilot project "Stop Radon" / T. Pavlenko, O. German, M. Frizyuk, N. Aksenov, A. Operchyuk // Nuclear Technology and Radiation Protection. – 2014. – Vol. 29, No. 2. – P. 142-148.

2. Ukrainian Experience of Monitoring of Radiation Exposure of Population Determined by Building Materials / Andrey Serdyk, Tatyana Pavlenko, Ivan Los, Olga German, Nikolay Aksenov // Processing of Third European IRPA Congress. - Helsinki, Finland, 2010. - P. 1070-1077.

## ГЛАВА 5

### НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА, ВНЕДРЕНИЕ И ОЦЕНКА ПРОТИВОРАДОНОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

#### 5.1 Оценка целесообразности создания карт радоновых потенциалов в контексте оптимизации противорадоновых мероприятий

Одной из задач данной работы было создание карт радонового риска или радонового потенциала для пилотного Савранского района. Стоит отметить, что оба понятия используются в международной практике абсолютно идентично. Во избежание путаницы с радоновыми рисками для здоровья населения далее в работе используется термин "карта радонового потенциала".

Для классификации радонового потенциала территорий использовались методики, разработанные Шведской геологической службой по заказу Государственного архитектурно-строительного управления [95].

В соответствие с этой методикой, территория делится на три категории: с низким, нормальным и высоким радоновым потенциалом. Отправным элементом при создании данной классификации является активность радона в грунте, на которую накладывается характеристика территории и способность грунта свободно перемещать имеющийся в нем воздух или, другими словами, особенности морфологического состава грунтов: морена, песок, глина, лесс и т.д.

Таким образом, для создания карты радонового потенциала использовался массив данных Савранского района Одесской области, который включает в себя такие данные:

- объемные активности радона в грунтах;
- удельные активности радия в грунтах;
- геоморфологические данные грунтов;

– ландшафтные характеристики участков территории.

Верификация полученной карты радонового потенциала проводилась по данным ЭРОА радона в помещениях.

В соответствии с общепринятой методикой, мы выделяли характеристики грунтов и проводили их классификацию в соответствии с параметрами, которые представлены в табл. 5.1 и 5.2.

При анализе и построении карт радонового потенциала необходимо учитывать еще одну немаловажную закономерность формирования уровней радона в домах: даже при малых активностях радона в грунтах геоморфологические условия в комбинации с конструктивными решениями зданий могут создавать условия для повышенных значений ЭРОА радона в зданиях.

В связи с этим в геологической службе Швеции сегодня идет тенденция снятия класса "низкий радоновый потенциал" как такого, что может привести к неверным выводам и оставить лишь классы "нормальный" и "высокий" потенциал.

*Таблица 5.1*

**Характеристики участков высокого радонового потенциала**

Название горной породы или грунта	Концентрация радия-226, Бк·кг <sup>-1</sup>	Объемная активность радона в грунте, кБк·м <sup>-3</sup>
Выход магматических пород	200	–
Гравий, крупнодисперсные пески, супеси	>50	> 50
Суглинки, лёссы	>70	> 60
Глины, илы	>100	> 100

Таблица 5.2

**Характеристики участков низкого радонового потенциала**

Название горной породы или грунта	Концентрация радия-226, Бк·кг <sup>-1</sup>	Объемная активность радона в грунте, кБк·м <sup>-3</sup>
Выход основных пород	< 60	–
Гравий, крупнодисперсные пески, супеси	< 25	< 10
Суглинки	< 50	< 20
Глины, увлажненные глины	< 80	< 60

На следующем этапе по данным натурных исследований были составлены карты радонового потенциала для Савранского района Одесской области. Установлено, что Савранский район расположен в северной части Одесской области на границе с Кировоградской и ему присущи равнинные ландшафты, иногда пересекающиеся долинами рек, где река Савранка - самая большая [96, 97]. Вдоль реки Савранки расположены участки песчаных отложений, которые также характерны и для более мелких рек региона. Чуть дальше от реки основными грунтами являются суглинки и супеси, на которых сформированы черноземы. Мощность чернозема достигает двух метров, а иногда и более. На участках необрабатываемых степных ландшафтов слой чернозема маломощный и сформирован часто на суглинках или глинах. Участки выхода горных пород на западе Савранского района обнажают гнейсы, пегматиты и мигматиты - вулканические горные породы, обычно богатые радием. По данным литературных источников и геологическим картам местности [96, 97, 98] также установлено, что мощность осадочного чехла на данной территории достигает сотни метров и перекрывается двумя водоносными горизонтами. При таком строении грунтов радон,

сформированный на поверхности горной породы, становится малодоступным для верхних слоев почвенного горизонта.

Для подтверждения генетического и гранулометрического состава почв, а также их типа, было отобрано 10 образцов наиболее представительных грунтов и проведен лабораторный анализ образцов в лаборатории департамента почвы и окружающей среды в SGU. Лабораторные исследования показали, что образцы содержат примерно 40 % глины, гумусовый состав – до 4,7 % (типичный для черноземов). В таких условиях измерения активности радона в грунте на глубине 70-80 см не всегда было возможным, поэтому активность радона рассчитывалась по результатам спектрометрического измерения активной концентрации радия.

Из кластерного анализа всего массива данных и нанесения результатов на топографическую карту Савранского района при помощи кода ArcGIS было получено два типа участков: с низким и нормальным радоновым потенциалом.

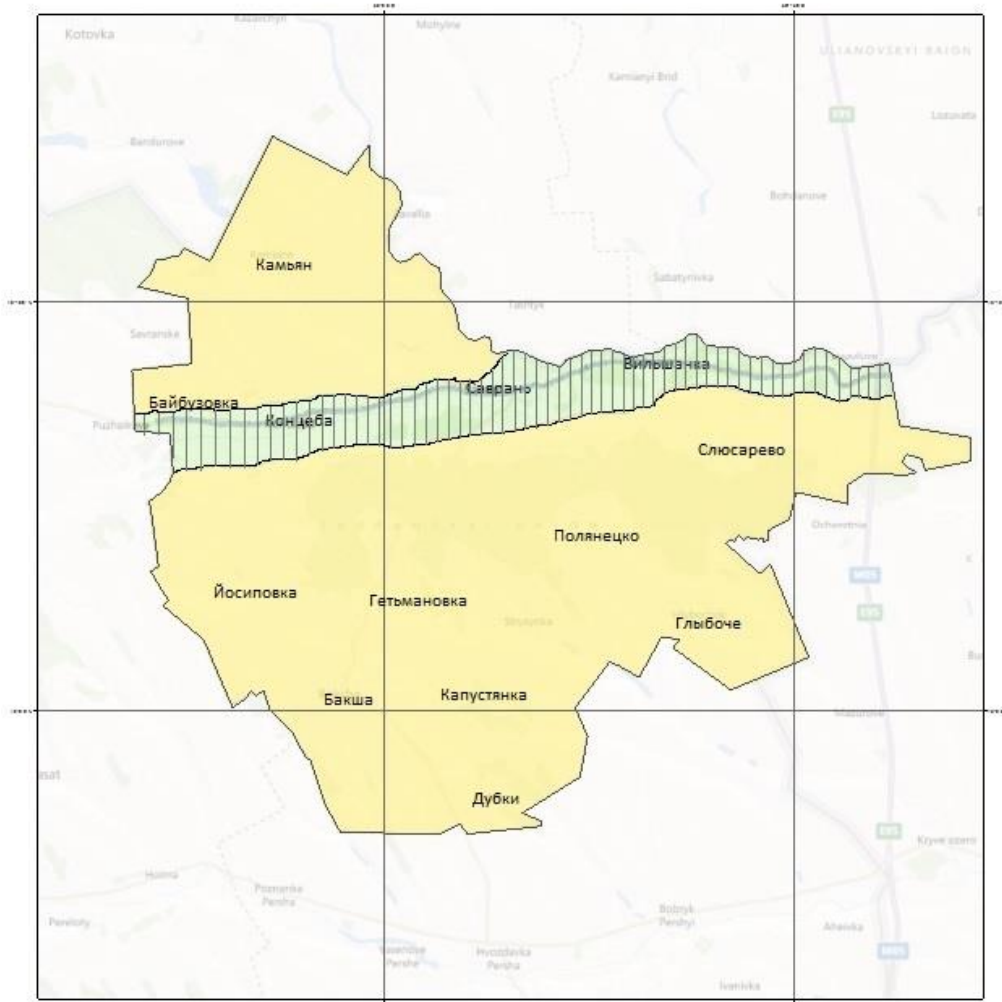
Необходимо также отметить, что измерения радона проводились только в населенных пунктах или в непосредственной близости от них. Некоторые удаленные участки остались непокрыты измерениями и для них изолинии проводились по усредненным данным.

На рис. 5.1 представлена полученная карта радонового потенциала. На карте выделены участки с нормальным и низким радоновым потенциалом. На участках с нормальным потенциалом доминируют глины и суглинки, перекрывающиеся черноземом мощностью от одного до двух метров. Мощность дозы гамма-излучения на поверхности иногда выше среднего значения, а ЭРОА радона в домах часто превышают норматив. На участках с низким радоновым потенциалом преобладают грунты с низкой радиоактивностью, а ЭРОА радона в домах редко превышают норматив.

На следующем этапе исследований для верификации данных карты радонового потенциала выделенные участки сравнивались с результатами измерений ЭРОА радона в зданиях, которые расположены на этих территориях.



Как отмечалось в разделе 3.1, измерения ЭРОА района в Савранском районе проводились в отопительный сезон. Анализ результатов ЭРОА района по населенным пунктам показал, что на участках низкого радонового потенциала расположены села Ольшанка, Дубиново и Байбузовка.



- нормальный радоновый потенциал. Активности радона в грунтах невелики, большой объем легкодоступного грунтового воздуха, активности радона в помещениях часто превышают норматив;
- низкий радоновый потенциал. Грунты часто песчаные с низкой радиоактивностью. Активности радона в домах редко превышают норматив

Рис. 5.1 Карта радонового потенциала для Савранского района Одесской области

Установлено, что для этих сел норматив ЭРОА радона для жилых помещений превышен только в 20 % случаев. Такая же ситуация зафиксирована в селе Полянецкое (которое расположено вдоль усыхающего рукава реки Савранка): норматив ЭРОА радона для жилых зданий превышает всего в 9 % случаев. Тем не менее, село было отнесено в общую группу нормального радонового потенциала, т. к. концентрации радия на территории села слегка повышены, и нет достаточно подробных данных по спектрометрии вне территории данного населенного пункта для проведения отдельной изолинии.

Анализ результатов измерений ЭРОА радона в домах, расположенных на территориях с нормальным радоновым потенциалом, показал, что превышение уровня ЭРОА радона в  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  варьирует от 25 до 64 %, при этом значения активностей радона в грунтовом воздухе сравнительно невелики.

Наибольшие значения ЭРОА радона были зафиксированы в селе Бакша, где основным типом грунта является глина. В летний период, когда проводились измерения радона в грунтах, глины были увлажнены дождями и измерения в них активности радона были крайне затруднены. Однако в зимний период глины под домами высыхают за счет тепла, которое генерирует само здание, в результате увеличивается приток радона внутрь помещений.

По результатам всех перечисленных исследований была проведена верификация метода составления карты радонового потенциала при помощи анализа информации по ЭРОА радона в помещениях. Было установлено, что в первом приближении карты радонового потенциала могут давать прогнозные оценки активностей радона в домах определенного типа. Кроме того, создание карт позволяет составлять прогнозные оценки при планировании строительства или выборе противорадоновых мероприятий.

Необходимо также отметить, что большинство одноэтажных зданий эксплуатируемого жилищного фонда Украины строилось по проектам, традиционным для каждого конкретного региона страны и, как правило, из местных строительных материалов. Анализ результатов измерений радона и конструктивных особенностей домов показал, что активности радона в

соседних зданиях одного села могут отличаться на два порядка. Обычно, на уровни радона в домах влияют те конструктивные особенности, которые могут в той или иной мере изменять величину потока радона из грунта во внутреннее пространство помещений (тип перекрытий, степень герметизации внутреннего пространства от подстилающих грунтов, тип вентиляции). Выбор противорадоновых мероприятий – это анализ особенностей здания и подбор контрмер, которые могут изменить негативное влияние конкретных конструктивных решений.

Таким образом, алгоритм выбора противорадоновых мероприятий включает несколько последовательных шагов. Первый шаг – это измерения радона в грунтовом воздухе и гамма-спектрометрия грунта с последующим геоморфологическим анализом его состава. Второй шаг – анализ конструктивных особенностей здания и поиск источников поступления радона в дом (обнаружение щелей в перекрытиях, определение кратности воздухообмена, типа вентиляции и т.д.). Третий шаг – выбор противорадоновых мероприятий, которые соответствуют конструктивным особенностям здания.

Для эксперимента были выбраны два региона (Кировоградский район Кировоградской области и Савранский район Одесской области) Украины, которые, по предварительным данным, располагаются на радоноопасных территориях и имеют типичные для сельской местности здания. Дома были выбраны разных годов постройки и, соответственно, разных планировочно-конструктивных решений, которые значительно менялись с развитием строительных технологий.

## 5.2. Обоснование и выбор противорадоновых мероприятий для типовых односемейных зданий

Первый тип зданий – это дома постройки 60-х годов без вентиляции, с подполом и дощатым полом, подсыпкой из грунта или щебня (иногда из

отходов местного производства) и индивидуальным газовым отоплением. В таких домах двери между комнатами часто отсутствуют, стены выполнены из дерева и обложены кирпичом или изолированы глиной, а также саманные дома. В таких домах кухня чаще всего вынесена в отдельную постройку во дворе или располагается в отдельном помещении, пристроенном позднее, чем был построен сам дом. В такие дома редко проведены коммуникации, отсутствует водопровод (вода набирается в колодце или используется артезианская скважина) и канализация (выгребная яма за домом). Из коммуникаций подведены только газовые трубы, как правило, по внешней стороне стен.

В качестве второго типа зданий были выбраны односемейные дома постройки 70-80-х годов с фундаментом или небольшим погребом под полом. В таких домах, как правило, присутствует газовое отопление, а вентиляция помещений естественная (открывание-закрывание окон). Пол, обычно, плохо изолирован от фундамента и покрыт линолеумом. Конструкция такого фундамента приведена на рис. 5.2.

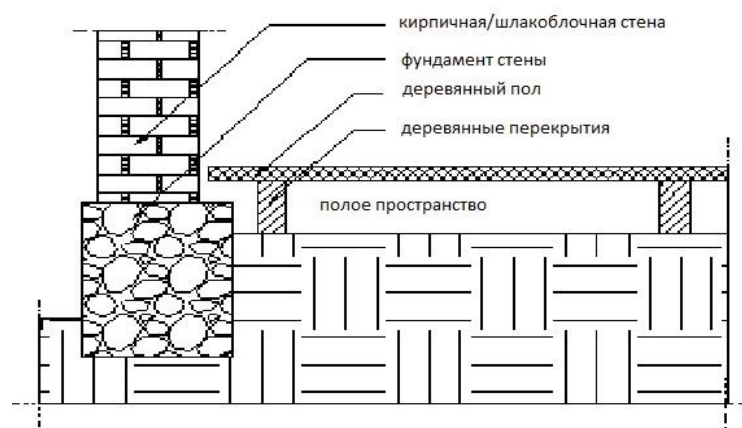


Рис. 5.2 Конструкция фундамента с бетонным покрытием между грунтом и полом

Между комнатами чаще всего имеются двери. В качестве строительного материала стен часто используется силикатный кирпич (белый кирпич), реже – глиняный кирпич (красный). В таких домах кухня обычно располагается

непосредственно в доме. Кроме того, в такие дома часто проведены газовые и водные коммуникации, а также канализация.

К третьему типу зданий мы отнесли современные дома, построенные в последние 10-15 лет. Такие дома строятся, как правило, на фундаменте с цокольным этажом или подвальными помещениями, поверх которых устанавливается бетонное перекрытие между этим и вышележащим уровнем. Далее сверху на бетонные перекрытия укладывается паркет, ламинат или линолеум. Вентиляция в современных домах чаще всего с естественным побуждением, реже встречается - с механическим побуждением. Комнаты обычно разделены дверьми. В такие дома проведены все коммуникации: водопровод, канализация, газовые трубы. Кухня является планировочной частью дома, часто снабжена вытяжкой.

Рассмотрим несколько типичных примеров зданий с выявленными повышенными уровнями активностей радона.

*Первый вариант.* Дом построен в 1962 году из деревянных досок. В последствии строение снаружи было обложено красным кирпичом. Кирпич изготовлен на местном заводе из локального сырья. Дом состоит из 4 комнат и кухни и расположен на небольшом холме. Под домом имеется подпол высотой от 25 до 75 см. Осмотр дома показал, что деревянный пол не изолирован и не герметизирован. Между досками обнаружено много широких щелей. Подпольное пространство не вентилируется наружным воздухом. В доме нет системы вентиляционных отверстий, а проветривание комнат проводят периодическим открыванием окон. Здание отапливается газовым котлом. Водные коммуникации в дом не подведены. Водоснабжение дома осуществляется из скважины глубиной 19 метров.

Проанализированы геологические условия для данного дома. Дом располагается недалеко от реки. Установлено, что грунт состоит из аллювиальных и крупнозернистых песков, немного выше над уровнем реки и есть примесь глины. Под четвертичными отложениями – граниты, отделенные от поверхности двумя водоносными горизонтами.

Первый этап исследований включал измерения ЭРОА радона в доме, которая составила  $588 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  (интегральные измерения с помощью пассивных трековых радонометров), и мощности экспозиционной дозы, которая в доме составила в среднем  $10 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ . На втором этапе экспресс-методом (мгновенные измерения) было проведено измерение активности радона в подпольном пространстве, активность радона,  $A_{Rn}$ , составила  $1537\pm 307 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Далее были проведены измерения в грунте возле дома. Мощность экспозиционной дозы на поверхности составила  $18 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$  и на глубине 70 сантиметров –  $6 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Параллельно проводилось измерение активностей радона в почвенном воздухе. Активности радона в грунте вокруг дома составили 21, 13 и 19  $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ . На тех же площадках был проведен гамма-спектрометрический анализ грунта на содержание ЕРН. Было установлено, что на поверхности почв содержание калия-40 составляет  $620 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , радия-226 –  $17 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , тория-232 –  $41 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Такие измерения были проведены на глубине 70 сантиметров, то есть на той же глубине, на которой измерялся почвенный радон. Концентрации ЕРН на этой глубине составили: калий-40 –  $544 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , радий-226 –  $20 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  и торий-232 –  $40 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  и практически не отличались от соответствующих величин на поверхности.

Таким образом, было установлено, что источником радона для данного дома является грунт. Несмотря на то, что активности радона в грунте были относительно небольшими, высокая пористость и воздухопроницаемость грунта определили мощность потока радона в неизолированное внутреннее пространство. Комбинация таких характеристик грунта с плохой изоляцией пола и полным отсутствием проветривания подпольного пространства приводят к тому, что в зимний период времени холодный грунтовый воздух засасывается в дом, где также отсутствует постоянный воздухообмен. Поступающий из грунта воздух накапливается, и в отсутствие воздухообмена внутри помещения обуславливает активности радона, в несколько раз превышающие установленный норматив.

