

Введение

Радон и радиоактивные продукты его распада вносят основной вклад в радиационный фон жилых и производственных помещений. Радон образуется при распаде естественных радионуклидов, содержащихся в земных породах, и рассеивается в атмосфере. [1]. В связи с этим при проведении инженерных изысканий участков застройки проводятся радиационно-экологические исследования, составной частью которых является оценка радоноопасности территории. В настоящее время в мире не существует универсального метода для определения радоноопасности территории. Это объясняется тем, что концентрации и потоки радона крайне неравномерны и зависят как от геолого-геофизических характеристик природной среды (содержания урана и тория в грунте, структуры подстилающих пород и уровня грунтовых вод, климатических условий), так и от конструкции зданий, строительных материалов и качества работы вентиляционных систем. Поэтому разные страны имеют свои подходы к определению радоноопасности.

За рубежом, например, проводятся исследования радоноопасности, основанные на методах картирования радона в помещениях и в геологической среде. Так, в странах Европейского союза для решения задачи оценки потенциальной радоноопасности территорий придерживаются концепции «геогенного радонового потенциала». Данная концепция основана на анализе и картировании признаков повышенного выделения радона из геологической среды – повышенных концентрации урана (радия) в горных породах, объемной активности радона в почвенном воздухе, повышенной газопроницаемости грунтов и т.п. На основе этих данных строятся карты геогенного радонового потенциала, которые служат для идентификации областей, где по естественным причинам можно ожидать повышенные концентрации радона в помещениях [2]. Например, в некоторых странах Европы радоновый потенциал грунта определяют как функцию газопроницаемости грунта и объемной активности радона в

почвенном воздухе (далее поровая активность) с последующим присвоением территории класса радонового индекса (например, I, II, III... или низкий, средний, высокий).

В России также проводились исследования в этом направлении, которые ограничились созданием в середине 1990-х гг. обзорных карт природной радиоактивности и потенциальной радоноопасности территории России и ближнего зарубежья. Детальные исследования облучения населения радоном и принятие мер по ограничению облучения рекомендовано проводить после районирования территории РФ по степени радоноопасности. Недостатком таких карт является их обзорный масштаб, который ограничивает возможности их применения на практике. В настоящее время в России при оценке радоноопасности измеряют плотность потока радона (ППР) методом накопительных камер. Существенным недостатком такого метода оценки является временная и пространственная вариабельность измеряемой величины, а также низкая достоверность результатов [3].

Цель исследования: разработка методики определения плотности потока радона методом «двух глубин», основанном на измерении поровой активности радона на двух, отличающихся в два раза глубинах.

Задачи:

- рассмотреть методы определения радоноопасности, используемые за рубежом и в Российской Федерации;
- изучить устройство измерительного комплекса «Альфарад плюс- AP» и методики измерения поровой активности и ППР;
- провести измерения ППР двумя методами;
- провести анализ полученных результатов.

1. Методы определения радоноопасности территорий

Перед проведением оценки радоноопасности территории необходимо, прежде всего, выбрать и обосновать критерии радоноопасности и методики их измерения. Существует множество критериев радоноопасности территории и методик их измерения, которые были разработаны за рубежом и в Российской Федерации. Все критерии и методики обладают достоинствами и недостатками. К сожалению, до сих пор не выработана единая точка зрения на метод оценки радоноопасности территорий.

1.1 Методы определения радоноопасности, используемые за рубежом

В настоящее время в странах Европейского союза интенсивно развиваются методы исследования потенциальной радоноопасности в помещении и в геологической среде. По мнению авторов статьи [2] наиболее близка к решению задачи определения потенциальной радоноопасности территорий концепция «геогенного радонового потенциала». При определении радоноопасности территории специалисты заинтересованы в использовании величин, которые не зависят от антропогенных факторов и обладают сравнительно невысокой изменчивостью. По набору таких величин предлагается определять «геогенный радоновый потенциал» территории.

При проведении количественной оценки геогенного радонового потенциала авторы работы [2] предлагают использовать два подхода. Первый подход основан на определении некоторого численного показателя, который называется радоновым потенциалом. Данный численный показатель отражает физические процессы, вносящие наибольший вклад в формировании измеряемой концентрации радона в жилых домах. Данный показатель рассчитывают как функцию газопроницаемости грунта (k) и поровой активности радона (OA) на глубинах 0.8...1.0 м:

$$RP = f(OA, k) \quad (1)$$

При этом отмечается, что при определении этих входных переменных (k и OA) возникают сложности. Например, отсутствует стандартизованная система измерения газопроницаемости грунта, имеет место высокая неопределенность результатов измерений поровой активности радона, наличие временных колебаний k и OA , основной причиной которых является малое время экспозиции, которое составляет обычно несколько минут [2].

Второй подход при оценке «геогенного радонового потенциала» основан на определении категориально – численной величины, которая называется радоновым индексом и обозначается как RI . Определение радонового индекса основывается на измерении концентрации радона на глубине 0.8 м и определении проницаемости путем визуальной оценки эксперта. Данный метод определения радоноопасности основан на «многомерном перекрестном табулировании». Комбинациям входных величин присваиваются баллы или качественные характеристики [4]. Результатом определения радонового индекса является присвоение исследуемой территории низкого, среднего или высокого класса радоноопасности или I, II, III, IV класса радоноопасности.

