

Новый метод оценки радонового риска в местах застройки

The new method for assessing the radon risk of building sites

Матей Нежнал*, Мартин Нежнал*, Милан Матолин, Иван Барнет, Житка Миксова

Matej NEZNAL*, Martin NEZNAL*, Milan MATOLÍN, Ivan BARNET, Jitka MIKSOVA

*** RADON v.o.s., Novakových 6, 180 00 Prague 8, Czech Republic**

Phone + fax: ++420 266314112, ++420 266317550

radon
v.o.s.

| | |
|---|----|
| Реферат | 3 |
| 1. Введение | 3 |
| Новый метод оценки радонового риска в местах застройки | 4 |
| 2. Определение радонового индекса места застройки: новый метод | 4 |
| 2.2. Терминология | 4 |
| 2.3. Удельная активность радона в почвенном воздухе | 5 |
| 2.3.1 Количество точек отбора проб | 6 |
| 2.3.2 Метод отбора проб почвенного воздуха | 6 |
| 2.3.3 Обработка данных и представление результатов измерения радона в почвенном воздухе | 7 |
| 2.4. Проницаемость почвы | 8 |
| 2.4.1. Определение проницаемости почвы | 8 |
| 2.4.1.1. Прямое измерение проницаемости почвы | 8 |
| 2.4.1.2. Экспертное определение проницаемости почвы | 9 |
| 2.4.2. Подготовка отчета о результатах проницаемости, классификация | 11 |
| 2.4.2.1. Прямое измерение проницаемости почвы | 11 |
| 2.4.2.2. Экспертная оценка проницаемости почвы | 11 |
| 2.5. Оценка радонового индекса | 12 |
| 2.5.1 Радоновый потенциал площадки строительства | 12 |
| 2.5.2. Оценка радонового индекса в других случаях | 13 |
| Результаты исследований радонового риска площадок застройки | 15 |
| 3. Измерение содержания радона в почвенном воздухе | 15 |
| 3.1. Входные данные | 16 |
| 3.2. Статистические оценки | 16 |
| 4. Отбор почвенного воздуха | 17 |
| 4.1. Геометрия отбора проб | 18 |
| 4.2. Полевые измерения | 18 |
| 4.3. Влияние различной геометрии на результаты измерений | 19 |
| 5. Определение проницаемости | 19 |
| 5.1. Сравнение методов определения проницаемости почвы и полевых измерений | 20 |
| 5.2. Результаты полевых исследований | 21 |
| 5.3. Оценка проницаемости | 23 |
| 6. Скорость эксхалляции радона с поверхности почвы | 23 |
| 6.1. Простой метод аккумуляции | 24 |
| 6.2. Места испытаний | 24 |
| 6.3. Применимость метода | 25 |
| 7. Мгновенные, интегральные, и продолжительные измерения радона в почвенном воздухе | 25 |
| 7.1. Лабораторные и полевые тесты | 25 |
| 7.2. Оценка результатов | 26 |
| 8. Геологические параметры и их влияние на заключительную оценку радонового потенциала почвы | 27 |
| 8.2. Применимость различных параметров | 27 |
| 9. Доступность радона | 28 |
| 9.1. Испытание моделей | 30 |
| 9.2. Сравнение различных подходов | 31 |
| 10. Обоснование (обустройство) референтных площадок для тестирования активности радона в почвенном воздухе в Чешской Республике | 32 |
| 10.1. Референтные радоновые площадки в Чешской республике | 32 |
| 10.2. Временная вариация в характеристиках референтных площадок | 33 |
| 10.3. Тестирование надежности измерений радона в почвенном воздухе | 33 |
| 11. Верификация новой методологии для картирования радонового риска | 34 |
| 11.1. Использование новой методологии для картирования радонового риска | 34 |
| 11.2. Анализ надежности карты прогноза радонового риска 1: 50 000 | 35 |
| Благодарность | 36 |
| Литература | 36 |

Реферат

Оценка радонового риска в местах застройки является важной частью радоновой программы в Чешской Республике. Этот материал подводит итог результатам исследовательского проекта, который был направлен на изучение выхода радона из почвы и породы в жилища, оценивая влияние этого выхода и на классификацию радонового риска мест застройки. Радоновый индекс места застройки указывает на уровень риска выхода радона из породы и может быть выражен количественно как радоновый потенциал места застройки. Радоновый индекс строения отражает степень радиационной защиты требуемой для жилища, которая зависит от характеристик почвы и типа фундамента. Предлагается новый метод определения радонового индекса. Проводя сравнение с методом, который использовался, начиная с 1994 года, новый метод более точно проводит линию раздела в различных условиях возникающих при классификации радонового риска и должен служить лучшей защите домов против проникновения радона из почвенного газа.

1. Введение

Эти материалы подводят итог трехлетнего исследовательского проекта по поручению Государственного Офиса Ядерной Безопасности (ГОЯБ). Компания RADON v.o.s. согр. выступила в качестве главного исследователя в процессе исследования, в то время как полевые работы, обработка данных, и написание итогового отчета были закончены с помощью Факультета Естественных Наук Карлова Университета в Праге и Чешской Геологической службы (CGS). Текст был просмотрен ГОЯБ и Национальным Институтом Радиационной Защиты и Чешским Национальным регулятором по вопросам Ядерной, биологической и Химической Защиты. Главной задачей исследований была разработка нового унифицированного метода для оценки риска проникновения радона из подстилающей почвы и породы, основанного на определении радонового индекса места застройки. Этот метод, как ожидается, станет обязательным для всех специалистов по вопросам радона в частных и другого подчинения компаниях, которые заняты оценкой радонового риска в местах застройки в Чешской Республике. Действия таких специалистов основываются на разрешения, которое выдает КОЯБ.

Для того чтобы получить такое разрешение необходимо пройти курсы геологического и радиометрического тренинга на факультете Естественных наук Карлова университета и пройти сертификацию в ГОЯБ. Итак, субъективная оценка геологических условий, которые должны выполнять эти работники, проводя процедуру оценки радонового риска, основана на профессиональном, научном опыте и познаниях.

Эти материалы приведены на двух языках. Каждая версия состоит из двух главных частей. Первая из них (часть 2) содержит описание нового метода оценки риска радона. Вторая часть, которая состоит из следующих частей, дает детальное описание отдельных ветвей исследования, которое привело к открытию нового метода. Данные и результаты индивидуальных исследовательских проектов описаны в отдельном отчете by SONS (на чешском), в то время когда этот материал дает только короткое резюме в силу ограниченной задачи. Новый метод частично основан на предыдущем методе представленном Barnet (1994). Новейшие результаты, собранные в процессе исследований в рамках Радоновой Программы в Чешской Республике и в рамках этого проекта, касаются, в основном, статистических оценок измерений удельной активности радона в почвенном воздухе, метода отбора проб почвенного воздуха, определения проницаемости почвы, скорости эксхалации радона с поверхности почвы, одиночных и повторяющихся измерений концентрации радона в почвенном воздухе, изучения геологических условий, которые оказывают влияние на оценку потенциала радона, и сравнения различных методов оценки моделей доступности радона. Все эти предметы

обсуждения вложены большей частью для формулирования нового метода оценки радонового риска. Этот метод был также испытан для картирования радонового индекса в региональном масштабе; это исследование было завершено обустройством радоновых референсных объектов для сравнения результатов и для тестирования используемого частными компаниями и учреждениями, которые имеют дело с измерением радона в почвенном воздухе.

Новый метод радонового риска основан на более детальном обследовании участка под застройку с усилением внимания направленного на определение проницаемости неомогенной геологической среды. Предлагаемый метод классификации лучше при определении радонового индекса в пограничных случаях и в предположении влияния изменяющейся проницаемости на конечную оценку измеряемого объекта.

Новый метод оценки радонового риска в местах застройки

2. Определение радонового индекса места застройки: новый метод

2.1. Введение

Определение радонового индекса места застройки основано на оценке концентрации радона (^{222}Rn) в почвенном газе и проницаемости подлежащей почвы. Чем выше концентрация радона в почвенном воздухе, чем выше проницаемость слоя почвы, тем выше вероятность проникновения радона в дом.

Радоновый индекс места застройки (RI) в общем случае выражает радоновый потенциал места застройки. Радоновый индекс здания (строения) выражает степень защиты, требуемый к выполнению в здании против проникновения радона из подлежащей породы или почвы. Радоновый индекс здания выводится из радонового индекса места застройки, принимая во внимание глубину подвала, тип фундамента, и параметров подлежащей почвы. В месте застройки, которое имеет точно определенный радоновый индекс, радоновый индекс здания на этом месте может колебаться в зависимости от того будет ли оно построено на поверхности почвы или оно будет иметь подземные этажи.

Метод, который предложен тут для определения радонового индекса, основан на результатах исследований, которые были проведены между 1994 и 2002 гг. Это модификация метода, который был действительным начиная с 1994 года. Подраздел 2.6 суммирует информацию, которая должна быть включена в любой отчет по радоновому обследованию места застройки и которая должна быть доступна для строительных экспертов и работников, которые занимаются защитой от радона.

Настоящий метод был сформулирован в соответствии с актом №. 18/1997 Coll. (ядерного законодательства), с учетом изменений акта №. 13/2002 Coll. И Декрета государственного комитета по ядерной безопасности (ГОЯБ) №. 307/2002 Coll. По радиационной защите. Все эксперты, компании и институты, которые занимаются определением радонового индекса, должны обладать действительным разрешением ГОЯБ на эту деятельность.

2.2. Терминология

В последующем описании встречаются такие термины:

Радон: ^{222}Rn изотоп радона.

Удельная активность радона в почвенном газе: количество радиоактивных распадов ^{222}Rn в одном кубическом метре почвенного воздуха за секунду, называется также **концентрацией радона в почвенном газе**.

Радоновый индекс места застройки (RI): индекс, который показывает уровень риска выхода радона из породы, поверхностных материалов и \или почвы. Соответствующие категории есть низкий, средний и высокий.

Радоновый индекс здания (RB): индекс, который выражает степень требуемой радиационной защиты, которая требуется в здании для предотвращения проникновения радона. Он выводится из RI с учетом типа фундамента используемого в здании и характеристик подстилающей почвы и породы.

Радоновый потенциал места застройки (RP): значение, которое выражает радоновый индекс места застройки. Если $RP < 10$, то RI низкий, если $10 \leq RP < 35$, то RI – средний; если $35 \leq RP$, тогда RI высокий.

Почва: включает почву, подверженные воздействию погоды каменные породы в верхней части почвенного профиля (включая органические вещества), неподверженные воздействию погоды каменные породы в верхнем слое оказывают воздействие на оценку RI, и любые искусственные материалы, которые могут присутствовать.

Почвенный газ (воздух): смесь газов в поровом пространстве почвы.

Проницаемость газовая: параметр, который характеризует потенциальную возможность для радона и других газов мигрировать через почву. Проницаемость определяется путем прямых измерений или путем оценки почвы экспертом. Часто используется для упрощения как **проницаемость**.

Вертикальный профиль почвы: описание конкретных слоев почвы, которое дает характеристику их структурных и механических характеристик, глубины и толщины. Это описание используется в случае экспертного определения проницаемости.

Третий квартиль: 75% процентиль от набора данных из N измерений. С целью определения RI третий квартиль определяется следующим образом: данные выстраиваются по возрастанию, и третий квартиль это **N75** -е значение из набора данных, где **N75** равно **(0.75N + 0.25)** округлено к ближайшему меньшему целому.

2.3. Удельная активность радона в почвенном воздухе

Удельная активность радона в почвенном воздухе это первый решающий параметр для определения радонового индекса места застройки. Удельная активность радона в почвенном воздухе определяется путем измерения радиоактивности пробы почвенного воздуха отобранной из глубины 0.8 метра.

Базовыми условиями для метода определения есть:

- (a) Измерения радиоактивности должны иметь предел детектирования не хуже $1 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$.
- (b) Прибор должен быть калиброван Национальным Метрологическим Центром для измерений радона и ДПР радона.
- (c) Методы отбора проб и измерений должны быть протестированы на объекте на калибровочных площадках для сравнений при измерении радона.

В соответствии с Чешскими государственными нормами ISO 31-9, удельная активность радона в почвенном воздухе обозначается как **cA**, и значения приводятся в $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ используя один десятичный знак.

Обычно используются мгновенные измерения почвенного радона, хотя в принципе интегрированные или повторяющиеся методы могут быть использованы для выполнения приведенного выше требования.

В том случае, когда используется мгновенное измерение радона в почвенном воздухе для измерительных приборов: сцинтилляционных камер, или ионизационных камер требуется контроль фоновых показателей до момента отбора проб. Фон не должен превышать 1/10 от измеряемого сигнала.

Присутствие тория в почве и каменной породе приводит к генерации альфа-емиттера торона (^{220}Rn). Его концентрация в почвенном воздухе обычно находится на одном порядке величины с радоном. Для результатов измерений радона в почвенном воздухе полученных сразу после отбора пробы требуется процедура коррекции влияния торона на измеряемую величину.

2.3.1 Количество точек отбора проб

В связи с тем, что распределение радона в почвенном воздухе негетогенно и в связи с встречаемостью выпадающих результатов, надежное измерение RI требует получения набора данных по измерению радона в почвенном воздухе.

В случае, когда место застройки меньше чем 800 м^2 (типичная площадка для построения дома для одной семьи, отдельного здания, пристройки, или для реконструкции, которая требует вовлечения контакта с почвой) оценено, что необходимо измерять, по крайней мере, в 15 точках отбора. Эти точки должны попадать на строительный земельный план и его ближайшее окружение.

Если проводится оценка площадки под застройку больше 800 м^2 (место для более чем одного дома или для одиночного дома большего размера), пробы почвенного воздуха отбираются по сетке $10 \times 10 \text{ м}$.

Опять же весь земельный план и его близкое окружение должны быть покрыты точками отбора. Для случаев, когда присутствуют другие здания или присутствуют покрытия почвы бетоном \ асфальтом регулярность точек сети отбора проб может быть адаптирована, если это необходимо, т.е. местоположение некоторых точек отбора может быть изменено, хотя и есть необходимость в измерении распределения радона по всей площади строения.

В том случае, когда обнаружены локальные аномалии концентрации радона (выше, чем в три раза над уровнем третьего квартиля: $3 * \text{сA75}$) рекомендуется увеличить количество точек отбора проб, т.е. использовать сеть $5 \times 5 \text{ м}$.

2.3.2 Метод отбора проб почвенного воздуха

Пробы почвенного воздуха отбирают обычно с использованием стального полого пробника малого диаметра со свободным заточенным нижним концом (теряемым наконечником) в комбинации с шприцем большого объема или насосом. Вся система должна быть хорошо герметизирована. Использование системы отбора проб, которая негерметична или которая не достигает нужного уровня вакуума для отбора пробы воздуха в почвах низкой проницаемости, может привести к недооценке концентрации радона в почвенном воздухе. По этой причине такие системы не должны использоваться.

Внутренний объем полости, которая открывается в нижней части пробоотборника должна быть достаточной для того, чтобы позволить отобрать пробу. Минимальная внутренняя поверхность, которая касается почвы - 940 мм^2 (в соответствии с цилиндром, который имеет диаметр 10 мм и высотой 30 мм).

Пробы воздуха отбираются с глубины 0.8 м ниже уровня почвы. В том случае, когда пробы почвенного воздуха не могут быть отобраны в силу низкой проницаемости почвы, высокого насыщения грунтовых вод, или присутствием мели, твердого каменного слоя, может быть использована следующая модификация. Если проницаемость почвы очень низкая, полость в нижней части пробника может быть увеличена путем вытаскивания пробника на $10\text{-}15 \text{ см}$ в направлении поверхности. Иногда (верхний слой почвы с высокой проницаемостью не достигнут, пробник остается зафиксированным в почве, также как и загрязнение почвенного газа атмосферным можно избежать) пробник можно вытащить до уровня 0.5 м ниже поверхности, пока достигается хорошая герметизация всей системы.