Учитывая все перечисленные особенности дома и результаты измерений, были разработаны рекомендации по уменьшению уровней радона. Было установлено, что наиболее приемлемыми мероприятиями в данной ситуации, учитывая конструктивные особенности здания и финансовые возможности домовладельцев, является герметизация внутреннего пространства здания посредством изоляции грунта плотной пленкой 0,3-0,5 мм. Концы пленки необходимо закрепить на перекрытиях во избежание просачивания грунтового воздуха во внутреннее пространство дома. Пол необходимо герметизировать и сократить количество трещин между досками. Более эффективной мерой могла бы стать комбинация герметизации подпольного пространства с установкой дренажных труб под полом, но такое мероприятие требует дополнительных расходов не только на сами материалы, но и прокладку канализационных труб через стены фундамента, поэтому от данного мероприятия пришлось отказаться.

Второй пример противорадиновых мероприятий был разработан для более нового типичного дома постройки 1974 года. Дом выполнен из красного кирпича, изготовленного на местной фабрике из локальных глин. Здание расположено на верхней террасе речной долины. Фундамент высотой примерно 1 метр выполнен из гранитных камней также происхождением из местного карьера. Подпольное пространство под домом наполнено угольной золой высотой примерно 15 см. Фундамент здания не проветривается. В доме имеется 5 комнат, которые отапливаются газовым котлом. В доме имеется камин, но им не пользуются и дымоотвод перекрыт. Пол деревянный и не изолирован от подпольного пространства с большими щелями между досками. Окна глухие и не открываются, поэтому воздухообмен в доме ограничен лишь периодическим открыванием-закрыванием входной двери. Подведенных по земле водных коммуникаций нет, а водоснабжение домашнего хозяйства осуществляется по трубам, проведенным выше фундамента. Вода подается насосом из колодца глубиной 15 м, который располагается в 5 метрах от дома.

Геологические условия: грунт состоит из грубых аллювиальных песков с небольшими примесями глины. Мощность осадочного чехла в данном регионе порядка 100 метров и подстилающие граниты перекрыты двумя водоносными горизонтами.

Дом был также обследован по программе исследований, приведенной выше. Установлено, что мощность экспозиционной дозы внутри дома составляет  $7-8 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ , то есть строительные материалы как источник радона исключаются. ЭРОА радона в воздухе дома в отопительный сезон составила  $500 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Уровни радона в подпольном пространстве, по экспресс-измерениям, составили  $1289\pm 258 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Далее были проведены измерения в грунте возле дома. Измеренная мощность экспозиционной дозы составила на поверхности  $10 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ , на глубине 70 сантиметров –  $6 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Активности радона в грунтовой атмосфере варьировали от 13 до  $20 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Концентрации ЕРН на поверхности грунта составили  $782 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  для калия-40,  $28 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  – для радия-226 и  $44 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  – для тория-232. Гамма-спектрометрия грунта на глубине 70 сантиметров установила концентрации калия-40 –  $526 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , радия-226 –  $17 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , тория-232 –  $39 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Эти значения на 20-30 % ниже, чем на поверхности, что может быть объяснено привнесением в верхние слои почвы либо удобрений с содержанием ЕРН выше, чем в местных почвах, либо привнесением или перемешиванием верхних слоев с остатками строительных материалов (песок, щебень) и подсыпок.

Далее были проанализированы все результаты исследований и для данного здания подобран комплекс противорадоновых мероприятий. Как и в предыдущем примере, очевидно, что источником радона в помещении является грунт под домом. Несмотря на то, что активности радона в грунте низкие, геоморфологические характеристики грунта (высокая пористость и воздухопроницаемость) создают значительный перепад давления внутри дома и снаружи его, тем самым, создавая условия для притока грунтового воздуха внутрь здания. Комбинация таких характеристик грунта с плохой изоляцией пола, а также полным отсутствием проветривания подпольного пространства и



непосредственно жилых помещений приводит к тому, что в зимний период времени холодный грунтовый воздух засасывается в дом. Хотя дымоотвод закрыт, небольшое количество воздуха просачивается в местах соединения перекрытия со стенами трубы, создавая дополнительные потоки воздуха. Попавший внутрь грунтовый воздух, при отсутствии воздухообмена, с притоком свежего атмосферного воздуха в помещении накапливается. Накапливается, соответственно, и радон до активностей, в несколько раз превышающих установленный норматив.

Проанализировав вышеперечисленные особенности данного строения, для жильцов были разработаны рекомендации по уменьшению уровней радона. Для данной ситуации, учитывая конструктивные особенности здания, было рекомендовано выполнить изоляцию грунта плотной пленкой 0,3-0,5 мм с последующей герметизацией пола. Домовладелец предложил покрыть пол после герметизации линолеумом, что, несомненно, усилит эффективность противорадоновых мер, если концы линолеума правильно закрепить для предотвращения просачивания грунтового воздуха. Однако при реализации данных мероприятий следует быть осторожными, так как отсутствие вентиляции внутри дома может привести к накоплению влаги под линолеумом и последующему гниению досок пола. Решением проблемы для данного типа фундамента, выполненного из крупных гранитных глыб, была бы установка дренажных труб, что не только уменьшит поток радона с холодным грунтовым воздухом в здание, но и позволит исключить накопление влаги на напольных покрытиях.

С целью улучшения общей санитарно-гигиенической обстановки в доме домовладельцам была дана рекомендация заменить старые окна на окна иной конструкции, позволяющей проводить регулярное проветривание, или устранить в помещениях вентиляционные отверстия с естественным или механическим побуждением притока воздуха.

В качестве третьего примера был выбран современный дом (2010 года постройки) из белого силикатного кирпича. В этот дом проведены все

коммуникации (вода, канализация, газ). Дом состоит из 5 комнат, кухни, туалета и ванной. Кроме того, в здании имеются как вытяжка для вентиляции, которая практически не используется по назначению и отключена, так и окна современной конструкции, позволяющие проветривать помещения. Визуальный осмотр установил, что изоляция вокруг оконных рам выполнена не качественно.

Из конструктивных особенностей дома следует отметить, что фундамент высотой примерно 1 метр выполнен из гранитных блоков, подпольное пространство составляет 30 см и не предусматривает проветривание подпольного пространства. Пол выполнен из деревянных досок, а наличие щелей в полу предполагает существенный приток воздуха из подпольного пространства. Пример такой конструкции приведен на рис. 5.3.

Далее был проведен геоформологический анализ подстилающих грунтов. Было установлено, что грунт вокруг постройки состоит из мощного чернозема глубиной более 70 см, материнская порода – супесь под мощным осадочным чехлом, который в данном регионе составляет более 100 метров, ниже находятся граниты. Установлено также, что через осадочный чехол проходят два водоносных горизонта. Параллельно были проведены измерения мощности экспозиционной дозы внутри дома, которая составила  $7-8 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$  и позволила исключить стройматериалы как источник поступления радона в дом.

В отопительный сезон было проведено измерение ЭРОА радона в воздухе дома, которая составила  $248 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . На втором этапе проведены экспресс-измерения активностей радона в подпольном пространстве дома, которые составили в среднем  $270\pm 54 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , причем в одной из спальных комнат эта величина составила  $227\pm 45 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Следующий этап включал измерения радона в грунте. Установлено, что активности радона в грунтовом воздухе варьировали от 18 до 22  $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения на поверхности грунта составила  $9 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ , а на глубине 70 сантиметров –  $5 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Результаты гамма-спектрометрических измерений концентраций ЕРН на поверхности грунта установили, что концентрации калия-40 составляют

1158 Бк·кг<sup>-1</sup>, радия-226 – 29 Бк·кг<sup>-1</sup>, тория-232 – 65 Бк·кг<sup>-1</sup>. На глубине 70 сантиметров измеренные величины составили для калия-40 – 544 Бк·кг<sup>-1</sup>, радия-226 – 24 Бк·кг<sup>-1</sup>, тория-232 – 40 Бк·кг<sup>-1</sup>.

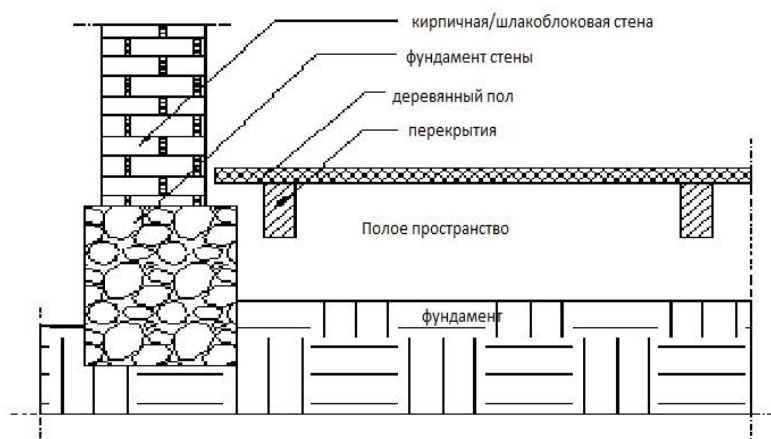


Рис. 5.3 Конструкция фундамента здания с подпольным пространством

Таким образом, установлено, что, так же, как и в предыдущем случае, при довольно низких активностях радона в грунте активности радона в доме были повышены (в более чем 2 раза превышали норматив для существующих зданий), однако были почти в 3 раза ниже, чем в старых домах.

С одной стороны, это связано с легкой доступностью грунтового радона и конструктивными особенностями строения, обуславливающими активный перенос грунтового воздуха внутрь здания и его накопление, с другой, – наличие вентиляционных систем и окон, новых конструкций, что способствует увеличению кратности воздухообмена, предопределило более низкие значения ЭРОА радона по сравнению со старыми конструктивными решениями односемейных домов.

Рекомендации для таких зданий, прежде всего, касаются систем вентиляции, которые предусмотрены конструктивным решением, но не приведены в активное состояние. Кроме этого, в таких домах необходимо провести мероприятия по изоляции пола, а также оконных щелей. Причем изоляция пола должна сочетаться по возможности с изоляцией грунта.

Впрочем, второе мероприятие не носит обязательного характера, так как активности радона относительно небольшие и, вполне возможно, что изоляции пола будет достаточно, что минимизирует финансовые затраты. Для уменьшения потока радона в технических помещениях необходимо герметизировать места подвода коммуникаций, особенно это касается ванной комнаты, туалета, кухни. Герметики должны быть высокого качества и достаточно пластичными, однако, даже для высококачественных герметиков рекомендуется их замена не реже 1 раза в 5 лет.

В заключение, необходимо отметить, что рекомендация перевести вентиляционные системы в рабочий режим должна осуществляться после герметизации внутренних помещений. При включенной вентиляции увеличивается скорость воздухообмена в помещениях, что может привести к еще большему засасыванию грунтового воздуха в дом. Невозможно проконтролировать качество всех работ, поэтому если при повторных измерениях выясняется, что уровни радона увеличились или остались на том же уровне, к противорадоновым мероприятиям стоит добавить изоляцию грунта под домом специальной пленкой, толщина которой должна быть не менее 0,3 см, а концы обязательно закреплены на балках перекрытий.

Эффективность проведения противорадоновых мероприятий подтверждается повторными измерениями активностей радона в воздухе дома в отопительный сезон. По результатам этих измерений, если нормативные уровни превышаются, вносятся дополнительные корректирующие действия.

5.3. Обоснование и выбор противорадоновых мероприятий для зданий, построенных по индустриальным технологиям и типовым проектам, на примере детских дошкольных и школьных учреждений

Возможность не только научно обосновать комплекс противорадоновых мероприятий, но оценить их эффективность, как рекомендовано

МКРЗ [101, 10], позволила Кировоградская региональная программа "Стоп-радон", в ходе которой были обследованы 1023 детских заведения, выявлены радоноопасные здания, в 200 из них были проведены корректирующие меры. Необходимо отметить, что из-за отсутствия достаточного финансирования работ не все рекомендованные мероприятия были выполнены в полном объеме, что, конечно, сказалось на их эффективности. Тем не менее, это первый в Украине опыт реализации таких мероприятий, который позволил значительно снизить радиационные риски детей в данном регионе. Оценки эффективности реализованных противорадоновых мероприятий в контексте радиационных рисков будут приведены в заключительном разделе данной главы.

Анализ существующей ситуации облучения радоном в воздухе детских дошкольных и школьных заведений Кировоградской области приведен в работе М.А. Фризюк [100]. По степени радоноопасности все здания условно были разделены на 3 категории. Противорадоновые мероприятия были запланированы и, в первую очередь, проведены в тех детских садах и школах, уровни радона в которых 6-10 раз превышали нормативные значения по ЭРОА радона в воздухе помещений [21]. Норматив для такого типа зданий составляет  $50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , а максимальная ЭРОА радона, зафиксированная в воздухе помещений, составила  $809 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  при среднегеометрическом значении  $63 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Анализ геоморфологических особенностей грунтов по населенным пунктам показал, что они хорошо коррелируют с результатами измерений радона в грунте. Слагаемые породы обладают низким содержанием радия и, соответственно, радона, но содержат довольно большой объем свободного грунтового воздуха, благодаря своей структуре. Этот легко доступный воздух активно переносит радон в грунтах, обуславливая его поступление в воздух зданий при перепаде давления и температуры. Как показывают расчеты, для превышения норматива ЭРОА радона  $50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , достаточно поступления 1,6 литра грунтового воздуха в час при активности радона в грунте  $20 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ , а для превышения норматива для жилых помещений  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  – достаточно 3 литров в час.

Анализ конструкций зданий, типичных для сельской местности и данного региона Украины, показал, что инженерно-планировочные решения зданий способствуют активному накоплению радона в воздухе помещений. Все обследованные детские дошкольные заведения и школы, а также жилые здания имели общие характеристики, а именно:

- плохую изоляцию помещений от грунта, наличие щелей в полах и перекрытиях, зазоры между конструкциями и коммуникациями, проведенными в здание;

- наличие непроветриваемого пространства под полом внутренних помещений;

- отсутствие или неправильно установленную систему вентиляции помещения.

Более подробная характеристика обследованных зданий различных типов будет приведена ниже.

На следующем этапе данного проекта были проведены исследования, аналогичные описанным в предыдущем разделе для односемейных домов. Исследования включали измерения радона в грунтах, мощности экспозиционной дозы, гамма-спектрометрический анализ концентраций ЕРН в грунтах, геоморфологический анализ подстилающих почв и грунтов, анализ конструктивных особенностей зданий и возможных источников поступления радона в воздух помещений. Остановимся более подробно на анализе конструктивно-планировочных особенностях зданий, для которых проводились измерения в грунтах.

На обследованных участках можно выделить два типа зданий, предназначенных для детей дошкольного возраста. Первый тип – одноэтажные постройки из кирпича без подвалов. Второй – двухэтажные дома с небольшим подвальным помещением, в основном, технические помещения для подведения коммуникаций. Школы – это либо одноэтажные кирпичные постройки без подвалов, либо трехэтажные постройки большей площади с подвальным техническим помещением.

Основной характеристикой для всех типов зданий является плохая изоляция грунта, долговременное отсутствие серьезных ремонтных работ и, как следствие, наличие больших щелей и отверстий в полах, нарушенный режим работы вентиляционных систем или полное их отсутствие, что приводит к существенному нарушению воздухообмена в помещениях.

Так как радиационно-гигиенические регламенты для строительного минерального сырья в Украине исключают использование строительных материалов с повышенным содержанием радия, их можно исключить как потенциальный источник поступления радона. Этот факт был подтвержден на всех исследуемых объектах измерениями мощности экспозиционной дозы, которые также не превышали нормативные величины и составляли не более 23-28 мкР·ч<sup>-1</sup>. Установлено также, что для водоснабжения этих зданий используется сертифицированная вода, которая не содержит радон и другие ЕРН. Таким образом, было установлено, что единственным источником поступления радона в воздухе исследуемых зданий является подстилающий грунт.

Проанализировав все входные параметры, были разработаны рекомендации для обследованных зданий, которые, в первую очередь, касались изменений режимов воздухообмена, изменения давления воздуха под зданием по отношению к внутреннему давлению воздуха, изоляции и герметизации полов и подпольных пространств, герметизации всех коммуникационных систем.

Для наиболее эффективного решения радоновой проблемы в зданиях были рекомендованы радонооткачивающие насосы, то есть трубу из поливинилхлорида (ПВХ), один конец которой заводят под пол или перекрытия, а другой выводят на улицу. Таких труб в здании может быть несколько, и они могут соединяться в одной или нескольких точках, снабженных на конце системы вентилятором достаточной мощности. Этот противорадоновый метод выполним для данных конструкций и может дать наибольший эффект снижения активностей радона. Однако, расчет количества

точек откачивания грунтового воздуха из подпольного пространства должен учитывать, как площадь эффективной зоны действия системы, так и наличие перекрывающих конструкций в данном пространстве.

Необходимо отметить, что после проведения таких противорадоновых мероприятий необходимо периодически проверять и обновлять используемые материалы (не реже одного раза в пять лет).

Приведем несколько конкретных примеров с описанием конструкций и рекомендованными противорадоновыми мероприятиями.

Пример первый. Детский сад в поселке Калиновка – одноэтажное кирпичное здание. Фундамент небольшой и подпольное пространство от фундамента до деревянного пола составляет примерно 50 сантиметров. Между досками в полу зафиксированы большие щели. Сверху в ряде помещений настелен линолеум, в некоторых помещениях – ковровое покрытие, в отдельных помещениях – пол без настила, только доски. Окна старые. Система вентиляции отсутствует, проводится периодическое проветривание открыванием-закрыванием окон, а в зимний период окна запечатываются наглухо и проветривание не производится.

На территории детского сада проведен комплекс исследований, описанный выше. В результате исследований было установлено, что мощность экспозиционной дозы внутри здания составляет  $7-9 \text{ мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ , средневзвешенное значение среднегодовой ЭРОА радона в воздухе помещений составило  $195 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . На втором этапе исследований были проведены экспресс-измерения активностей радона в подпольном пространстве ряда помещений детского сада, которые составили  $1040 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  в комнате старшей группы, порядка  $400 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  – на кухне, и такие же активности  $400 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  были зафиксированы в холле.

В качестве противорадоновых мероприятий были рекомендованы следующие меры: установить системы вентиляции в помещениях для нормализации скорости воздухообмена; герметизировать пол и уплотнить герметиком системы коммуникаций, чтобы изменить разницу давления воздуха



между подполом и внутренним объемом помещения; установить радонооткачивающую систему.

В качестве второго примера выбора радоновых контрмер мы рассмотрим среднеобразовательную школу в городе Знаменка. Здание школы построено из кирпича. Пол в здании выполнен из деревянных досок, которые накрыты сверху паркетом. В подпольном пространстве находятся технические коммуникации (трубы). В школе установлены новые окна, которые имеют хорошую степень изоляции и не пропускают воздух снаружи. Вентиляционная система естественного побуждения состоит только из выходящих каналов (в рабочем режиме), расположенных в каминных трубах. Входящие каналы отсутствуют.

В ходе обследования здания была измерена мощность экспозиционной дозы внутри здания, которая составила 7-9 мкР·ч<sup>-1</sup> (что исключает стройматериалы как источник радона) и среднегодовая ЭРОА радона, которая составила 191 Бк·м<sup>-3</sup>. На втором этапе исследований проведено экспресс-измерение активностей радона в подпольном пространстве ( $A_{Rn}=1200$  Бк·м<sup>-3</sup>), отверстиях у центральной стены ( $A_{Rn}=1910$  Бк·м<sup>-3</sup>), в холле между классными комнатами и физкультурным залом, где  $A_{Rn}$  зафиксирована на уровне 400 Бк·м<sup>-3</sup>, и классной комнате № 3 за радиатором ( $A_{Rn}=596$  Бк·м<sup>-3</sup>).

