

На правах рукописи



Ставицкая Ксения Олеговна

**ОСНОВЫ МЕТОДА ОЦЕНКИ РАДОНООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ПО ГЕОЛОГО-
ФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОРОД**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент
Рыжакова Надежда Кирилловна

Официальные оппоненты:

Маренный Альберт Михайлович

Доктор физико-математических наук.

Федеральное государственное унитарное предприятие научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены федерального медико-биологического агентства г. Москва, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений.

Нагорский Петр Михайлович

Доктор физико-математических наук, профессор.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории физики климатических систем.

Защита состоится «28» сентября 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13,
к.т.н., доцент



Шевелева Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Известно, что радон и его дочерние продукты распада являются наиболее значимой причиной естественного облучения населения. Наличие больших концентраций радона в жилых или производственных помещениях увеличивает риск возникновения онкологических заболеваний. В Российской Федерации при проведении радиационно-экологических исследований измеряют плотность потока радона (ППР) на земной поверхности. Например, территория, предназначенная для жилой застройки, считается радоноопасной, если 20% и более результатов измерений плотности потока радона превышают критическое значение, равное $80 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В этом случае при проектировании строительства зданий предусматриваются меры противорадоновой защиты, что удорожает строительство. Однако, данный способ подвергается критике, т.к. не позволяет получить достоверные оценки радоноопасности территорий по двум причинам. Во-первых, геолого-физические характеристики пород на земной поверхности, как правило, существенно отличаются от свойств подстилающих пород, залегающих в основании фундамента зданий на глубинах 1 м ... 5 м. Во-вторых, результаты измерения ППР характеризуются достаточно высокой вариабельностью, обусловленной влиянием погодных условий и неоднородностью подстилающих пород.

Анализ ситуации показывает, что из-за значительных вариаций результатов измерений плотность потока радона при проведении оценок радоноопасности за рубежом не используют. В европейских странах часто при проведении оценок измеряют объемную активность радона в почвенном воздухе (далее поровая активность) на глубинах 0,8 м...1 м. Однако по величине поровой активности на таких глубинах нельзя оценить количество радона, выделяющего с поверхности породы (что и представляет основной интерес). Это количество зависит не только от интенсивности выделения радона из твердых частиц пород, но и от способности радона мигрировать к поверхности. В связи с этим во многих странах наряду с измерениями поровой активности радона измеряют также газопроницаемость поверхностных пород и по измеренным значениям этих величин рассчитывают радоновый потенциал, по которому классифицируют территорию по степени радоноопасности. Однако, газопроницаемость поверхностных пород, как и плотность потока радона, характеризуется высокой вариабельностью. Кроме того, газопроницаемость поверхностных пород отличается от газопроницаемости плотных пород, залегающих в основании фундамента зданий. К тому же такой способ оценки является трудоемким и дорогостоящим. Для уменьшения объема работ при определении радоноопасности территорий в последние годы возникла идея построения карт потенциальной радоноопасности. Предназначение таких карт заключается в классификации территорий по степени радоновых рисков. Предполагается, что на территориях с низкой радоноопасностью измерения можно не

проводить, либо существенно уменьшить их объем. Однако, до сих пор не решена проблема выбора используемых для построения карт параметров, которые обеспечили бы высокую достоверность оценок. Кроме того, измерения большинства параметров также проводят на земной поверхности или в верхних слоях пород.

Безусловно, концентрации радона в помещениях зависят не только от его количества, выделяющегося из пород. Существует множество и других факторов, в том числе архитектурные особенности строения, а также образ жизни и привычки населения. Однако, необходимо подчеркнуть, что основным источником радона все-таки является подстилающие фундамент здания породы. К настоящему времени в научной литературе отсутствуют данные о количестве радона, выделяющегося с поверхности пород разных типов. Не обсуждаются вопросы о том, какие физические свойства пород оказывают наиболее сильное влияние на выход радона с их поверхности. Не сделаны однозначные выводы о влиянии погодных условий на результаты измерения ППР. Не проведен сравнительный анализ результатов измерения ППР, полученных используемыми в Российской Федерации методами.

Объектом исследования являются плотность потока радона и подстилающие горные породы.

Предметом исследования является выход радона с поверхности подстилающих горных пород при разных природно-климатических условиях.

Цель и задачи работы

Целью наших исследований является разработка основ метода оценки радоноопасности территорий по геолого-физическим свойствам пород, позволяющего получать достоверные результаты при минимальных затратах. В соответствии с общей целью работы в диссертации поставлены следующие основные задачи:

1. Провести анализ существующих подходов к проблеме оценки радоноопасности территорий.
2. Сделать обзор литературы по классификации и геолого-физическим свойствам пород.
3. Организовать экспедиции в районы с разным типом подстилающих горных пород.
4. Провести измерения плотности потока радона на поверхности пород разного типа для разных погодных условий методами накопительных камер и угольных адсорберов.
5. Отобрать образцы пород и определить их геолого-физические свойства.
6. Проанализировать результаты измерения плотности потока радона с точки зрения влияния погодных условий и геолого-физических свойств пород.

Научная новизна

1. Показано, что основным фактором, определяющим количество выделяющегося с поверхности радона, является тип породы.

2. Показано, что на выход радона с поверхности рыхлых осадочных пород наибольшее влияние оказывает их дисперсный и вещественный состав, влагоемкостные свойства и способ упаковки зерен, а также наличие разломов и глубоких трещин в подстилающих коренных породах.