Метод, который используется в Чешской Республике для определения радонового потенциала почвы, основан на измерении поровой активности радона и проницаемости почвы на глубине 0.8 м [5, 6]. По результатам измерений рассчитывается радоновый потенциал RP , входными параметрами для которого являются третий квартиль набора данных поровой активности радона (OA_3) и третий квартиль набора данных газопроницаемости грунтов (k_3):

$$RP = \frac{OA_3 - 1}{-\ln k_3 - 10}, \quad (2)$$

где OA_3 – в $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$; k_3 – в м^2 .

Затем по классификационной таблице 1 определяется радоновый индекс RI .

Таблица 1 – Классификационная таблица для оценки радонового индекса (RI) по значениям радонового потенциала.

Радоновый потенциал (RP)	Радоновый индекс (RI)
$RP < 10$	Низкий
$10 < RP < 35$	Средний
$RP > 35$	Высокий

Если измерение газопроницаемости оказывается затруднительным, тогда используют экспертную оценку проницаемости на основе визуального изучения структуры почвы, присваивая ей соответствующую категорию: низкая, средняя, высокая. В этом случае радоновый индекс оценивают по классификационной таблице 2:

Таблица 2 – Классификационная таблица для оценки радонового индекса.

Категория радонового индекса (R)	Поровая активность радона ($\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$)		
	Низкий	$OA < 30$	$OA < 20$
Средний	$30 \leq OA \leq 10$	$20 \leq OA \leq 7$	$10 \leq OA \leq 30$
Высокий	$OA \geq 100$	$OA \geq 70$	$OA \geq 30$
Проницаемость	Низкая	Средняя	Высокая

Недостатком данного подхода является большая вариабельность величины газопроницаемости, также не обосновано использование третьего квартиля выборок для OA и k .

В Венгрии [7] входными параметрами, используемыми для определения «геогенного радонового потенциала», являются равновесная концентрация радона в грунте (C_∞ измеряется в $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-3}$) и проницаемость грунтов (k). Равновесная концентрация радона (C_∞), измеряется на глубине 0.8 м. Затем геогенный радоновый потенциал рассчитывается по формуле:

$$RP = \frac{OA}{-\ln(k) - 10}. \quad (3)$$

В работе [7] внимательно отслеживалось влияние погодных условий, времени суток и времени года на значения поровой активности. В выводе говорится, что время суток имеет меньшее влияние, чем время года. При этом зимой вариабельность измерения поровой активности ниже, чем летом, когда варьируемость величины увеличивается. Это объясняется тем, что летом почва подвергается большему влиянию атмосферных условий. Уменьшение вариабельности поровой активности зимой является положительным моментом при оценках радоноопасности, однако на территории России измерения зимой проводить невозможно.

В Германии определение геогенного радонового потенциала основано также на полевых измерениях поровой активности радона и газопроницаемости грунтов, но на другой глубине – 1.0 м [8]. Расчет радонового потенциала проводится по той же формуле, что и в Чехии, но вместо третьего квартиля используются максимальные значения величин. Определение радонового индекса осуществляется с использованием классификационной матрицы (рис. 1). Каждый из двух входных параметров (поровая активность и газопроницаемость грунтов) подразделяется на три класса.



Рисунок 1 – Классификационная матрица

Результаты исследования показали, что практически на всей территории Германии высокая газопроницаемость. Из-за этого в качестве оценки геогенного

радонового индекса использовали только один параметр – поровую активность радона. Поэтому карты геогенного радонового потенциала, основанные на данных только поровой активности, не могут быть использованы для прогнозирования содержания радона в помещениях.

Выбор измеряемых в странах Европы величин (ОА, к) является вполне обоснованным, так как поровая активность определяет количество радона, образовавшегося в грунте, а газопроницаемость характеризует условия выхода радона на поверхность. Однако, глубины измерения разные, что свидетельствует о необоснованности выбора этих глубин. Также утверждение о том, что практически на всей территории Германии высокая газопроницаемость представляется сомнительным.

В США [9] при определении радоноопасности территории определяют радоновый индекс (RI). Он определяется путем оценки пяти факторов, которые являются индикаторами радонового потенциала: измерения ЭРОА радона в помещениях, геологии – какой породой представлена территория, надземной радиометрии, почвенных параметров (в частности, проницаемости почвы) и типов архитектуры (имеют ли в основном дома на участках земли фундамент или имеют подвальные помещения). Каждый фактор подвергается классификации в балловом виде или качественно. Оценка геологических данных исходит из типа пород. Была выявлена следующая зависимость от типа породы на радоновый потенциал (табл.3)

Таблица 3 – Классификационная таблица зависимости радонового потенциала от типа породы.

Тип породы	Радоновый потенциал
Кварцевые пески, кремнезём, некоторые виды глин	Низкий
Структура почвы различна, концентрация урана средняя	Средний
Коренные породы (углеродистые чёрные сланцы, фосфориты, бокситы, ледники)	Высокий

Классификационная матрица для индикаторов радонового потенциала представлена таблицей 4.