Для проведения противорадоновых мероприятий администрации школы было рекомендовано установить отдушины для поступления свежего воздуха в системы вентиляции. Кроме этого, в здании рекомендовано изменить разницу давления воздуха между подполом и внутренним объемом помещения. Для этого необходимо герметизировать пол и уплотнить герметиком отверстия в точках подвода труб систем коммуникаций, а также установить радонооткачивающую систему.

Данные мероприятия были выполнены либо частично, либо полностью в рамках научно-практической программы "Стоп-радон". Нарушение строителями рекомендаций привело к неоднозначным результатам по уменьшению уровней радона. В ряде случаев противорадоновые мероприятия

привели к увеличению потока радона в здание. Общая оценка эффективности данной программы будет приведена ниже.

Выводы к главе.

1. По данным измерений радона в грунтах, их гамма-спектрометрического анализа и геоморфологических характеристик территорий для пилотного Савранского района Одесской области были созданы карты радонового потенциала.

2. Верификация полученных результатов была проведена путем сравнения уровней радона в грунтовом воздухе с ЭРОА радона в воздухе жилых зданий. Установлено, что данные ЭРОА радона в помещениях соответствовали выделенным категориями радонового потенциала.

3. По анализу основных характеристик подстилающих грунтов, типов вентиляции зданий, типов перекрытий и фундамента с подпольным пространством, был представлен ряд рекомендаций по противорадоновым мерам. Меры были адаптированы к условиям конструктивно-планировочных решений для каждого отдельного здания.

Основные результаты исследований по главе 5 опубликованы в следующих статьях:

1. Практикум по курсу "Радиоэкология" : Радон и его дочерние продукты распада / А. А. Касьяненко, В. Р. Ахмедзянов, А. Г. Платонов, О. А. Герман. – М. : РУДН, 2004. – 127 с.

2. NORM Assessment at Gas and Oil Fields in Ukraine / T. Pavlenko, M. Aksyonov, O. German, M. Friziuk, E. Fedorenko, A. Mikhajlenko // Energy, Environmental and Structural Engineering Series N 25 : Latest trends in energy, environment and development. – Salerno : WSEAS Press, 2014. – P. 213-216.

3. Вивчення досвіду картування радононебезпечних територій у пілотному Савранському районі Одеської області / О. Герман // Довкілля та здоров'я. – 2013. – № 1 (64). – С. 26-29.

4. The Ukrainian pilot project "Stop Radon" / T. Pavlenko, O. German, M. Frizyuk, N. Aksenov, A. Operchyuk // Nuclear Technology and Radiation Protection. – 2014. – Vol. 29, No. 2. – P. 142-148.

5. Radon mapping in Savran region Odessa Oblast, Ukraine : SGU-rapport 2012:9 Diarie-nr: 08-221/2010 / Britt-Marie Ek, Olga German. – Stockolm, 2010. – 45 p.

6. Картирование радонового риска - необходимый инструмент в области радиационной защиты населения / О. Герман, Т. Павленко // Гігієна населених місць. – 2008. – № 51. – С. 302-306.

7. Radon study in Ukraine / T. O. Pavlenko, N. V. Aksenov, O. A. German, M. A. Frizyuk // The 9 International Symposium on the Natural Radiation Environment : Book abstracts (Hirosaki, Japan, 22 -26 September, 2014). – Hirosaki University, 2014.

8. Дослідження вмісту радону-222 в повітрі приміщень загального призначення та житлових будинках Кіровоградської області / Т. О. Павленко, С. В. Протас, М. В. Аксьонов, О. О. Герман, А. П. Оперчук, Ю. М. Брюм // Актуальні питання гігієни та екологічної безпеки України (одинадцяті марзеєвські читання, 2015 р.) : Зб. тез доп. наук.-практ. конф. Вип. 15 (Київ, 8-9 жовтня 2015 р.) ; МОЗУ ; НАМНУ ; ДУ "ІГМЕ НАМНУ" ; ДВНЗ "Івано-Франківський нац. мед. університет". – Івано-Франківськ, 2015. – С. 37-39.

## ГЛАВА 6

## АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Закономерности формирования уровней радона в воздухе зданий и их инженерно-планировочные особенности определили выбор методов радонозащиты. Так, исследования, описанные в предыдущих двух разделах, установили, что величина потока радона во внутреннее воздушное пространство зданий зависит от геоморфологических особенностей подстилающих грунтов, типа фундамента здания, а также степени изоляции его перекрытий от грунтов и системы вентилирования помещений (см. выводы главы 4). Установлено, что при относительно равномерном распределении уровней радона в грунтовой среде (см. главу 5, рис. 5.1) при двух зонах радонового потенциала, по общепринятой классификации, радоноопасности территорий, вариабельность его активностей в воздухе соседних зданий составила один - два порядка. Такие отличия, в первую очередь, связаны с разнообразием инженерно-планировочных решений зданий и сроком их эксплуатации, который определяет процессы разрушения фундаментов, изоляции мест подвода коммуникаций и т.д., то есть, те особенности конструкции, которые влияют на поступление почвенного воздуха во внутреннюю воздушную среду здания.

Рекомендованные противорадоновые мероприятия учитывали все перечисленные аспекты. Кроме того, при их разработке были учтены и экономические аспекты данной проблемы – все рекомендованные мероприятия по возможности носили одноразовый характер и, при возможности, не были связаны с потреблением электроэнергии. Последнее условие наложило определенные ограничения на рекомендованные противорадоновые мероприятия. Чтобы оценить степень этого влияния, была проведена оценка их эффективности на примере детских дошкольных и школьных учреждений, многие из которых строились по типовым проектам. Для проекта были

выбраны школы, ЭРОА радона в которых, превысили  $300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , то есть те помещения, в которых был превышен норматив  $50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  в 6 и более раз.

### 6.1 Оценка эффективности реализации противорадоновых мероприятий в детских дошкольных и школьных заведениях Кировоградской области

С целью оценки эффективности проведенных мероприятий после их окончания в отопительный сезон в 189 школах были проведены повторные измерения ЭРОА радона в воздухе. На рис. 6.1 приведены усредненные по районам результаты измерений радона до и после проведения мероприятий. Из рисунка видно, что в среднем по районам достигнуто снижение уровней радона. Например, в результате проведенных в полном объеме мероприятий средние уровни радона в школах Новоархангельского района уменьшились в 5 раз, в Кировограде – 3,2 раза, в Ульяновском и Александровском районах – в 2,8 раза.

Анализ эффективности реализованных санитарно-гигиенических противорадоновых мероприятий установил, что в среднем радиационные риски учеников школ Кировоградской области удалось снизить на 48 %. Установлено, что только в 2 школах уровни радона сегодня соответствуют установленному НРБУ-97 -  $50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Если анализировать результаты этого этапа, условно все школы, которые участвовали в проекте, можно разделить на три категории. В первом случае, рекомендованные мероприятия были выполнены в полном объеме, во-втором – запланированные мероприятия были выполнены частично, в третьем – выполнены неправильно.

Например, для случаев, когда уровни радона были уменьшены незначительно, как правило, были неправильно проведены расчеты скорости воздухообмена в помещениях. Иногда строители по-своему усмотрению меняли тип рекомендуемых вентиляционных систем, в результате чего менялся вектор давления и радон начинал сильнее засасываться во внутреннее пространство

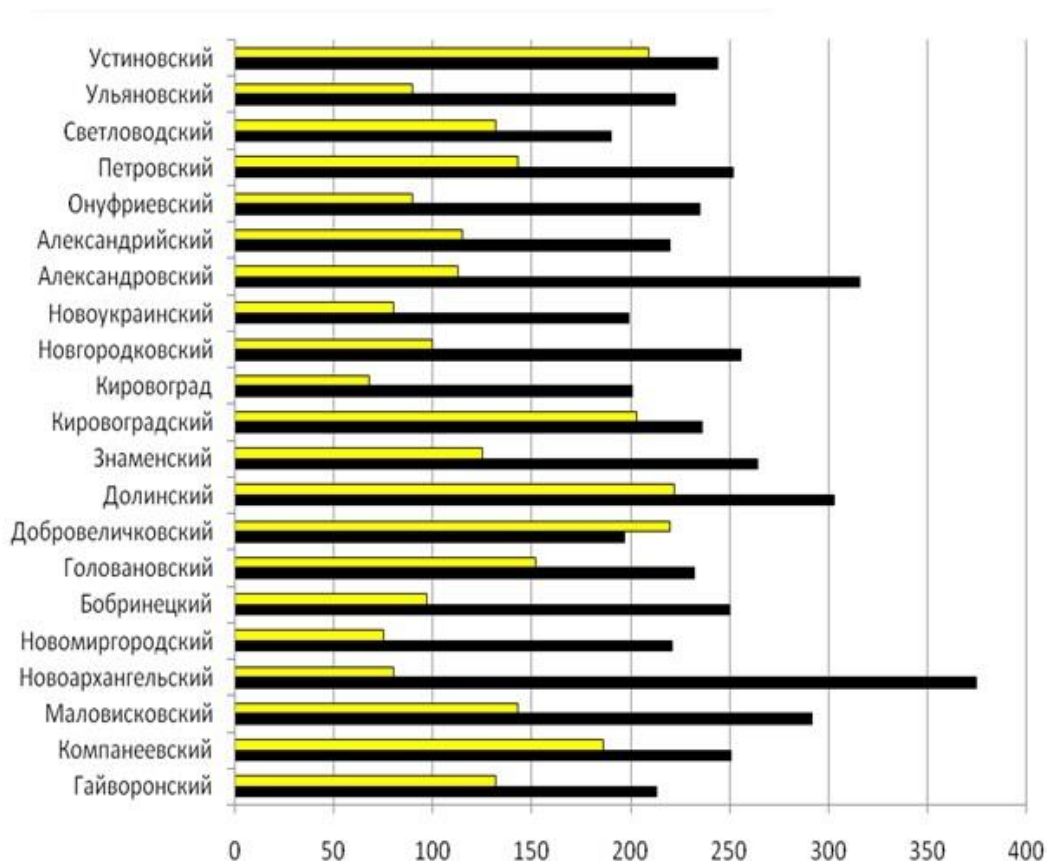
помещений. Практика показала, что выполнение работ с нарушением основных принципов радонозащиты и замена одних технических решений противорадоновых мероприятий на другие может привести к значительному ухудшению ситуации в домах.

Например, в нескольких школах уровни радона увеличились по отношению к его активностям в помещениях до реализации контрмер. В этих случаях строителями было принято решение о замене вентиляционных систем без соответствующих расчетов. Для этого в стены были вмонтированы отдушины на высоте 2 и более метров над уровнем пола. При этом не была проведена герметизация подпольного пространства и уплотнены места подвода коммуникаций. В результате поток радона во внутреннее воздушное пространство зданий увеличился вдвое.

Замена вентиляционных систем должна проводиться только после соответствующих измерений радона в грунтах, анализа их морфологических свойств и сопоставления необходимой кратности воздухообмена в помещениях с возможностями вентиляционной системы удовлетворить эти требования. И, конечно, работы должны проводить подготовленные по специальным программам специалисты.

Анализ результатов измерений показал, что уменьшить активности радона до уровня радиационно-гигиенического регламента [21] удалось только в нескольких школах. Наиболее успешными в контексте уменьшения активностей радона оказались комбинированные методы радонозащиты, которые совмещали несколько мероприятий одновременно.

Тем не менее, программа позволила значительно уменьшить радиационные риски детей. На рис. 6.1. приведены результаты анализа эффективности проведенных противорадоновых мероприятий в контексте радиационных рисков.



■ - среднее значение ЭРОА района после проведения противорадоновых мероприятий.

■ - среднее значение ЭРОА района до проведения противорадоновых мероприятий.

Рис. 6.1 Усредненные ЭРОА района в воздухе детских учреждений Кировоградской области до и после проведения противорадоновых мероприятий

По результатам измерения проведены оценки эффективных доз облучения детей, результаты которых приведено в табл. 6.1. В таблице для сравнения также приведены значения средневзвешенных доз облучения детей, которые были зафиксированы до проведения контрмер.

Для расчета доз облучения было принято, что дети проводят в школе 900 часов в год. Учитывалось также, что для детей младше 10 лет, дозовый коэффициент равен 2, по сравнению с взрослыми. Учитывалась также

этажность зданий. Как правило, младшие классы располагаются на первом этаже, критичном по активностям радона.

Таблица 6.1

**Эффективные дозы детей от радона в воздухе помещений школ до и после проведения противорадоновых мероприятий (ПрМ)**

Район	Количество школ, где проводился контроль эффективности	Эффективная доза до проведения ПрМ, мЗв·год <sup>-1</sup>	Эффективная доза после проведения ПрМ, мЗв·год <sup>-1</sup>
Александровский	3	0,93	0,49
Александровский	6	1,34	0,48
Бобринецкий	4	1,06	0,41
Гайворонский	5	0,53	0,58
Головановский	4	0,98	0,64
Добровеличковский	4	0,84	0,99
Долинский	2	1,29	0,94
Знаменский	11	1,12	0,53
г. Кировоград	10	0,85	0,29
Кировоградский	4	1,02	0,87
Компанеевский	4	1,07	0,79
Маловисковский	6	1,24	0,61
Новгородковский	3	1,09	0,42
Новоархангельский	3	1,59	0,34
Новомиргородский	8	0,94	0,32
Новоукраинский	2	0,84	0,34
Онуфриевский	6	1,00	0,38
Петровский	4	1,07	0,60
Светловодский	2	0,95	0,56
Ульяновский	3	0,94	0,38
Устиновский	3	1,03	0,89

МКРЗ оценила [68] ущерб на единицу коллективной эффективной дозы (ЭД) величиной в  $5,7 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup>, включая вклад  $5,5 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup> для случаев рака с летальным исходом,  $0,2 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup> - для тяжелых наследственных эффектов,



причем для радона в воздухе жилых помещений риски, приведенные в последних Публикациях 115 и 126 МКРЗ [10, 11], были пересмотрены в сторону увеличения (табл. 6.2).

Таблица 6.2

**Эволюция оценок величины радиационных рисков при облучении радонам**

Источник	Модель	Риск $\times 10^{-4}$ WLM <sup>-1</sup>
МКРЗ, 1993	Публикация 65 [79]	2,83
МКРЗ, 2010	Публикация 115 [11]	4,4

Примечание. WLM (рабочий уровень) в год эквивалентен ЭРОА=230 Бк·м<sup>-3</sup> в домах при коэффициенте равновесия, равном 0,4.

Переоценка рисков связана как с ревизией дозовых моделей, так и с результатами нескольких эпидемиологических исследований [4, 5, 6], по выводам которых риск рака легких увеличивается на 10 % с увеличением объемной активности радона на каждые 100 Бк·м<sup>-3</sup> при хроническом облучении в течение 30 лет. Кроме того, последние эпидемиологические исследования, которые проводились в течении 12 лет во Франции, установили устойчивую связь между радонам и лейкемией у детей [102], причем увеличение радиационных рисков на каждые 100 Бк·м<sup>-3</sup> составили 20 %. По данным аналогичных исследований [103, 104], этот прирост еще больше – 34 %. Данные выводы являются неоднозначными и требуют дальнейшего изучения этого вопроса.

В табл. 6.3 представлены результаты оценки эффективности противорадиационных мероприятий по величине уменьшения радиационных рисков для детей.

**Оценка эффективности противорадиационных мероприятий (ПрМ) в  
контексте радиационных рисков**

Район	Количество детей школьного возраста	Количество детей в школах, где проведены ПрМ	Величина риска до проведения ПрМ <sup>1</sup>	Величина радиационных рисков после проведения ПрМ <sup>1</sup>	Процент уменьшения радиационных рисков <sup>2</sup>
Александровский	17329	75	0,072	0,038	47
Александровский	4126	150	0,206	0,074	64
Бобринецкий	4097	100	0,109	0,042	61
Гайворонский	4644	125	0,068	0,074	-9
Голованеевский	4152	100	0,101	0,066	35
Добровеличковский	5439	100	0,086	0,102	-18
Долинский	5230	50	0,066	0,048	27
Знаменский	5103	275	0,316	0,150	53
г. Кировоград	35508	250	0,218	0,074	66
Кировоградский	4835	100	0,105	0,089	15
Компанеевский	4823	100	0,110	0,081	26
Маловисковский	4823	150	0,191	0,094	51
Новгородковский	2228	75	0,084	0,032	61
Новоархангельский	3305	75	0,122	0,026	79
Новомиргородский	4208	200	0,193	0,066	66
Новоукраинский	6243	50	0,043	0,017	60
Онуфриевский	2474	150	0,154	0,058	62
Петровский	3051	100	0,110	0,062	44
Светловодский	8559	50	0,049	0,029	41
Ульяновский	3618	75	0,072	0,029	60
Устиновский	1747	75	0,079	0,068	14

Примечания.

1. Величина оценивается в летальных исходах.
2. Знаком "-" в таблице обозначена величина, на которую радиационные риски увеличились.

Радиационные риски для школьников Кировоградской области рассчитывались из условия, что дети 12 лет будут учиться в школах одного и того же района области, не переезжая в другие регионы.

Анализ эффективности реализованных противорадоновых мероприятий установил, что в среднем радиационные риски для учеников 89 школ удалось снизить на 48 %. Однако, практически только в 2 школах уровни радона сегодня соответствуют установленному НРБУ-97 нормативу  $50 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ . Это свидетельствует о том, что рекомендации были выполнены не в полном объеме и носили выборочный характер. Практика показала, что выполнение работ с нарушением основных принципов радонозащиты и технологических решений противорадоновых мероприятий могут привести к значительному ухудшению ситуации. Так, в нескольких школах уровни радона увеличились по отношению к его активностям в помещениях до реализации контрмер.

6.2. Рекомендации по проведению противорадоновых мероприятий в зависимости от источников поступления радона в воздух зданий

Корреляционный анализ зависимостей уровней радона в домах от его активностей в грунтах выявил основные направления радонозащиты, которые уже на первом этапе исследований дали 50 % уменьшение радиационных рисков школьников. Рекомендованные противорадоновые мероприятия проводились для случая, когда радон в домах поступает из грунта. Однако имеется ряд регионов, где дополнительным источником радона может служить водопродная вода, которая поступает в воздух помещений из артезианских скважин, или строительные материалы. Рассмотрим эти примеры и соответствующие противорадоновые мероприятия.

*Вода.* Такая ситуация возникла в пгт. Маньковка Черкасской области, где водоснабжение ведется из артезианских скважин с повышенным содержанием радона в воде. Максимальные концентрации радона в воде скважин в

пгт. Маньковка составили  $3000 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}$  при средних значениях порядка  $1000 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}$  [105]. Исследования установили, что уровни радона в домах, водоснабжение которых ведется из артезианских скважин, значительно увеличивались и достигали  $200\text{-}300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  при включении воды. В таких случаях в качестве контрмер достаточно на входе системы водоснабжения поставить барботер или систему аэрации и проблема радона будет решена.