3. Показано, что для условий естественного залегания дисперсных осадочных пород значимая зависимость между плотностью потока радона и влажностью и полной пористостью отсутствует.

4. Показано, что основным параметром состояния атмосферы, влияющим на результаты измерения плотности потока радона на поверхности подстилающих горных пород, является количество осадков, выпавших накануне измерений.

5. Показано, что для измерений плотности потока радона предпочтителен метод угольных адсорберов, так как он обеспечивает более достоверные результаты при однократных измерениях.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. При проектировании зданий вопрос о необходимости осуществления мер о противорадоновой защите решается на основе предпроектной оценки радоноопасности территорий застройки. В Российской Федерации предпроектная оценка радоноопасности территорий застройки проводится на основе измерений плотности потока радона на земной поверхности. Однако данный способ подвергается критике, так как количество радона, выделяющегося на земной поверхности, как правило, существенно отличается для пород, залегающих в основании фундамента зданий.

2. В работе показано, что основными факторами, определяющими количество выделяющегося радона, является тип породы и ее основные геофизические свойства, которые определяются при проведении предпроектных инженерно-изыскательских работ на участке застройки. По итогам проведенных исследований предлагается новый подход к решению задачи радоноопасности территорий застройки, основанный на использовании имеющейся у проектно-строительных организаций базы данных о типах и свойствах горных пород, залегающих в основании фундамента зданий. Предлагаемый подход позволяет снизить финансовые, материальные и трудовые затраты на проведение оценок радоноопасности территорий застройки.

3. При отсутствии разломов и трещин в коренных породах оценку радоноопасности участка застройки для наиболее распространенных рыхлых осадочных пород – суглинков и глин можно не проводить.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Основным фактором, определяющим количество выделяющегося с поверхности радона, является тип породы. Средние значения плотности потока радона на поверхности различных видов распространенных в природе дисперсных осадочных пород - суглинков, супесей, глин, обломочных пород не превышают $200 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; для плотных скальных пород достигают $800 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. На выход радона с поверхности рыхлых осадочных пород наибольшее влияние оказывает их дисперсный и вещественный состав, влагоемкостные свойства и способ упаковки зерен, а также наличие разломов и глубоких трещин в подстилающих коренных породах.

3. Для дисперсных осадочных пород в природном залегании значимого влияния естественной влажности и полной пористости на плотность потока радона не обнаружено.

4. Выход радона с поверхности исследованных пород не коррелирует с содержанием радия-226, что обусловлено влиянием дисперсного и вещественного состава пород, погодных условий, которые оказывают комплексное и разнонаправленное воздействие на процессы эманации и диффузии радона в породах и нивелирующих вклад удельной активности радия в количество выделяющегося радона.

5. В работе предлагается новый подход к решению задачи радоноопасности территорий застройки, основанный на использовании имеющейся у проектно-строительных организаций базы данных о типах и свойствах горных пород, залегающих в основании фундамента зданий. Предлагаемый подход позволяет снизить финансовые, материальные и трудовые затраты на проведение оценок радоноопасности территорий застройки.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием статистических методов обработки результатов измерения и современных программных пакетов, а также современной и поверенной в аккредитованной лаборатории аппаратуры для измерения плотности потока радона и удельной активности радия, согласием результатов измерений, полученных разными методами, а также отсутствием противоречий с результатами, представленными в научной литературе.

Апробация

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях:

1) 9th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications: Book of Abstracts, Valencia, July 6-11, 2014. - Valencia

2) 54-я Международная научная студенческая конференция: материалы, Новосибирск, 16-20 Апреля 2016. - Новосибирск: НГУ, 2016

3) 55-я Международная научная студенческая конференция: материалы, Новосибирск, 16-20 Апреля 2017. - Новосибирск: НГУ, 2017

4) IX Международная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию исследовательского ядерного реактора ТПУ, Томск, 21-22 Сентября 2017

5) 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, September 16-22, 2018

6) XIII Международная школа молодых ученых им. А.Г. Колесника, посвященная 140-летию Томского государственного университета, Томск, 9-16 Сентября 2018

7) 10-ая Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров», Томск, 9-11 Сентября 2020

8) 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, September 14-26, 2020

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в выборе методов исследований, проведении экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке научных публикаций по теме исследования. Постановка цели и задач исследования, анализ полученных результатов проведены совместно с научным руководителем. Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Вклад соавторов в основные публикации не превышал 50% от общего объема работы.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 работ, из них публикации в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science – 5; публикации, включенных в список ВАК – 2; статьи; патенты – 1. Исследование поддержано грантом РФФИ «Аспиранты 2019».

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 77 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 111 страниц и включает 34 рисунков, 12 таблиц и 4 Приложения.

Содержание работы

Во Введении кратко описаны существующие подходы к оценке радоноопасности территорий, отмечены их недостатки и обоснована актуальность диссертационной работы. Сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения, описана структура диссертации.