Таблица 4 – Классификационная матрица радонового индекса.

Фактор	Количество баллов		
	1	2	3
Средний уровень ЭРОА радона в помещении	$< 2 \text{ пКи} \cdot \text{л}^{-1}$ (74 Бк·м ⁻³)	(2 – 4) пКи·л ⁻¹ ((74 – 148) Бк·м ⁻³)	$> 4 \text{ пКи} \cdot \text{л}^{-1}$ (> 148 Бк·м ⁻³)
Надземная радиометрия	$< 0.5 \text{ пКи} \cdot \text{л}^{-1}$	0.5-0.83 пКи·л ⁻¹	$> 0.83 \text{ пКи} \cdot \text{л}^{-1}$
Геология	низкий	средний	высокий
Проницаемость почвы	$< 1.5 \text{ см} \cdot \text{ч}^{-1}$	(1.5 – 15) см·ч ⁻¹	$> 15 \text{ см} \cdot \text{ч}^{-1}$
Тип архитектуры	имеет фундамент	смешанная	в основном подвальное помещение

Суммируя баллы по каждому фактору, получают итоговую оценку радоноопасности (в баллах), соответствующую одной из категорий радонового индекса (табл. 5).

Таблица 5 – Классификационная таблица для оценки радоноопасности

Категория радонового индекса	Число баллов
Низкая	5-9
Средняя	10-12
Высокая	13-15

На основе анализа вышеприведенных работ можно сделать вывод, что определение радонового индекса RI широко распространено в практике в ряде стран, таких как США [9], Чехия [10], Германия [8], Венгрия [7] на протяжении 20 лет. Этот способ оценки зарекомендовал себя, как наиболее надежный, но при

этом страны Европы и Америка имеют различные наборы входных величин и свою методику оценки радоноопасности.

1.2 Метод определения радоноопасности, используемый в Российской Федерации

В настоящее время в России при оценке радоноопасности территории застройки измеряют величину плотности потока радона, которая определяет количество радона, выходящего за секунду с единицы поверхности грунта [11, 12]. Территория считается безопасной, если величина ППР не превышает $80 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$.

В соответствии с регламентом проведения радиационно-экологических изысканий измерения ППР проводят методом накопительной камеры [13, 14]. Этот метод основан на отборе проб радона в пробоотборники в полевых условиях с последующим измерением поровой активности радона в пробах с помощью блока измерения поровой активности в стационарных условиях.

Однако, несмотря на простоту данного метода и небольшое время экспозиции, в последние годы появилось много статей, в которых подвергаются критике методики и приборы измерения ППР в связи с большой изменчивостью этой величины и сомнительной достоверностью результатов измерения. Сильная временная вариабельность значений ППР в первую очередь обуславливается малыми временами экспозиции, а также тем, что измерения проводятся на поверхности земли, где атмосферные условия имеют большое влияние на полученные результаты. Пространственная вариабельность ППР на поверхности земли объясняется тем, что вследствие выветривания и высушивания поверхностных почв образуется большое кол-во микротрещин и даже трещин, что приводит к сильной неоднородности физических свойств поверхностных грунтов. Неучет обратной диффузии радона из камеры в почву и боковой диффузии в месте соединения камеры с почвой приводит к большой погрешности измерений [14, 15]. Но главным недостатком аттестованной методики является то, что ППР измеряют на поверхности земли, тогда как

фундамент всех зданий залегает обычно на глубине нескольких метров. Активный слой грунта, из которого радон выходит на поверхность не превышает двух-трех метров.

Для оценок средних значений ППР в некоторых работах рекомендуется использовать математические модели. Например, в работах [13, 16] предлагается рассчитывать среднее значение ППР по формуле, полученной на основе диффузионной модели:

$$\text{ППР} = A_{Ra} \cdot K_{em} \cdot \rho_d \cdot \sqrt{D_e \cdot \lambda}. \quad (4)$$

где ρ_d – плотность сухого грунта, кг/м³, A_{Ra} – удельная активность содержащегося в грунте радия, Бк/кг, K_{em} – коэффициент эманирования, определяет долю выделяющегося из грунта радона, отн. ед.; D_e – эффективный коэффициент диффузии, м²/с. Из формулы видно, что для расчета плотности потока радона необходимы значение коэффициентов эманирования и диффузии, определение которых должно проводиться в натуральных условиях [17]. Следует отметить, что в этих работах для оценок ППР использованы значения K_{em} и D_e , полученные в лабораторных условиях.

На кафедре прикладной физике Томского Политехнического Университета разработан метод определения ППР, основанный на одновременном измерении поровой активности на двух, отличающихся в два раза глубинах. В соответствии с диффузионной моделью переноса радона через однородные почвогрунты получено следующее выражение для расчета ППР [17]:

$$\text{ППР} = \frac{\lambda \cdot h_1 \cdot OA_1 \cdot \eta}{\left(2 - \frac{OA_2}{OA_1}\right) \cdot \left|\ln\left(\frac{OA_2}{OA_1} - 1\right)\right|}, \quad (5)$$

где OA_1 , OA_2 – поровая активность радона, измеренная на глубинах h_1 и $h_2 = 2h_1$, η – пористость грунта; λ – постоянная распада радона. Условие однородности грунтов по глубине, использованное при получении выражения

(5), нетрудно обеспечить, если в точках измерения удалить верхний почвенный слой толщиной 0.3...0.5м [18].