Иногда источником поступления радона могут быть строительные материалы. Для Украины это редкие случаи, но они возможны, если для строительства использовались не сертифицированные строительные материалы. Для того чтобы строительные материалы вносили значимый вклад в активности радона в помещении ( $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ), содержание радия-226 в них должно превышать  $80 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Если такая ситуация возникла, чтобы уменьшить уровни радона, достаточно изменить кратность воздухообмена вентиляционных систем, которая подбирается в каждом конкретном случае и зависит от размеров помещения.

Использование таких строительных материалов в конструкциях зданий в Украине запрещается НРБУ-97 и на практике не встречалось. Тем не менее, исследования, проведенные в частном жилом секторе, выявили дома, где материалы с повышенным содержанием радия-226 и тория-232 использовались для подсыпок под фундамент и отмостки. Например, в г. Днепродзержинск Днепропетровской области были выявлены дома, где для подсыпок под фундамент использовались отходы урановой добычи и производства, что привело не только к повышенным активностям радона в домах, но и к повышенным значениям мощности экспозиционной дозы, которые в несколько раз превышали установленные нормативы. Такие случаи составляют скорее исключение из правил и встречаются редко, а радон из грунта является наиболее ожидаемым источником радона в воздухе помещений.

Активный перенос радона внутрь помещений, как правило, происходит сквозь неплотности в перекрытиях и в местах соединения конструкций домов, а также поступает через коммуникационные отверстия и трещины в

перекрытиях. Движущей силой транспортировки воздуха из грунта в помещения является градиент давления, создавая так называемый "эффект вытяжной трубы", который возникает из-за разницы температур внутри и снаружи помещения [106].

Анализ гидрогеологических особенностей территорий Кировоградской и Одесской областей установил, что они расположены на осадочных четвертичных отложениях, которые могут достигать толщины 150 метров и перекрываются двумя водоносными горизонтами [99, 106, 107]. Такое строение дает достаточно большой объем грунтового воздуха, который, к тому же, является легкодоступным из-за высокой пористости и мелкого размера составляющих его минеральных частиц. Этот огромный объем воздуха легко переносится в холодное время года в помещения, неся с собой образовавшийся в породах радон.

Активный перенос радона с грунтовым воздухом может затрудняться, если грунт сильно увлажнен или влага в нем замерзла. Однако глубина промерзания почвы в средних широтах не слишком велика и, как правило, под каждым зданием накапливается достаточный объем неувлажненного грунта, которого вполне достаточно для создания свободного потока грунтового воздуха внутрь помещений.

Если измеренные среднегодовые активности радона в воздухе помещения составляют более  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , то пассивный перенос или диффузия также могут иметь место, но в таких случаях неплотности перекрытий и недостаточная изоляция грунта должны быть весьма серьезными. Такая ситуация присуща домам с деревянным полом, где пол имеет множество щелей, а пространство между полом и подстилающим грунтом не изолировано.

Большинство бетонных перекрытий дают хорошую изоляцию внутреннего пространства дома от диффузного переноса радона, даже если их толщина составляет не более 8 сантиметров и имеет большое количество трещин. По расчетам [31, 106], для домов с бетонными полами для привнесения

100 Бк·м<sup>-3</sup> в воздух помещения необходимо, чтобы его содержание в грунтовом воздухе составляло порядка 300 кБк·м<sup>-3</sup>.

В здании или помещении, где источником радона является грунтовый воздух, активность радона будет определяться как объемом грунтового воздуха, переносимого в здание, так и объемной активностью радона в воздухе грунта. Влияние будут оказывать также внутренний объем помещения и скорость воздухообмена в нем. Зная эти параметры, после измерений радона в грунтовом воздухе мы можем спрогнозировать активности радона в воздухе дома. Для этого используется зависимость, приведенная ниже.

$$C_b = \frac{1}{(\lambda + n) \cdot V} \cdot C_m \cdot L, \quad (6.1)$$

где  $C_b$  – активность радона в помещении, обусловленная грунтовым воздухом, Бк·м<sup>-3</sup>;

$\lambda$  – постоянная распада радона (0,00755);

$n$  – скорость воздухообмена в помещении, ч<sup>-1</sup>;

$V$  – внутренний объем исследуемого помещения, м<sup>3</sup>;

$C_m$  – активность радона в грунтовом воздухе, Бк·м<sup>-3</sup>;

$L$  – объем поступающего грунтового воздуха, м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>.

Ожидаемая активность радона для помещения площадью 500 м<sup>3</sup> и скорости воздухообмена 0,5 приведена в табл. 6.4. Расчеты позволяют оценить объемы грунтового воздуха, который должен попасть в помещение, чтобы объемная активность радона в доме не превышала 200 Бк·м<sup>-3</sup> (ЭРОА 80 Бк·м<sup>-3</sup>).

Необходимо отметить, что количества радона в грунтовом воздухе всегда достаточно для накапливания его активностей в помещении выше нормативного уровня при условии, что поступает достаточно большой объем воздуха из грунта. Эту закономерность подтвердили результаты измерений, проведенные в процессе исследований, которые установили, что, несмотря на небольшие активности радона в грунтовом воздухе, среднегодовые активности

радона в помещении могут быть довольно высокими. Объяснением таких результатов является наличие больших объемов воздуха в грунтах и его легкой доступностью.

Таблица 6.4

**Ожидаемая активность радона в воздухе стандартного помещения в зависимости от интенсивности воздухообмена**

Объем поступающего грунтового воздуха	Активность радона в грунтовом воздухе
0,1 м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	500 000 Бк·м <sup>-3</sup>
0,5 м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	100 000 Бк·м <sup>-3</sup>
1,0 м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	50 000 Бк·м <sup>-3</sup>
1,7 м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	30 000 Бк·м <sup>-3</sup>
2,5 м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	20 000 Бк·м <sup>-3</sup>
5,0 м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	10 000 Бк·м <sup>-3</sup>

Анализ закономерностей формирования уровней радона в зданиях при его поступлении из грунта показал, что повышенные значения ЭРОА радона фиксировались в тех домах, где более 30 % объема внутреннего воздуха поступало из подстилающего грунта. Установлено, что при средних активностях радона в грунтовом воздухе в пределах 20 000-30 000 Бк·м<sup>-3</sup> достаточно скорости поступления грунтового воздуха, равной 1-1,6 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>, чтобы активности радона в помещении приблизились к нормативным границам – 50 Бк·м<sup>-3</sup>.

Основные принципы противорадоновых мероприятий были описаны во многих практических и научных публикациях. Авторы таких публикаций предлагают стандартные решения для любого типа конструкций зданий. И, тем

не менее, конкретные решения могут быть различными и зависят, как правило, от климата и конструктивно-инженерных решений конкретных зданий.

К таким решениям относятся изоляция мест протечки грунтового воздуха в помещение, система шлангов для откачивания воздуха из-под здания, проветривание подпольного пространства, радоновые колодцы, усиление внутренней принудительной вентиляции.

При выборе метода радонозащиты, среди прочих факторов необходимо учитывать то обстоятельство, что многие мероприятия требуют дополнительных затрат (например, оплата электроэнергии) уже после их реализации, поэтому желательно выбирать такие решения, которые не предполагают расходы в дальнейшем. Выбор противорадоновых мероприятий - это по сути процедуры взвешивания эффективности метода и затрат на его реализацию и поддержание. В этом контексте противорадоновые методы можно разделить на активные (вентиляция) и пассивные (изоляция подпольного пространства). Рассмотрим преимущества и недостатки основных методов радонозащиты.

*Вентиляция.* Самый простой способ снизить активность радона в помещении – увеличить скорость воздухообмена. Если источником радона является строительный материал, то, увеличив скорость вентиляции вдвое, мы можем наполовину снизить активность радона в помещении [108]. Если источником радона является грунтовый воздух, то проветривание свежим атмосферным воздухом позволяет уменьшить градиент давления внутри помещения, и поток грунтового воздуха снизится. Однако в холодное время года такой способ может значительно понизить температуру в помещении, поддержание которой потребует дополнительных расходов на отопление, что неприемлемо для Украины. Если все же принято положительное решение о применении вентиляции, принудительное механическое вентилирование должно применяться в комбинации с теплообменником. Необходимо помнить, что в некоторых случаях такой метод может привести к еще большему повышению активностей радона в помещении за счет трудностей, которые



возникают с регулировкой объемов сбрасываемого воздуха. В этом случае при неправильной подстройке отрицательное давление внутри помещения может увеличиться, и желаемого эффекта система не принесет [31, 109].

В летнее время года или при теплом климате можно использовать вентиляторы для нагнетания внешнего атмосферного воздуха внутрь помещений, создав, таким образом, положительный градиент давления. Такой способ эффективно предотвращает засасывание грунтового воздуха в здание. Однако его нельзя применять в холодном климате или при температурах ниже 7 градусов. Это связано с тем, что внутренний воздух в доме более влажный, чем наружный, и при его продавливании через конструкции влажность будет оседать в виде конденсата. Как следствие, стены и крыша могут быстро и сильно повреждаться или покрываться грибком [56, 110].

В работе японских исследователей была проверена эффективность влияния четырех других вентилирующих устройств, доступных для установки в большинстве современных домов: кондиционера, воздухоочистителя, газового отопления и кухонной вытяжки. Исследования проводились в обыкновенных односемейных домах с нормальным режимом эксплуатации. В ходе исследования кухонная вытяжка была признана наиболее эффективной для снижения активностей радона в помещении на длительный период, в то время как кондиционер не имел особой эффективности в снижении активностей радона из-за различий в режимах его эксплуатации [111].

Необходимо отметить, что, несмотря на положительный результат, различные бытовые устройства могут быть эффективными только в режиме непрерывной эксплуатации, при этом вытяжки, кондиционеры и вентиляторы такого типа создают повышенную шумовую нагрузку и требуют значительных расходов электроэнергии.

*Стройматериалы.* Если источником радона являются стройматериалы, то самым дешевым способом уменьшить его активность является изменение кратности воздухообмена (вентиляция) в помещении. Вторым способом является замена конструкций с повышенным содержанием радия-226, который

распадаясь, выделяет радон. Иных методов с доказанной эффективностью не существует. Некоторое время назад в продаже были так называемые радоновые обои, изоляторы и тому подобное, но их применение, при тщательной проверке, не дало положительного результата.

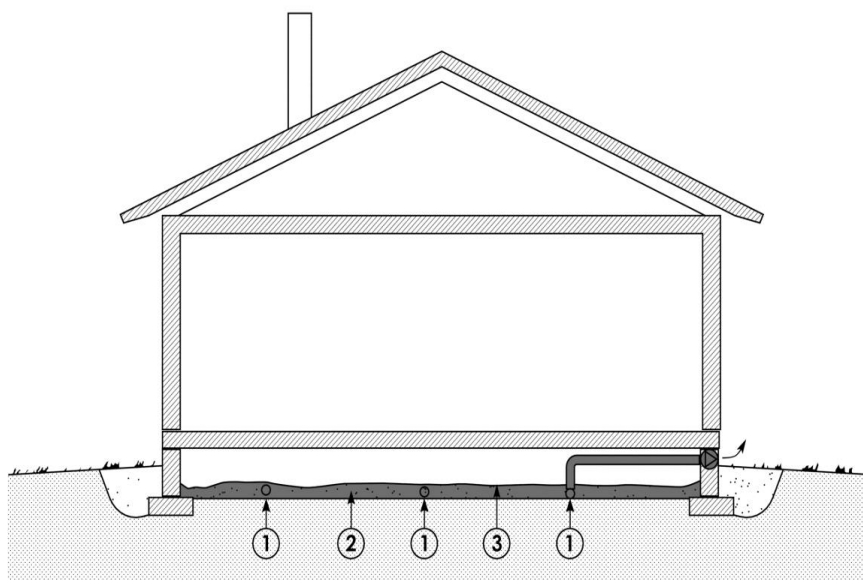
Некоторые методы противорадоновых мероприятий определяются конструктивными особенностями зданий. Например, здания с подпольным пространством.

В некоторых странах, например, в Германии и Великобритании, популярны радоновые барьеры или мембраны. Они состоят из пластиковых или резиновых мембран и наносятся прямо на грунт под фундамент или на перекрытия. Для этого метода очень важна герметичность покрытия и плотность его прилегания ко всем конструкциям [112]. В случаях, когда в зданиях имеется подпольное пространство, очень трудно провести хорошую и полную изоляцию пола. Снизить уровни радона возможно путем вентиляции самого подпольного пространства, однако, в холодном климате это приводит к дополнительному охлаждению полов в доме, кроме того, возникает риск промерзания водопроводных труб.

В случае, если в подпол можно добраться (часто при смене напольного покрытия), целесообразно уложить пленочное покрытие толщиной не менее 0,3 мм и хорошо закрепить и изолировать края пленки (рис. 6.2). Сама пленка не является полностью радононепроницаемой и некоторое количество радона может просачиваться через микропоры, но эффективность ее велика и большинство атомов радона все-таки будут задерживаться в воздухе под пленкой.

Эффективность такой пленочной изоляции можно еще увеличить, если уложить под ней дренажные трубы из ПВХ диаметром примерно 100 мм. Таким образом, под пленкой создается более низкое давление и предотвращает засасывание грунтового воздуха в подпол и далее в помещение, а само подпольное пространство при этом не вентилируется и не замерзает [106].

Если воспользоваться предыдущим методом уменьшения уровней радона не представляется возможным, в доме можно установить радонооткачивающие системы (рис. 6.3). В большинстве случаев это наиболее эффективный и дешевый способ снижения активностей радона в воздухе помещений.



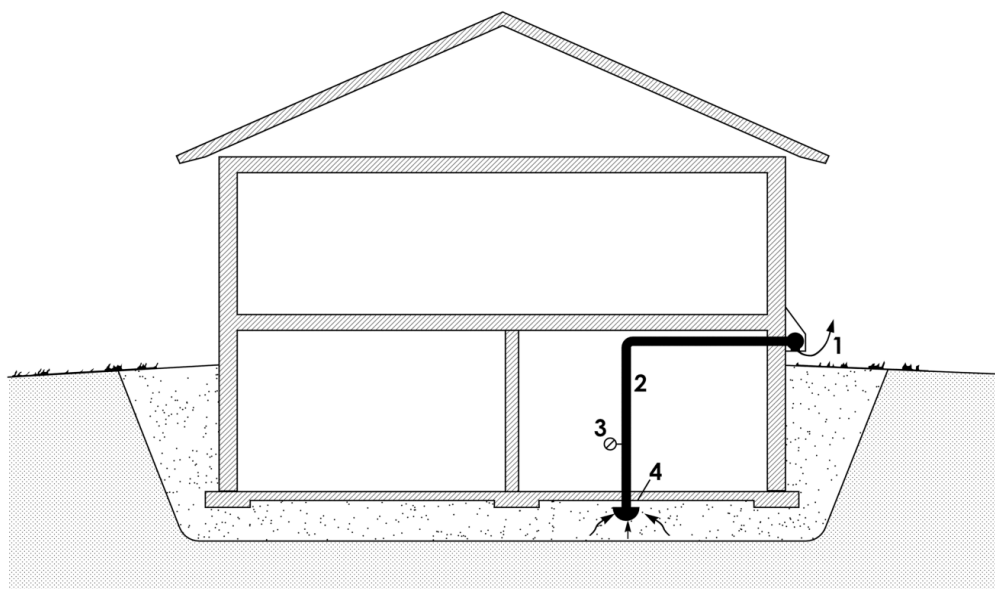
- 1 – отводная труба с вентилятором;
- 2 – дренажные трубки диаметром 100 мм;
- 3 – пленка толщиной не менее 0,3 мм

Рис. 6.2 Система радонозащиты для дома с подпольным пространством

Такой способ используется в зданиях с бетонными перекрытиями на первом этаже или в подвале. Метод основан на принципе снижения давления воздуха под зданием для того, чтобы грунтовый воздух, содержащий радон, не засасывался в помещения.

Система радонооткачивания, по сути, состоит из вентилятора мощностью 75 Ватт, присоединенного к трубам, по которым идет откачивание воздуха из грунта под домом, его отведение от дома и сбрасывание в атмосферу.

Труба устанавливается в отверстие, проделанное в перекрытии до глубины капиллярного слоя гравийной подсыпки или другого наполнителя под зданием. Диаметр ямки в насыпке делается радиусом примерно в 30 см. Такая конструкция необходима для перераспределения силы откачки воздуха на больший радиус, чтобы предотвратить прокачку воздуха по капиллярным системам грунта или наполнителя фундамента.



- 1 – канальный вентилятор;
- 2 – оцинкованная труба или труба из ПВХ диаметром 70-110 мм, изолированная от просачивания конденсата;
- 3 – манометр для непрерывного контроля перепадов давления;
- 4 – точка всасывания воздуха под фундаментом.

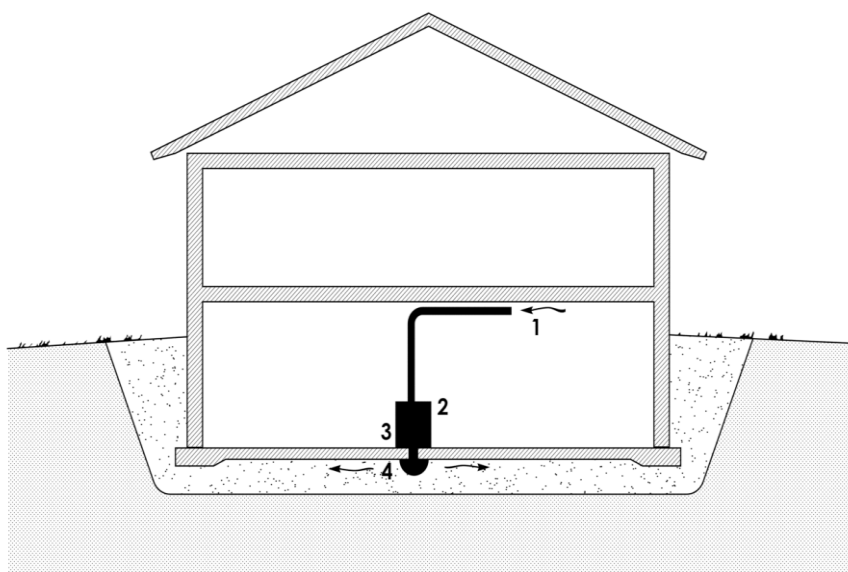
Рис. 6.3 Схема установки радонооткачивающей системы

Во избежание вбрасывания воздуха, насыщенного радоном, обратно в помещение другой конец трубы выводится на улицу, где к трубе подсоединяется вытяжной вентилятор. Диаметр труб должен быть не менее 75 мм.

Количество точек или лунок для заглубления трубы зависит от площади фундамента дома и типа конструкций перекрытий.

Иногда установки для откачивания воздуха не работают или не дают желаемого эффекта. Такое возможно, например, если из грунта идет природный поток воздуха, особенно часто это случается, если дом построен над гравийными или валунными скоплениями, или на вершине холма.

Создание воздушной подушки под домом возможно при помощи трубы и присоединенного в ней вентилятора, но в данном случае вентилятор работает на нагнетание воздуха под здание. В этом случае воздух грунта вентилируется воздухом из помещения и создается его разбавление. Таким образом, грунтовый воздух, попадающий в помещение, будет содержать очень малые активности радона (рис. 6.4).