Подобный подход часто используется, когда слой отбора проб пропитанный водой. В случае привлечения мелководного каменного слоя минимальная глубина для отбора пробы может быть изменена до 0.5 м ниже уровня поверхности. Изменение мест отбора проб между ячейками сети 10 x 10 м может быть выполнено во всех указанных ранее случаях.

Однако необходимо привести все отклонения, полученные по сети стандартного отбора проб из глубины 0.8 м, включая трактовки (пояснения) и оценки потенциального влияния этих разбросов на результаты оценки.

Если никакая модификация не помогает провести оценку такого места застройки, то саму оценку следует отложить во времени, пока поверхность фундамента станет видна. Могут применяться другие методы, такие как измерения скорости эксхалации радона, измерения удельной активности ^{226}Ra ($\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$), и мощности эманации. Эти технологии не стандартизованы по ряду причин; и за исключением особых случаев, когда необходимо их применение, измерения должны быть выполнены с пониманием параметров, которые влияют на миграцию радона и на детализированные условия на объекте.

Отбор проб почвенного воздуха измерения радона в почвенном воздухе не должны выполняться в экстремальных метеорологических условиях.

2.3.3 Обработка данных и представление результатов измерения радона в почвенном воздухе

Классификация радонового риска в целом или в части места застройки основана на оценке измерений удельной активности и распределения радона в почвенном воздухе.

При классификации места застройки для отдельного здания (для мест застройки меньше и равных 800 м^2 , привлекать не менее чем 15 результатов измерения радона в почвенном воздухе), главное значение, которое используется для этой классификации, это третий квартиль для набора данных измерения радона в почвенном воздухе **cA75**. Значения меньше, чем $1 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ исключаются из набора данных. Человек, который проводит считывание, который ответственный за классификацию должен принять во внимание все аномалии радоновой концентрации и вариации. Заключительный отчет должен содержать следующие статистические параметры: минимум, максимум, арифметическое среднее, медиану и третий квартиль.

Классификация больших мест застройки (места застройки более 800 м^2 , требует проводить измерения радона в почвенном воздухе по сетке $10 \times 10 \text{ м}$) в зависимости от гомогенности данных. Если набор данных гомогенный, третий квартиль от всех данных используется как результат, по которому принимается решение. Значения, которые ниже $1 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ снова исключаются.

Если набор данных не является гомогенным, нужно рассмотреть три таких ситуации:

- (a) негомогенная площадка состоит из нескольких гомогенных площадок.
- (b) зона разлома пересекает площадку застройки.
- (c) на площадке застройки присутствуют локальные радоновые аномалии.

Для случая (a) и (b) площадка застройки графически делится на гомогенные подплощадки, которые рассматриваются и анализируются в отдельности. Пространственная вариация проницаемости может быть полезна в такой оценке.

Если количество измеренных значений достаточно большое (более чем 50 измерений концентрации радона в почвенном воздухе), гистограмма радонового распределения может быть полезна для оценки гомогенности данных наряду с визуальной оценкой. Другой метод для оценки гомогенности данных использует логарифмический график относительного ранга **r** относительно отсортированных в спадающем порядке значений: $\ln(r/1-r)$, где $r = i/(n+1)$, и **i** это ранг значений в **n** сортированных данных. Если форма кривой приближается к строгой

прямой, распределение нормальное или логнормальное. Если форма кривой приближается к разрывной линии набор данных полиномиальный.

Третий квартиль соответствующего набора данных используется снова как базовое значение для классификации. Для гомогенных мест застройки (или их частей) используется третий квартиль для целого релевантного набора данных. Для характеристики мест застройки, которые содержат несколько подплощадок с различной концентрацией радона в почвенном воздухе, используется самый высокий из третьих квартилей соответствующих наборов данных.

Для случая (с), радоновый специалист должен взвесить важность локальных аномалий и их связь с геологическими и негеологическими факторами, и таким образом принять решение случайно или не случайно они случились. Дополнительные измерения принимаются во внимание (если они есть). В таких случаях классификация особенно зависима от экспертизы работника. Наблюдаемые аномалии могут оказывать влияние на конечное определение RI.

При оценке большого места для застройки в заключительный отчет приводят не только основные статистические параметры указанные ранее (минимум, максимум, арифметическое среднее, медиана, третий квартиль), но должны быть показаны все измеренные значения концентрации радона в почвенном воздухе в числовой и в графической форме. Графическое представление позволяет лучше понять пространственную вариабельность этого параметра.

2.4. Проницаемость почвы

Проницаемость почвы является вторым фактором, который влияет на принятие решения при определении радонового индекса места застройки. Поскольку высокая проницаемость дает повышенную миграцию почвенного воздуха и радона из почвы в здание повышенный радоновый риск ожидается в условиях с повышенной проницаемостью почвы.

2.4.1. Определение проницаемости почвы

Проницаемость почвы может быть определена:

- прямое *in situ* измерение проницаемости;
- экспертная оценка проницаемости;

Проницаемость обозначается символом **k**. В случае прямого *in situ* измерения проницаемости. Проницаемость для газа выражается в м^2 (округлено до одной десятичного знака, например: $1.7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$). Экспертная оценка проницаемости приводит к утверждению низкая – средняя – высокая категория.

2.4.1.1. Прямое измерение проницаемости почвы

Прямое *in situ* определение проницаемости производится на глубине 0.8 м ниже уровня поверхности почвы.

Метод измерения *in situ* состоит из измерения потока воздуха в процессе высасывания воздуха из почвы или, наоборот, его нагнетания в почву при постоянном давлении. Процедуры для измерения проницаемости почвы подобны процедурам, которые используются для отбора проб почвенного воздуха (стальной полый пробник тонкого диаметра со свободным заостренным нижним концом – теряемым наконечником). Поверхность внутренней полости поверхность, формируемая после сбрасывания наконечника, должна быть точно определена для каждой измерительной системы. Могут использоваться различные устройства, которые разработаны для *in situ* измерений газовой проницаемости почвы.

Есть определенные сложности в определении коэффициентов формы пробника (которые определяются геометрией и внутренними размерами) и индивидуальной коррекции свободного потока воздуха в каждом приборе. Из этих соображений и из-за отсутствия стандартизации газовой проницаемости, результаты, которые получены для различных устройств требуют стандартизации к параметрам RADON-JOK системы, которая широко используется в Чешской Республике: (www.radon-vos.cz/index_en.html).

Прямые измерения проницаемости *in situ* основываются на фиксированной измерительной геометрии.

Размер измерительной полости в почве не должен увеличиваться. Рекомендуется использовать дополнительные ограничения для низкой проницаемости $k = 5.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$. Когда $5.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ (время измерения системы RADON-JOK превышает 1200 с), проницаемость должна быть измерена точно. Результирующее значение для итогового результата будет $5.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, и результирующее значение для статистической оценки отправляется на основе $5.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$.

Поскольку есть сопротивление прибора свободному потоку воздуха есть ограничение для прибора и по измерению высокой проницаемости равно: $k = 1.8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Итак, если $k > 1.8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ (время измерения прибора RADON-JOK меньше чем 6 с), значение итогового результата будет $k > 1.8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$, а значение, используемое для статистических оценок, будет использовано $k = 1.8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Для прямых *in situ* измерений проницаемости требование необходимого количества измерений проницаемости такое же, как и для измерений радона в почвенном воздухе, т.е. не менее 15 измерений для одиночного строения (со строительной площадкой $\leq 800 \text{ м}^2$), или выполняя измерения по сети 10 x 10 м для мест застройки площадью $> 800 \text{ м}^2$. Тот же статистический параметр, т.е. третий квартиль от набора данных (обозначенный k75), используется в качестве значения для принятия решений. Третий квартиль снижает влияние выпадающих значений и локальных аномалий проницаемости.

Если проводится прямое *in situ* измерение проницаемости, нет никакой необходимости в анализе и описании вертикального профиля почвы.

Только при наличии набора данных прямых *in situ* измерений проницаемости (k , в м^2) радоновый потенциал места застройки (RP) может быть использован для определения RI (см. подраздел 2.5.1.).

2.4.1.2. Экспертное определение проницаемости почвы

Экспертная оценка проницаемости необходима, когда прямое *in situ* измерение проницаемости не проводится во всех точках отбора проб для измерения радона в почвенном воздухе. Такая экспертная оценка, которая приводит к классификации места застройки по категориям проницаемости (низкая, средняя или высокая) основана на описании вертикального профиля почвы до глубины в 1 метр (или до как можно большей глубины, которую можно достичь при помощи ручного бура, в случае вовлечения огромного количества грубого материала или неподверженной атмосферному влиянию каменной породы вблизи поверхности). Оценка должна привлечь как минимум один из приведенных методов:

□ Макроскопическое описание фракций в пробе почвы с глубины 0.8 метра, с классификацией ее проницаемости (низкое – среднее – высокое). Оценка пропорции мелкой фракции (f, размер частиц $< 0.063 \text{ мм}$) также необходима в этой классификации.

Для $f > 65\%$, проницаемость низкая; когда $15\% < f \leq 65\%$, степень проницаемости средняя; и когда $f \leq 15\%$, проницаемость высокая. Заключительная классификация корректируется в зависимости от факторов, которые могут определять реальную проницаемость (см. Вопросы, которые приведены в конце подраздела).

Оценивание сопротивляемости, встречаемой при отборе проб почвенного воздуха, для измерения радона во всех точках отбора проб и оценивая предпочтительную категорию проницаемости (низкую – среднюю – высокую).

Для лучшей оценки в вертикальном и горизонтальном изменении проницаемости (для места под одиночную застройку $\leq 800 \text{ м}^2$) следует провести анализы, по крайней мере, два отбора проб почвы при помощи ручного бура. Для больших мест застройки количество отборов проб почвы должно быть увеличено, по крайней мере, как один дополнительный отбор на 30 отборов проб воздуха.

Следующие вопросы должны быть рассмотрены всякий раз, когда используется экспертное определение проницаемости почвы:

Может ли высокая влажность почвы в горизонте отбора проб влиять на фактическую проницаемость (т.е. степень насыщения водой может снижать действительную проницаемость)?

Может ли низкая влажность почвы в горизонте отбора проб влиять на действительную проницаемость (т.е. низкая степень водной насыщенности может увеличить текущую пористость)?

Может ли необычно низкая пористость на горизонте отбора проб влиять на фактическую проницаемость (т.е. высокая плотность или густота может уменьшить проницаемость)?

Может ли необычно высокая пористость горизонта отбора проб влиять на реальную проницаемость (т.е. ее низкая плотность и пустоты могут увеличить проницаемость)?

Есть ли присутствие микро- и макро - трещин достаточным для повышения иными словами проницаемости?

Является ли степень негомогенности мелкой фракции таковой, что она способна иным образом увеличить проницаемость?

Является ли содержимое грубой фракции (фрагменты, булыжники, обломки камней) настолько велико, что оно способно увеличить реальную проницаемость?

Может ли характер поверхность камней в отбираемом горизонте, которая подвержена воздействию погоды, в горизонте отбора проб или присутствие трещин увеличить реальную проницаемость?

Могут ли антропогенные факторы поверхности почвы в верхнем слое почвы (такие как глубокое пропахивание или присутствие тропинок и т.п.) увеличить реальную проницаемость?

Могут ли антропогенные эффекты на поверхности почвы или в верхнем слое почвы (такие как глубокие пустоты в верхнем слое почвы или присутствие бетонных или асфальтовых покрытий) уменьшить настоящую проницаемость?

Расположено ли место застройки на склоне с вертикальной и горизонтальной изменчивостью слоев почвы с различной проницаемостью, которые могут увеличить или уменьшить общую проницаемость?

Примечание: Если результат детальной геологической или гидрогеологической разведки для одного и того же места застройки известны, не нужно проводить отбор проб почвы ручным буром в процессе радоновой съемки. Имеющиеся детальные результаты могут быть использованы для экспертной оценки проницаемости почвы.

Если проводится экспертная оценка проницаемости, RI определяется в соответствии с классификационной таблицей (подраздел 2.5.2.).

2.4.2. Подготовка отчета о результатах определения проницаемости, классификация

Оценка места застройки и определение его радонового индекса (RI) привлекает следующие процедуры для определения проницаемости.

2.4.2.1. Прямое измерение проницаемости почвы

Третий квартиль набора данных (k75) является определяющим значением для классификации площадки для одиночного здания (на месте застройки $\leq 800 \text{ м}^2$, и с по крайней мере, 15 прямыми *in situ* измерениями проницаемости). Лицо, ответственное за итоговую классификацию должно рассмотреть все локальные аномалии проницаемости, вариабельность и разброс данных. Итоговый отчет должен содержать следующие статистические параметры: минимум, максимум, арифметическое среднее, медиану и третий квартиль. Классификация для участков большей площади (площадь застройки $> 800 \text{ м}^2$, где измерения проницаемости необходимо измерять по сети $10 \times 10 \text{ м}$) зависит от гомогенности площадки и соответствующих данных. Если площадка застройки геологически гомогенна в особенности по ее проницаемости, для ее классификации используется третий квартиль набора данных (k75).

Если площадка большей площади не является гомогенной, для нее должны быть рассмотрены три опции по отношению к геологии площадки:

- (a) негомогенная площадка может быть разделена на несколько гомогенных площадок.
- (b) зона раскола с отдельной проницаемостью пересекает площадку строительства.
- (c) локальные аномалии проницаемости присутствуют на площадке строительства.

В случае (a) и (b) официальный эксперт делит площадку под строительство на гомогенные подплощадки, которые рассматриваются и обрабатываются отдельно. Пространственная вариабельность активности радона в почвенном воздухе тоже очень полезна при этом для оценки.

Третий квартиль соответствующего набора данных рассматривается снова, как главный показатель для классификации. Для гомогенных строительных площадок третий квартиль всего набора данных, для негомогенных – наивысших третий квартиль из поднаборов для подплощадок, который является главным для всей площадки или решающим, касательно строительства.

Для случая (c) официальный эксперт ответственный за оценку должен взвесить важность локальных аномалий и их связь с геологическими и негеологическими факторами (т.е., случайны они или нет). Эти аномалии могут влиять на финальную классификацию проницаемости и определение RI. Итоговая классификация зависит от решения эксперта.

Когда проводится оценка большей строительной площадки, итоговый отчет должен содержать требуемые статистические параметры (минимум, максимум, арифметическое среднее, медиану, и третий квартиль), и все значения проницаемости, которые имеются, в числовой и графической форме для лучшего понимания пространственной вариабельности этого параметра.

2.4.2.2. Экспертная оценка проницаемости почвы

Проводя классификацию места под застройку одного строения ($\leq 800 \text{ м}^2$ и 2 пробы почвы ручным пробником), оценка проницаемости почвы (как низкая, средняя, или высокая) основывается на описании профиля почвы до как минимум одного метра глубиной (или до глубины, которая определена в подразделе 2.4.1.2.) и на выбранном дополнительном методе (макроскопическом описании или сопротивляемости вакууму).

Итоговая проницаемость классифицируется как низкая, средняя, или высокая.

Для площадок застройки большой площади ($> 800 \text{ м}^2$) гомогенность характеристик почвы путем проделывания отверстий при помощи ручного бура. Степень проницаемости (низкая – средняя - высокая) на гомогенных площадках застройки выбирается экспертами прямо на месте.

Если же крупная площадка застройки не является гомогенной, может быть рассмотрено три варианта, которые выбираются с учетом геологических условий площадок:

- (a) негомогенная площадка может быть разделена на гомогенные подплощадки.
- (b) зона разлома с выделяющейся проницаемостью пересекает площадку застройки.
- (c) на площадке наблюдаются локальные аномалии проницаемости.

Негомогенные площадки застройки затем делятся на гомогенные подплощадки, которые рассматриваются отдельно. Экспертная оценка проницаемости почвы основана на описании профиля почвы до глубины в 1 метр, на основе одного из использованных методов (макроскопическое описание или сопротивляемость вакууму), и на оценке любых горизонтальных и вертикальных изменений параметров почвы, которые могут иметь место. Пространственная вариабельность концентрации радона в почвенном воздухе также важна для этой оценки.