Оценка среднего количества радона, выходящего на поверхность грунта, с помощью метода «двух глубин» более достоверна чем при определении ППР с помощью накопительных камер, так как:

- измеряемая на глубинах от 0.4 до 1.0 м поровая активность радона подвержена влиянию атмосферы в меньшей степени, чем плотность потока радона на поверхности грунта [см. 15];
- использование соответствующих методов измерения поровой активности позволяет сгладить мгновенные колебания радона;
- методы измерения поровой активности радона обеспечивают более надежные результаты, чем методы измерения ППР.

Следует также отметить, что методы измерения поровой активности радона существенно проще и дешевле, чем известные методы измерения плотности потока радона.

2. Изучение устройства измерительного комплекса «Альфарад плюс- - АР» и методик измерения поровой активности и ППР

Комплекс «Альфарад плюс- АР» предназначен для экспрессных измерений и непрерывного мониторинга поровой активности (ОА) радона-222 (^{222}Rn) и количества распадов ^{216}Po (ThA), а также эквивалентной объемной активности (ЭРОА) радона и торона-220 (^{220}Tn) в воздухе жилых, рабочих помещений и на открытом воздухе. Наличие специальных пробоотборных устройств позволяет проводить измерения содержания радона-222 в воде, почвенном воздухе, определять плотность потока радона с поверхности почвы. В рамках рассматриваемой темы более подробно будут рассмотрены блок измерения поровой активности и определение ППР.

2.1 Устройство измерительного комплекса «Альфарад плюс- АР» и его характеристики

Комплекс может применяться для санитарно-гигиенического обследования помещений и использоваться для работы в полевых условиях, если они соответствуют эксплуатационным параметрам. Ниже приведены основные технические характеристики блока измерения ОА радона в почвенном воздухе:

- диапазон измерения ОА радона-222 в пробах почвенного воздуха, $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$, ...от 10^3 до 10^6 ;
- предел допускаемой относительной погрешности при измерениях ОА радона-222 в почвенном воздухе, не более, % ... $\pm 30\%$;
- диапазон измерения величины плотности потока радона с поверхности грунта, $\text{мБк}/\text{с}\cdot\text{м}^2$... от 20 до 10^7 ;
- предел допускаемой относительной погрешности при измерениях величины плотности потока радона с поверхности грунта, не более, % ... $\pm 30\%$.

Измерение ОА радона-222 основано на электростатическом осаждении заряженных ионов ^{218}Po (RaA) из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора (ППД).

Измерительная камера блока измерения ОА представляет собой пустотелый цилиндр с расположенным внутри высоковольтным электродом и герметично закрытыми фланцами с двух сторон (рис. 2). На входном фланце установлен фильтродержатель с аэрозольным фильтром, а на внешней поверхности размещен входной штуцер. В центре выходного фланца установлен ППД с предусилителем (ПУ), сигнал с которого поступает на блок управления (БУ). На выходном фланце установлена климатическая камера, которая содержит датчик температуры, давления и влажности и соединена с объемом измерительной камеры.

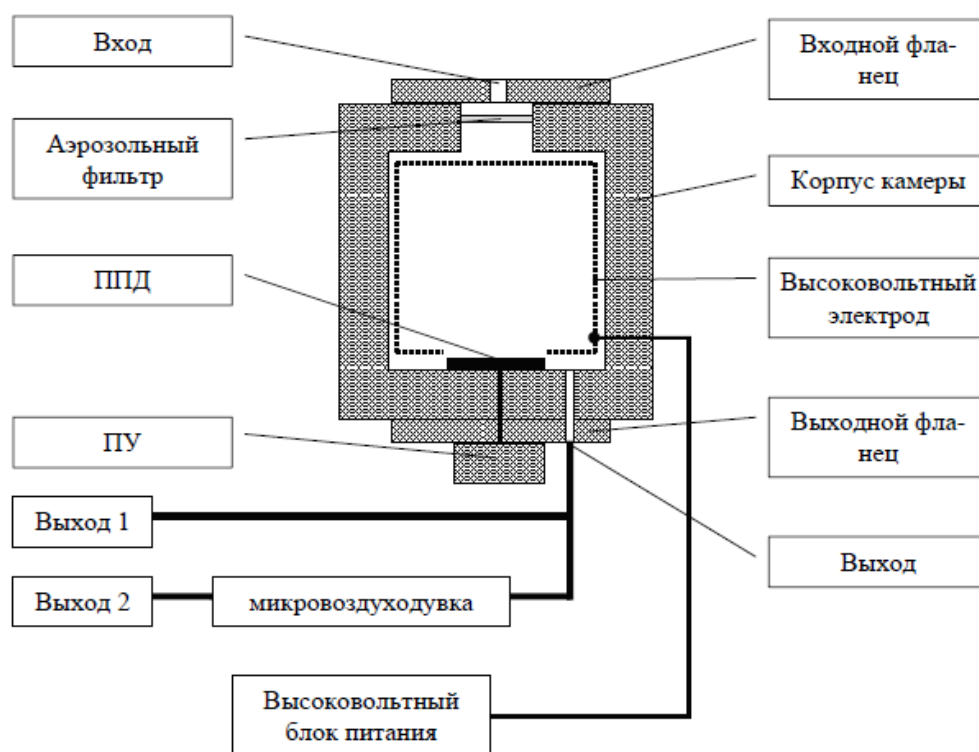


Рисунок 2 – Измерительная камера блока измерения ОА

Отбор пробы воздуха в измерительную камеру осуществляется с помощью микровоздуходувки. Проба воздуха через защитный аэрозольный