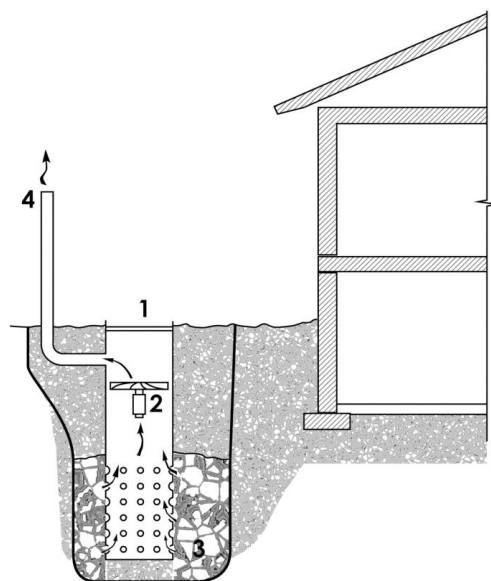


- 1 – место закачки в трубу отработанного воздуха из помещения;
- 2 – пылевой фильтр для предотвращения забивания грунтовых пор;
- 3 – вентилятор;
- 4 – выемка для перераспределения давления

Рис. 6.4 Схематичное изображение создания воздушной подушки под фундаментом здания

При использовании воздушной подушки в трубе перед вентилятором дополнительно устанавливают пылевые фильтры, а также регулировку потока воздуха. Эти меры необходимы для предотвращения забивания грунтовых капилляров, а также помогают избежать перемешивания грунтового воздуха с воздухом в помещениях. Кроме того, регулировка мощности потока воздуха позволяет избежать откачки воздуха из ванной и туалета, и его переноса в жилые комнаты [112].

В случае, когда противорадоновые мероприятия реализуются для зданий, построенных на мощном слое пористых материалов с высокой воздухопроницаемостью, например, гравийные формирования, морены, наиболее эффективным противорадоновым мероприятием является установка "радоновых колодцев". "Радоновый колодец" (рис. 6.5) состоит из цилиндра диаметром 40-100 см, который располагают в шурфе глубиной 4 метра.



- 1 – крышка радонового колодца для защиты от осадков;
- 2 – вентилятор;
- 3 – грунтовый воздух, содержащий радон;
- 4 – отводная труба для сбрасывания откаченного грунтового воздуха

Рис. 6.5 Схема конструкции "радонового колодца" [87]

Материал для изготовления цилиндра должен иметь высокие устойчивые свойства, например, стекловолоконный пластик. На конце цилиндра, обращенного ко дну колодца, проделываются отверстия для того, чтобы как можно больше по объемам грунтового воздуха закачивалось в трубу. В колодец устанавливается вентилятор, мощность которого рассчитывается в зависимости от активностей радона в грунтовом воздухе. В центральную трубу устанавливается труба для сброса воздуха, которая на 2-3 метра возвышается над поверхностью земли.

"Радоновые колодцы" размещают снаружи на некотором расстоянии от здания. Колодец создает отрицательное давление воздуха в окружающем грунте и предотвращает его засасывание внутрь здания. По данным автора этого метода, "радоновый колодец" очень эффективный способ и при большой мощности вентилятора позволяет снизить активности радона даже в прилежащих домах [87].

### 6.3 Рекомендации по противорадоновым мероприятиям для новых зданий

В заключение будут приведены рекомендации для новостроек на радоноопасных территориях.

В этом случае, если дом только строится, противорадоновые мероприятия можно заложить в конструкцию дома. Такой подход наиболее дешевый, потому что такую систему радонозащиты можно активизировать в любой момент.

Кроме того, уже на стадии строительства рекомендуется применять надежные бетонные перекрытия толщиной не менее 14 см, изолировать стены и стыки конструкций фундамента, особенно если дом расположен на участках повышенного радонового риска.

При выборе участка под застройку необходимо исследовать грунт и проанализировать его геоморфологические особенности. Результатом такого исследования является заключение о необходимом уровне радонозащиты.

Во многих странах мира (Канада, Швеция, Финляндия, Чехия, Норвегия, Германия, Ирландия) существуют государственные требования о проведении исследования уровней радона в грунте до начала строительства зданий [113, 114]. Такой подход позволяет значительно сэкономить средства на противорадоновые мероприятия, закладывая адекватную радонозащиту еще на стадии планирования.

В табл. 6.5 приведены результаты анализа и оценка эффективности противорадоновых мероприятий, которые применяются при строительстве новых зданий.

Необходимо отметить, что выбор противорадоновых мероприятий, соответствующие им планирование и расчеты, а также реализация радонозащиты на практике должны осуществляться профессионалами. Во многих странах существуют фирмы, которые не только специализируются на таких видах работ, но и проводят гарантийные работы и поддерживают активные системы противорадоновых установок в рабочем состоянии.

После реализации противорадоновых мероприятий в большинстве стран мира рекомендуют регулярно (хотя бы раз в 5 лет) проводить измерения в домах, где проведены противорадоновые мероприятия. Это связано с тем, что может меняться режим эксплуатации зданий, нарушаться плотность и изолирующие свойства конструкций и материалов. Кроме того, ведение работ и эксплуатация прилежащих территорий могут оказывать значимое влияние на свойства грунта и доступность радона в нем.

На рис. 6.6 представлено одно из наиболее эффективных конструктивных решений противорадоновых мероприятий, которые закладываются при строительстве.

Перед закладкой фундамента на грунт укладываются перфорированные трубы (отверстиями к грунту), к которым присоединяется вентиляционная система.



**Эффективность различных противорадоновых мероприятий для  
новостроек [115]**

Техническое решение	Эффек- тивность	Условия применения
Откачка радона из-под бетонных перекрытий	50 – 99 %	Эффективно, если воздух может легко откачиваться
Пассивное продувание под бетонным перекрытием	30 – 70 %	Наиболее эффективный метод для холодного климата. Однако эффективность уменьшается, если используется активное откачивания воздуха
Откачивание воздуха под мембраной (пленкой) в подполье	50 – 99 %	Меньше потерь тепла, чем при естественной вентиляции. Высокая эффективность в холодное время года
Естественное вентилирование подпольного пространства	0 – 50 %	Потеря тепла
Изоляция путей поступления радона в помещение	–	Эффективность варьирует. Метод применим в комбинации с любым другим
Естественное проветривание помещений	Варьирует	Не дает постоянного желаемого эффекта и обуславливает большие потери тепла в холодное время года
Воздушная подушка	50 – 99 %	Эффективен в изолированных от внешнего воздуха и верхних этажей фундаментах или подвалах

В зависимости от активностей радона в грунтовом воздухе и типа почвы рассчитывается мощность вентиляционной системы и выбирается ее тип. Эта система может находиться в неактивном состоянии, пока конструкции фундамента дома не пропускают радон. В случае обнаружения высоких

активностей радона, вентиляционная система легко подключается и обеспечивает откачку грунтового воздуха.

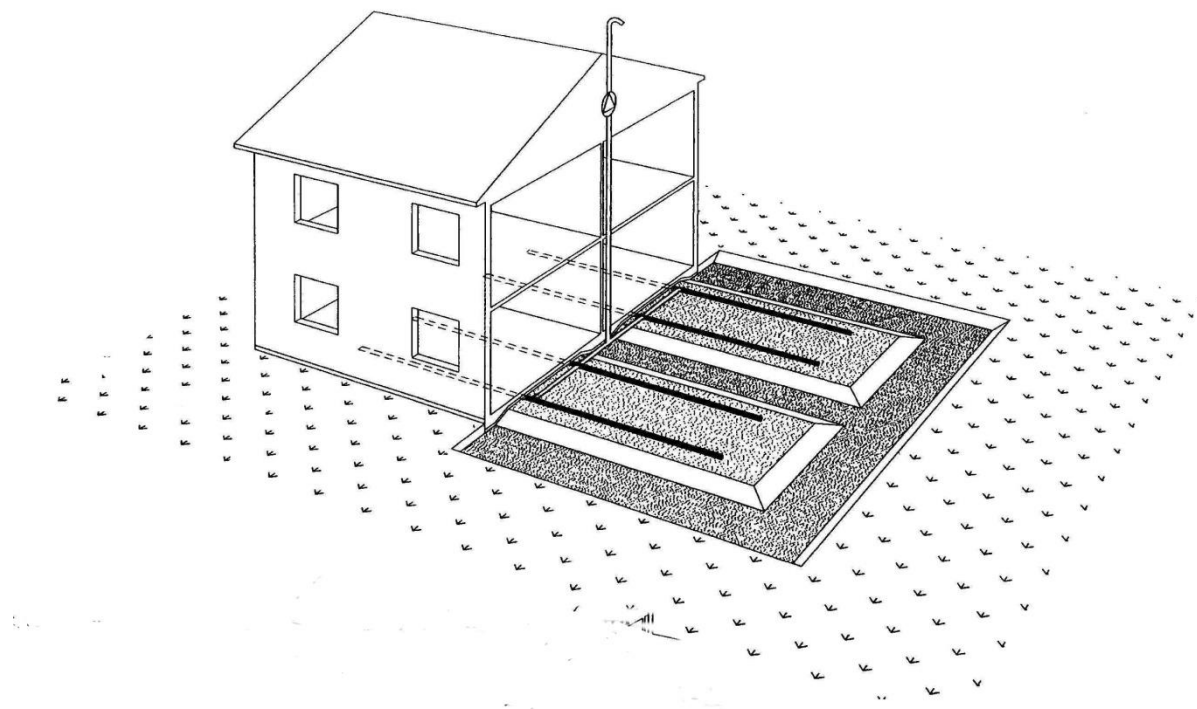


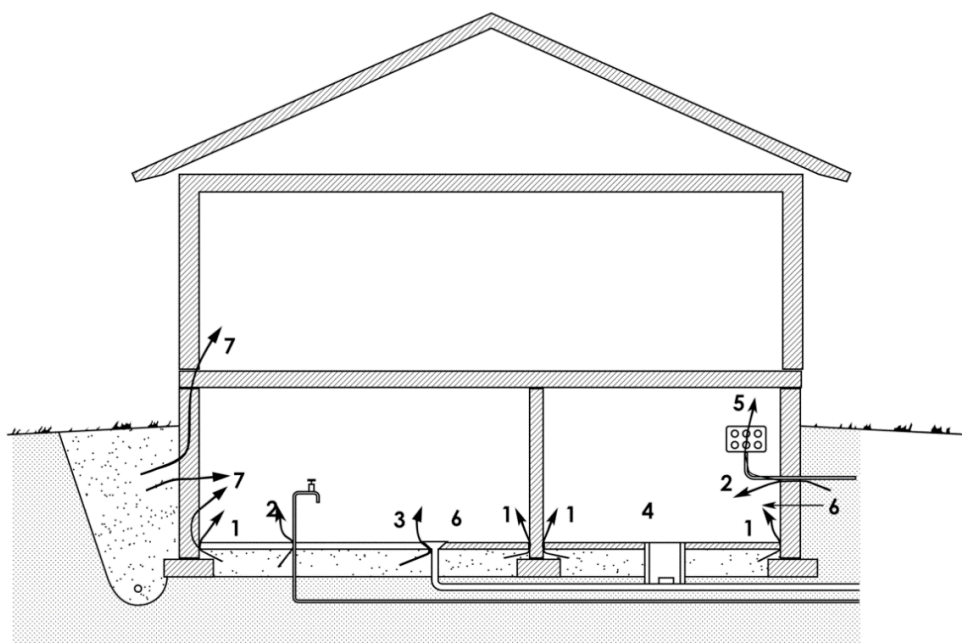
Рис. 6.6 Конструкция нового дома с системой радонозащиты

Старение конструкций, нарушение герметизации полов, мест подвода коммуникаций, использование некачественных материалов со временем приводят к росту потока радона в воздух зданий, поэтому в регулирующих или нормативных документах по радонозащите многих стран рекомендуется не реже 1 раза в 5 лет проводить контрольные измерения радона. Если измерения установили повышенные активности радона в помещении, в первую очередь, основные действия должны быть направлены на обнаружение источника просачивания грунтового воздуха и его устранения.

На рис. 6.7 схематически изображены типичные места просачивания грунтового воздуха. После определения всех мест просачивания, эти места изолируют, используя пластичные материалы. Такие материалы как цемент, привычные для Украины, при проведении данных работ лучше не

использовать, так как цемент усыхает и может оставить неплотности и трещины, что сведет эффективность проведенных мероприятий к нулю.

Необходимо отметить, что иногда не удастся найти очевидные места просачивания грунтового воздуха. В таком случае можно предположить, что данный эффект связан с пористостью строительных материалов (например, шлакоблоков) фундамента и стен. В этом случае изоляции может быть недостаточно и более эффективным мероприятием будет установка труб для откачивания воздуха из подпольного пространства (см. рис. 6.2 и 6.3) [106].



- 1 – места протечек радона между плитами пола и стенами;
- 2 – негерметичные участки вдоль труб водопровода и канализации;
- 3 – негерметичные участки вокруг скважин;
- 4 – негерметичные участки вокруг люка канализации;
- 5 – негерметичные участки в местах прокладки электропроводки;
- 6 – трещины в стенах при усадке, сжатии здания;
- 7 – воздухопроницаемые строительные материалы, такие как керамзит, полые блоки, швы и т. п.

Рис. 6.7 Источники поступления радона из грунта

### Выводы к главе.

1. Анализ эффективности противорадоновых мероприятий установил, что уровни радона в 89 школах в целом были уменьшены на 49 %. Эффективность варьировала от 10 % до 70 %. В 4 школах уровни радона увеличились по отношению к первоначальным значениям.

2. Низкая эффективность реализации контрмер свидетельствует о нарушении строителями рекомендаций по радонозащите. Тем не менее, величина радиационных рисков школьников 189 школ, в которых были проведены повторные измерения ЭРОА радона в воздухе помещений после реализации противорадоновых мероприятий, дает возможность прогнозировать снижение смертности от онкозаболеваний в среднем на 1 случай в год, что в относительных единицах составляет порядка 10 случаев в год на 100 тысяч человек.

Основные результаты исследований по главе 6 опубликованы в следующих статьях:

1. Вимоги до організації просвітницької роботи з населенням щодо радіаційних ризиків опромінення / Т. О. Павленко, М. В. Аксьонов, М. А. Фризюк, О. І. Турос, О. О. Герман // Гігієна населених місць. – 2011. – № 57. – С. 276-280.

2. The Ukrainian pilot project "Stop Radon" / Т. Pavlenko, O. German, M. Frizyuk, N. Aksenov, A. Operchuk // Nuclear Technology and Radiation Protection. – 2014. – Vol. 29, No. 2. – P. 142-148.

3. Методи протирадонового захисту будівель (огляд) / Т. О. Павленко, М. В. Аксьонов, М. А. Фризюк, О. І. Турос, О. О Герман // Гігієна населених місць. – 2012. – № 60. – С. 218-222.

4. Радон. Что нужно знать, чтобы обезопасить себя и свою семью? : Буклет / Т. А. Павленко, М. А. Фризюк, Н. В. Аксенов, О. А. Герман. – К. : Интерпресс ЛТД, 2014. – 6 с.

## ВЫВОДЫ

В диссертации на основе теоретического обобщения и экспериментального комплексного исследования радиационно-гигиенических параметров воздуха помещений и подстилающих грунтов выявлены закономерности формирования уровней радона в воздухе типичных сельских зданий для его основного источника поступления – подстилающего грунта, а также оценена эффективность противорадоновых мероприятий для типовых школ в контексте уменьшения радиационных рисков для детей и соответствующего им уровня онкозаболеваемости.

1. Установлено, что средние значения активностей радона в воздухе различных видов грунта радоноопасных территорий Украины варьировали от 14 до 40  $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Концентрации радия-226 в различных типах грунтов варьировали от 16 до 41  $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  и практически не отличались от средних значений по Украине, что свидетельствует о транзиторном характере основного потока радона. Среднегеометрическое значение ЭРОА радона в домах Савранского района Одесской области составило 75  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  при стандартном отклонении 54  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , для Кировоградской области – 108  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  и 117  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , соответственно.

2. Доказаны устойчивые зависимости уровней радона от геоморфологических особенностей грунтов и конструктивно-планировочных решений зданий, а именно: типа дома, который обусловлен методами строительства и конструкцией фундамента ( $F=8,23$ ;  $p<0,001$ ); вида вентиляции дома, то есть наличия или отсутствия принудительной вентиляции ( $F=11,95$ ;  $p<0,001$ ); типа подстилающих грунтов под домом ( $F=3,65$ ;  $p=0,003$ ). Доказана корреляционная зависимость активностей радона в воздухе зданий от двух параметров: системы вентиляции помещений ( $F = 11,97$ ,  $p < 0,001$ ) и типа грунта ( $F = 3,65$ ,  $p = 0,003$ ). Эти параметры напрямую связаны со скоростью поступления радона в воздух здания и определяют выбор типа противорадоновых мероприятий.

3. Установлено, что метод картирования радоновых рисков может использоваться в качестве инструмента оптимизации радиационной защиты населения от радона при оценке радоноопасности участков, выделенных под строительство, и при выборе противорадоновых мероприятий.

4. Доказано, что наиболее эффективными противорадоновыми мерами для сельского жилого фонда являются изоляция подстилающих грунтов от внутреннего пространства помещений с параллельной заменой систем вентиляции в здании. Эти меры носят разовый характер и практически не требуют дополнительных затрат на электроэнергию.

5. Установлено, что в зависимости от объемов и полноты выполненных рекомендаций эффективность противорадоновых мероприятий составила 49 % и на уровне отдельных районов варьировала от 20 до 80 %. Определены факторы, которые повлияли на эффективность контрмер, а именно: ошибки строителей при оценках величины потока радона, неверные расчеты мощности вентиляционных систем, нарушения при выполнении строительных работ.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При выборе противорадоновых мероприятий должны учитываться тип грунтов как показатель доступности грунтового воздуха и конструктивные особенности фундамента дома и перекрытий.

2. На стадии планирования противорадоновых мероприятий необходимо обязательно проводить комплекс измерений активностей радона в грунтовом воздухе и оценивать геоморфологические особенности грунта вместе с анализом конструктивных особенностей здания.

3. Опыт реализации противорадоновых мероприятий доказал острую необходимость подготовки специалистов по противорадоновым мероприятиям (радоновых консультантов) и организации научно-просветительской работы с населением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. UNSCEAR 2000 Report: Annex B. Exposure from natural radiation sources / United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York : United Nations, 2000. – 74 p.
2. UNSCEAR 2006 Report: Annex E: Source-to-effects assessment for radon in homes and workplaces / United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York : United Nations, 2009. – 138 p.
3. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies / S. Darby, D. Hill, A. Auvinen et al. // British Journal of Medicine. – 2005. – Vol. 330. – 223 p.
4. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies / J. H. Lubin, Z. Y. Wang, J. D. Boice et al. // International Journal of Cancer. – 2004. – Vol. 109. – P. 132-137.
5. Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe / S. Darby, D. Hill, A. Auvinen et al. // Scand. J. Work Environ. Health. – 2006. – № 32, suppl. 1. – P. 1-84.
6. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer / D. Krewski, J. H. Lubin, J. M. Zielinski et al. // J. Toxicol. Environ. Health. – 2006. – № 69. – P. 533-597.
7. Marsh J. W. A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny / J. W. Marsh, M. R. Bailey // Radiat. Prot. Dosim. – 2013. – № 157. – P. 499-514.
8. Lung cancer in French and Czech uranium miners – risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure / L. Tomasek, A. Rogel, M. Tirmarche et al. // Radiat. Res. – 2008. – № 169. – P. 125-137.