Результирующая проницаемость классифицируется как низкая, средняя или высокая в соответствии с представленными указаниями, т.е. только одна оценка на гомогенной площадке и наивысшая категория в случае разбиения площадки на части в случае площадки, которая для анализа была разбита на подплощадки.

Заключительный отчет должен содержать результирующую степень проницаемости (низкую – среднюю – высокую), макроскопическое описание профилей почвы для всех отборов проб ручным буром, и оценкой содержания мелкой фракции почвы на глубине 0.8 м или сопротивляемости вакууму для всех точек отбора проб.

2.5. Оценка радонового индекса

Определение радонового индекса площадки застройки (RI) основано на двух факторах: концентрации радона в почвенном воздухе и проницаемости почвы. Другие факторы, которые касаются структурной и геологической ситуации (такие как тип подстилающей каменной породы, присутствие трещин (разломов), рельеф площадки, и региональные геологические единицы) также полезны для заключительного определения.

Заключительное определение RI получают из данных проницаемости. Если доступны числовые данные концентрации радона в почвенном воздухе и проницаемость почвы, используется метод радонового потенциала площадки строительства (RP) (подраздел 2.5.1.). Для числовых значений концентрации радона в почвенном воздухе и экспертной оценки проницаемости почвы (приводимой как, низкая, средняя и высокая), процедура оценки описана в подразделе 2.5.2.

2.5.1 Радоновый потенциал площадки строительства

Если доступны результаты определения концентрации радона в почвенном воздухе и результаты *in situ* измерений проницаемости для всех точек измерений, для определения RI может быть использована модель радонового потенциала (RP).

Модель для оценки RP основана на используемой ранее таблице классификации RI. Версия amended использует продолжающиеся (непрерывные) линии вместо фракционных для разделения низкой, средней и высокой категорий RI (Рисунок. 1). Это изменение позволяет проводить более точную оценку пограничных случаев.

Две прямых линий (V- формы, рисунок 2), которые ограничивают средний уровень индекса радона, могут быть определены следующими уравнениями:

$$-\log k = \alpha_1 \cdot c_A - (\alpha_1 \cdot c_{A0} + \log k_0),$$

$$-\log k = \alpha_2 \cdot c_A - (\alpha_2 \cdot c_{A0} + \log k_0),$$

Где, α_1 и α_2 коэффициенты наклона этих лимитирующих линий, а (c_{A0} ; $-\log k_0$) – это координаты соответствующих точек пересечения. Радоновый потенциал RP определяется уравнением:

$$RP = (c_A - c_{A0}) / (-\log k + \log k_0) \quad [1]$$

Для того чтобы следовать последовательности с ранее использованным методом (Barnet 1994) уравнения, которые описывают пределы, и параметры RP определены оптимально следующим образом:

$$\log k = 1/10 \cdot c_A - (1/10 + \log 1E-10) = 0,1 c_A + 9,9$$

$$-\log k = 1/35 \cdot c_A - (1/35 + \log 1E-10) = 0,0286 c_A + 9,971 \quad [2]$$

$$RP = (c_A - 1) / (-\log k - 10),$$

т.е. углы наклона прямых определены значениями 1/10 и 1/35, а их пересечение соответствует значению $c_A = 1$ кБк/м³, и $-\log k_0 = 10$, когда $k_0 = 1 \cdot 10^{-10}$ м².

Графическое представление приведено на рисунке 2.

Третий квартиль набора данных концентрации радона в почвенном воздухе (c_{A75}) и третий квартиль данных по проницаемости почвы (k_{75}), являются входными данными для оценки площадки застройки, используя модель RP, которая представлена на рисунке 2.

В исключительных случаях, лицо уполномоченное проводить оценку может использовать другие статистические параметры для заключительного определения RI (см. подраздел 2.3.3.). Однако в заключительном отчете потребуются привести свои соображения по этому поводу.

Значение RP получают из оценки площадки застройки при помощи уравнения [2], и позволяет определить RI в терминах: низкий, средний или высокий (если $RP < 10$, то RI низкий; если $10 \leq RP < 35$, то RI средний; если $35 \leq RP$, то RI высокий).

2.5.2. Оценка радонового индекса в других случаях

Если используется экспертная оценка проницаемости почвы (т.е. если проницаемость определяется без нахождения числовых значений), радоновый индекс площадок застройки оценивается при помощи приведенной классификационной таблицы (Таблица 1):

Таблица 1: Оценка радонового индекса

| Радоновый индекс (RI), категория | Активность радона в почвенном воздухе (кБк·м ⁻³) | | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| | Низкий | $C_A < 30$ | $C_A < 30$ |
| Средний | $30 \leq C_A \leq 100$ | $20 \leq C_A \leq 70$ | $10 \leq C_A \leq 30$ |
| Высокий | $C_A \geq 100$ | $C_A \geq 70$ | $C_A \geq 30$ |
| | Низкая | Средняя проницаемость | Высокая |

Входные параметры для оценки RI это третий квартиль c_{A75} набора данных измерения радона в почвенном воздухе, или наибольший c_{A75} определенный для подплощадок с учетом негомогенности площадки застройки (см. подраздел 2.3.3.).

В исключительных случаях, эксперты вправе использовать другие статистические параметры при заключительном определении RI (см. подраздел 2.3.3.). Однако он при этом должен привести свои соображения в заключительном отчете.

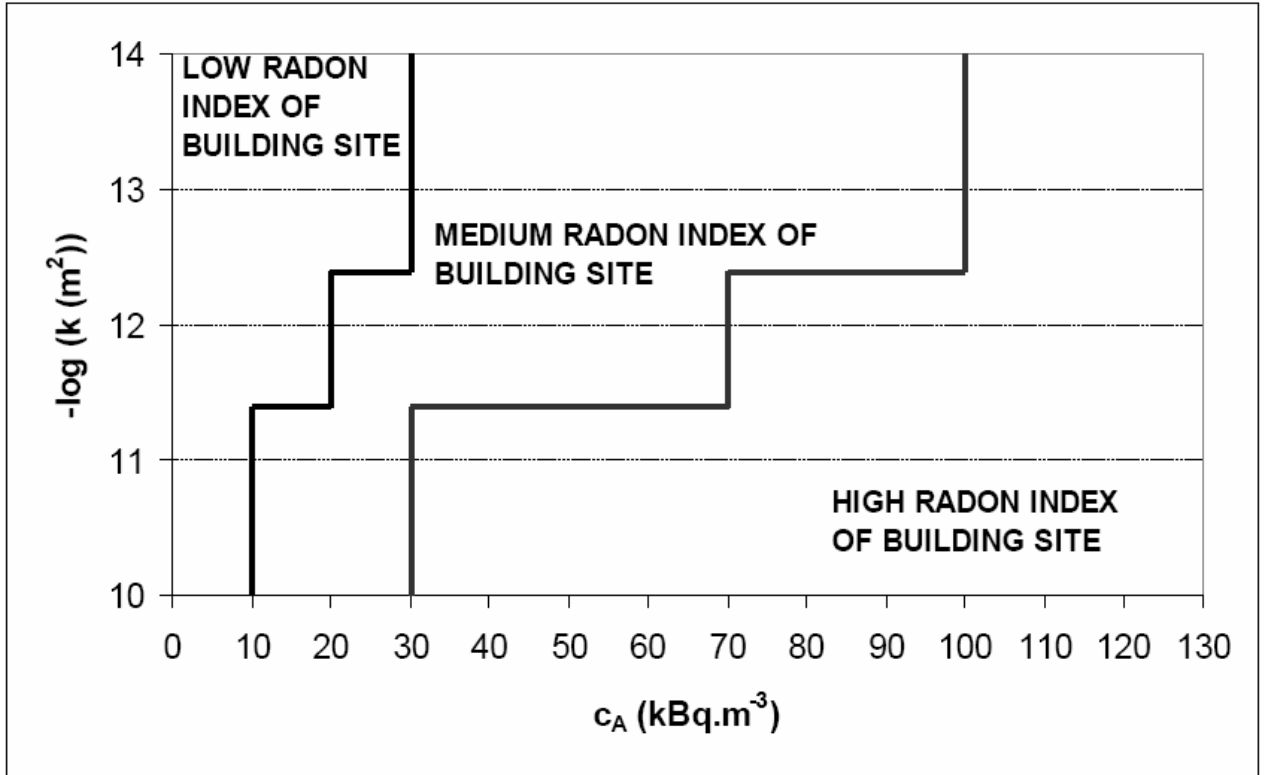


Рисунок 1 – Определение радонового индекса в соответствии с ранее используемой методологией (Barnet 1994)

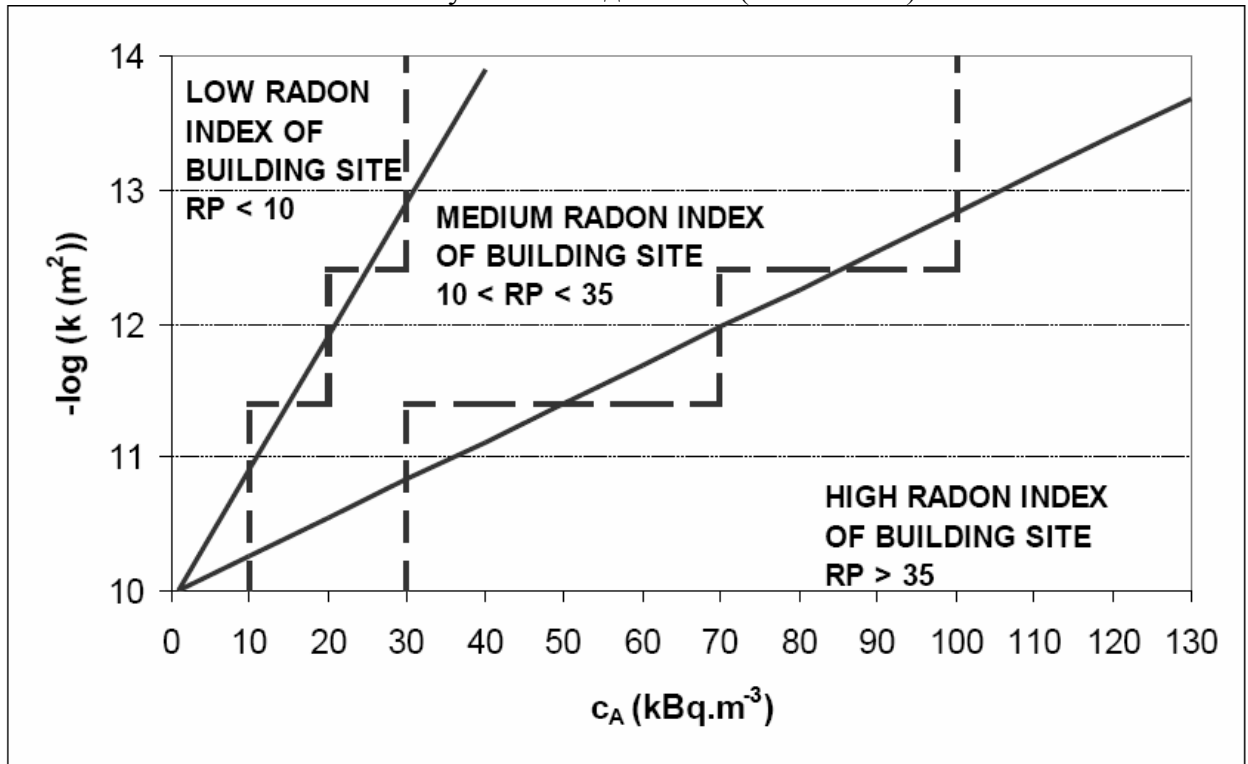


Рисунок 2 – Радоновый потенциал мест застройки

Проницаемость определяется экспертной оценкой (подразделы 2.4.1.2. и 2.4.2.2.).

Результирующий радоновый индекс места строительства (RI) выдается в одной из трех категорий: низкий, средний, высокий.

2.6. Детальная радоновая разведка

Этот подраздел не касается определения радонового индекса (RI) места застройки, однако обобщает требования к детальной радоновой разведке для определения радонового индекса строения (RB).

Для домов для одной семьи или для других домов без cellars, в которых используется фундамент глубиной 0.8 м ниже уровня почвы, или ближе к поверхности или даже над поверхностью, не приводятся какие либо специальные требования к проведению детальной радоновой съемки (т.е. определения радонового индекса места застройки (RI)).

Для случаев, когда глубина фундамента неизвестна или превышает глубину 0.8 м, последующие данные должны быть получены для потребностей детальной радоновой съемки (глубина фундамента и другие факторы могут рассматриваться только при наличии релевантных данных).

В этом последнем случае, полевые работы, документирование проницаемости, итоговый отчет должны сопровождаться:

- Описанием вертикального профиля почвы (или профилей) как минимум до глубины 1.5 м, с определением проницаемости нижнего слоя почвы (подраздел 2.4.1.2 и 2.4.2.2.).
- Информацией о типах подстилающей каменной породы и относительно к содержанию в ней ^{226}Ra и потенциальном увеличении радона в почвенном воздухе с глубиной.

Радоновый индекс здания (RB) выражает степень требуемой радиационной защиты в здании по отношению к проникновению радону из почвы. Он основан на радоновом индексе площадки строительства (RI), и принимает во внимание глубину фундамента и любые вертикальные изменения в проницаемости, вплоть до уровня контакта здания с почвой или подстилающей породой. Определение радонового индекса здания (RB) выполняется строительными экспертами. Оно основано на результатах детальной радоновой съемки и их собственных правилах радиационной защиты зданий (противорадоновая защита).

Это конец описания нового метода оценки. Последующие разделы предлагают детальное описание связанных других исследований и их результаты.

Результаты исследований радонового риска площадок застройки

3. Измерение содержания радона в почвенном воздухе

В связи с тем, что концентрация радона в почвенном воздухе может варьироваться в широких пределах на малых расстояниях, любая оценка на основе одиночного измерения не является достоверной. По оригинальному методу классификации радонового риска почвы фундамента (Barnet 1994), требуется как минимум 15 результатов измерения радона в почвенном воздухе для оценки площадки под застройку односемейного дома (Matolín and Prokor 1991). Измерения на площадках большего размера необходимо выполнять по сетке 10 x 10 м, или 20 x 20 м в некоторых случаях.

Это исследование сфокусировано на статистической оценке набора данных по уровню радона в почвенном воздухе. Главная цель переподтвердить требования, касающиеся минимального набора данных уровня радона в почвенном воздухе и сетке проводимых измерений.

3.1. Входные данные

Большинство данных, которые были использованы для статистической обработки, поступили из старых записей корпорации RADON. Эти данные – это данные измерений радона в почве проводимых на коммерческой основе. Только несколько дополнительных измерений было проведено в течение этой фазы исследования.

Детальные исследования включали 13 больших наборов данных, которые включали от 61 до 200 точек измерения. Данные были получены в процессе радоновой разведки проводимой для больших мест застройки по сетке 10 x 10 м, в период между 1993 и 2000. Во первых, базовые статистические параметры были получены для 13 оригинальных наборов данных. Многие поднаборы, которые соответствуют сети 20 x 20 м, были выбраны, потом из каждого оригинального набора и статистическая обработка была повторена. В заключение, два поднабора, которые были выбраны случайным образом из каждого оригинального набора, тоже были проанализированы. И, наконец, 30 меньших набора данных (каждый содержал 18 или 25 точек измерения) были проанализированы.

3.2. Статистические оценки

13 больших наборов данных (пример приведен в таблице 2) могут быть разделены на несколько групп в соответствии с предпочтительным типом распределения. Распределение множества наборов данных близко описываются логнормальной моделью, в то же время распределение других наборов найдено как гетерогенное, т.е. не находящее хорошего описания ни нормальной ни логнормальной моделью.

Нормальное распределение оказалось применимым в некоторых редких случаях. Общий вывод заключается в том, что ни нормальное, ни логнормальное распределение не годится для описания данных предыдущих исследований (Neznal et al. 1994a). Непараметрические оценки (робуст), такие как медиана или третий квартиль больше подходят для описания наборов данных измерения радона в почвенном воздухе.