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

Также в комплект измерительного комплекса входит автономная воздуходувка с набором пробоотборных устройств. Воздуходувка выполнена в виде блока из пластмассового корпуса. Внутри корпуса установлены нагнетатель воздуха, аккумуляторная батарея и управляющая плата с таймером.

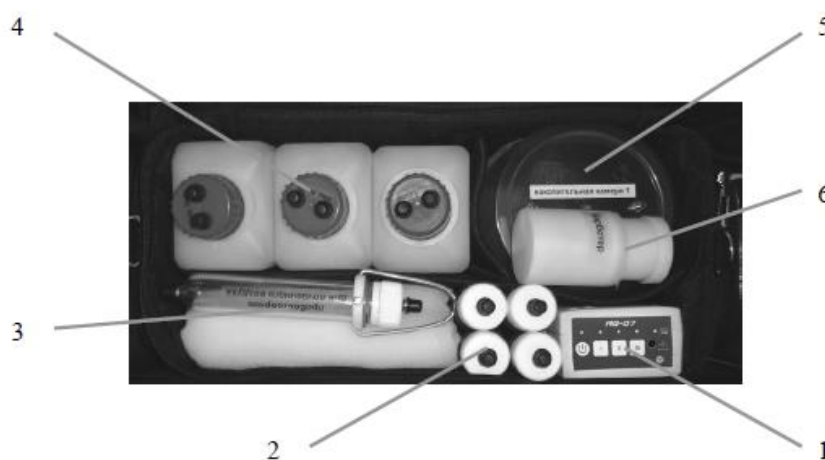


Рисунок 3 – Автономная воздуходувка АВ-07 с пробоотборниками

- 1 – Автономная воздуходувка;
- 2 – Пробоотборники для воды;
- 3 – Пробоотборник почвенного воздуха;
- 4 – Воздушные пробоотборники;
- 5 – Накопительная камера;
- 6 – Барботер.

2.2 Методики измерения поровой активности ППР с помощью измерительного комплекса «Альфарад плюс-АР»

Как известно, критерием радоноопасности территории в Российской Федерации является величина плотности потока радона, которая измеряется методом накопительной камеры. Этот метод основан на отборе проб радона в пробоотборники в полевых условиях с последующим измерением поровой

активности радона в пробах с помощью блока измерения поровой активности в стационарных условиях. Схема отбора пробы представлена на рисунке 4.

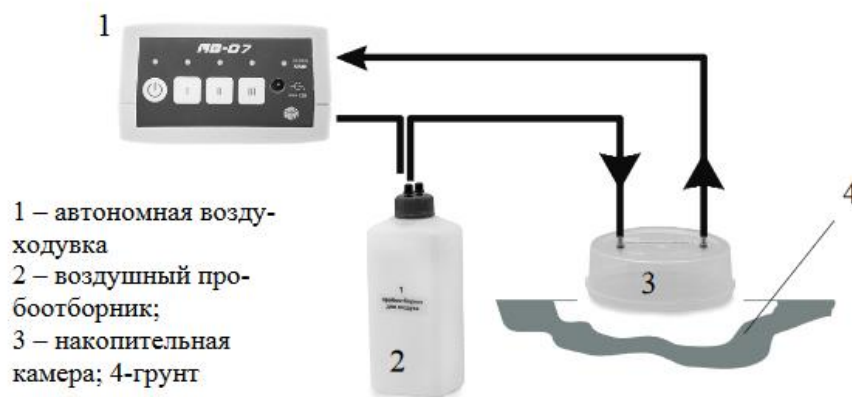


Рисунок 4 – Схема отбора пробы воздуха для определения ППР

Перед тем, как устанавливать накопительную камеру, необходимо подготовить площадку. Подготовка включает в себя: очищение поверхности грунта от мусора, растительности, крупных камней, в месте установки камеры производится рыхление почвы на глубину 3-5 см. Накопительная камера устанавливается путем вдавливания краев камеры в почву, ее края присыпаются грунтом. Далее с помощью соединительных трубок собирается представленная выше схема и в течение пяти минут происходит накачка воздуха в пробоотборник. После автоматического выключения автономной воздуходувки необходимо герметизировать пробоотборник резиновыми заглушками из комплекта. Накопительную камеру извлекают из грунта и прокачивают систему с накопительной камерой в течение двух минут окружающим воздухом. Затем уже в стационарных условиях воздух из пробоотборников переводится в измерительную камеру с помощью схемы, представленной ниже (рис. 5).