9. Increasing lung cancer and risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany / H. Wichmann, A. Rosario, I. Heid et al. // *Health Phys.* – 2005. – Vol. 88. – P. 71-79.
10. ICRP Publication 126 : Radiological protection against radon exposure // *Ann. ICRP.* – 2014. – Vol. 43, №3. – 73 p.
11. ICRP Publication 115 : Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon // *Ann. ICRP.* – 2010. – Vol. 40, № 1. – 64 p.
12. Domestic radon and childhood cancer in Denmark / O. Raaschou-Nielsen, C. E. Andersen, H. P. Andersen et al. // *Epidemiology.* – 2008. – Vol. 19, № 4. – P. 536-543.
13. Residential radon and cancers other than lung cancer: a cohort study in Galicia, a Spanish radon-prone area / R. Barbosa-Lorenzo, J. M. Barros-Dios, M. RaícesAldrey et al. // *Eur J Epidemiol.* – 2016. – March. - P. 1-5.
14. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. – Vienna : IAEA, 2014. – 436 p. – (General Safety Requirements ; No. GSR Part 3).
15. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom [Electronic resource] // *Official Journal of the European Union.* – 17.1.2014. – 73 p. – Available at : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF>.
16. Кравченко Н. И. Рабочие средства измерений активностей радона и его дочерних продуктов распада / Н. И. Кравченко, В. В. Скляр, Л. Н. Яковлева // *Украинский метрологический журнал.* – 1998.– № 4. – С. 40-44.
17. Pavlenko T. A. Indoor <sup>222</sup>Rn levels and irradiation doses on the territory of Ukraine / T. A. Pavlenko, I. P. Los // *Radiation Measurements.* – 2000. – Vol. 25.– № 1-4. – P. 595-600.



18. Pavlenko T. A. Exposure doses due to indoor Rn-222 in Ukraine and basic directions for their decrease / T. A. Pavlenko, I. P. Los, N. V. Aksenov// Radiation Measurements. – 1997. – Vol. 28, № 1-6. – P. 733-738.
19. Павленко Т. О. Рівні радону в повітрі будинків України / Т. О. Павленко // Довкілля та здоров'я. – 2007. – № 2. – С. 22-25.
20. Павленко Т. О. Наукове обґрунтування системи радіаційного захисту населення України від радону-222 : автореф. дис. канд. технічн. наук. – К., 1996. – 19 с.
21. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) : державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. – К., 2000. – 135 с.
22. Сердюк А. М. Розробка концепції державної науково-практичної програми «РАДОН» / А. М. Сердюк, І. П. Лось, Т. О. Павленко // Наукові засади Міжгалузевої комплексної програми «Здоров'я нації» : зб. наук. пр. – К. : Деркул, 2007. – С. 256-261.
23. The Norwegian radon mapping and remediation program / C. L. Jensen, T. Strand, G. Rambergetal // Processing of the Third European IRPA Congress (Helsinki, Finland, 14-18 June 2010). – Helsinki, 2010. – P. 488-677.
24. Arvela H. Radonsanering av bostäder / H. Arvela, H. Reisbacka ; STUKA. – Helsinki : Helsingfors, 2009. – 132 p.
25. ICRP Publication 50 : Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters // Ann. ICRP. – 1988. – Vol. 17, № 1. – 76 p.
26. ICRP Publication 39 : Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation // Ann. ICRP. – 1984. – Vol. 14, № 1. – 312 p.
27. Malmqvist L. Expositionsratens beroende av byggnadsmaterials densitet, tjocklek och aktivitetsinnehåll / L. Malmqvist ; Statens Strålskyddsinstitut. – Stockholm, 1974. – 29 p.
28. Hultqvist B. Studies of naturally occurring ionizing radiations / B. Hultqvist. – Stockholm : Kungliga vetenskapliga akademins handlingar, 1956. – 56 p.

29. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы / под ред. Р. М. Алексахина. – Москва : Наука, 1990. – 358 с.
30. U.S. Geological Survey – The Geology of Radon [Electronic resource]. – Available at : <http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon/3.html>.
31. Clavensjö B. Radonboken – Nya byggnader / B. Clavensjö, G. Åkerblom. – Stockholm : FORMAS, 2004. – 106 p.
32. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne / G. Ielsch, M. E. Cushing, Ph. Combes, M. Cuney // Journal of Environmental Radioactivity. – 2010. – № 101. – P. 813-820.
33. Suksi J. Selective extraction in uranium migration studies – findings from a natural analogue study at Palmottu / J. Suksi, T. Ruskeeniemi, L. Saarinen // The Palmottu analogue project : progress report 1993. The behaviour of natural radionuclides in and around uranium deposits : Nr. 7 /ed. by T. Ruskeeniemi et al. – Helsinki, 1993. – P. 65-75.
34. Tieh T. T. Release of uranium from granitic rocks during in situ weathering and initial erosion (central Texas) / T. T. Tieh, E. B. Ledger, M. W. Rowe // Chemical Geology. – 1980. – № 29. – P. 227-248.
35. Arvela H. Radon prevention in new construction in Finland: A Nationwide sample survey in 2009 / H. Arvela, O. Holmgren, H. Reisbacka // Radiation Protection Dosimetry. – 2012. – № 148(4). – P. 465-474.
36. Otton J. K. The geology of radon [Electronic resource] / J. K. Otton, L. C.S. Gundersen, R. R. Schumann ; U.S. Government Printing Office. – Available at : <http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon>.
37. The European map of the geogenic radon potential / V. Gruber, P. Bossew, M. De Cort, T. Tollefsen // J. Radiol. Prot. – 2013. – № 33. – P. 51–60.
38. From radon hazard to risk prediction - based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany / J. Kemski, R. Klingel, A. Siehl, M. Valdivia-Manchego // Environ. Geol. – 2009. – № 56. – P. 1269–1279.

39. Palermi S. Radon mapping in Abruzzo, Italy [Electronic resource] / S. Palermi, A. Pasculli // Proceedings of the 4th Canadian conference on geohazards: from causes to management. – Québec : Presse de l'Université Laval, 2008. – 594 p. – Available at : <http://www.geohazard.ggl.ulaval.ca/alea/palermi.pdf>.
40. Mustonen R. Building materials as sources of indoor exposure to ionizing radiation / R. Mustonen ; Radiation and Nuclear Safety Authority. – Helsinki, 1995. – 25 p.
41. O'Brian K. The effect of the male-female body-size difference on absorbed dose rate distributions in humans from natural gamma rays / K. O'Brian, R. Sanna // Health Phys. – 1978. –Vol. 34. – P. 107-109.
42. Radiation protection information: naturally occurring radiation in the Nordic countries: levels [Electronic resource] / The Radiation Protection Institutes in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. – Available at : [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/16/034/16034499.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/16/034/16034499.pdf).
43. Mustonen R. Natural radioactivity in and radon exhalation from Finish building materials / R. Mustonen // Health Physics. – 1984. –Vol. 46. – P. 1195-1203.
44. Ukrainian experience of monitoring of radiation exposure of population determined by building materials / T. Pavlenko, O. German, A. Serdyuk et al. // Processing of Third European IRPA Congress. – Helsinki, Finland, 2010. – P. 1070-1077.
45. Buzinny M. A New approach to determining  $^{222}\text{Rn}$  in air using liquid scintillation counting in liquid scintillation spectrometry / M. Buzinny // Radiocarbon. – 1996. – P. 137-140.
46. Костенецкий М. И. Радиоактивность питьевой воды подземных источников и дозы облучения населения / М. И. Костенецкий, А. И. Севальнев // АКВА Украина – 2005 : материалы III Международного Водного Форума. – К., 2005. – С. 229-232.
47. Linden A. Utvärdering av radonavskiljare. Effekt på radon i dricksvatten från bergborrade brunnar : SSI rapport 97:01 / A. Linden. – Stockholm, 1997. – 72 p.

48. Indoor radon surveys in the U.K. / A. Wrixon, L. Brown, K. Cliff et al. // Radiat. Prot. Dosimetry. – 1998. – № 7. – P. 321-325.
49. Characteristics of indoor radon and its progeny in a Japanese dwelling while using air appliances / C. Pornnumpa, S. Tokonami, A. Sorimachi, C. Kranrod // Radiat Prot Dosimetry. – 2015. – Vol. 167, № 1-3. – P. 87-91.
50. Measurements of radon and thoron progeny concentrations in dwellings of Tehri Garhwal, India, using LR-115 deposition-based DTPS/DRPS technique / M. Prasad, M. Rawat, A. Dangwa et al. // Radiat Prot Dosimetry. – 2015. – Vol. 167, N 1-3. – P. 102-106.
51. Radon [Electronic resource]. – Available at : <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/Radon>.
52. Radon [Electronic resource]. – Available at : <http://www.stuk.fi/web/sv/teman/radon>.
53. Radon [Electronic resource]. – Available at : <http://www.boverket.se/sv/sok/?query=radon>.
54. Лось И. П. Существующие дозы облучения населения Украины / И. П. Лось, Т. А. Павленко // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. – № 1. – С. 18-22.
55. Павленко Т. А. Ограничение облучения техногенно усиленными источниками природного происхождения / Т. А. Павленко, И. П. Лось // Гигиена и санитария. – 2005. – № 2. – С. 3-6.
56. Классификационные признаки для картирования радонового риска на территории Гомельской и Могилевской областей Республики Беларусь / Л. Чунихин, А. Карабанов, А. Беляшов и др. // Вісник Львівського університету. – 2010. – № 45. – С. 70-77.
57. German O. Radon in dwellings in the Republic of Kalmykia. Results from the National Radon Survey 2006-2007 : Publication of SSM / O. German, G. Åkerblom, I. Stamat. – Stockholm, 2009. – 40 p.
58. Clavensjö B. Measures against radon / B. Clavensjö, G. Åkerblom. – Stockholm : Formas, 2007. – 140 p.

59. Radon and lung cancer risk: a joint analysis of 11 underground mines studies / Public Health Service ; National Institutes of Health. – NIH Publication. – 1994. – N 94-36444. – 185 p.
60. Cohen B. L. Lung cancer rate vs mean radon level in US countries of various characteristics / B. L. Cohen // Health Phys. – 1997. – Vol. 72. – P. 114-119.
61. Residential radon exposure and lung cancer: variation risk estimates using alternative exposure scenarios / R. W. Field, B. J. Smith, D. J. Steck et al. // Expo. Anal. Environ. Epidemiol. – 2002. – Vol. 159. – P. 261-271.
62. Sources and effects of ionizing radiation : UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008). – New York : UN, 2010. – Vol. 1, Annex B. – 245 p.
63. ICRP Publication 66 : Human respiratory tract model for radiological protection // Ann. ICRP. – 1994. – Vol. 24, № 1-3. – 482 p.
64. Harley N. H. The variability in radon decay product bronchial dose / N. H. Harley, B. S. Cohen, E. S. Robbins // Environ. Int. – 1996. – № 22 (Suppl. 1). – P. 959-964.
65. Porstendorfer J. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products / J. Porstendorfer // Radiat. Prot. Dosim. – 2001. – № 94. – P. 365- 373.
66. Winkler-Heil R. Comparison of modelling concepts for radon progeny lung dosimetry / R. Winkler-Heil, W. Hofmann // High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects : Proceedings of Fifth International Conference (September 2000, Munich). – Amsterdam : Elsevier, 2000. – P. 169-177.
67. Comparison of radon lung dosimetry models for the estimation of dose uncertainties / R. Winkler-Heil, W. Hofmann, J. W. Marsh et al. // Radiation Protection Dosimetry. – 2007. – № 127. – P. 27-30.
68. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года : пер. с англ. / под ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. – М. : Алана, 2009. – 344 с.

69. Alavanja M.C. Biologic damage resulting from exposure to tobacco smoke and from radon: implication for preventive interventions / M. C. Alavanja // *Oncogene*. – 2002. – Vol. 21, № 48. – P. 65-75.
70. De Groot P. P. Lung cancer epidemiology, risk factors, and prevention / P. P. de Groot, R. F. Munden // *Radiology Clinic North American*. – 2002. – № 50 (5). – P. 63-76.
71. Klammer H. Evidence of an adaptive response targeting DNA nonhomologous end joining and its transmission to bystander cells / H. Klammer, M. Kadhim, G. Iliakis // *Cancer Research*. – 2010. – № 70 (21). – P. 8498-8506.
72. Long-term genomic instability in human lymphocytes induced by single-particle irradiation / M. A. Kadhim, S. J. Marsden, D. T. Goodhead et al. // *Radiation Research*. – 2001. – Vol. 155, № 1, Part 1. – P. 122-126.
73. Radiation protection 151: EU Scientific Seminar 2005 "Alpha-Emitters: reliability of assessment of risk for radiation protection [Electronic resource] / European Commission. – 64 p. – Available at : <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/rp151.pdf>.
74. Domestic radon and childhood cancer in Denmark / O. Raaschou-Nielsen, C. E. Andersen, H. P. Andersen et al. // *Epidemiology*. – 2008. – Vol. 19, № 4. – P. 536-543.
75. Wakeford R. The proportion of childhood leukaemia incidence in Great Britain that may be caused by natural background ionizing radiation / R. Wakeford, G. M. Kendall, M. P. Little // *Leukemia*. – 2009. – Vol. 23, № 4. – P. 770–776.
76. Childhood cancer and residential radon exposure - results of a population-based case-control study in Lower Saxony (Germany) / U. Kaletsch, P. Kaatsch, R. Meinert et al. // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 1999. – № 38. – P. 211-215.
77. Case-control study of childhood acute lymphoblastic leukemia and residential radon exposure / J. H. Lubin, M. S. Linet, J.D. Jr. Boice et al. // *Journal of the National Cancer Institute*. – 1998. – № 90. – P. 294-300.

78. Environmental radon exposure and childhood leukemia / J. Tong, L. Qin, Y. Cao et al. // *Journal of Toxicology and Environmental Health*. – 2012. – Vol. 15, № 5. – P. 332-347.

79. ICRP Publication 65 : Protection against radon-222 at home and at work // *Ann. ICRP*. – 1993. – Vol. 23, № 2. – 45 p.

80. BFS 2011:26, BFS 2015:3 Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd) [Electronic resource]. – Available at : <http://www.boverket.se>.

81. Governmental, legal and regulatory framework for safety : general safety requirements // *IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1*. – Vienna : IAEA, 2010. – 40 p.

82. Нормы радиационной безопасности НРБ–76/87 и основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП–72/87. – 3–е изд., перераб. и дополн. / Минздрав СССР. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

83. Review of legislation and regulatory framework in Ukraine with regard to environmental radiation monitoring : 2009:14 / W. Goldammer, B. Batandjjeva, O. Nasvit, O. German ; Swedish Radiation Protection Authority. – Stockholm, 2009. – 140 p.

84. Status of the European atlas of natural radiation / P. Bossew, T. Tollefsen, G. Cinelli et al. // *Radiat Prot Dosimetry*. – 2015. – Vol. 167, № 1-3. – P. 29-36.

85. Dubois G. An overview of radon surveys in Europe / G. Dubois. – Luxembourg : Office for official publication of the European Communities, 2005. – 168 p.

86. Sundén G. Regional övervakning av grundvattenkemi. Utvärdering avdelprogram. SGU-rapport 2014:23 / G. Sundén, L. Maxe, L.-O. Lång. – Stockholm, 2014. – 54p.

87. Clavensjö B. Radonboken: åtgärder mot radon / Clavensjö B., Åkerblom G.; Statens råd för byggnadsforskning. – Stockholm, 1992. – 131 p.

88. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective / World Health Organisation. – France, 2009. – 94 p.
89. Вимірювання активностей радону-222 у повітрі будинків методом пасивної трекової радонометрії з використанням приладу "Track 2010Z" : МВК 6.6.2.-063-2000. – К., 2000.
90. Павленко Т. О. Наукове обґрунтування системи радіаційного захисту населення України від радону : дис. ... канд. тех. наук : 05.26.05 / Т. О. Павленко. – К., 1996. – 125 с.
91. Аксьонов М. В. Наукове обґрунтування вимог до системи гарантій якості радіаційного контролю радону у повітрі житлових приміщень : дис. ... канд. біол. наук : 14.02.01 / М. В. Аксьонов. – К., 2012. – 169 с.
92. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. – Vienna : IAEA, 2003. – 173 p. (IAEA-TECDOC-1363).
93. Публикация МКРЗ 118. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты. – Челябинск : Книга, 2012. – 383 с.
94. Publication ICRP 55. Optimization and decision-making in radiological protection. – New York : Pergamon Press, 1988. – 60 p.
95. Markradon (Ground radon) : Second revised edition / G. Åkerblom, B. Petterson, B. Rosén ; The Swedish Building Council. – Stockholm, 1990. – 159 p.
96. Shpak P. The Geology of Ukraine / P. Shpak, J. Teslenko // The Encyclopedia of Earth Sciences Series. Encyclopedia of European and Asian Regional Geology. – Springer, 1997. – P. 760-766.
97. Geological maps of Ukraine [Electronic resource] / State Geological Service of Ukraine. – 2000. – Available at : <http://dgs.gov.ua/oglyadov-geologchn-karti.html>.
98. Soil Atlas of Europe [Electronic resource] / European Soil Bureau Network ; European Commission. – 2005. – 420 p. – Available at : [http://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Soil\\_Atlas/Download/Atlas.pdf](http://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Soil_Atlas/Download/Atlas.pdf).



99. Gozhik P.F. Glacial history of the Ukraine / P. F. Gozhik // *Glacial Deposits in North-East Europe*. – Rotterdam, 1995. – P. 547-555.
100. Фризьюк М.А. Наукове обґрунтування оптимізації протирадонових заходів для громадських будівель (на прикладі дитячих навчальних закладів Кіровоградської області) : дис. ... канд. біол. наук : 14.02.01 / М. А. Фризьюк. – К., 2013. – 168 с.
101. ICRP Publication 60 : 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // *Ann. ICRP*. – 1991. – Vol. 21. – № 1-3. – 201 p.
102. Evrard A. S. Childhood leukemia incidence and exposure to indoor Radon, terrestrial and cosmic gamma-radiation / A.-S. Evrard, D. Hemon, S. Billon. – *Health Physics*. – 2006. – Vol. 90, № 6. – P. 569-579.
103. Domestic radon and childhood cancer in Denmark / O. Raaschou-Nielsen, C. E. Andersen, H. P. Andersen et al. // *Epidemiology*. – 2008. – Vol. 19, № 4. – P. 536-543.
104. Рак в Україні, 2013-2014. Захворюваність, смертність, показники діяльності онкологічної служби [Електронний ресурс] / З. П. Федоренко, Л. О. Гулак, Ю. Й. Михайлович та ін. // *Бюлетень національного канцер-реєстру України*. – 2015. – № 16. – Режим доступу: [http://ncru.inf.ua/publications/BULL\\_16/index\\_e.htm](http://ncru.inf.ua/publications/BULL_16/index_e.htm).
105. Бузинний М. Г. Природна радіоактивність питної води свердловин на території України / М. Г. Бузинний // *Гігієнічна наука та практика на рубежі століть : матеріали XIV з'їзду гігієністів України (Дніпропетровськ, 19–21 травня 2004 р.)*. – Дніпропетровськ : Арт-Прес, 2004. – Т. II. – С. 308–310.
106. Clavensjo B. Radon book. Measures against radon / B. Clavensjo, G. Akerblom. – Stockholm : Formas, 2007. – 140 p.
107. Дикань Н.И. Систематика четвертичных остракод Украины (справочник-определитель) / Н. И. Дикань ; Институт геологических наук НАН Украины. – К., 2006. – 429 с.