В первой главе проведен аналитический обзор методов оценки радоноопасности территорий. В странах Европы на протяжении многих лет в качестве критерия радоноопасности часто используется поровая активность радона в почвенном воздухе, измеренная на глубинах 0,8 м – 1 м. Однако по величине объемной активности на таких глубинах нельзя оценить количество радона, выделяющего с поверхности породы (что и представляет основной интерес). Действительно, на выход радона из пород влияют факторы, не связанные с величиной поровой активности радона, например, погодные условия, газопроницаемость пород, наличие трещин и разломов, гидрогеологические условия местности и т.д. В последние годы для определения радоновых рисков во многих странах используют категориально-численную величину – радоновый индекс (*RI*). К сожалению, не существует единого мнения о методологии и методах определения данной величины. В частности, в разных странах для определения *RI* используют различные входные параметры – концентрации урана/радия, поровую активность радона, газопроницаемость грунтов, особенности геологического строения подстилающих пород, объемную активность радона в помещениях, мощность дозы гамма-излучения и т.д. В настоящее время в Европе активно проводятся исследования, целью которых является определение набора величин, адекватно отражающих радоновые риски местности. Во многих странах широкое использование получило определение радонового индекса на основе расчета численного показателя – радонового потенциала, входными параметрами для которого является набор данных поровой активности радона и газопроницаемости породы, измеренных на глубинах 0,8 м ... 1 м. Основной недостаток такого подхода – измеряемые в поверхностных слоях параметры, как правило, значительно отличаются от параметров пород, залегающих в основании фундамента зданий на глубинах от одного до нескольких метров.

В Российской Федерации потенциальные радоновые риски территорий определяют на основе значений плотности потока радона (ППР), измеренной на земной поверхности с помощью накопительных камер или угольных адсорберов. Территория не имеет радоновых рисков, если, например, для жилой застройки 20% и более результатов измерений плотности потока радона превышают критическое значение, равное $80 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Однако, данный способ также не позволяет получить достоверные оценки по двум причинам. Во-первых, геолого-физические характеристики пород поверхностных слоев, как правило, существенно отличаются от свойств пород, залегающих в основании фундамента зданий на глубинах 1 м ... 5 м. В частности, почвенный слой в большом количестве содержит органику, может отличаться и минеральный состав. Кроме того, почвенный покров характеризуется наличием большого количества микро-и макротрещин, возникающих в результате выветривания и высушивания. Глубина фундаментов, составляющая от одного до нескольких метров, соответствует толщинам активного слоя, из которого радиоактивный радон выходит на поверхность. На таких глубинах обычно залегают

плотные коренные породы с отличающимися от верхних почвенных слоев свойствами. Во-вторых, результаты измерения ППР характеризуются достаточно высокой вариабельностью, обусловленной влиянием погодных условий и неоднородностью подстилающих пород.

В настоящее время во многих странах для определения степени опасности радона достаточно больших территорий активно разрабатывают карты геогенного радонового потенциала. При построении карт используют базы данных о геологических особенностях подстилающих пород, объемной активности радона в помещениях и в почвенном воздухе, газопроницаемости, содержании урана/радия, дозы гамма-излучения и т.д. Однако, на сегодняшний день нет единой методологии построения таких карт, так как до сих пор не выявлены параметры, однозначно коррелирующие с количеством поступающего в здания радона. В результате проведенного аналитического обзора существующих методов оценки радоноопасности была обозначена цель диссертационного исследования: разработать основы метода оценки радоноопасности территорий с помощью геолого-физических свойств пород, позволяющего получать достоверные результаты при минимальных затратах.

Вторая глава диссертации посвящена изучению влияния погодных условий и методов измерения на значения плотности потока радона.

В *разделе 2.1* описаны методы измерения ППР и планирование экспериментов, проведенных в 2014-2018 гг. Эксперимент проводили в г.Томске на поверхности дисперсных осадочных пород, наиболее типичных для населенных территорий. Плотность потока радона измеряли двумя используемыми в Российской Федерации аттестованными методами – методом накопительной камеры (НК) и методом угольных адсорберов (УА). При реализации метода накопительной камеры использован измерительный комплекс Альфарад Плюс, для метода угольных адсорберов - измерительный комплекс Камера-01. Измерения проведены на шести площадках г.Томска. Большая площадка размерами 20 м × 30 м располагалась на дне котлована глубиной 1.5 м, предназначенного для строительства жилого дома; тип породы – суглинок. Остальные площадки размерами 1 м×1 м находились на террасе реки Томь. Площадка №2 расположена в суглинке на глубине 0.5м; площадка №3 рядом с площадкой №2 на земной поверхности, т.е. на рыхлом почвенном слое; площадка №4 на поверхности лессовидных суглинков; площадка №5 на поверхности глинистых сланцев; площадка №6 на поверхности белой глины. Дополнительно в 2018 году проводили измерения ППР на нескольких территориях Горного Алтая, а именно в долине р. Катунь, на площадках г. Горно-Алтайска, с.Майма и с. Кызыл-Озек. Всего было выбрано 7 площадок измерения. При изучении влияния состояния атмосферы регистрировали температуру, давление и влажность атмосферного воздуха, а также количество осадков, выпавших накануне проведения измерений. За период наблюдений с 2014 по 2018 год получено 385 результатов измерений плотности потока радона разными методами:

НК (2014) = 36; НК (2016) = 95; УА (2016) = 60; НК(2017) = 59, НК(2018) = 138. На каждой площадке отбирали пробы пород методом режущего кольца для определения плотности, полной пористости и влажности, а также отбирали образцы пород для измерения удельной активности радия-226. Удельную активность радия-226 в зависимости от массы образца измеряли в геометрии сосуда "Маринелли" с объемом 1 л или геометрии сосуда «Дента» (усеченный конус) с объемом 250 мл с помощью γ -спектрометра на базе полупроводникового детектора из сверхчистого германия (CANBERRA GC2018) с разрешением 1.85 кэВ для энергии 1.33 МэВ и 0.85 кэВ для энергии 122 кэВ (калибровка проведена по источнику Eu-152 с насыпной плотностью 1 г/см³). Измерения проводили в условиях радиоактивного равновесия по наиболее интенсивным линиям дочерних продуктов распада радона – Pb-214 (295,21; 351,92 кэВ) и Bi-214 (609,32 кэВ). Перед измерением породы тщательно высушивали при температуре ~100С° и измельчали. Время выдержки герметично закрытых сосудов составляло две – три недели, время измерения одного образца – 1 сутки; статистическая погрешность измерений не превышала 15%. Для обработки аппаратных гамма-спектров использована программа CANBERRA «Genie-2000».

В разделе 2.2 проведено сравнение полученных в 2016 году результатов измерения плотности потока радона методами НК и УА (рисунок 1, таблица 1). Необходимо подчеркнуть, что измерения методами НК и УА в 2016 г проведены одновременно на одной площадке.

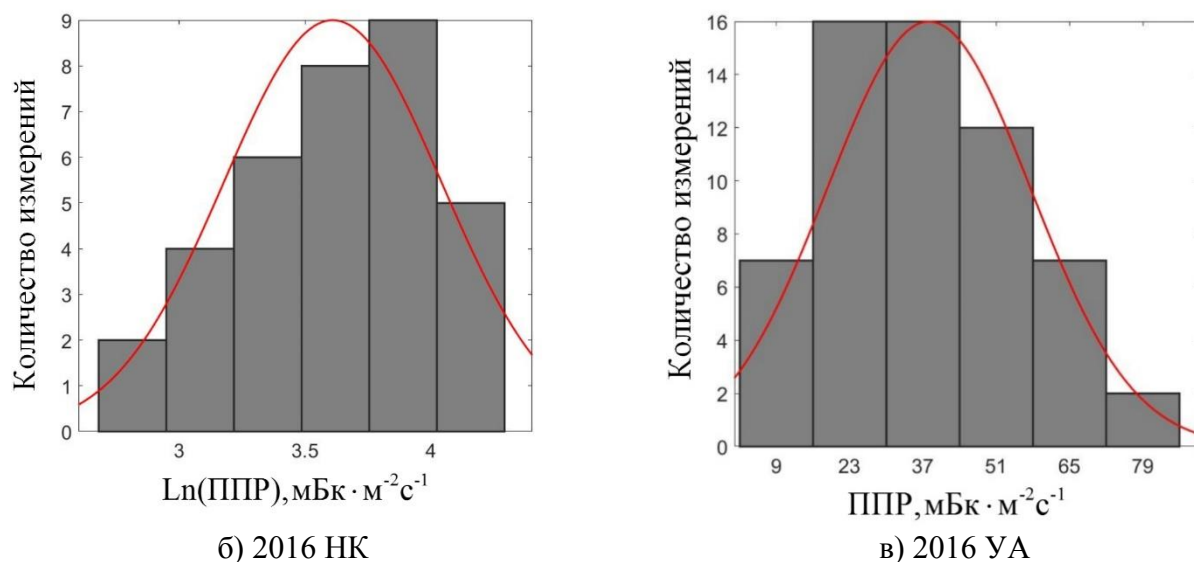


Рисунок 1 – Гистограммы плотности потока радона, измеренной разными методами: а) метод накопительной камеры, 2016 г; б) метод угольных адсорберов, 2016 г.

Таблица 1 – основные результаты измерений ППР разными методами в 2016 г.

Площадка, год измерения	Метод измерения	Количество измерений	Диапазон значений $x_{\min} \dots x_{\max}$, $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\bar{x}$, $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	σ_x , $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	V_x , %
Площадка №2, 2016 г	НК	95	3...96	39	31	80
	УА	60	2...82	38	19	51

С помощью критерия Пирсона показано, что распределение значений ППР имеет разный характер: для метода НК – логнормальное, для УА – нормальное. Различие в характере распределений в данном случае можно объяснить тем, что площадь земной поверхности, с которой накапливается радон при проведении измерений для метода НК ($132,8 \text{ см}^2$) больше в четыре раза, чем для метода УА ($33,2 \text{ см}^2$). Следовательно, мультипликативное воздействие количества микро–и макротрещин на результаты измерения ППР для метода УА будет гораздо слабее либо вообще будет отсутствовать. Из таблицы 1 видно, что средние значения ППР, измеренных разными методами, практически совпадают и составляют в среднем $38 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Однако, диапазоны результатов измерений, как и соответствующие коэффициенты вариации, для двух методов заметно отличаются. Разброс значений ППР для метода НК заметно больше, чем для метода УА, так как период экспозиции для метода УА более чем на порядок превышает период экспозиции для метода НК и влияние стохастической природы радиоактивных распадов проявляется слабее. Таким образом, методы измерения влияют только на вариабельность результатов измерений ППР.

В разделе 2.3 рассмотрено влияние параметров атмосферы на результаты измерения ППР. Для изучения влияния атмосферных условий на выход радона методом наименьших квадратов построены регрессионные зависимости между ППР и параметрами атмосферы. Обработка показала, что большое значение $R^2=0.8$ соответствует экспоненциальной зависимости ППР от температуры для метода УА (рисунок 2).