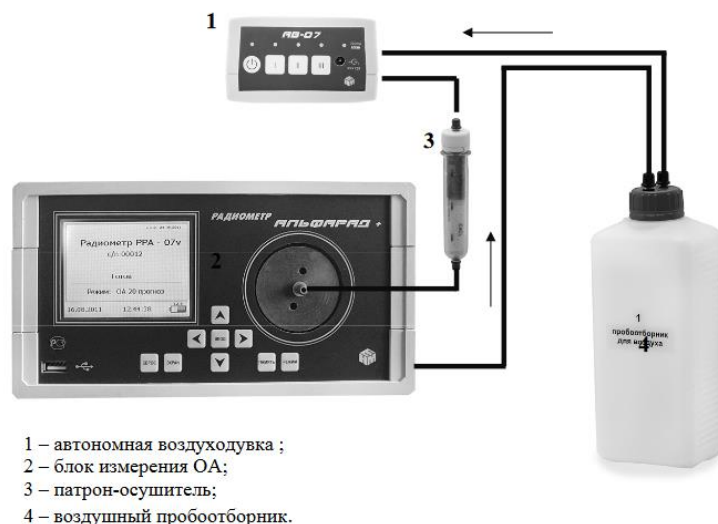


Рисунок 5 – Схема перевода пробы в блок измерения ОА

Для оценки ППР методом «двух глубин» необходимо измерить поровую активность радона на двух, отличающихся в два раза глубинах, используя выражение (5). Для измерения поровой активности также используется измерительный комплекс «Альфарад плюс- АР». В шпуров на подвесе погружают пробоотборники, со штуцеров которых предварительно снимают резиновые заглушки, после чего шпуров плотно закрывают сверху (рис. 6).

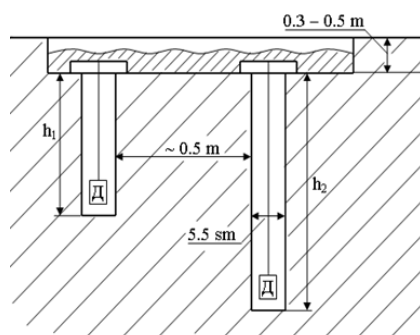


Рисунок 6 – Схема измерения поровой активности радона

Пробоотборники находятся в шпуров одни сутки, затем их извлекают из шпуров, герметизируют и измеряют поровую активность радона. Плотность и пористость грунта определяется методом «режущего кольца». Необходимо отметить, что при проведении измерений поровой активности в шпуров иногда забивают трубы. Однако каких-либо данных о влиянии труб на результаты измерений в литературе не обнаружено.

3. Эксперимент в городе Томск

3.1 Планирование эксперимента

Измерения поровой активности радона проводили в весенне-летний период (май-июнь) 2016 года на территории Лагерного сада в г. Томске. Были выбраны две контрольные точки, расположенные на расстоянии 6 метров друг от друга. В каждой точке ручным буром пробурили четыре шпура, два из них глубиной 0.4 метра и два шпура глубиной 0.8 метра. В одну пару шпуров (0.4 м и 0.8 м) вставляли металлические трубы, другую оставляли без труб; расстояние между шпурами не превышало 0.5 метров. Схема расположения точек измерения представлена на рисунке 7. В исследовании проводили анализ влияния труб на поровую активность радона.