108. Hamilton E. I. The relative radioactivity of building materials // American Industrial Hygiene Association Journal. –1971. – Vol. 32, № 6. – P. 398-403.

109. First result: mitigation of indoor thoron decay products by air door / J. Wang, O. Meisenberg, Y. Chen, J. Tschiersch // The 9th International Symposium on the Natural Radiation Environment (22 – 26 September, 2014, Hirosaki, Japan). – Science of the Total Environment. – 2011. – № 409. – P. 3613-3619.

110. Birovljev A. Effects of ventilation on radon concentrations on Norwegian kindergartens [Electronic resource] / A. Birovljev, T. Strand, A. Heiberg // Radon in the living environment : Proceed. intern. workshop (Athens, Greece, 19-23 April 1999). – Available at : <http://www.aivc.org/resource/effects-ventilation-radon-concentrations-norwegian-kindergartens>.

111. Characteristics of indoor radon, thoron and their progenies in a Japanese dwelling while using air appliances / C. Pornnumpa, S. Tokonami, A. Sorimachi, C. Kranrod // The 9th International Symposium on the Natural Radiation Environment, (22 – 26 September, 2014, Hirosaki, Japan). – Radiat Prot Dosimetry. – 2015. – Vol. 167, № 1-3. – P. 87-91.

112. Scivyer C. R. A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings: dwellings with cellars and basements / C. R. Scivyer, M. P. R. Jaggs. – IHS BRE Press, 1998. – 36 p.

113. Weltner A. Radon mapping strategy in Finland / A. Weltner, I. Mäkeläinen, H. Arvela // Proceed. 5th intern. conf. on high levels of natural radiation and radon areas (Munic, Germany, 4-7 Sept., 2002). – Elsevier, 2002. – P. 63-69. – (International Congress Series ; Vol. 1225).

114. Strand T. Identification of radon affected areas in Norway [Electronic resource] / T. Strand // 6th Intern. symp. on the natural radiation environment (5-9 June, 1995, Montreal, Canada). – Available at : <http://irpa11.irpa.net/pdfs/6a61.pdf>.

115. Health risk of radon [Electronic resource]. – Available at : <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>.

## Приложение А

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ В ГРУНТАХ САВРАНСКОГО РАЙОНА ОДЕССКОЙ  
ОБЛАСТИ И КИРОВОГРАДСКОГО РАЙОНА КАРОВОГРАДСКОЙ  
ОБЛАСТИ

## Данные изменений в грунтах Савранского района Одесской области

Населенный пункт	K, ppm	U, ppm	Th, ppm	Тип грунта	Почва	Влажность 1_5	Радон, кБк/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Гетмановка	1,7	1,6	9,9	суглинки	чернозем мощный	1	
Бакша , запад	1,8	2,0	9,5	суглинки	чернозем мощный	2	41
Бакша , запад	1,8	2,1	11,8	суглинки	чернозем мощный	2	37
Бакша, восток	1,5	1,9	7,0	суглинки	чернозем мощный	4	0
Бакша, восток	1,5	1,7	8,4	суглинки	чернозем мощный	4	0
Бакша, восток	1,3	1,9	9,6	суглинки	подзол	2	42
Байбузовка	1,7	2,0	11,5	суглинки	подзол		42
Байбузовка	0,7	0,7	2,2	песчано	подзол	2	3
Байбузовка, север	0,7	0,3	1,7	песчано	подзол	2	
Байбузовка, север	0,7	0,2	1,7	песчано	подзол	2	4
Байбузовка, север	1,6	1,9	9,8	суглинки	чернозем	2	51
Байбузовка, юг	1,6	2,2	8,2	суглинки	чернозем	2	63
Байбузовка, юг	1,3	1,9	9,2	суглинки	чернозем	2	
Байбузовка, юг	1,5	7,5	9,6	суглинки	чернозем	4	54
Бакша	1,6	5,5	11,1	суглинки	чернозем	4	108
Бакша	1,7	2,9	11,7	суглинки	чернозем	2	23
Бакша	1,5	5,1	9,9	суглинки	чернозем	4	49
Бакша	1,4	4,6	8,9	суглинки	чернозем	4	44
Бакша	2,0	2,2	11,4	суглинки	чернозем	2	26
Бакша	1,6	2,3	10,2	суглинки	чернозем	3	78
Бакша	1,9	2,3	12,8	суглинки	чернозем	2	76

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Бакша	1,7	2,0	9,4	суглинки	чернозем	3	48
Бакша	2,1	1,8	11,2	суглинки	чернозем	2	64
Бакша	1,6	1,8	8,0	суглинки	чернозем	2	47
Бакша	1,5	1,8	10,7	суглинки	чернозем	2	57
Бакша	1,8	2,7	11,4	суглинки	чернозем	2	70
Бакша	1,5	1,5	10,3	суглинки	чернозем	2	51
Вильшанка	0,4	0,7	1,8	песчано	нет	1	6
Вильшанка	0,8	0,7	2,8	песчано	нет	3	3
Вильшанка	0,8	0,9	3,3	песок	чернозем		4
Вильшанка	0,9	1,0	3,8	песок	чернозем		7
Вильшанка	0,7	0,7	3,3	песок	чернозем		4
Вильшанка	0,9	0,7	4,4	песок	чернозем		4
Вильшанка	0,8	1,0	4,5	песок	чернозем		8
Гетьмановка	1,0	0,9	4,9	песок	чернозем		0
Гетьмановка	1,4	2,2	7,6	лессы	чернозем		29
Гетьмановка	0,9	2,8	11,5	лессы	чернозем	2	33
Гетьмановка	1,4	2,0	9,0	глины	чернозем		38
Гетьмановка	1,8	2,3	12,0	глины	чернозем	2,5	0
Глыбочек	1,4	1,1	8,3	суглинки	чернозем		17
Глыбочек	1,4	2,2	9,0	суглинки	чернозем		25
Глыбочек	1,4	1,8	7,6	суглинки	чернозем		28
Глыбочек	1,7	1,8	11,1	суглинки	подзол		38
Глыбочек	1,6	5,5	11,1	суглинки	подзол		19
Глыбочок	2,0	2,9	13,3	суглинки	подзол	1,5	25
Глыбочок	1,5	6,1	10,5	суглинки	чернозем		25

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Графитовый карьер	2,1	2,5	13,0	суглинки	чернозем	1	0
Графитовый карьер	1,7	3,1	10,7	суглинки	чернозем		0
Графитовый карьер	1,4	3,1	10,0	суглинки	чернозем	3	0
Графитовый карьер	1,5	2,7	9,9	суглинки	чернозем		33
Дубиново	2,0	3,2	11,3	суглинки	чернозем	1,5	0
Дубиново	1,6	2,0	9,8	суглинки	чернозем		24
Дубиново	1,8	2,6	12,1	суглинки	чернозем	1	
Дубиново	1,1	1,8	7,6	суглинки	чернозем		
Дубиново	1,7	2,0	9,7	суглинки	чернозем	2,5	21
Дубиново	0,7	1,0	3,3	песок	чернозем		0
Дубиново	1,0	0,4	3,8	песок	чернозем	3,5	15
Завалье	1,0	-0,9	3,6	песок	подзол	1	7
Завалье	0,8	1,8	0,2	песок	чернозем		
Завалье	0,9	0,9	5,5	песок	чернозем	1,5	
Завалье	1,4	2,5	11,1		чернозем		38
Йосиповка, восток	2,0	2,2	13,5		чернозем		
Йосиповка, восток	4,4	6,2	45,8	мигматит	чернозем		
Йосиповка, восток	3,7	3,7	37,7	мигматит	чернозем		
Йосиповка, север	1,1	2,4	8,7	глины	чернозем	2-3	18
Йосиповка, север	1,3	1,2	8,3	глины	чернозем		28

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Йосиповка, север	1,3	2,1	9,0	глины	чернозем		
Йосиповка	1,4	1,3	8,6	глины	чернозем		
Йосиповка	1,5	2,1	9,4	глины	чернозем	2-3	
Йосиповка	1,3	2,5	10,1	глины	чернозем		
Йосиповка	1,3	2,5	10,2	глины	чернозем		
Йосиповка	1,4	2,0	9,1	глины	чернозем		
Йосиповка	0,7	0,8	4,6	суглинки	чернозем	3	4
Йосиповка	0,7	1,0	5,1	суглинки	чернозем		7
Каменное	0,7	0,9	4,9	суглинки	чернозем		
Каменное	0,6	1,4	4,4	суглинки	чернозем		
Каменное	1,5	1,1	6,7	суглинки	чернозем		25
Каменное	2,0	1,4	9,3	суглинки	чернозем		
Каменное	2,8	1,2	27,7	гнейс	чернозем		
Каменное	2,0	1,0	13,8	гнейс	чернозем		
Каменное	3,8	0,2	5,8	гнейс	чернозем		
Каменное	0,9	0,5	2,0	гнейс	чернозем		
Каменное	1,0	0,7	4,0	супесь	чернозем	4	
Каменное	1,5	1,3	7,9	супесь	чернозем	3	45
Каменное	1,7	1,7	9,5	глины	чернозем		
Каменное	1,4	0,6	6,5	суглинки	нет	4	35
Каменное	1,9	1,5	9,1	суглинки	нет		
Каменное	0,6	0,7	1,8	песок	нет	3	1
Каменное	0,6	0,2	1,7	песок	нет		4
Каменное	1,1	1,5	5,0	песок	нет	3	11
Каменное	1,0	0,5	3,4	глины	маломощный чернозем		8

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Каменное	1,9	1,7	9,5	глины	маломощный чернозем	3	
Каменное	2,2	2,6	12,1	глины	маломощный чернозем		
Каменное	1,8	1,3	10,1	глинистые	чернозем	3	
Каменное	1,5	5,8	9,2	глинистые	чернозем	3	22
Капустянка, север	2,4	-0,3	11,4	глинистые	чернозем		44
Капустянка, север	2,1	0,9	10,2	глинистые	чернозем	3	30
Капустянка, юг	2,0	1,7	10,3	глинистые	чернозем		17
Капустянка, юг	1,9	1,3	8,9	глинистые	чернозем	3	14
Карьер	1,8	1,6	11,4	глинистые	чернозем		46
Карьер	1,8	1,5	9,9	суглинки	чернозем	3	32
Концеба	1,9	1,7	10,5	суглинки	чернозем		30
Концеба	1,9	1,1	11,8	суглинки	чернозем	3	41
Крытка	2,0	0,6	9,4	суглинки	чернозем	3	62
Крытка	2,1	2,3	11,2	суглинки	чернозем		54
Осиежка	1,9	1,7	9,7	глинистые	чернозем	3	48
Осиежка	2,0	-0,7	23,5	глинистые	чернозем		29
Осиежка	1,8	0,8	9,4	глинистые	чернозем	3	
Осиежка	1,7	1,2	9,3	глинистые	чернозем		40
Осиежка	2,1	1,5	12,5	глинистые	чернозем		33
Осиежка	1,7	1,3	8,1	глинистые	чернозем	4	48
Осиежка	2,5	2,1	11,7	глинистые	чернозем		
Осиежка	1,6	0,6	10,6	глинистые	чернозем	4	
Осиежка	2,0	1,6	13,0	глинистые	чернозем		
Осиежка	1,5	1,0	10,1	глинистые	чернозем		



Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Осиежка	1,7	0,9	10,4	глинистые	чернозем		62
Осиежка	2,0	2,2	11,2	глинистые	чернозем		
Оститское	1,0	0,5	3,4	супесь	чернозем	2	13
Оститское	1,2	0,7	4,6	супесь	чернозем		5
Островка	1,0	0,9	5,9	супесь	чернозем		
Островка	0,9	0,4	3,2	супесь	чернозем	3	9
Островка	1,0	0,4	2,9	супесь	чернозем		4
Островка	1,6	1,6	8,8	супесь	чернозем	3	27
Островка	2,1	2,1	11,7	глина	чернозем		42
Островка	1,7	1,6	9,9	глина	чернозем	4	34
Островка	1,8	1,9	10,9	глина	чернозем		
Островка	1,3	0,8	6,3	суглинки	чернозем	2	8
Островка	1,1	0,6	5,8	суглинки	чернозем		19
Островка	1,5	1,4	7,8	суглинки	чернозем		
Островка	1,7	1,2	12,0	суглинки	чернозем	3	
Полянецкое	2,1	1,9	12,1	глинистые	чернозем		
Полянецкое	1,7	1,2	9,3	глинистые	чернозем	3	
Полянецкое	2,1	1,9	10,9	глинистые	чернозем		
Полянецкое	1,6	1,1	10,3	глинистые	чернозем		
Поляковское лес	1,6	1,2	8,9	глинистые	подзол	3	28
Поляковское лес	2,0	1,4	12,0	глинистые	подзол		
Поляковское лес	1,5	2,8	8,9	глинистые	подзол	2	17
Поляковское лес	1,6	2,3	10,7	глинистые	подзол		28
Поляковское лес	1,7	2,0	10,2	глинистые	подзол	2	35
Полянецкое	1,5	3,1	9,9	глинистые	чернозем		
Полянецкое	1,5	1,9	8,4	глинистые	чернозем	2,5	32

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Полянецкое	1,6	3,3	10,3	супесь	чернозем		19
Полянецкое	1,0	2,2	5,6	супесь	чернозем	2	13
Полянецкое	1,4	1,6	6,1	супесь	чернозем	2	10
Полянецкое	1,4	1,4	7,5	супесь	чернозем	2	17
Полянецкое	1,5	2,1	7,4	супесь	чернозем	2	14
Полянецкое	0,7	1,0	2,3	песок	чернозем	1	4
Полянецкое	0,8	0,8	2,8	песок	чернозем	1	4
Полянецкое	1,2	2,4	7,5	глина	чернозем	2,5	10
Саврань	0,9	7,1	-0,9	супесь	подзол		
Саврань	0,8	2,1	10,2	супесь	подзол		
Саврань	0,8	1,4	4,1	супесь	подзол	2,5	2
Саврань	0,9	0,6	2,4	супесь	подзол		4
Саврань	1,3	2,0	9,2	супесь	подзол	2	8
Саврань	0,9	1,9	6,5	супесь	подзол		12
Саврань	1,2	1,6	6,7	суглинки	чернозем	2	5
Саврань	2,0	-2,9	11,0	суглинки	чернозем		30
Саврань	1,4	2,0	7,6	илы	чернозем	4	
Саврань	1,1	1,5	6,9	илы	чернозем		
Саврань	1,5	4,6	0,4	глина	чернозем		
Саврань	2,0	2,4	12,2	глина	подзол	3	
Саврань	1,4	2,3	9,0	глина	подзол		
Саврань	2,0	2,1	11,4	глина	подзол	3	
Саврань	2,0	2,3	8,4	глина	подзол		
Саврань	1,7	2,2	10,4	глина	чернозем		
Саврань	1,2	5,6	10,9	глина	чернозем		
Саврань	1,8	2,6	10,4	глина	чернозем		15

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Саврань	2,1	2,7	12,8	глина	чернозем		13
Саврань	0,7	1,0	2,3	песок	чернозем	2,5-3	7
Саврань	0,7	0,5	3,8	песок	чернозем		
Саврань	1,0	-0,7	2,0	песок	чернозем		21
Саврань	1,1	-0,3	0,7	песок	чернозем		
Саврань	1,3	1,2	7,9	суглинки	чернозем	36	22
Саврань	1,3	0,1	11,7	суглинки	чернозем		27
Саврань	1,5	1,8	9,7	суглинки	чернозем		
Саврань	1,4	1,7	7,9	глина	чернозем		
Саврань, юго-запад	1,6	2,3	10,9	глина	чернозем		
Саврань, север	1,8	1,9	9,2	глина	чернозем	3	23
Саврань, север	2,3	2,7	12,7	глина	чернозем	3	31
Саврань, север	1,9	1,9	9,7	глина	чернозем	2,5	
Саврань, юг	1,9	2,3	11,7	глина	чернозем		24
Саврань, юг	1,7	1,6	9,3	глина	чернозем		44
Саврань, юг	2,0	5,5	0,5	глина	чернозем		
Саврань, юг	1,5	1,6	9,5	глина	чернозем	3	
Саврань, юг	1,6	3,0	9,3	глина	чернозем		
Саврань, юг	1,3	1,9	8,8	глина	чернозем	3	12
Саврань, юг	1,3	1,8	10,3	глина	чернозем		29
Саврань, юг	1,4	2,2	10,6	суглинки	чернозем мощный	2	44
Слюсареве	1,9	2,7	11,4	суглинки	чернозем мощный		
Слюсареве	1,6	1,9	9,4	суглинки	чернозем мощный	2	51
Слюсареве	1,6	2,0	10,6	суглинки	чернозем мощный		
Слюсареве	1,9	3,3	12,9	суглинки	чернозем мощный		

Продолж. табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Слюсарев	1,0	1,6	5,5	глина	чернозем	2	69
Слюсарев	1,7	2,8	12,0	глина	чернозем		
Слюсарев	1,4	2,2	9,4	глина	чернозем		79
Слюсарев	1,8	2,7	12,1	глина	чернозем		
Слюсарев	1,5	1,6	9,7	суглинки	чернозем	2,5	
Слюсарев	1,8	2,4	12,4	суглинки	чернозем		
Слюсарев	1,6	2,0	9,6	суглинки	чернозем	2	22
Слюсарев	1,7	2,5	11,2	суглинки	чернозем		
Слюсарев	1,2	1,8	7,4	песок	чернозем	2	13
Слюсарев	1,4	2,0	8,7	песок	чернозем		
Слюсарев	1,5	2,2	9,0	песок	подзол	2	23
Слюсарев	1,6	2,5	10,2	песок	подзол		
Слюсарев	1,4	1,3	9,7	глина	подзол		20
Стронтинка	1,3	2,0	10,6	глина	подзол		
Стронтинка	1,6	2,7	10,7	глина	чернозем		44
Стронтинка	1,8	3,2	11,1	глина	чернозем		
Струтинка	1,5	2,3	9,0	глина	чернозем		45
Струтинка	1,8	3,1	11,6	глина	чернозем		

Таблица А.2

## Данные изменений в грунтах Кировоградского района Кировоградской области

Населенный пункт	К, ppm	U, ppm	Th, ppm	Тип грунта	Почва	Влажность 1_5	Радон, кБк/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Аджамка	1,5	2	10,5	суглинки	чернозем	1,0	34
Аджамка	3	4,4	18,9	суглинки	чернозем	1,0	56
Аджамка	1,5	2	9,8	суглинки	чернозем	1,5	29
Аджамка	2,9	4,2	19,8	суглинки	чернозем	1,5	24
Аджамка	1,6	2,2	9,1	глина	чернозем	1,0	30
Аджамка	2,9	4,4	19,5	глина	чернозем	1,0	27
Аджамка	1,4	1,8	8,6	суглинки	чернозем	1,5	42
Аджамка	2,9	4	18,5	суглинки	чернозем	1,5	27
Аджамка	1,6	3	9,4	песок	песок	1	14
Аджамка	4,9	6,5	27,4	песок	песок	1	18
Алексеевка	1,6	2,8	10,3	суглинки	маломощный чернозем	2	23
Алексеевка	2,8	4,4	18,4	суглинки	маломощный чернозем	2	20
Алексеевка	1,7	3,1	10,3	суглинки	мощный чернозем	3	32
Алексеевка	3,4	5	20,3	суглинки	мощный чернозем	3	33
Алексеевка	2,6	4,8	17	суглинки	маломощный чернозем	1	27
Алексеевка	1,4	2,2	7,9	суглинки	маломощный чернозем	2	23