Одной из целей данного исследования было протестировать соответствие наборов данных полученных по измерительной сети 10 x 10 и 20 x 20 м и оценить возможность снижения минимального требуемого числа измерительных точек. Основная проблема заключается в том, что число измерений обычно мало для нужд их статистической оценки. Любое снижение числа измеренных значений приводит к увеличению релевантного доверительного интервала.

Другими словами, если число измерений мало, на ширину доверительного интервала влияет большей степени количество данных, чем их вариабельность.

Минимальный размер набора данных, который дает приемлемую относительную погрешность для стандартного отклонения (10%), составляет 50 значений при условиях нормального распределения данных. Для логнормального распределения, минимальный размер набора данных существенно больше. Радоновую разведку выполняют обычно на площади не более чем 100 x 100 м, большие площади измеряются реже. Если измерения проводятся по сети 10 x 10 м, то такая площадка покрывается 121 точкой измерений. Если же применяется сеть 20 x 20 м, то для покрытия необходимо только 36 точек. Такое небольшое количество недостаточно для хорошей статистической оценки даже в том случае, когда данные подчиняются нормальному закону распределения.

Когда оцениваются наборы данных с большей вариабельностью, выделение сети измерений 20 x 20 м из сети для 10 x 10 м приводит к существенному расширению доверительных интервалов для медианы и для третьего квартиля (см. таблица 2). Предельные значения, которые отделяют средние и высокие категории радонового риска (радонового индекса) - 10 и 30 кБк^м⁻³, соответственно, когда проницаемость почвы высока.

Доверительный интервал для третьего квартиля может, таким образом, охватывать все три интервала, соответствующие трем различным категориям риска.

Для маленьких наборов данных (набор из 15 измерений значения концентрации радона в почвенном воздухе, соответствующие области формирования для одиночного дома семейства), применимость статистических оценок спорна вообще.

Может быть сделано заключение о том, что по соображениям статистической перспективы не имеют смысла замена сети 20 x 20 м сетью 10 x 10 м. Это заключение правильно также в вопросе сокращения минимума требуемого числа точек измерения, когда оценивается строительный участок дома для одного семейства.

Таблица 2: Результаты статистической оценки

| Набор № | 1561-96 | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| N | 197 | 57 | 50 | 47 | 43 | 60 | 40 |
| Среднее | 7.9 | 7.2 | 7.4 | 7.4 | 9.8 | 7.4 | 7.6 |
| Среднее10 | 6.3 | 6 | 5.9 | 6.2 | 7.6 | 6.1 | 6 |
| Медиана | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.1 |
| Q ₇₅ | 8.5 | 8.3 | 7.8 | 7.6 | 10.4 | 8.5 | 8.4 |
| Сигма | 7.5 | 5.8 | 7.2 | 6.3 | 10.5 | 6.5 | 7.2 |
| Сигма10 | 3 | 2.7 | 2.9 | 2.8 | 5 | 3.3 | 3.6 |
| (Q ₇₅ - Q ₂₅)/2 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 1.8 | 3.2 | 2.6 | 2.5 |
| Минимум | 1.1 | 1.1 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| Максимум | 58.5 | 27.7 | 38.3 | 33.4 | 58.5 | 30.4 | 30.4 |
| Сигма.сред. | 0.95 | 0.8 | 0.96 | 0.86 | 1.07 | 0.88 | 0.95 |
| Нормальности тест | нет | нет | нет | нет | нет | нет | Нет |
| 95%CI:средн | (6.8;8.9) | (5.7;8.8) | (5.4;9.5) | (5.5;9.2) | (6.6;13.0) | (5.8;9.1) | (5.3;9.9) |
| 95%CI:медиана | (5.0;5.7) | (4.3;6.0) | (4.4;6.0) | (4.7;6.6) | (5.0;7.4) | (4.1;5.6) | (3.8;5.6) |
| 95%CI:сигма | (6.8;8.3) | (4.9;7.1) | (6.0;8.9) | (5.3;8.0) | (8.7;13.3) | (5.5;8.0) | (5.9;9.2) |
| 95%CI:Q ₇₅ | (6.0;10.9) | (6.0;11.2) | (6.0;12.7) | (6.5;14.3) | (7.3;21.5) | (5.6;12.3) | (5.3;17.9) |

(N = количество точек измерения; среднее = арифметическое среднее; среднее10 = обработанное арифм. среднее (10%); Q₂₅ = первый квартиль (25й процентиль); Q₇₅ = третий квартиль (75й процентиль); сигма = стандартное отклонение; sigma10 = обработанное стандартное отклонение (10%); 95%CI - 95% доверительный интервал)

4. Отбор почвенного воздуха

Типовое оборудование, используемое в Чешской Республике для отбора проб газа в почве, состоит из полого стального пробника с маленьким диаметром со свободным, заостренным концом в нижней части.

Пробник погружается в почву на глубину 0.8 м. Провод (прут) перфоратор вставляется в пробник. Активная область создается в головке пробника проталкиванием наконечника, посредством провода-перфоратора, на расстояние нескольких сантиметров. Образцы газа в почве собираются, используя шприц или насос, и подаются в заранее вакуумированные ячейки Лукаса (см. рис. 3). Подобная методика осуществления отбора была описана Reimer (1990).

Измерения, проведенные в предыдущие годы (Matolín et al. 2000, Neznal et al. 1994b, Neznal et al.1996a) показали, что концентрация радона в почвенном воздухе зависит от глубины отбора, проницаемости почвы, размеров полости из которой проводится отбор, а также от применяемой техники отбора проб.



a)

b)

c)

Рисунок 3 – Отбор пробы воздуха

(а) Вставка заостренного наконечника в нижнюю часть пробника

(b) Заостренный наконечник выталкивается на несколько сантиметров вниз – это создает полость в нижней части пробника

(с) Отбор пробы почвенного воздуха (газа) при помощи шприца

Почвы низкого проницаемости часто требуют расширения полости для осуществления отбора пробы (т.е. расширение активной области).

4.1. Геометрия отбора проб

Связь между активностью радона в почвенном газе и различными геометриями отбора проб изучалась на четырех испытательных областях, которые характеризуются почвами низкой проницаемости и/или высокой влажности почвы. Измерения были сделаны в девяти точках измерений в каждой испытательной области. В каждой точке измерения, образцы почвенного газа отбирались на различных глубинах отбора и, используя различные размеры активной области.

- глубина отбора пробы 60-62 см, проем 2 см, называемая как «геометрия 60 см (2 см).»;
- глубина отбора пробы 80-82 см, проем 2 см, называемая как «геометрия 80 см (2 см).»;
- глубина отбора пробы 80-82 см, проем 5 см, называемая как «геометрия 80 см (5 см).»;
- глубина отбора пробы 80-90 см, проем 10 см, называемая как «геометрия 80 см (10 см).»;
- глубина отбора пробы 70-90 см, проем 20 см, (пробник вытаскивали обратно к поверхности), называемая как «геометрия 70-90 см»;
- глубина отбора пробы 60-90 см, проем 30 см, называемая как «геометрия 60-90 см»;
- глубина отбора пробы 40-90 см, проем 50 см, называемая как «геометрия 40-90 см».

4.2. Полевые измерения

Измерения были проведены в трех испытательных областях: Světice, расположенном в 20 км в северо-востоке от Праги, подстилающая порода сформирована Ordovician сланцами, закрытыми loess суглинками; Dubnice в северной Bohemia, расположенном 20 км на запад от Liberec, порода сформирована Cretaceous claustones и песчаниками, закрытыми глинистыми песками или песчаными глинами; и Růžená в южной Bohemia, расположенном 90 км на юг от Праги, подстилающая порода сформирована durbachites (biotite syenite) Центрального Богемского плато, закрытого речными отложениями.

Результаты, полученные в этих точках, были подобными. Считывание радона в почвенном воздухе были идентичны тому, как использована геометрия 80 см (2 см), геометрия 80 см (5 см), или геометрия 80 см (10 см). Результаты, полученные при использовании геометрии 60 - 90 см, были несколько ниже, но подобны тем, что и от геометрии 60 см (2 см) испытание (см. рис. 4).

Почти никакой зависимости радона в почвенном газе от изменения активной области не наблюдалась в четвертой испытательной области в Ptice (расположенный 20 км на запад от Праги, подстилающая порода сформирована Ordovician сланцами, покрытыми Четвертичными eolian глинистыми суглинками), характеризуется гомогенным вертикальным профилем почвы (см. рис. 5).

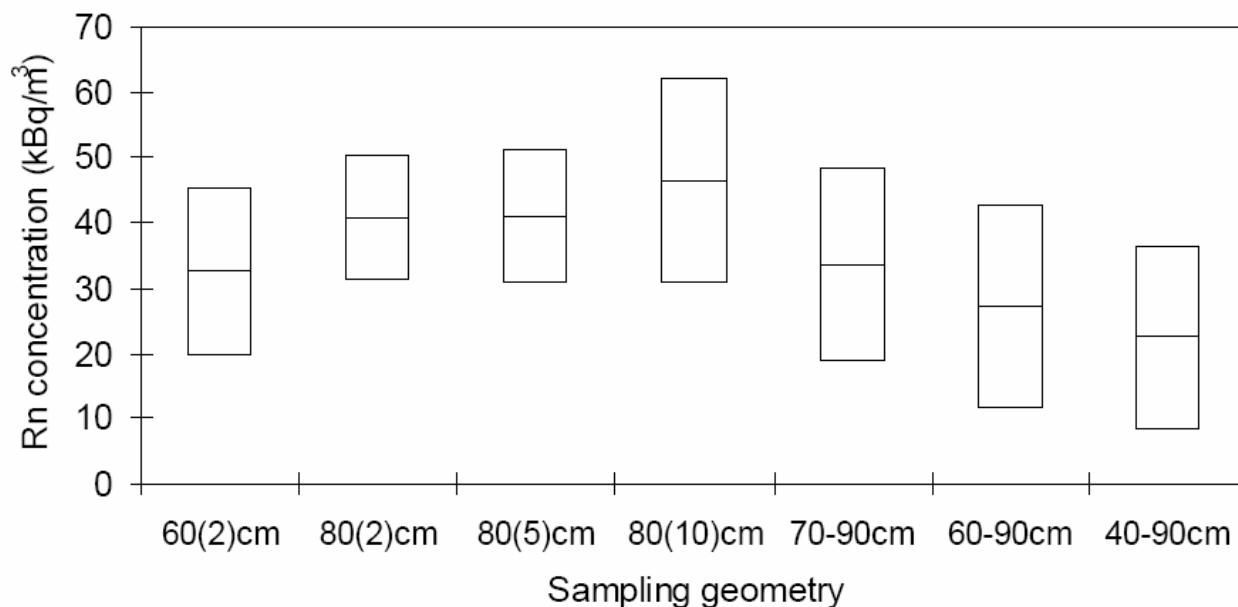


Рисунок 4 – Референсная площадка в Světice: Концентрация радона в почвенной воздухе (арифметическое среднее \pm стандартное отклонение) от геометрии измерения.

4.3. Влияние различной геометрии на результаты измерений

Таким образом, можно сделать вывод о том, что измеренные концентрации радона в почвенном воздухе не зависят от геометрии осуществления отбора пробы воздуха, если уровень почвы гомогенен и низкого проницаемости.

Уменьшение радона в почвенном воздухе с увеличением размера активной области (то есть использование геометрии 70 - 90 см, геометрии 60 - 90 см, или геометрии 40 - 90 см) указывает на то, что вертикальный профиль почвы не гомогенен и что проницаемость почвы является выше в мелких глубинах.

При отборе проб воздуха в почвах низкого проницаемости, требуется выполнять совершенную герметизацию всех частей оборудования.

5. Определение проницаемости

Первоначальный метод для классификации радонового риска использует *in situ* определение проницаемости почвы или анализа размера *частиц* (из которого определяется проницаемость почвы по относительному весу мелкой фракции в пробе почвы). Главным недостатком метода исследований размера частицы - то, что этот метод не рассматривает

другие факторы, влияющие на проницаемость почвы, типа естественной влажности, плотности, и эффективной пористости почвы. Результаты прямых измерений настоятельно зависят от изменений в маленьком масштабе в характере почвы. Кроме того, оборудование, обычно используемое в Чешской Республике, не допускает точных измерений в почвах с чрезвычайно низкой или высокой проницаемостью (результаты изменяются на несколько порядков величины). Никакие правила не срабатывают для статистической оценки значений проницаемости, минимальное число измерений, или для оценки изменений в вертикальных профилях не были включены в первоначальный метод.

Эта часть исследования, сосредоточенного главным образом при выборе наиболее подходящего метода для определения проницаемости почвы, и на влиянии пространственных и сезонных изменений при классификации радонового риска. Более детальная информация относительно результатов этого исследования дается в Neznal и Neznal (2003). Для лучшего понимания факторов, влияющих на проницаемость и причины для замены однородного метода, это повторено в этом разделе.

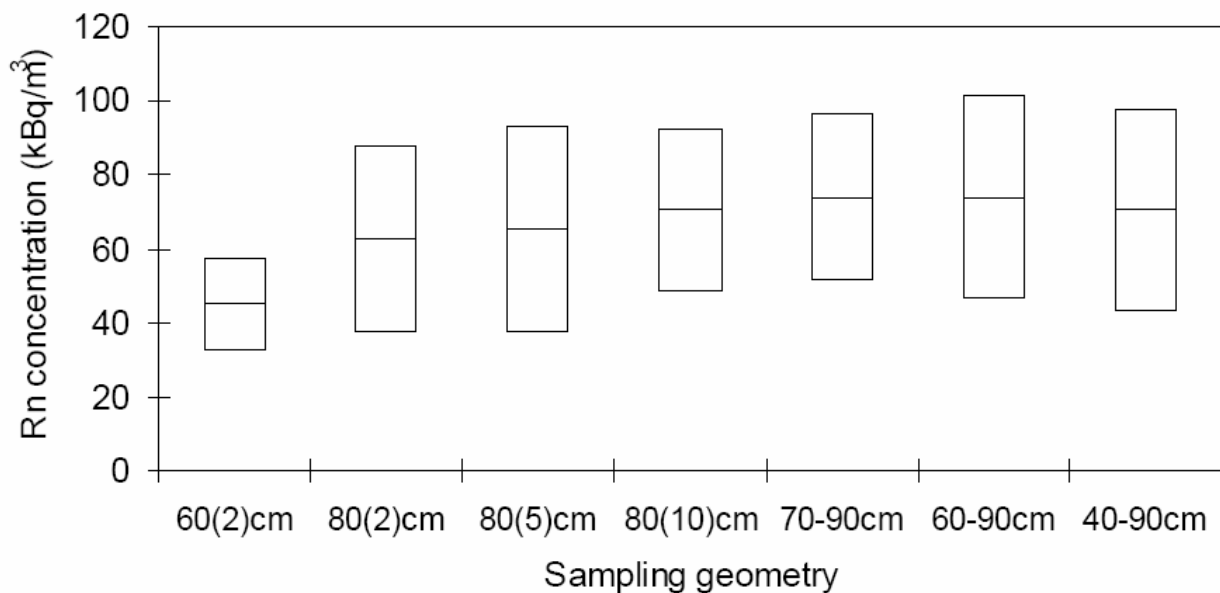


Рисунок 5 – Референсное место Ptice: радон в почвенном воздухе (арифметическое среднее \pm стандартное отклонение) относительно к геометрии измерения

5.1. Сравнение методов определения проницаемости почвы и полевых измерений

В качестве первого шага был предложен широкий диапазон подходов, используемых в Чешской Республике и других странах для определения газовой проницаемости почв и каменной породы для дальнейшего исследования (Tanner 1994). Они состоят главным образом из измерений одной пробы (Damkjaer и Korgsbech 1992), измерения двойных проб (Garbesi и другие. 1993), и определения проницаемости от факторов типа водной проницаемости (Rogers и Nielson 1991) и анализом размера зерна. Методы, используемые *in situ*, помимо оценки радонового риска, были также использованы (Asher-Bolinder et al. 1990, Morris and Fraley 1994). После сравнения преимуществ и недостатков этих систем от профессиональных и экономических перспектив, были подготовлены три прямых опытных метода измерения. Главная цель состояла в том, чтобы избежать или, по крайней мере, уменьшить недостатки, которые встречались в оборудовании RADON JOK.