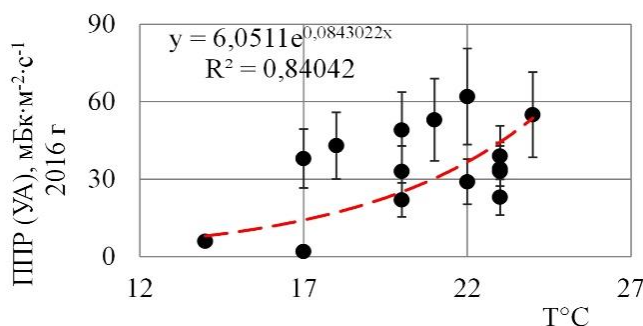


Рисунок 2 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом УА (2016 г) от температуры (Т)

Данную закономерность можно объяснить тем, что измерения ППР проведены с открытым объемом камеры. Количество атмосферной влаги с ростом температуры несколько

уменьшается, что в свою очередь приводит к усилению процесса сорбции радона на угле. Значимая зависимость результатов измерений ППР с помощью угольных адсорберов от других параметров атмосферы не обнаружена. Не обнаружена также зависимость значений ППР от параметров атмосферы для метода накопительных камер.

Отсутствие зависимости между результатами измерения ППР и отдельными параметрами атмосферы не означает, что процесс выхода радона из грунтов не зависит от атмосферных условий. Скорее всего, атмосфера оказывает комплексное влияние на результаты измерения. Например, повышение температуры приводит к возникновению дневных конвективных потоков, способствующих выходу радона с поверхности грунтов. Однако, повышение летних температур, как правило, сопровождаются ростом атмосферного давления, что оказывает противоположное действие.

В разделе 2.4 изучено влияние выпавших накануне измерений осадков на значения плотности потока радона. На рис. 3-4 представлены результаты, полученные в 2016 г и 2018 г.

Для суглинков (рис. 3 и 4а) отчетливо просматривается следующая тенденция – при выпадении небольшого количества осадков ППР резко уменьшается, а затем с увеличением количества выпавшей влаги наблюдается заметный рост. Аналогичная, но менее выраженная зависимость наблюдается и для сланцев (рис. 4б). Можно предположить, что при небольшом количестве осадков происходит закупорка верхних пор породы, что препятствует выходу радона. При большом количестве осадков влага фильтруется на сравнительно большие глубины и вытесняет радон из порового пространства. Кроме того, радон, количество которого на этих глубинах гораздо больше, чем в приповерхностных слоях, растворяется в воде (известно, что радон обладает высокой растворимостью в воде). При росте температур в дневные часы происходит интенсивное испарение насыщенной радоном влаги, что в конечном счете также приводит к увеличению выхода радона из пород.

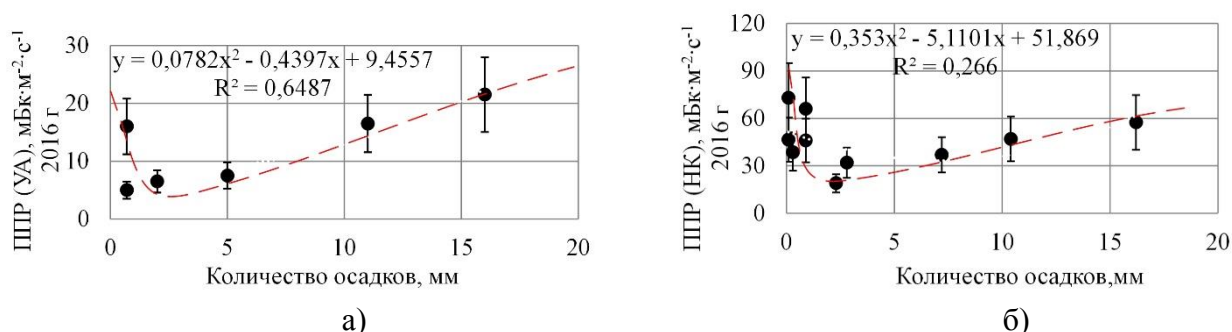


Рисунок 3 – Результаты регрессионного анализа значений ППР на поверхности суглинков (2016 г.) от количества осадков: а) ППР, измеренная методом УА;

б) ППР, измеренная методом НК.