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Алексеевка	2,8	3,8	15,9	глина	маломощный чернозем		20
Алексеевка	1,5	2,1	8,6	глина	маломощный чернозем		15
Бережинка	1,7	2,7	10,3	песок	мощный чернозем	2	15
Бережинка	3,1	4,1	17,4	песок	мощный чернозем	2	23
Бережинка	1,7	1,8	10,7	песок	чернозем		20
Бережинка	3,2	5,7	18,5	песок	чернозем		19
Бережинка	1,7	3,3	9,9	супесь	чернозем	1	13
Бережинка	2,9	5	16,5	супесь	чернозем	1	
Бережинка	1,8	2,7	9,9	песок	чернозем	3	23
Бережинка	3,3	4,7	17,1	песок	чернозем	3	28
Большая Северинка	1	1,5	7,2	супесь	маломощный чернозем	1,5	8
Большая Северинка	0,4	0,9	3,5	супесь	маломощный чернозем	1,5	10
Большая Северинка	1	1,4	6,6	песок	чернозем	2,0	19
Большая Северинка	1	1,1	7,1	песок	чернозем	2,0	14
Большая Северинка	0,9	1,1	5,7	глина	чернозем	2,8	22
Большая Северинка	2,3	2,7	14,1	глина	чернозем	2,8	52
Большая Северинка	1,4	1,4	9,3	глина	чернозем		27
Веселовка	1	2,1	8,5	глина	чернозем	2,5	14
Веселовка	0,6	1,2	7,2	глина	чернозем	2,5	21
Веселовка	1,6	1,8	8,7	суглинки	маломощный чернозем	1,5	18

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Веселовка	2,9	4,8	18	суглинки	маломощный чернозем	1,5	30
Веселовка	1,1	1,7	7,9	супесь	маломощный чернозем	3,8	17
Веселовка	0,3	1,1	7,4	супесь	маломощный чернозем	3,8	34
Веселовка	1,5	2,4	10,4	суглинки	маломощный чернозем	1,5	59
Веселовка	2,9	4,6	17,3	суглинки	маломощный чернозем	1,5	27
Вишняковка	1,4	2,8	9,5	суглинки	маломощный чернозем	2	21
Вишняковка	2,8	4,6	19,6	суглинки	маломощный чернозем	2	29
Вишняковка	1,4	2,4	10,8	глина	маломощный чернозем	2	21
Вишняковка	2,9	4,8	20,6	глина	маломощный чернозем	2	43
Владимировка	1,3	2,4	8,2	лесс	чернозем	3,0	17
Владимировка	3,6	4,9	17,7	лесс	чернозем	4	23
Владимировка	1,8	2,3	9,5	лесс	чернозем	4,0	25
Владимировка	3,4	5,2	18,2	лесс	чернозем	3,5	24
Владимировка	2,8	3,5	18	суглинки	маломощный чернозем	2	24
Владимировка	1,5	2,4	9,2	суглинки	маломощный чернозем	2	20
Владимировка	3,1	4,5	18,8	лесс	мощный чернозем	2	29
Владимировка	2,7	3,8	22,6	лесс	мощный чернозем	2	11

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Высокие Байраки	1,3	3,1	8,4	глина	маломощный чернозем	3	27
Высокие Байраки	2,3	4,6	14,4	глина	маломощный чернозем	3	39
Высокие Байраки	1,7	2,7	8,9	суглинки	маломощный чернозем	2	19
Высокие Байраки	2,9	5,3	17,4	суглинки	маломощный чернозем	2	29
Гайовка	1,7	2,7	8,7	суглинки	маломощный чернозем	2,5	12
Гайовка	3,1	4,9	16,6	суглинки	маломощный чернозем	2,5	8
Гайовка	1,8	2,8	8,7	суглинки	маломощный чернозем	3,5	18
Гайовка	3,2	4,7	16	суглинки	маломощный чернозем	3,5	25
Гурзское	1,7	3,6	8,1	глина	чернозем	3,0	20
Гурзское	2,9	4,6	15,7	глина	чернозем	4	21
Гурзское	1,4	2,1	7,6	суглинки	чернозем	4,0	
Гурзское	3,1	4,9	13,5	суглинки	чернозем	3	12
Гурзское	1,6	2,7	9	лесс	мощный чернозем	4,0	24
Гурзское	2,8	4,7	15,6	лесс	мощный чернозем	4	21
Гурзское	1,8	2,5	11,4	глина	чернозем	3	22
Гурзское	3,1	5,2	16,4	глина	чернозем	3	24
Ивано-Благодатное	1,4	2,8	8,5	глина	чернозем	5,0	27
Ивано-Благодатное	2,9	5,1	16,9	глина	чернозем	5	24
Ивано-Благодатное	1,4	2,5	10,4	глина	чернозем	1	32



Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Ивано-Благодатное	3,1	5,1	18,8	глина	чернозем	2	16
Ивановка	1,6	2,1	9,6	глина	чернозем	3	14
Ивановка	2,8	4,1	17,2	глина	чернозем	3	19
Ивановка	1,6	2,3	9	суглинки	чернозем	2	20
Ивановка	2,9	4,3	17,5	суглинки	чернозем	2	19
Ивановка	4,6	3,2	40,8	гранит			
Ивановка	4,5	2,6	38,7	гранит			
Ивановка	1,9	2,1	12,4	суглинки	чернозем	2	29
Ивановка	3,4	4,7	19,7	суглинки	чернозем	2	33
Калиновка	2,7	3,7	16,3	суглинки	мощный чернозем	1	21
Калиновка	1,6	2,7	11,1	суглинки	мощный чернозем	1	28
Калиновка	2,8	3,7	18,3	глина	маломощный чернозем	1	33
Калиновка	1,7	2,6	9,5	глина	маломощный чернозем	2	14
Калиновка	3	4,2	17,3	суглинки	чернозем	1	22
Калиновка	1,4	3	10,7	суглинки	чернозем	1	19
Калиновка	2,5	3,9	19,1	суглинки	чернозем	1	11
Катериновка	1,5	1,8	9,1	глина	чернозем	2,0	30
Катериновка	3	4,4	20,1	глина	чернозем	2,0	22
Катериновка	1,6	2,1	10,3	глина	маломощный чернозем	1,5	32
Катериновка	2,7	4,7	18,5	глина	маломощный чернозем	1,5	17
Катериновка	1,6	1,8	9,4	глина	чернозем	2,0	26
Катериновка	3,1	4,4	19,4	глина	чернозем	2,0	

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Катериновка	1,6	2,1	9,6	глина	чернозем	1,0	24
Катериновка	3	4,7	19,8	глина	чернозем	1,0	56
Кировоград лесопарковая	0,5	1	3,6	песок	чернозем	2,0	36
Кировоград лесопарковая	1,1	1,9	8,1	песок	чернозем	2,0	22
Кировоград тюльпан	0,4	0,7	3,5	песок	песок	2,0	12
Кировоград тюльпан	1	1,9	7,4	песок	песок	2,0	12
Клинцы	1,7	2,1	11,8	глина	маломощный чернозем	1	29
Клинцы	2,6	4,7	17,5	глина	маломощный чернозем	1	
Клинцы	1,1	1,9	7	суглинки	маломощный чернозем	1	17
Клинцы	1,6	2,6	9,6	суглинки	маломощный чернозем	1	
Красный Яр	1,8	2,3	10,1	глина	маломощный чернозем	1	16
Красный Яр	3	4,9	17,3	глина	маломощный чернозем	1	14
Красный Яр	1,7	2,9	7,6	глина	маломощный чернозем		14
Красный Яр	2,9	4,4	17	глина	маломощный чернозем		
Крупское	1,6	2,5	9,7	глина	маломощный чернозем	2,0	12

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Крупское	2,8	4,7	20	глина	маломощный чернозем	2,0	53
Крупское	1,5	2,6	10,2	глина	чернозем		26
Крупское	2,9	4,6	20	глина	чернозем		66
Крупское	1,6	1,8	9,6	суглинки	маломощный чернозем	1,8	42
Крупское	2,9	4,8	19,9	суглинки	маломощный чернозем	1,8	39
Крупское	1,5	1,8	9,8	суглинки	маломощный чернозем	1,5	27
Крупское	3,4	4,4	20,4	суглинки	маломощный чернозем	1,5	30
Лесопарковая дом отдыха	0,6	0,8	4	песок	чернозем	3,0	23
Лесопарковая дом отдыха	1	2,3	8,6	песок	чернозем	3,0	19
Лесопарковая дом отдыха	0,5	1,1	4,7	песок	чернозем	2,5	39
Лесопарковая дом отдыха	1,3	1,9	9,2	песок	чернозем	2,5	23
Могутное	1,4	2,1	8,8	глина	мощный чернозем	1	19
Могутное	2,9	4,4	17,5	глина	мощный чернозем	1	18
Могутное	1,8	2	10	глина	мощный чернозем	1	25
Могутное	3,3	4,1	19,2	глина	мощный чернозем	1	11
Назаровка	1,8	3	11,1	глина	чернозем	3,0	16
Назаровка	2,7	5,1	18,5	глина	чернозем	3	21
Назаровка	1,6	2,1	10,6	суглинки	чернозем	3,0	8
Назаровка	2,9	6,7	16	суглинки	чернозем	3	14

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Николаевка	1,9	3,2	10,8	глина	чернозем	3,0	20
Николаевка	3	5,1	17,8	глина	чернозем	4	23
Николаевка	1,7	3	9,4	суглинки	чернозем	4,0	20
Николаевка	4	5,7	17,5	суглинки	чернозем	3	17
Новоалександровка	1,7	2,7	9,7	песок	маломощный чернозем	1	30
Новоалександровка	3,1	5,5	15,7	песок	маломощный чернозем	1	23
Новоалександровка	1,6	3,2	8,7	супесь	подзол	2	17
Новоалександровка	2,8	5,1	16,8	супесь	подзол	2	20
Обозновка	2,9	3,5	20,2	глина	чернозем	2,0	22
Обозновка	1,4	1,7	8,9	глина	чернозем	2,0	43
Обозновка	1,6	2,9	10,7	глина	чернозем	2,5	52
Обозновка	2,6	4	15	глина	чернозем	2,5	18
Обозновка	1,5	1,7	9,1	суглинки	маломощный чернозем	2,5	42
Обозновка	2,8	4,5	18,6	суглинки	маломощный чернозем	2,5	24
Обозновка	1,3	1,7	8,4	суглинки	чернозем	3,0	23
Обозновка	2,9	3,5	16	суглинки	чернозем	3,0	29
Овсянниковка	1,8	2,7	9	глина	мощный чернозем	3,5	19
Овсянниковка	2,9	4,7	17,5	глина	мощный чернозем	3	25
Овсянниковка	1,3	2,2	7,7	лесс	чернозем	3,0	33
Овсянниковка	2,9	4	17,4	лесс	чернозем	3	33
Овсянниковка	1,6	2,1	10,4	глина	глина	4,0	
Овсянниковка	2,7	3,8	22,6	глина	глина	4	

Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Осытняжка	1,1	1,4	7,4	суглинки	маломощный чернозем	1,5	24
Осытняжка	2,4	4,1	16,4	суглинки	маломощный чернозем	1,5	30
Осытняжка	0,4	1,4	4,3	песок	песок	1,8	8
Осытняжка	0,4	0,8	3,8	песок	песок	1,8	10
Осытняжка	1	1,4	7,6	глина	чернозем	2,0	26
Осытняжка	2	3,3	13,9	глина	чернозем	2,0	17
Осытняжка	0,6	1	5,7	супесь	чернозем		
Осытняжка	1,4	2,4	10,8	супесь	чернозем		27
Первозвановка	1,7	2,9	11,3	глина	чернозем	2	17
Первозвановка	2,6	4	16,7	глина	чернозем	2	
Первозвановка	1,7	2,9	11,8	суглинки	чернозем		
Первозвановка	2,9	4,1	16,3	суглинки	чернозем		
Первозвановка	1,5	2,3	11	суглинки	чернозем		
Первозвановка	1,6	2,5	10,1	песок	мощный чернозем	1	
Первозвановка	3	4,3	17,3	песок	мощный чернозем	1	
Покровское	1,4	2,2	8,2	песок	чернозем	3	20
Покровское	2,3	5,2	17,8	песок	чернозем	3	13
Покровское	1,5	2,1	8,5	суглинки	чернозем	3	18
Покровское	2,8	5,1	16,1	суглинки	чернозем	3	19
Сазоновка	1,6	1,6	9,7	глина	чернозем	1,3	26
Сазоновка	3	4,6	17,4	глина	чернозем	1,3	18
Созоновка	1,7	2	10,5	суглинки	чернозем	1,5	97
Созоновка	3,1	4,3	16,8	суглинки	чернозем	1,5	
Соколовка	1,8	2,6	10,7	глина	чернозем	3,0	25

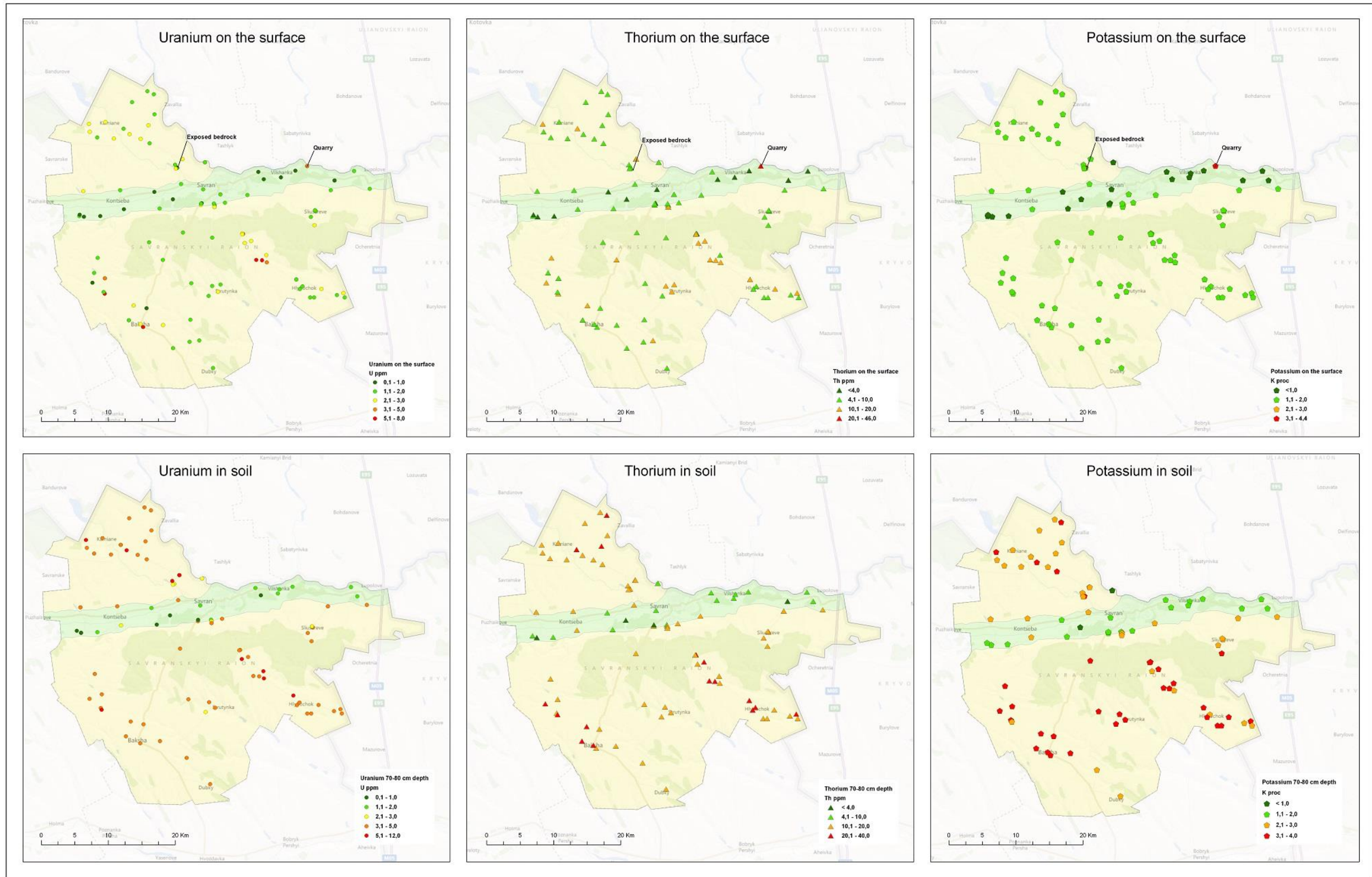
Продолж. табл. А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Соколовка	2,9	3,9	19	глина	чернозем	3	26
Соколовка	1,7	2,5	11,8	глина	чернозем	3	2
Соколовка	2,7	4,6	17,5	глина	чернозем	3	8
Соколовка	2,1	3	16,8	песок	чернозем	1	16
Соколовка	3,5	4,1	19,7	песок	чернозем	1	22
Соколовское	1,4	2,6	9,4	глина	чернозем	1,5	33
Соколовское	3,3	3,7	19,5	глина	чернозем	1,5	58
Соколовское	1,6	2,9	10,7	суглинки	чернозем	2,5	44
Соколовское	3,2	4,3	19,5	суглинки	чернозем	2,5	37
Соколовское	1,5	1,9	9,3	суглинки	чернозем	1,5	28
Соколовское	2,9	3,7	17,2	суглинки	чернозем	1,5	29
Степовое	1,8	3	10	суглинки	чернозем	1	18
Степовое	3	4,7	17,8	суглинки	чернозем	1	21
Степовое	1,8	2,2	11,4	глина	мощный чернозем		31
Степовое	3	4,2	18	глина	мощный чернозем		22
Степовое	2	2,1	11,3	суглинки	чернозем	1	27
Степовое	3	4,4	16,9	суглинки	чернозем	3	22
Федоровка	1,6	2,3	11,1	глина	чернозем	1	25
Федоровка	3,1	4,5	19	глина	чернозем	1	21
Федоровка	1,8	2,5	11,8	суглинки	маломощный чернозем	2	32
Федоровка	3	4	20	суглинки	маломощный чернозем	2	21
Федоровка	1,4	2,6	10,2	глина	мощный чернозем	1	24
Федоровка	3,3	3,9	19,4	глина	мощный чернозем	2	19
Хутор Надежда	1,6	2,5	9,7	суглинки	чернозем	1,5	54
Хутор Надежда	3	4,6	20	суглинки	чернозем	1,5	25

## Приложение Б

### ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАРТ РАДОНОВЫХ РИСКОВ

## Results of measurements in the Savran District



**SGU**  
Sveriges geologiska undersökning  
Geological Survey of Sweden  
Box 473  
SE-701 23 Uppsala  
Phone: +46 18 17 90 00  
Fax: +46 18 17 90 10  
E-mail: sgu@sgu.se  
URL: http://www.sgu.se

Рис. А.1 Содержание ЕРН в грунтах Савранского района Одесской области