Эти три прототипа и RADON JOK система были проверены при различных геологических условиях. Испытания подтвердили ожидаемые ограничения специфических методов. Система исследования одной пробы была выбрана для испытания временных и пространственных изменений из-за её простоты на основе её предыдущих результатов. Измерения были выполнены на двух испытательных полигонах с отличными геологическими характеристиками: Světice, расположенном в 20 км юго-восток от Праги, с подстилающей породой, сформированной Ordovician сланцами, закрытыми лессовыми суглинками; и Klánovice расположенном в восточной части Праги, с подстилающей породой, сформированным Cretaceous песчаниками, закрытыми песками. Испытания проводились ежемесячно в течение однолетнего периода. Газовая проницаемость почвы и камней была измерена в 15 точках на глубине 0.8 м. (та же самая глубина, в которой образцы газа почвы собраны для измерений концентрации радона). Другие важные параметры, главным образом концентрация радона в почвенном воздухе и влажность почвы, были также определены с интересом рассмотрения любых корреляций, которые могли бы иметь место между различными влияющими факторами. Данные, собранные при исследованиях на исследовательских площадках в Kocanda и Lysá nad Labem (раздел 8.1.) также использовались в заключительной оценке.

Детальные измерения в 21 других областях использовались для сравнения результатов прямых *in situ* измерений проницаемости с, данными, полученными путем анализа размера частиц почвы. Оценки, основанные на описании изменчивости нескольких факторов в вертикальном профиле, сравнивались с таковыми, основанными на результатах прямых *in situ* измерений и полученных из анализа размера частицы.

5.2. Результаты полевых исследований

Вообще, хорошая корреляция между измеренными параметрами была получена в областях с гомогенной и высоко водопроницаемой почвой. Наоборот, корреляции между концентрацией радона и проницаемостью, также как между проницаемостью и влажностью почвы, были очень слабы в средах средней или низкой проницаемости. Это заключение было правильно даже для высоко проницаемых сред, где имела место относительно высокая насыщенность верхних горизонтов (рис. 6).

Относительно статистической оценки, возможно, что на индивидуальные значения проницаемости существенно воздействует маленький размер измеренного объема почвы, особенно в областях среды с низкой проницаемостью. На статистическую оценку могло воздействовать возникновение выпадающих значений (outliers) высокой проницаемости, и неточными значениями на более низком пределе в случаях чрезвычайно низкой проницаемости. Таким образом, для статистической оценки прямых измерений проницаемости должно требоваться большое количество результатов измерений.

В большинстве этих 21 областей заключительная классификация, основанная на вертикальной оценке профиля, была совместима с результатами прямых измерений, и частично с данными, полученными из анализа размера частицы. Где проницаемость, полученная из анализа размера частицы, была противоречащей, недооценка проницаемости вызвана главным образом низкой влажностью почвы и-или возникновением существенных макро - и микротрещин. Завышенная проницаемость может наблюдаться особенно в мелкозернистых песках с относительно высокой влажностью почвы.

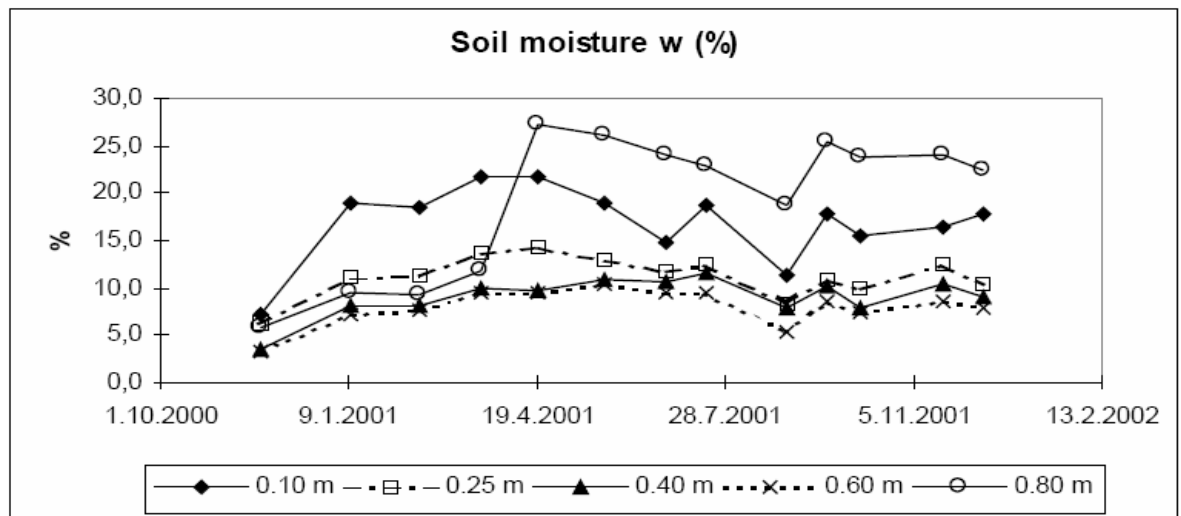
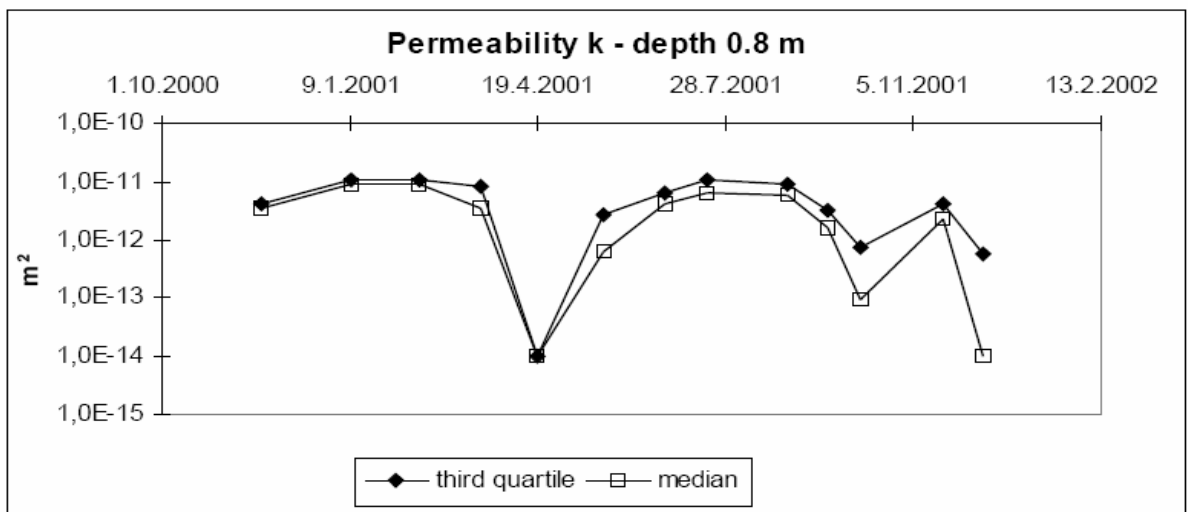
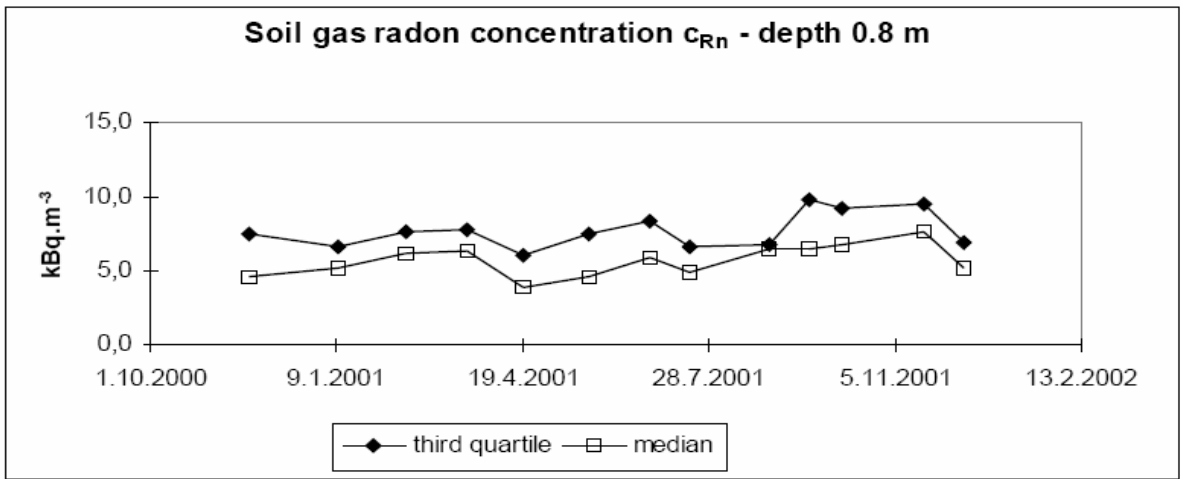


Рисунок. 6 – Результаты измерений в регионе Klánovice

5.3. Оценка проницаемости

Для улучшения метода классификации радонового риска рекомендуется, чтобы проницаемость почв был определена посредством большого количества прямых *in situ* измерений проницаемости и-или опытной оценкой проницаемости.

Прямые *in situ* измерения проницаемости должны быть выполнены на глубине 0.8 м под земной поверхностью. Рекомендуется, чтобы использовался прибор, основанный на измерении воздушного потока высасываемого из почвы, или на накачивании воздуха в почву под постоянным давлением.

Для прямого *in situ* измерения проницаемости, требование на число измерений - то же самое, что касается числа измерений концентрации радона в почвенном воздухе, то есть по крайней мере 15 измерений для одиночного здания (со строительным участком $\leq 800 \text{ м}^2$), или измерением в 10 x 10 м. сетка для больших областей (строительные участки $> 800 \text{ м}^2$). Третий квартиль набора данных, который уменьшает влияние выпадающих (outliers) результатов и местных аномалий проницаемости, используется как решающее значение для оценки.

В таких случаях нет необходимости описывать вертикальный профиль почвы. Однако, человек, ответственный за оценку и заключительную классификацию должен рассмотреть местные аномалии проницаемости, вариабельность и разброс данных.

Экспертная оценка проницаемости почвы необходима, когда *in situ* измерения проницаемости не выполнены во всех точках отбора проб почвенного воздуха. Эта опытная оценка, которая заканчивается классификацией проницаемости площадки категорией - низко, средне, или высоко, является основанной на описании вертикального профиля почвы с минимальной глубиной 1 м. Эта оценка должна сопровождаться, по крайней мере, одним из следующих методов:

□ Макроскопическое описание образцов почвы до глубины 0.8 м., с классификацией по проницаемости (низкая - средняя - высокая). Оценка мелкой фракции (f, размер частицы $< 0,063 \text{ мм}$) используется для этой классификации.

□ Оценка сопротивления в течение всасывания образцов газа почвы для измерений концентрации радона во всех точках осуществления выборки, и оценка полной категории проницаемости (низкая - средняя - высокая).

В течение этой оценки, которая настоятельно зависит от персонального опыта, есть от эксперта, все же субъективное знание, необходимо описать изменения в вертикальном профиле от поверхности до принятой глубины основы фундамента, или к глубине принятого контакта между фундаментом и почвой.

6. Скорость эксхалляции радона с поверхности почвы

Более детальная информация относительно исследования измерения эксхалляции радона из земной поверхности, также как детальное описание анализа результатов измерения, была представлена Neznal и Neznal (2002).

Унифицированный метод, используемый в Чешской Республике для определения радонового потенциала почв фундамента, основан на измерении концентрации радона в почвенном воздухе и на определении проницаемости почвы. Образцы газа почвы собираются на глубине 0.8 м ниже земной поверхности. Когда толщина покрытия почвы очень низка, или когда поры почвы насыщены водой, отбор проб на этой глубине может быть усложнен или почти невозможен. Мы должны, поэтому спросить, имеется ли другой способ оценить концентрацию радона в почвенном воздухе.

Эксхалляция радона из земной поверхности - один из факторов, который характеризует радоновый потенциал почв, или радоновый потенциал материалов отходов, загрязненных

естественными радионуклидами. Имеются различные методы для определения скорости радоновой эксхалиции, типа простого метода сумматора (Hinton 1985, Anděl и другие. 1994, Neznal и al.1996b, Merta и Burian 2000). Однако, серьезный недостаток, связанный с этим методом - то, что на поверхность земли настоятельно воздействуют, изменяемые метеорологические условия. Поэтому ожидаются большие временные колебания скорости эксхалиции радона с поверхности.

6.1. Простой метод аккумуляции

Определение эксхалиции радона, использующее простой метод сумматора основано на измерении нарастания концентрации радона в цилиндрической канистре, помещенной в измеряемую поверхность. В течение полевого обследования использовались цилиндрические канистры, имеющие основу 0.08 м^2 и высоту 0.2 м. Одинокое измерение эксхалиции радона вовлекало определение повышения концентрации радона в четырех воздушных образцах, собранных от сумматора в регулярных интервалах 40 или 60 минут. Для определения других параметров, образцы газа почвы для измерения радона в почвенном воздухе были собраны на глубине 0.8 м ниже земной поверхности. Прямой *in situ* измерение проницаемости почвы были сделаны, используя RADON-JOK оборудование. Этот последний метод основан на изъятии газа из почвы посредством отрицательного давления. Влажность почвы была определена, сравнивая вес образцов почвы до и после высыхания. Временные изменения во влажности почвы были определены, используя косвенный метод, основанный на измерении d_i -электрической константы почвы.

6.2. Места испытаний

Большинство полевых измерений было выполнено в четырех испытательных областях, характеризованных различными геологическими условиями: Dubnice в северной Bohemia, расположенном 20 км на запад от Liberec, с подстилающими породами, сформированными Cretaceous суглинок и песчаниками, закрытыми глинистыми песками или песчаными глинами; Stráž, расположенный в северной Bohemia около города Stráž pod Ralskem на хвостах завода по переработке урана; Růžená, расположенный в южном Bohemia 90 км С подстилающими породами, сформированным durbachites Центрального Богемного плато, верхние горизонты, сформированные коркой наклона; и Žibřidice, расположенный в северном Bohemia 18 км на запад от Liberec, с подстилающей породой, сформированной Cretaceous песчаниками, закрытыми речными песками и глинами.

Скорость эксхалиции радона, проницаемость почвы и концентрация радона в почвенном воздухе были определены в десяти точках измерений в течение одного дня. Влажность почвы была измерена в шести пробах на различных глубинах ниже земной поверхности. Временные изменения всех факторов периодически измерялись с лета 2000 по лето 2001. Измерения повторялись каждые два месяца, т.е. семь раз на каждом месте за период наблюдений.

Два различных пути размещения канистр на измеренной поверхности были испытаны в испытательных областях Dubnice и Stráž: (a) канистра помещена в безмятежную поверхность почвы и запечатана с глиной, или песчаной глиной (этот метод будет упомянут как “поверхностный” метод); (b) верхний уровень почвы удален, и канистра помещена приблизительно 10 см ниже поверхности земли (этот метод будет упомянут как “-10cm” метод).

В сентябре 2001, дополнительные измерения эксхалиции радона, проницаемость почвы, и активности радона в почвенном воздухе были сделаны в области испытания Zdiměřice (расположенном, приблизительно 5 км в юго-востоке от Праги, подстилающая

порода сформирована Proterozoic сланцами, а верхние горизонты глинами). Эта точка характеризуется чрезвычайно низкой проницаемостью почвы и водной насыщенностью верхнего уровня почвы.