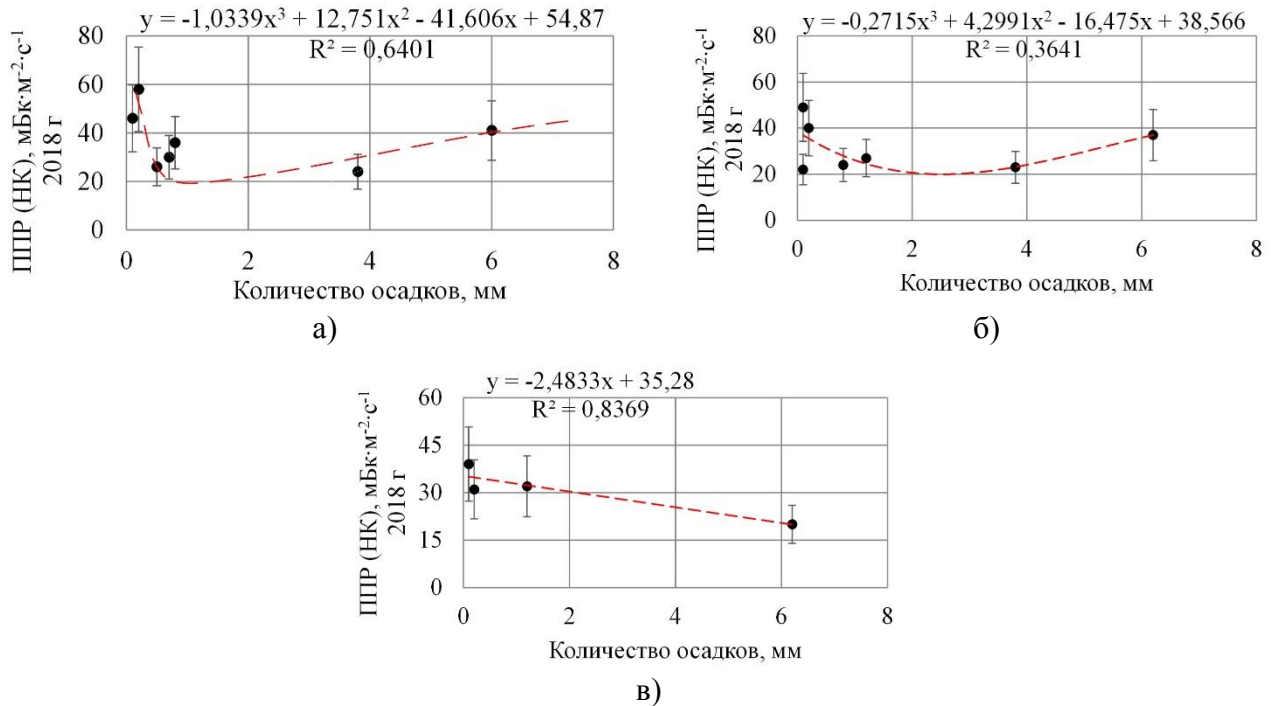


Рисунок 4 – Результаты регрессионного анализа значений ППР (2018 г.) от количества осадков для: а) суглинков; б) глинистых сланцев; в) белой глины

Для глин (рис.4в) получена слабо убывающая линейная зависимость ППР от количества осадков. Полученный результат объясняется тем, что глина обладает высокой гигроскопичностью. При поглощении влаги частицы глины быстро разбухают, поэтому объем открытых пор, через которые происходит вынос радона на поверхность, уменьшается.

Третья глава посвящена обзору литературы по классификации подстилающих горных пород и их геолого-физическим свойствам, планированию эксперимента в 2020 году в городе Томске, а также приведены основные результаты измерения ППР на поверхности пород разного типа.

В разделе 3.1 описана классификация осадочных пород. При определении типа осадочных пород используют их классификацию с помощью различных признаков – происхождению, текстурных и структурных особенностей и вещественному составу. Существует несколько базовых классификаций породы по происхождению, так по классификации Лучицкого выделяют – химические, обломочные и органогенные породы, а по классификации Рухина и Швецова – глинистые, обломочные и хемобиогенные. Дальнейшее разделение в рамках больших групп проводят по минеральному и вещественному составу.

В процессе классификации осадочных пород не следует в пользу однообразия и ложной стройности отдавать предпочтение какому-либо одному признаку перед другими. При рассмотрении обломочных пород основным признаком выступает размер частиц. По размеру частицы подразделяют на песчаные, грубообломочные, глинистые и алевроитовые. Затем частицы разделяют по происхождению и минеральному составу. В группе кремнистых пород на первой

позиции выступает генетический признак. По происхождению их разделяют на хемобиогенные, хемотрогенные и биогенные. Дальнейшее разделение проводят по структуре, минеральному составу и др. Такое разделение пород наиболее соответствует классификации Страхова И. М., разработанной на основе о типах литогенеза.

По происхождению и вещественному составу можно выделить: глинистые (алюмосиликатные и силикатные), обломочные, железистые, глиноземистые (аллитные), марганцевые, кремнистые, фосфатные, карбонатные, соли, каустобиолиты.

Осадочные породы в основном состоят из нескольких компонентов в различных соотношениях, например, из обломочных аутигенных-хемобиогенных, аллотигенных и биогенных. Только некоторые виды породы состоят из одного компонента.

Классификацию обломочных пород проводят по их структуре (размеру частиц), содержанию цемента в составе породы. По структуре выделяют следующие породы:

- глинистые-пелитовые (размер частиц $< 0,005$ мм);
- пылеватые-алевритовые (размер частиц от 0,05 до 0,005 мм);
- песчаные-псаммитовые (размер частиц от 0,05 до 1 мм);
- грубообломочные-псефитовые (размер частиц более 1 мм).

Иногда классификацию проводят по 0,01 мм между пылеватыми и глинистыми частицами, и по 0,1 мм между пылеватыми и песчаными.

Суглинки и супеси являются промежуточными породами между песком и глиной, с разным содержанием глинистого, алевритового и песчаного материала. Они представляют из себя связные породы из глинистых, алевритовых и песчаных частиц, которые сцеплены между собой в один кусок.