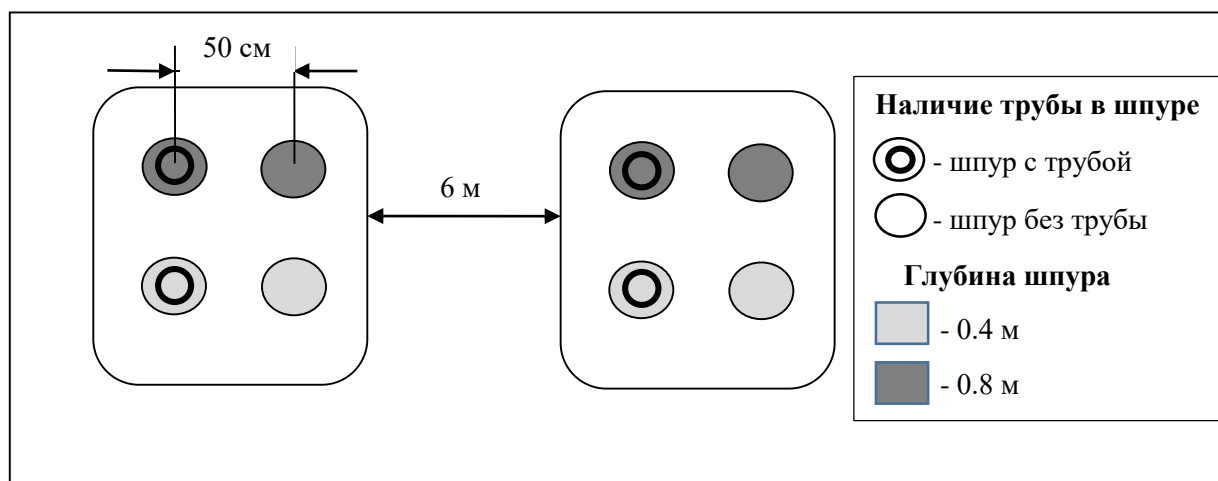


Рисунок 7 – Схема расположения точек измерения

Образцы грунта отобраны с разных глубин до 0.8 метров с шагом 20 см с использованием специального оборудования, с помощью которого режущим кольцом изымали ненарушенные образцы грунта. Это сделано с целью отследить изменение физических параметров грунта (плотность, пористость, влажность) в зависимости от глубины шпура. Всего выполнено 40 измерений поровой активности. Однако при проверке результатов на достоверность, некоторые из них определялись как промахи. Также выполнено 24 измерения ППР накопительной камерой и отобрано 24 пробы грунта.

3.2 Результаты измерений и их анализ

Результаты измерения физических характеристик (пористость η , плотность ρ_d , влажность ω) сухого грунта представлены в таблице 6. Для расчета ППР использованы усредненные по всем глубинам и точкам измерения значения пористости и плотности для каждого шпура.

Таблица 6 – Результаты измерений пористости, плотности и влажности грунта.

Номер точек измерения	Глубина отбора проб, м	η , отн.ед	$\bar{\eta}$, отн.ед	ρ_d , г·см ⁻³	$\bar{\rho}_d$, г·см ⁻³	ω , %	$\bar{\omega}$, %
1	0.2	0.46	0.39	1.34	1.53	14.44	11.43
	0.4	0.32		1.71		8.41	
2	0.2	0.41	0.34	1.48	1.65	13.27	10.99
	0.4	0.38		1.55		11.88	
	0.6	0.27		1.83		7.89	
	0.8	0.32		1.71		10.91	
3	0.2	0.43	0.39	1.43	1.52	14.58	14.70
	0.4	0.36		1.61		14.81	
4	0.2	0.53	0.40	1.17	1.51	16.25	13.68
	0.4	0.35		1.62		15.45	
	0.6	0.32		1.71		10.91	
	0.8	0.39		1.52		12.12	
5	0.2	0.58	0.44	1.05	1.41	16.67	11.76
	0.4	0.29		1.76		6.48	
6	0.2	0.43	0.37	1.43	1.57	14.58	13.19
	0.4	0.53		1.17		16.25	
	0.6	0.32		1.69		18.49	
	0.8	0.21		1.97		3.42	
7	0.2	0.41	0.40	1.47	1.49	18.45	13.92
	0.4	0.39		1.52		9.38	
8	0.2	0.46	0.38	1.36	1.55	19.59	17.70
	0.4	0.39		1.52		17.14	
	0.6	0.35		1.62		16.96	
	0.8	0.32		1.69		17.09	

Как видно из результатов измерений, с глубиной пористость уменьшается, а плотность увеличивается.

В соответствии с данными таблицы 6 средние значения пористости, плотности и влажности сухого грунта составляют соответственно $\bar{\eta} = 0.38$ отн.ед;

$\bar{\rho}_d=1.54\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$, $\bar{\omega}=13.56\%$. Дисперсии выборок $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i-\bar{X})^2}{(n-1)}}$ для η , ρ_d , ω соответственно равны 0.08 отн.ед; 0.21 г·см⁻³, 4.18 %; коэффициенты вариации $V = \frac{\sigma \cdot 100\%}{\bar{x}}$ пористости, плотности и влажности составляют 22.7%, 14.2% и 30.82%. Из приведенных результатов видно, что грунт на изучаемом участке не обладает достаточной однородностью по глубине. Стоит отметить, что почти во всех шпурах пористость, которая входит в формулу для расчета ППР, изменяется с глубиной в 1.5-2 раза. Это объясняется тем, что площадки для шпуров углублялись на небольшую глубину – 20 см, что не позволило обеспечить однородность грунтов по глубине. Следовательно, площадку для шпуров надо углублять.

В таблице 7 представлены результаты измерений поровой активности радона на двух глубинах в шурфах с трубами и без них.

Таблица 7 – Значения поровой активности на глубинах 0.4 и 0.8 м.

Номер	Дата		ОА, кБк*м ⁻³			
			С трубами		Без труб	
	Погружения	Извлечения	0.4 м	0.8 м	0.4 м	0.8 м
1	17.май	18.май	-	-	0.81	1.28
2	18.май	19.май	1.03	1.32	1.44	2.26
3	19.май	20.май	3.33	4.70	4.99	5.63
4	23.май	24.май	2.08	2.51	-	-
5	24.май	25.май	0.79	1.26	-	-
6	25.май	26.май	-	-	2.13	3.40
7	25.май	26.май	1.28	1.47	-	-
8	31.май	1.июня	4.09	6.02	-	-
9	1.июня	2.июня	-	-	4.66	6.32
10	1.июня	2.июня	-	-	4.40	5.11
11	5.июня	6.июня	3.14	5.09	1.37	2.17
12	5.июня	6.июня	1.12	1.34	-	-
13	6.июня	7.июня	3.09	3.75	4.03	4.52
14	6.июня	7.июня	2.76	4.28	4.65	6.66
15	7.июня	8.июня	2.62	3.33	2.14	2.76
16	7.июня	8.июня	3.75	4.24	-	-