6.3. Применимость метода

Детальный анализ результатов измерения был представлен Neznal и Neznal (2002). Пространственная изменчивость эксхалиции радона была сопоставима или слегка выше, чем таковая для концентрации радона в почвенном воздухе. Более высокая изменчивость наблюдалась, когда измерения были сделаны при критических метеорологических условиях (типа того, когда поверхность почвы была заморожена или насыщалась с водой, или во время сильных ветров).

Временная вариабельность эксхалиции радона была значительно выше таковой для концентрации радона в почвенном воздухе, когда образцы газа почвы были собраны на глубине 0.8 м ниже поверхности. Два различных метода размещения канистр на поверхностях, которые измерялись ("поверхность" и "-10 см" методы) были проверены в двух испытательных областях. Ожидалось, что последний из этих двух будет менее чувствителен к изменениям в метеорологических условиях, но это предположение не было подтверждено. Временная изменчивость результатов, полученных обоими методами, была подобна.

Корреляции между поверхностной эксхалицией радона и концентрацией радона в почвенном воздухе, и между эксхалицией радона и влажностью почвы, были очень слабы. Это заключение было правильно даже для влажности почвы, измеренной в глубине 0.1 м.

Поэтому заключается, что измеряемые значения эксхалиции радона находятся под существенным воздействием условий поверхности почвы. Значительно ниже уровни обнаруживались, когда поверхность почвы была заморожена или закрыта водой. Кроме того, уменьшение эксхалиции радона было найдено в испытательной области Růžená после сжатия верхнего уровня почвы.

Дополнительные измерения, которые были приняты в Zdiměřice области, подтвердили, что использование эксхалиции радона не подходящее для определения радонового потенциала почв в формировании областей с почвами, которые насыщены водой или низкой проницаемостью. Если водная насыщенность верхних уровней почвы связана с низкой проницаемостью почвы, эксхалиция радона от поверхности очень низка даже, когда измерения концентрации радона в почвенном воздухе указывают на высокий потенциал радона. По этим причинам эксхалицией радона нельзя рекомендовать как стандартный дополнительный метод для оценки риска радона почв фундамента.

7. Мгновенные, интегральные, и продолжительные измерения радона в почвенном воздухе

Оценка радонового потенциала почвы фундамента основана на мгновенных значениях концентрации радона в почвенном воздухе, используя ячейки Лукаса. Эта часть исследования, сосредоточена на интегральных и непрерывных методах измерения, в который мы анализировали применимость непрерывных и-или интегральных методов измерений концентрации радона в почвенном воздухе для классификации радонового потенциала.

7.1. Лабораторные и полевые тесты

Следуя обзору доступных публикаций, лабораторные испытания на влиянии высоких и низких температур на измерения были выполнены. Ответ scintillometer на контрольный

источник излучения (альфа-излучатель) был определен неоднократно в температурах в пределах от -6 до $+35$ °С. Полевое испытание включало третий шаг этого исследования. Краткосрочные временные изменения концентрации радона в почвенном воздухе изучались различными методами измерения, включая мгновенные методы (осуществление отбора) использование ячеек Лукаса, непрерывных мониторов, и интегральный метод на основе трековых детекторов.

Детальное описание методов измерения, которые были сравнены, и результаты, дается в Neznal и другие. (2004).

7.2. Оценка результатов

Лабораторные испытания подтвердили, что ответ прибора – зависит от температуры, особенно если установка работы, высокое напряжение фотоумножителя не оптимально. В течение полевых измерений, относительно низкая изменчивость радона в почвенном воздухе наблюдалась в течение испытательного срока 72 часа. Различные временные изменения наблюдались при использовании различных методов (пример полученных результатов, используя два различных непрерывных монитора, дается в рис. 7). Многие из этих изменений было вероятно вызвано колебаниями и ошибками, связанными с измеряющими методами, непосредственно и это не отражало реальные изменения в измеренном параметре.

Поскольку измерения не выполняются при критических метеорологических условиях, все проверенные методы вообще применимы для определения концентрации радона в почвенном воздухе. Единственный существенный недостаток непрерывных и интегральных методов - их существенно выше стоимость.

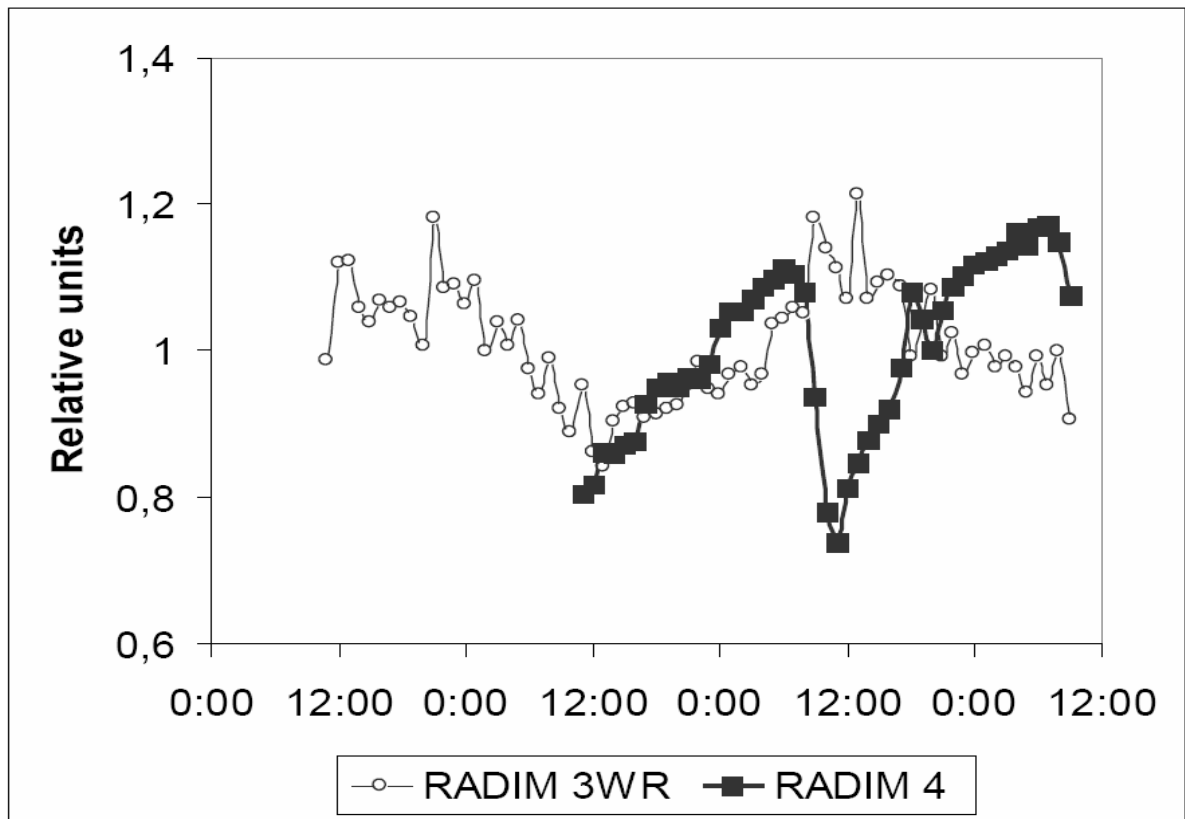


Рисунок 7 – Относительные временные колебания радона в почвенном воздухе – продолжительные измерения (RADIM)

8. Геологические параметры и их влияние на заключительную оценку радонового потенциала почвы

Метод, который использовался для классификации радонового риска в Чешской Республике, начиная с 1994 (Barnet 1994) основан на оценке концентрации радона в почвенном воздухе и на степени, в которой почва и камни являются проницаемы к газам. Таким образом, проницаемость - один из главных факторов для заключительной классификации радонового риска строительных участков. Заключительная оценка проницаемости может быть очень трудна в некоторых случаях, особенно, когда пространственная изменчивость проницаемости очень большая (Ball et al. 1981, Tanner 1991). Это имеет интерес, чтобы искать другие факторы, которые являются подобно эффективными в описании радонового потенциала, и пытаться заменить их на проницаемость. Мы поэтому изучили преимущества и недостатки использования различных факторов (типа влажности почвы, насыщенности, эффективной пористости, пористости, плотности, и оптовой плотности) с целью классификации радонового риска. Это исследование рассматривает вертикальные и горизонтальные изменения в профиле почвы, сезонная изменчивость условий, и доступности методов измерения и оборудования.

8.1. Измеряемые параметры

Для сравнения преимуществ и недостатков использования различных параметров для классификации радонового риска, мы выполнили измерения в двух испытательных областях с различными, все же гомогенными, геологическими условиями: Lysá nad Labem, расположенный в восточной части города, 40 км на восток от Праги, подстилающая порода сформирована Cretaceous отложениями, покрытие Четвертичными речными песками; и Kosanda, расположенный 50 км на восток от Праги, подстилающая порода сформирована Proterozoic paragneiss, закрытый лесом и лессовым суглинком. При выборе для испытания параметров и методов измерения, экономические показатели оказались очень важными, поскольку измерительные методы должны быть к коммерческой практике. По этой причине мы сконцентрировались в основном на измерениях *in situ*.

Следующие параметры были выбраны для рассмотрения: проницаемость, влажность почвы, пористость, водная насыщенность, и массовый процент для различных фракций размера частиц почвы. Эти факторы были измерены, наряду с концентрацией радона в почвенном воздухе, в 15 точках на различных глубинах каждый месяц в течение одного летнего периода. Некоторые данные от измерений в Klánovice и Světice областях (раздел 5.1.) также использовались.

8.2. Применимость различных параметров

Вообще, хорошая корреляция между измеренными параметрами была получена в областях с гомогенными и высоко водопроницаемыми почвами. Коэффициенты корреляции между значениями медианы в Lysá nad Labem испытательная область (с гомогенными верхними уровнями почвы, характеризованными низким уровнем радона в почвенном воздухе и высокой проницаемостью), следующие:

$$\begin{aligned} cRn(0.8m)/cRn(0.4m) &= 0.92 & k(0.8m)/k(0.4m) &= 0.83 \\ cRn(0.8m)/k(0.8m) &= -0.68 & cRn(0.4m)/k(0.4m) &= -0.60 \\ cRn(0.8m)/w(0.1m) &= 0.70 & k(0.8m)/w(0.1m) &= -0.52 \\ cRn(0.8m)/w(0.1m) &= 0.70 & k(0.8m)/w(0.25m) &= -0.66 \end{aligned}$$

Примечание: Значения в скобках представляют глубину ниже уровня почвы; **cRn** - концентрация радона в почвенном воздухе, **k** - проницаемость, **w** - влажность почвы.

Наоборот, корреляции между радоном в почвенном воздухе и проницаемостью почвы, и между проницаемостью и влажностью почвы и другими параметрами, были часто очень слабы в средах средней или низкой проницаемости. Пример от области испытания Kocanda иллюстрирован в рис. 8. Хотя эта область может быть описана как наличие гомогенных верхних уровней почвы, большие пространственные и вертикальные изменения в проницаемости, и другие факторы не позволяют коррелировать никаким измеренным параметрами.

Значения проницаемости находятся под сильной зависимостью от изменений маленького масштаба в характере почвы. Подобная ситуация произошла даже в высоко водопроницаемых средах, где имелась относительно высокая насыщенность верхних горизонтов почвы (типа в области испытания Klánovice).

Эти результаты были развиты повторными измерениями радона в почвенном воздухе и проницаемостью почвы в области Prosek в Праге 9, где наблюдается существенная вариабельность в верхних горизонтах почвы (верхние горизонты сформированы из лесов, в то время как подлежащая порода состоит из Cretaceous песчаника). Более низкие концентрации радона в почвенном воздухе, соответствующие более высокому проницаемости перед процессом уплотнения и стабилизации извести произошел в этом узле, и более высокие концентрации, соответствующие, понижению проницаемостью после этих изменений закончились той же самой классификацией.

Для улучшения метода классификации радонового риска, рекомендуется, чтобы все факторы были оценены, включая их вариацию в пределах вертикального профиля от поверхности до принятого уровня фундамента здания, или к принятому уровню контакта между формированием и почвой. Необходимо описать следующие параметры: проницаемость, размер зерна, влажность почвы, степень насыщенности, эффективная пористость, пористость, плотность, оптовой плотность, компактность, толщина покрытия Четвертичных отложений, символ наклона подстилающей породы, и любая модификация слоев почвы антропогенными действиями.

9. Доступность радона

Два главных фактора, используемые в классификации радонового риска почв фундамента – концентрация радона в почвенном воздухе и проницаемость почвы. Оценка этих факторов была полуколичественная (см. таблица 1 в разделе 2.5.2.) в первоначальном методе, обычно используемом в Чешской Республике (Barnet 1994). Классификация проницаемости основана на описании вертикального профиля почвы. Для оценки данных измерения радона в почвенном воздухе в качестве решающего параметра был использован третий квартиль (= 75-му процентилю) от набора измеренных значений.

Для практического приложения радонового обследования для выбора оптимальной технологии строительства, казалось бы полезно определить единый параметр для характеристики радонового потенциала почвы. Этот параметр обычно называется доступность радона, хотя для перехода к новому методу мы использовали радоновый потенциал строительного участка (RP). Этот параметр должен позволить более точно характеризовать радоновый риск, особенно, *когда измеренные значения - близки к пределам, которые отделяют различные категории риска.*

Различные подходы и модели для оценки доступности радона изучались и проверялись.