Классификацию смешанных пород проводят по содержанию алеврита, глины и песка, а также по числу пластичности. Породы, содержащие глинистых частиц $< 5\%$, относят к пескам или алевритам, от 5 % до 10 % - к супесям, от 10 % до 30 % - к суглинкам, при содержании глинистых частиц более 30 %, относят к глинам. В зависимости от доли содержания алевритовых и песчаных частиц породы именуют супесями и суглинками или алевритовыми супесями и суглинками (в случае, когда число алевритовых частиц превосходит число песчаных).

В разделе 3.2 рассматриваются основные геолого-физические свойства пород, которые могут повлиять на выход радона. К ним относятся дисперсный и вещественный состав, строение и структура пород, плотность, пористость и влажность. Классификация частиц пород по дисперсному составу наиболее типичных осадочных пород приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Классификация частиц по дисперсному составу осадочных пород.

Галька	Гравий	Дресва	Песчаные частицы					Пылеватые частицы		Глинистые частицы
Более 10.0	10-5	5-2	2.0-1.0	1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	0.01-0.002	<0.002

Строение пород во многом определяет их физические и фильтрационные свойства и охватывает структуру, текстуру и укладку (упаковку) пород.

Структура определяется: 1) зернистостью породы, т.е. размером и формой зерен; 2) текстура определяется расположением зерен, например, слоистое или неслоистое расположение зерен; и 3) степенью сближенности зерен, т.е. укладкой или упаковкой зерен. В последнее время укладку зерен рассматривают как одну из основных характеристик строения пород (плотной или рыхлой), представляющих особый интерес в инженерной геологии. Укладка определяет прочность, пористость и проницаемость пород.

В разделе 3.3 описаны типы и физические свойства исследованных пород. Измерения ППР проведены на поверхности трех типов горных пород – разных видов глинистых пород, крупнообломочных горных пород, а также кварцита и андезито-базальтового порфирита. Подавляющее число результатов получено для глинистых пород, так как эти породы характерны для большинства населенных территорий, в том числе и г.Томска.

К глинистым породам относятся суглинки разных видов, супеси и глины. Наиболее широко распространены суглинки разных видов, мощность которых составляет обычно от нескольких метров до нескольких десятков и даже сотен метров.

Суглинок – рыхлая молодая (четвертичного периода) порода; в зависимости от вида примесей различают следующие виды суглинков: 1) валунные, имеют в составе щебень, гальку, гравий, валуны; 2) лессовидные суглинки. В зависимости от гранулометрического состава породы различают легкие песчанистые, легкие пылеватые, тяжелые песчанистые, тяжелые пылеватые суглинки. Образование суглинка происходит в результате дробления и оседания горных пород с высоким содержанием кварца.

К супесям относятся породы с большим содержанием песка - до 70%, в то время как глинистых частиц не более 5-10%; характеризуется средней водо-и газопроницаемостью.

В глинах содержание глинистых частиц размером $< 0,01$ мм, в том числе не менее 25% частиц $< 0,001$ мм., составляет не менее 50 %. Характерным признаком глин является также обязательное присутствие в них в значительном количестве глинистых минералов из группы слоистых силикатов, сосредоточенных главным образом во фракции $< 0,001$ мм.

Обломочные горные породы — осадочные породы экзогенного происхождения, которые в основном содержат обломки других горных пород или минералов.

Кварцит – метаморфическая горная порода является вторичным образованием, возникающим из осадочных и магматических при их метаморфизации при высоких давлениях и температурах.

Андезито-базальтовый порфирит – магматическая горная порода, возникает из магмы при ее кристаллизации и застывании.

В *разделе 3.3* описано планирование измерений ППР в 2020 году. Измерения в г.Томске проведены на одиннадцати экспериментальных площадках (районы Лагерного сада и Бактина) (рис.5); в день проводили в среднем по восемь измерений плотности потока радона. На выбранных площадках параллельно отбирали образцы породы методом режущего кольца для определения естественной, объемной, абсолютной влажности, коэффициентов влажности и водонасыщения, полной пористости, плотности сухой породы. На каждой площадке проводили отбор образцов массой примерно 1,5 кг для измерения удельной активности радия-226.

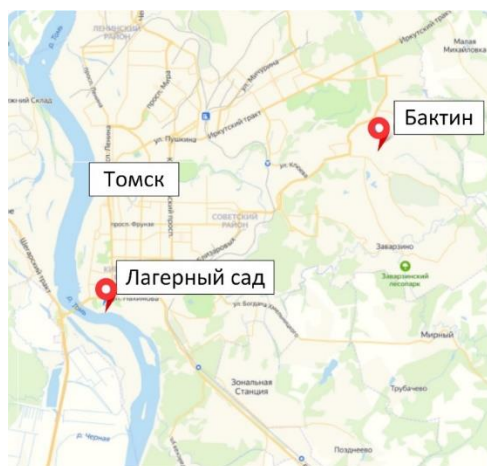


Рисунок 5 – Схема измерения плотности потока радона в г.Томске

В *разделе 3.4* представлены результаты экспериментальных исследований в Томске. При проведении исследований в Томске в 2014 г было получено – 36 измерений ППР, в 2016 г – 155, в 2017 г – 56, в 2018 г – 64; в 2020 г – 165; таким образом было получено 476 значений плотности потока радона на поверхности осадочных пород с разным вещественным и дисперсным составом.