Значения поровой активности радона, измеренные на глубинах 0.4 м и 0.8 м, находятся в интервалах для шпуров: 0.79...4.09 кБк·м⁻³ и 1.26...6.02 кБк·м⁻³; и 0.81...4.99 кБк·м⁻³ и 1.28...6.66 кБк·м⁻³ для шпуров без труб. Из приведенных цифр видно, что минимальное и максимальное значения поровой активности отличаются примерно в пять раз. Средние значения для данных выборок на глубинах 0.4 и 0.8 м составили для шпуров с трубами: $\overline{OA}_{0.4} = 2.42$ кБк·м⁻³ и $\overline{OA}_{0.8} = 3.28$ кБк·м⁻³; и $\overline{OA}_{0.4} = 3.06$ кБк·м⁻³ и $\overline{OA}_{0.8} = 4.01$ кБк·м⁻³ для шурфов без труб; дисперсии выборок равны на 0.4 и 0.8 с трубами: 1.13 кБк·м⁻³ и 1.66 кБк·м⁻³; и 1.62 и 1.89 для шпуров без труб; коэффициенты вариации поровой активности на глубинах 0.4 м и 0.8 м составили с трубами: 46.8 % и 50.8%; и 53.1% и 47.2% для шпуров без труб.

Таблица 8 – Результаты анализа значений поровой активности

Вид шпура	Интервал значений, кБк·м ⁻³		Среднее, кБк·м ⁻³		Дисперсия, кБк·м ⁻³		Коэффициент вариации, %	
	Глубина шпура, м							
С трубой	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
		0.79...4.09	1.26...6.02	2.42	3.28	1.13	1.66	46.8
Без трубы	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
	0.81...4.99	1.28...6.66	3.06	4.01	1.62	1.89	53.1	47.2

Из полученных результатов видно, что с учетом относительной погрешности наличие труб в шурфах не влияет существенным образом на полученные результаты.

Таблица 9 – Результаты измерений ППР методами «двух глубин» и накопительной камеры

Метод измерения						
Метод «двух глубин»			Метод накопительной камеры			
Номер измерения	ППР ммБк*м ⁻² *с ⁻¹		Номер измерения	ППР ммБк*м ⁻² *	Номер измерения	ППР ммБк*м ⁻² *
	С трубами	Без труб				
1	-	1.12	1	21	17	14
2	0.38	1.96	2	14	18	31

Продолжение таблицы 9

3	2.14	0.94	3	44	19	13
4	0.55	-	4	11	20	11
5	1.20	-	5	28	21	23
6	-	3.47	6	34	22	36
7	0.27	-	7	30	23	18
8	3.49	-	8	14	24	41
9	-	2.35	9	18		
10	-	0.96	10	13		
11	5.83	2.02	11	41		
12	0.28	-	12	17		
13	0.85	0.74	13	31		
14	3.45	3.27	14	20		
15	0.92	0.82	15	11		
16	0.71	-	16	28		

Для метода «двух глубин» значения ППР лежат в интервале для шпуров с трубами: $0.27...5.83 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и $0.74...3.47 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ без труб. Среднее значение и ППР для шпуров с трубами равны $1.67 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и $1.76 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ без труб. Дисперсия для шпуров с трубами $1.73 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и $1.01 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ без труб. Коэффициент вариации составил 103% для шпуров с трубами и 57% без труб. Для метода накопительной камеры: значения полученных величин плотности потока радона лежат в интервале $11...44 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Среднее значение и дисперсия ППР равны $23.4 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и $51.8 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; коэффициент вариации составил 221%.

Таблица 10 – Результаты анализа значений ППР, полученных двумя способами

Метод измерения		Интервал значений, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Среднее, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Дисперсия, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Коэффициент вариации, %
«Двух глубин»	С трубой	0.27...5.83	1.67	1.73	103
	Без труб	0.74...3.47	1.76	1.01	57
«Накопительной камеры»		11...44	23.4	51.8	221

Максимальное значение ППР существенно ниже критического ($80 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$), следовательно, исследованная территория не является радоноопасной. Из

полученных результатов видно, что значения ППР для метода «двух глубин» примерно на порядок меньше значений, полученных с помощью накопительной камеры. Следует отметить, что аналогичный результат был получен в измерениях, проведенных в 2014 году [19].

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы было проделано следующее:

- рассмотрены методы определения радоноопасности, используемые за рубежом;
- освоен метод определения радоноопасности, используемый в Российской Федерации;
- изучены методики и приборы, используемые для измерения поровой активности и плотности потока радона;
- отобрано 24 пробы грунта и определены его физические характеристики;
- проведено 40 измерений поровой активности и 24 измерения ППР;
- проведен анализ полученных результатов.

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- результаты измерений поровой активности с трубами и без труб в пределах погрешности не отличаются;
- значения ППР, измеренные методом накопительной камеры примерно на порядок больше, чем методом «двух глубин»;
- коэффициенты вариации ППР, определенные методом «двух глубин» примерно существенно меньше, чем методом накопительной камеры.