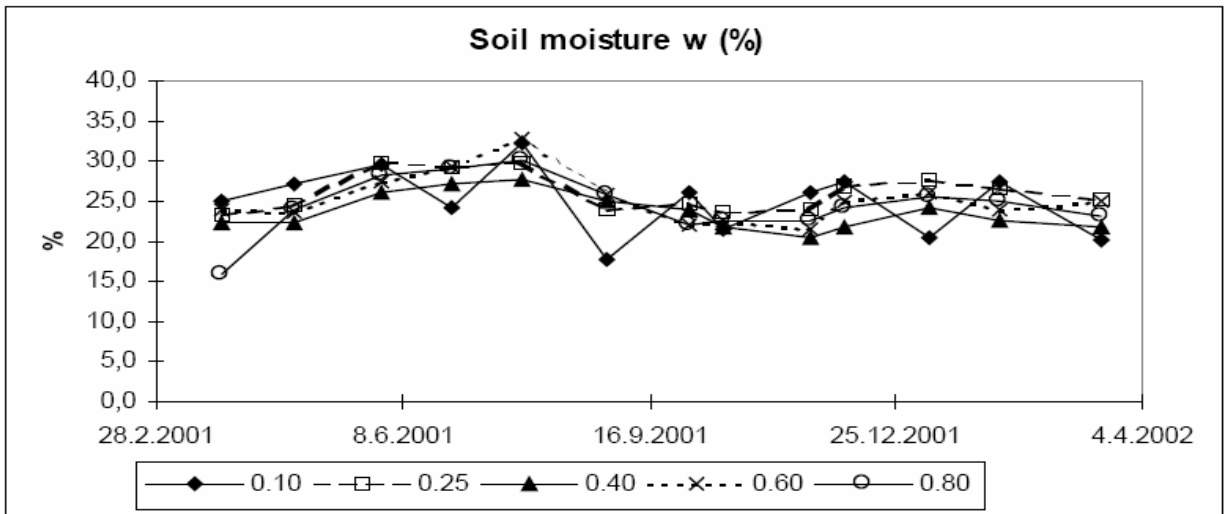
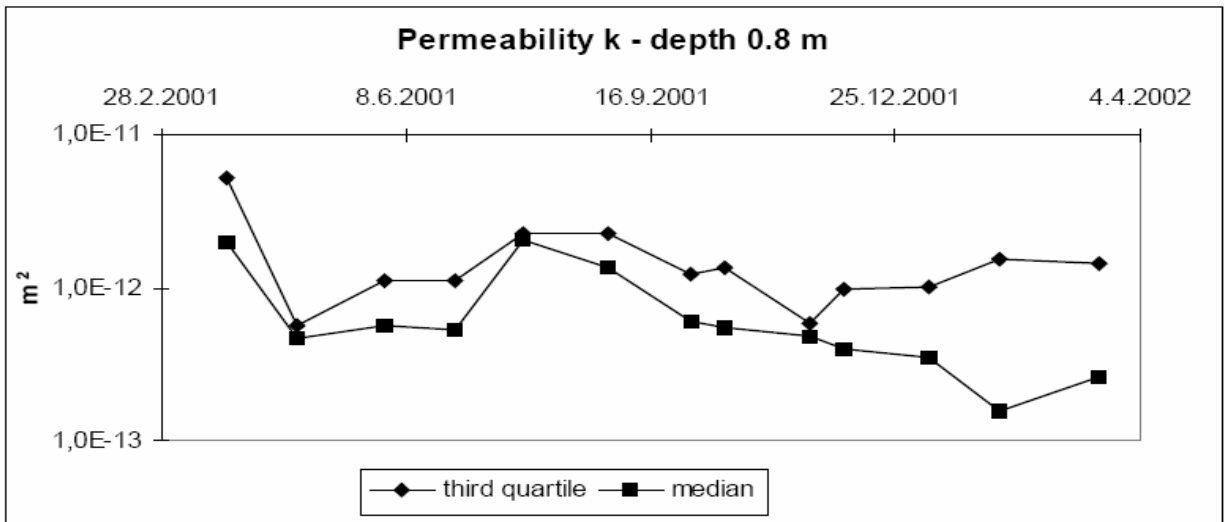
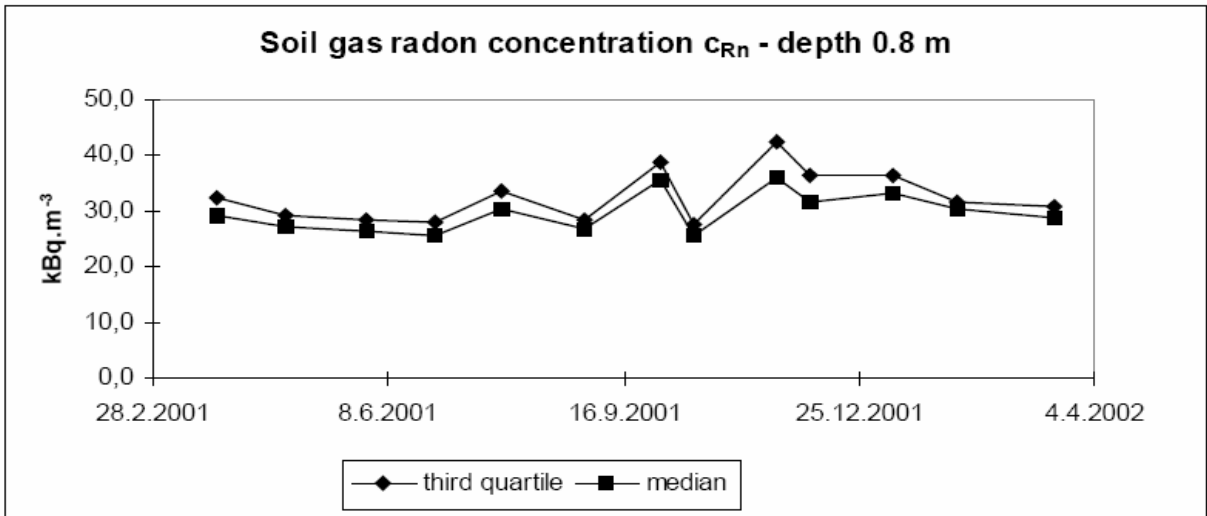


Рисунок 8 – Результаты измерений на площадке Косанда

9.1. Испытание моделей

На основе обзора доступных научных публикаций, пять различных моделей доступности радона были изучены подробно. Однако, несколько проблем появились в связи с обнаружением общей процедуры для испытания различных моделей.

Другое осложнение – то, что нет никакой системы стандартизации измерений проницаемости почвы, и таким образом проводить сравнение данных проницаемости, полученных, используя различные методы, трудно.

Наконец, для испытания, были выбраны три модели доступности радона. Подход, первоначально предложенный Surbeck и другие. (1991), и измененный позже (Surbeck и Johner 1999), является основанным на определении радона в почвенном воздухе и проницаемость почвы. Доступность радона тогда выражается как $RA = cRn \cdot K$, или $RA = cRn \cdot (K) / 2$, где cRn – концентрация радона в почвенном воздухе, и k - проницаемость. Подход, который является подобным Чешскому, был предложен Kemski и другие. (1996). В этой системе концентрация в почвенном воздухе и проницаемость почвы измеряются, а доступность радона, выраженная как радоновый индекс, ранжируется от 0 до 6. Методы измерения и пределы, которые разделяли категории радонового риска (радонового индекса) были несколько отличными от Чешской системы. Последняя модель доступности радона, которую мы тестировали (Nezmal et al. 1995) описана детально в подразделе 2.5.1 как радоновый потенциал.

Преследуя интерес уменьшения ошибок, вызванных недостатком стандартизации измерений проницаемости почвы, пределы проницаемости всех моделей были изменены, чтобы быть сопоставимыми Чешским. Две версии всех вышеупомянутых моделей (упомянутый как Surbeck I, Surbeck II, Kemski I, Kemski II, Nezmal I, и Nezmal II) были проверены, используя существующие данные относительно концентрации радона в почвенном воздухе и проницаемость почвы из отчетов корпорации RADON v.o.s.

Эти измерения были сделаны в 25 строительных участках. Surbeck I, версия является основанной на умножении активности радона на проницаемость, в то время как Surbeck II привлекает умножение активности радона на квадратный корень проницаемости. Обе версии Kemski модели используют те же самые пределы концентрации радона для отделения категорий радонового риска (10 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$, 30 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$, 100 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$ и 500 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$), но используют различные пределы проницаемости (Kemski I: $4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и $4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$; Kemski II: $4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и $4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$). Модель Nezmal I описывает пределы и параметр RA в следующей форме:

$$\begin{aligned} -\log k &= 1/10 \cdot cA - (1/10 + \log 1\text{E}-10) = 0,1 cA + 9,9 \\ -\log k &= 1/35 \cdot cA - (1/35 + \log 1\text{E}-10) = 0,0286 cA + 9,971 \\ RA &= (-\log k - 10) / (cA - 1), \end{aligned}$$

Наклон линий определен значениями 1/10 и 1/35, а их пересечение соответствует значениям: $cA = 1 \text{ кБк}/\text{м}^3$, и $k = 1\text{E}-10 \text{ м}^2$.

Модель Nezmal II имеет больший интервал для средней проницаемости. Уравнения, которое описывают пределы и параметры RA такие:

$$\begin{aligned} -\log k &= 2/10 \cdot cA - (2/10 + \log 2,524\text{E}-9) = 0,2 cA + 8,398 \\ -\log k &= 2/35 \cdot cA - (2/35 + \log 2,524\text{E}-9) = 0,0571 cA + 8,540 \\ RA &= (-\log k - 8,598) / (cA - 1), \end{aligned}$$

Наклоны линий определены значениями 2/10 и 2/35, а их пересечение определено значениями: $cA = 1 \text{ кБк}/\text{м}^3$, и $k = 2,524\text{E}-9 \text{ м}^2$.

Максимальные значения третьего квартиля были выбраны как решающие значения для наборов данных концентрации радона в почвенном воздухе. Для проницаемости почвы использовались значения медианы третьих квартилей. Значения радоновых индексов, полученные при использовании различных моделей, были сравнены с теми, которые определили в соответствии с первоначальным Чешским методом. Сравнение моделей иллюстрировано на рис. 9. Мы также проверили воспроизводимость классификаций, для которых использовались результаты повторных измерений в нескольких испытательных областях.

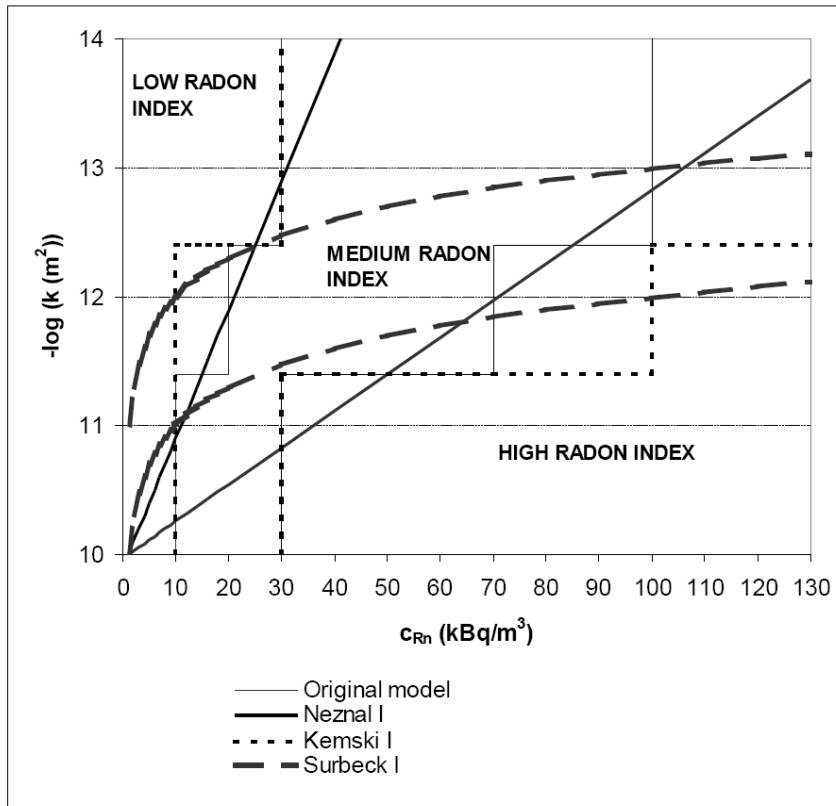


Рисунок 9 – Различные модели доступности радона

9.2. Сравнение различных подходов

Существенная согласованность наблюдалась между результатами, полученными с использованием первоначального метода и моделей Neznal, и Kemski. Это достигается благодаря подобию граничных значений в этих моделях (см. таблица 3). Оценка из моделей Surbeck была немного отлична. В большинстве случаев, лучшее соглашение было найдено для третьего квартиля данных концентрации радона и третьего квартиля значений проницаемости почвы.

Неравенство между результатами различных методов главным образом связано с площадками, чьи оценки были близки к границам классов радонового индекса. Эти несоответствия обычно возникают из-за различной классификации проницаемости почвы различными методами оценки (*in situ* измерения против описания вертикального профиля почвы). Воспроизводимость классификаций была относительно хороша для всех моделей. Сравнивая различные модели доступности радона, мы заключаем, что они все - применимы.

Различные результаты оценки были вызваны главным образом в соответствии с непоследовательной классификацией проницаемости почвы (в некоторых областях, проницаемость почвы, полученная из описания вертикального профиля почвы, была более низкой, чем проницаемость почвы, измеренная *in situ*).

Из интереса поддержания непрерывности в классификации радонового риска почвы фундамента, Neznal I модель рекомендуется для использования в улучшенном методе оценки радонового риска. Эта модель общая и такая, которую можно модифицировать; например, в определении дополнительных граничных областей (регионов) между низким и средним, и между средним и высоким радоновыми индексами.

Таблица 3: Сравнение результатов оценки полученной при использовании различных моделей доступности радона с результатами оригинальной модели на данных 25 площадок

| Решающие значения | Surbek I | | Surbek II | | Neznal I | | Neznal II | | Kemski I | | Kemski II | |
|--------------------------------------|----------|----|-----------|----|----------|---|-----------|---|----------|---|-----------|---|
| | A | D | A | D | A | D | A | D | A | D | A | D |
| Максимум C _{гн} : медиана k | 11 | 14 | 12 | 13 | 22 | 3 | 21 | 4 | 20 | 5 | 21 | 4 |
| Максимум C _{гн} : 3-квар. k | 11 | 14 | 13 | 12 | 18 | 7 | 22 | 3 | 20 | 5 | 21 | 4 |
| 3-квар. C _{гн} : медиана k | 9 | 16 | 14 | 11 | 18 | 7 | 21 | 4 | 21 | 4 | 24 | 1 |
| 3-квар. C _{гн} : 3-квар. k | 13 | 12 | 15 | 10 | 21 | 4 | 21 | 4 | 24 | 1 | 24 | 1 |

(A = согласованность; D = рассогласованность; **cRn** = концентрация радона в почвенном воздухе; **k** = проницаемость)

10. Обоснование (обустройство) референтных площадок для тестирования активности радона в почвенном воздухе в Чешской Республике

Радоновые референтные площадки используются для сравнительного измерения концентрации радона (²²²Rn) в почвенном воздухе, и для подтверждения согласованности результатов. Организации, которые профессионально определяют радоновый индекс строительных участков в Чешской Республике, должны подвергнуться испытанию на референтных радоновых площадках, поскольку это является обязательным условием для приобретения официального разрешения для этого вида деятельности из государственного Офиса для Ядерной Безопасности (Акт номер 18/1997).

В качестве референтных радоновых площадок выбраны площадки, показывающие отличные уровни радона в почве, гомогенное распределение радона, и подходящие по толщине почвы и проницаемости, допускающие отбор проб почвенного воздуха на глубине 0.8 м. Кроме того, геологическая структура на площадках известна. Известны концентрации естественных радионуклидов K, U и Th в почвах, и временные изменения радона в почвенном воздухе были также исследованы. Дополнительное требование для этих площадок - то, что они должны быть доступны автомобилем, и расстояния между ними должны быть небольшие. Более подробная информация относительно этого исследования приведена в Matolín 2002.

10.1. Референтные радоновые площадки в Чешской республике

Выбор и обследование радоновых референтных площадок были основаны на измерении радона, гамма-спектрометрии, геологических измерениях, поверхностном сейсмическом измерении, поверхностном бурении, и *in situ* измерении проницаемости почвы.

Три новых радоновых референтных площадки были обоснованы в 60 км в юго-западе от Праги, в области города Milín. Эти радоновые площадки расположены в лугах, и каждый имеет 15 установленных станций в пределах 5 x 5 м. сетка. Площадка в Cetyně расположена 5 км в юго-востоке от Milín, находится в области leucocratic biotite orthogneiss закрытой песчаными суглинками и глинистыми песками. Средние значения концентрации радона (31.6 kBk m^{-3}) и торона (44.7 kBk m^{-3}) получены на основе повторных полевых измерений в течение периода одного года.

Референтная площадка Bohostice, расположена в 7 км в юго-востоке от Milín, находится в области leucocratic biotite orthogneiss закрытой песчаными суглинками и глинистыми песками. Среднее значение концентрации радона деятельности 51.8 kBk m^{-3} , и таковой для торона - 39.7 kBk m^{-3} . Осуществление отбора проб почвенного воздуха очень простое на этой площадке. Референтная площадка Buk расположена в 2 км в направлении северо-северо-восток от Milín, находится в области среды гранулированные биотиты и amphibole-biotite granodiorite Центрального Богемного плато.

Поверхностное покрытие сформировано элювиальной песчаной почвой из подвальных камней. Среднее значение концентрации радона на этой площадке - 154.7 kBk m^{-3} , торона - 119.5 kBk m^{-3} . Покрытие почвы показывает высокую проницаемость, делая отбор проб почвенного воздуха простой.

Характеристики радоновых референтных площадок используемых в Чешской Республике приведены в таблице 4.

Таблица 4: Характеристики радоновых референтных площадок в Чешской Республике

| Параметр | Референтные площадки | | |
|---|----------------------|-------------|----------|
| | Цетине | Богоштице | Бук |
| Радон, среднее из медиан за год (kBk m^{-3}) | 31,6 | 51,8 | 154,7 |
| Радон, распределение, коэф. вариаб. | 0,39 | 0,17 | 0,27 |
| Радон, среднее из медиан за год (kBk m^{-3}) | 44,7 | 39,7 | 119,5 |
| Радон, распределение, коэф. вариаб. | 0,31 | 0,29 | 0,23 |
| U (ppt eU) | 2,0 | 2,3 | 3,6 |
| Th (ppt eTh) | 8,9 | 7,0 | 13,8 |
| Проницаемость почвы | L, (M), H | (L), (M), H | H |
| Влажность почвы (%) | 16,8-24,4 | 15,1-21,5 | 9,7-14,5 |

Проницаемость почвенного газа: L – низка, M – средняя, H – высокая

10.2. Временная вариация в характеристиках референтных площадок

Диапазон временных изменений референтных площадок был оценен по повторным измерениям. Активности радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) в почвенном воздухе, проницаемость почвы, уровень влажности почвы, и температура атмосферного воздуха была проверена в пределах одногодичного периода с 2000 до 2001. Итоговые данные показывают диапазон временных изменений этих факторов, и иллюстрируют эффекты климата на каждой площадке.

10.3. Тестирование надежности измерений радона в почвенном воздухе

Надежность измерения концентрации радона в газе почвы проверена сравнительными измерениями на референтных радоновых площадках. Заключительные данные, собранные официальными испытателями в течение одного дня сравниваются с таковым администратора

площадки, и с набором данных всех предшествующих измерений на этой специфической площадке. Официальный испытатель от организации, которая проводит измерения концентрации радона на 15 установленных станциях на каждой площадке. Итоговые данные ^{222}Rn , выраженные в кБк/м^3 , подвергнуты статистическому анализу в соответствии с компьютерной программой TestMOAR (приготовленной by M. Bartoň). Этот анализ влечет за собой три индивидуальных процедуры обработки данных.

Процедура 1 сравнивает данные радона, которые получены официальным тестером на каждой из трех референтных площадок со значением медианы данных полученных другими участниками в тот же день и на той же площадке. Уровень доверия применимый для этой процедуры - $\alpha = 1\%$.

Процедура 2 определяет компактность регрессии между радоновыми данными, которые получил официальный тестер на каждой станции референтной площадки и медианой значений полученных другими участниками в тот же день. Процедура выполняется на уровне доверия - $\alpha = 1\%$.

Процедура 3 проводит расчет арифметического среднего из данных концентрации радона, которые получили участники для конкретной площадке, и нормализует эти данные в два шага. Первое, данные нормализуются к среднему значению радона, полученному администратором референтной площадки. Второе, это нормализованное значение сравнивается со средним значением от всех предшествующих измерений каждого параметра на конкретной площадке в прошлом. Идеальное нормализованное значение 1.0, хотя значения в интервале 0.7 – 1.3 тоже приемлемы.

Процедура 3 исключает временные изменения в измерениях и выполняется независимо для каждой отдельной площадки.

Результаты, произведенные в соответствии с программой TestMOAR дают расчетные данные радона и критические значения прикладных испытаний.

Новые референтные площадки для измерений радона в почвенном воздухе (Matolín et al. 2001) начали функционировать в 2000 году. Они важны для подтверждения точности данных измерения радона, полученных при полевых измерениях, и таким образом играют, критическая роль в картировании радонового риска на строительных участках и к глобальной проблеме стандартизации данных измерения радионуклидов (МАГАТЭ - МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, в печати).

11. Верификация новой методологии для картирования радонового риска

Преыдущий метод оценки радонового риска (Barnet 1994) также использовался для измерения испытательных площадок для картирования радонового риска. Эти данные служат как, основание для компилирования карт предсказания радонового риска в масштабе 1:50000, которые являются полезными для выработки приоритета для распределения датчиков для измерения радона внутри зданий и для эффективного обнаружения областей, в которых более высокие концентрации радона внутри помещений часто встречаются (Barnet и другие. 2003).

После формулировки нового метода, было необходимо проверить его применимость для этой цели. Надежность этих карт была проанализирована в то же самое время.

11.1. Использование новой методологии для картирования радонового риска

Различные подходы к картированию радонового риска используются в настоящее время (Appleton and Miles 2002, Kemski et al. 2002). Начиная с 1999 года, CGS издал карты

радонового риска в напечатанной форме и на CD-ROM, используя его собственные данные или данные Ассоциации Радонового Риска.

К концу 2003, 154 листа карты были закончены из полного охвата 214 карт. Конструкция карт радонового риска основана на векторизованных геологических картах (1:50000 масштаба), изданных CGS. Процедура описана в статье Mikšová and Barnet (2002). Категории радонового индекса риска определены в специфических типах каменной породы путем измерения активности радона в почвенном воздухе и проницаемость почвы на испытательных площадках. На каждом листе карты охвачено, как минимум 20 измеренных площадок, выбранных в различных геологических модулях, и в каждой площадке, 15 случайных точек измерено. В настоящее время, 9000 испытательных площадок сохранены в базе данных. Четыре различных категории радонового индекса использовано для построения карт: низкий, промежуточный, средний и высокий.

Результаты, полученные от одиночной испытательной площадки с 15 отборами проб для измерения, служат как основание для формирования радоновых карт. Различия между новым методом и предыдущим незначительны для перспективы картирования, поскольку степень минимального набора измерений и решающих статистических параметров - тот же самый.

Оценка риска основана на определении радонового потенциала (радонового индекса строительного участка), а радоновые индексы строений не релевантные с картированием. Недавно модифицированный метод может использоваться для построения карт прогноза радонового риска, то есть для полевых измерений на испытательных площадках и для добавления к существующим базам данных.

11.2. Анализ надежности карты прогноза радонового риска 1: 50 000

Надежность карт предсказания радонового риска была проанализирована, сравнивая данные от детальных радоновых съемок с соответствующими данными радоновых карт геологической подстилающей породы. Следующие случаи использовались на этом сравнении:

а) Области, в которых найдены все категории радонового индекса, с предпочтительным присутствием более высоких категорий (лист карты Říčany, 13-31, 1: 50 000). Результаты 37 произвольно выбранных радоновых съемок были сравнены. Надежность листа карты была 62.2 %, для низкой, промежуточной, и средней категории радонового индекса. Несответствия между результатами обзоров и категории радонового индекса, принятой от карты были вызваны местными геологическими условиями, особенно присутствием Четвертичных отложений.

б) Области, в которых были предсказаны категории радонового индекса от низкий до промежуточной (лист карты Štětí, 02-44, 1: 50 000). Результаты были сравнены для 19 областей. В этом случае области были выбраны относительно морфологии и других факторов. Ожидаемый высокие радоновые индексы были подтверждены в самом большем числе этих точек. Присутствие относительно больших областей низкой категории радонового индекса, которые были надежно назначены на эти области, обусловлено, главным образом, благодаря гомогенным геологическим условиям. Не имеется никакого способа определить и описать детальную геологическую структуру на геологической карте масштаба 1: 50 000.

с) Области, в которых местные и региональные геологические данные были сравнены с целью оценки категории радонового индекса (лист карты Bergoun, 12-41, 1:50000, Chaby область). Область приблизительно 400 x 400 м была рассмотрена в 10 x 10 м сетке, которая вовлекала 1689 измерения концентрации радона в почвенном воздухе. Различия между признаками от карты и данных от обзора были существенны. Пространственное

распределение радонового индекса было вызвано изменениями в геологических условиях, которые могли только быть характеризованы после полного геологического обследования. Геологическая карта такого масштаба (1: 50 000) не может зарегистрировать таких деталей.

d) Области, в которых ожидалось гомогенные геологические условия и гомогенные радоновые индексы строительного участка (лист карты Mělník, 12-22, 1:50000, Kly область). Судя по данным, полученным из карты масштаба 1:50000, высоко проницаемая среда с промежуточной категорией радонового индекса была принята. Общее количество 150 образцов газа почвы было принято по сетке 10x10 м, и полная область классифицировалась как имеющая низкий радоновый индекс. Когда доступно достаточно информации относительно местных геологических условий, радоновый потенциал может быть более точно предсказан.

Недавно измененный метод может широко использоваться для оценки измерений в выбранных площадках для конструкции карт прогноза радонового риска.

Анализ надежности этих карт также адресовал возможность подготовки прогнозирующих карт, надежность которых будет достаточно высока, чтобы определить области, где оценка радонового риска не была бы необходима, где степень риска радона может быть получена из карты. Анализ показал, что различия между местной и региональной геологической структурой, и специфических литологических модулей повсюду по всей Чешской Республики, являются очень существенными. Не возможно делать прогнозирующие карты, которые могут определять области с 100 % низким радоновым индексом. Нет возможности заранее определить минимально требуемое количество измеряемых точек для оценки радонового индекса, даже если размер площади известен. Количество таких точек будет пропорционально негомогенности геологических условий.

Метод построения карты радонового риска основан на обобщении данных, приобретенных в пределах Чешской Республики. Из-за ограничений масштаба карты, эти карты не могут включать детальные описания геологической структуры, и таким образом не могут использоваться для непосредственно предсказания радонового риска специфических строительных участков.

Благодарность

Эта работа была поддержана Государственным Офисом по Ядерной Безопасности, Прага, Исследовательский и развития проект No. R/2/2000.

Литература

- Anděl P, Neznal M., Maňák J., Pribáň V. (1994): Radon flux from uranium mill tailings in Mydlovary. In: Barnet I., Neznal M. eds.: Radon investigation in CR. Vol. 5. Czech Geological Survey, Prague, pp. 74-80.
- Appleton D., Miles J. (2002): Mapping radon-prone areas using integrated geological and grid square approaches. In: Barnet I., Neznal M., Mikšová J. eds.: Radon investigations in CR. Vol. 9. Czech Geological Survey, Prague, pp. 34 - 43.
- Asher-Bolinder S., Owen E. D., Schumann R. R. (1990): Pedologic and Climatic Controls on RN-222 Concentrations in Soil Gas, Denver, Colorado, Geophysical Research Letters, Vol. 17, No. 6, pp. 825-828.
- Ball B.C., Harris W., Burford J.R. (1981): A Laboratory Method to Measure Gas Diffusion and Flow in Soil and Other Porous Materials, Soil Sci. 32, pp. 323-333.
- Barnet I. (1994): Radon risk classification for building purposes in the Czech Republic. In: Barnet I., Neznal M. eds.: Radon investigations in CR. Vol. 5. Czech Geological Survey, Prague, pp. 18-24.
- Barnet I., Mikšová J., Fojtková I. (2003): Indoor-soil gas radon relationship in the Central Bohemian Plutonic Complex. 7th Int. Conf. On Gas Geochemistry, Extended Abstracts, pp.65-67, Freiberg, Copernicus GmbH.
- Damkjaer A., Korsbech U. (1992): A Small-Diameter Probe for In-Situ Measurements of Gas Permeability of Soils, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45 No. 1/4, pp. 85-89.

- Garbesi K., Sextro R.G., Fisk W.J., Modera M.P., Revzan K.L. (1993): Soil-gas Entry into an Experimental Basement: Model Measurement Comparisons and Seasonal Effects, *Environmental Science and Technology*, Vol. 27, No. 3, pp. 466-473.
- Hinton T.C. (1985): Radon flux from reclaimed uranium mill tailings. *Health Phys.* 48(4), 421-427.
- IAEA (in print): Status of Radioelement Mapping – Towards a Global Radioelement Baseline
- Kemski J., Klingel R., Siehl A. (1996): Classification and mapping of radon-affected areas in Germany. *Env. International* 22 (Supl. 1): 789 – 798.
- Kemski J., Klingel R., Siehl A., Stegemann R. (2002): Radon maps and radon transfer from ground to houses in Germany.- Symp. Natural Radiation Environment, Book of abstracts, National Technical University of Athens, p. 377.
- Matolín M. (2002): Radon reference sites in the Czech Republic In: Barnet I., Neznal M., Mikšová J. eds.: Radon investigation in CR. Vol. 9. Czech Geological Survey and Radon corp., Prague, pp. 26-33.
- Matolín M., Bartoň J., Jáně Z., Karpíšek P., Stehlík E., Zoc J., Zocová J. (2001): Development of test radon reference sites for radon activity concentration in soil air. Report, Charles University in Prague, Faculty of Science, Prague (in Czech).
- Matolín M., Jáně Z., Neznal M., Neznal M. (2000): Geometry of soil gas sampling, soil permeability and radon activity concentration. In: Barnet I., Neznal M. eds.: Radon investigation in CR. Vol. 8. Czech Geological Survey and Radon corp., Prague, pp. 27 -29.
- Matolín M., Prokop P. (1991): Statistical significance of radon determination in soil air. In: Barnet I. eds.: Radon investigation in CS. Vol. 2. Czech Geological Survey, Prague, pp. 20-24.
- Merta J., Burian I. (2000): Radon flux: New experience and results. In: Barnet I., Neznal M. eds.: Radon investigation in CR. Vol. 8. Czech Geological Survey and Radon corp., Prague, pp. 30-35.
- Mikšová J., Barnet I. (2002): Geological support to the National Radon Programme (Czech Republic) - Bulletin of the Czech Geol. Survey, 77,1, pp.13-22. Prague.
- Morris C. R., Fraley L. Jr. (1994): Soil Permeability as a Function of Vegetation Type and Soil Water Content, *Health Physics* Vol. 66, No. 6, pp. 691-698.
- Neznal M., Matolín M., Just G., Turek K. (2004): Short-term temporal variations of soil gas radon concentration and comparison of measurement techniques. *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 108, pp. 55 – 63.
- Neznal M., Neznal M. (2002): Measurement of radon exhalation rate from the ground surface: can the parameter be used for a determination of radon potential of soils? In: Barnet I., Neznal M., Mikšová J. eds.: Radon investigation in CR. Vol. 9. Czech Geological Survey and Radon corp., Prague, pp. 16-25.
- Neznal M., Neznal M. (2003): Permeability as one of main parameters for radon risk classification of foundation soils, 7th International Conference on Gas Geochemistry, Book of extended abstracts, Technische Universität Freiberg, p. 70-71.
- Neznal M., Neznal M., Šmarda J. (1994a): Evaluation of soil-gas radon concentration data - some remarks. In: Barnet I., Neznal M. eds.: Radon investigations in CR. Vol. 5. Czech Geological Survey, Prague, pp. 37-41.
- Neznal M., Neznal M., Šmarda J. (1994b): Variability of radon with depth in various soil profiles. In: Barnet I., Neznal M. eds.: Radon investigation in CR. Vol. 5. Czech Geological Survey, Prague, pp. 55-61.
- Neznal M., Neznal M., Šmarda J. (1995): Radon risk classification of foundation soils and other radon measurements by private firms. *Bulletin Scientifique de l'Association des Ingénieurs Électriciens Sortis de l'Institut Montefiore* (3), pp. 31 - 34
- Neznal M., Neznal M., Šmarda J. (1996a): Assessment of Radon Potential of Soils – A Five-Year Experience, *Environ. Int.* 22, S819-828.
- Neznal M., Sokol, A., Thomas, J. (1996b): Radon contamination of natural gas in a storage cavern. *Env. International* 22: S425-S427.
- Reimer G.M. (1990): Reconnaissance technique for determining soil gas radon concentrations, an example from Prince Georges County, Maryland. *Geophysical research Letters*, 17, 809 – 812.
- Rogers V.C., Nielson K.K. (1991): Correlations for Predicting Air Permeabilities and 222 Rn Diffusion Coefficients of Soils, *Health Physics* Vol. 61, No. 2, pp. 225-230.
- Surbeck H. et al. (1991): Radon in Switzerland. *Proceedings of the Int. Symposium on Radon and Radon Reduction Technology*, Philadelphia.
- Surbeck H., Johner H.U. (1999): Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction. *Proceedings of the Conference on Radon in the Living Environment*, Athens, pp. 449 - 455.
- Tanner A.B. (1991): Methods of Characterization of Ground for Assessment of Indoor Radon Potential at a Site. In Gundersen, L.C.S.; and Wanty, R.B.; eds.; *Fields Studies of Radon in Rocks, Soils and Water*, U.S. Geol. Survey Bulletin No. 1971, pp. 1-18.
- Tanner A.B. (1994): Measurement and Determination of Radon Source Potential, A Literature Review.