Показано, что для рыхлых осадочных пород г.Томска средние значения плотности потока радона не превышают $60 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$ при коэффициентах вариации не более 70%; наибольшие средние значения ППР – $56 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $53 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$ получены для белой глины и супеси песчанистой соответственно. Отметим, что невысокие значения плотности потока радона, полученные на площадках г. Томска, характерны для суглинистых пород.

В *разделе 3.5* рассматриваются результаты эксперимента, полученные в Горном Алтае в 2018 г. Известно, что территория Горного Алтая характеризуется повышенными значениями плотности потока радона. Измерения проведены на поверхности пород трех типов: дисперсных осадочных пород (песчано-гравийно-галечные отложения, расположенные на трех террасах);

плотных осадочных пород (глинистый и скальный известняк); магматической горной породы (андезитно-базальтовый порфирит); метаморфической горной породы (кварцит). Виды пород, исследованных в Горном Алтае, определены в Алтайском региональном институте экологии. Сравнительно небольшие средние значения ППР ($100-200 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$) получены для песчано-гравийно-галечных отложений, для которых характерна высокая газопроницаемость. Эти типы пород имеют сложный минералогический и гранулометрический состав, поэтому средние значения ППР для трех террас заметно отличаются. Наибольшие средние значения получены для кварцита – $810 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$ и андезито-базальтового порфирита – $760 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Сравнительно высокие значения ППР для дисперсных осадочных горных пород Горного Алтая можно объяснить тем, что территория Алтая характеризуется наличием глубинных разломов и трещин, через которые происходит выделение мантийных флюидов, в т.ч. радона. Сильное влияние разломов и трещин на выход радона обнаружено и в других работах. Сравнительно высокие средние значения ППР для плотных осадочных пород - глинистого и скального известняка ($300-500 \text{ мБкм}^{-2}\text{с}^{-1}$) и высокие средние значения для андезито-базальтового порфирита и кварцита, возможно, обусловлены низкой гигроскопичностью зерен этих пород. Пробег образующихся при радиоактивном распаде ионов радона-222 в плотных средах крайне малы, поэтому отсутствие даже очень тонких водных пленок на поверхности зерен может привести к значительному увеличению выхода радона в открытые поры.

Четвертая глава посвящена изучению влияния геофизических свойств дисперсных осадочных пород на результаты измерения ППР. С помощью дисперсионного анализа значений ППР, измеренных на поверхности одиннадцати различных видов осадочных пород с разным дисперсным и вещественным составом, показано значимое различие соответствующих средних значений (расчетное значение критерия Фишера 8,05 значительно больше критического 1,89). В исследованиях 2020 г определение вида пород, их дисперсного состава и физических свойств проведено в грунтоведческой лаборатории АО «ТомскТИСИЗ».

В *разделе 4.1* изучено влияние вещественного и дисперсного состава осадочных пород на выход радона. На рисунке 6 представлены результаты регрессионного анализа измеренных в 2020 г средних значений ППР от усредненного по гранулометрическому составу размера частиц породы для каждой площадки. На графике видно, что увеличение среднего размера частиц породы ведет к росту ППР, что можно объяснить возрастанием доли открытых пор.

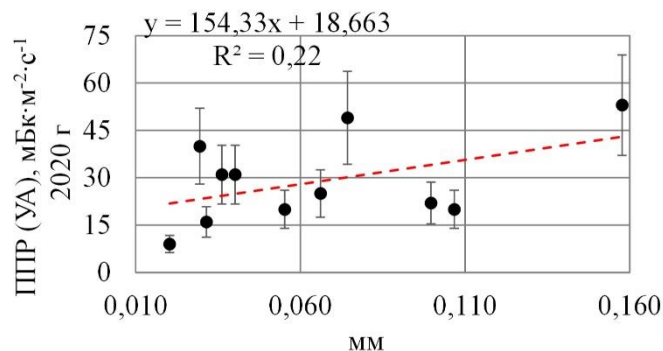


Рисунок 6 – Зависимость среднего значения ППР от усреднённого по гранулометрическому составу размера частиц пород на каждой площадке.

Более четко проявляется зависимость ППР от содержания песчаных, пылеватых и глинистых частиц (рис.7, 8а, 8б), причем наибольший рост ППР наблюдается с увеличением доли песчаных частиц размерами 0,25-0,1 мм. Отметим, что песчаные породы обладают наиболее низкой влагоемкостью и высокой газопроницаемостью. Напротив, увеличение доли пылеватых и глинистых частиц приводит к уменьшению ППР. Результат понятен, так как увеличение доли песчаных частиц приводит к увеличению объема открытых пор, в то время как мелкие пылеватые и глинистые частицы заполняют пространство между более крупными песчаными частицами, что затрудняет выход радона из пород.

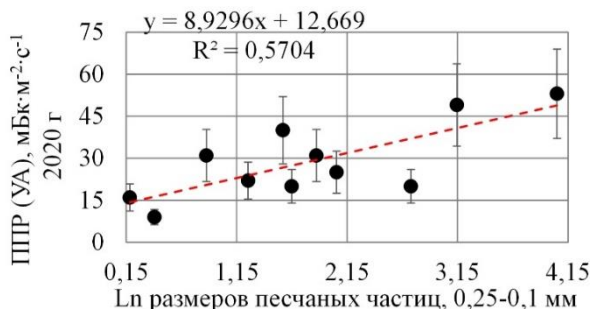


Рисунок 7 – Зависимость среднего значения ППР от логарифма размеров песчаных частиц

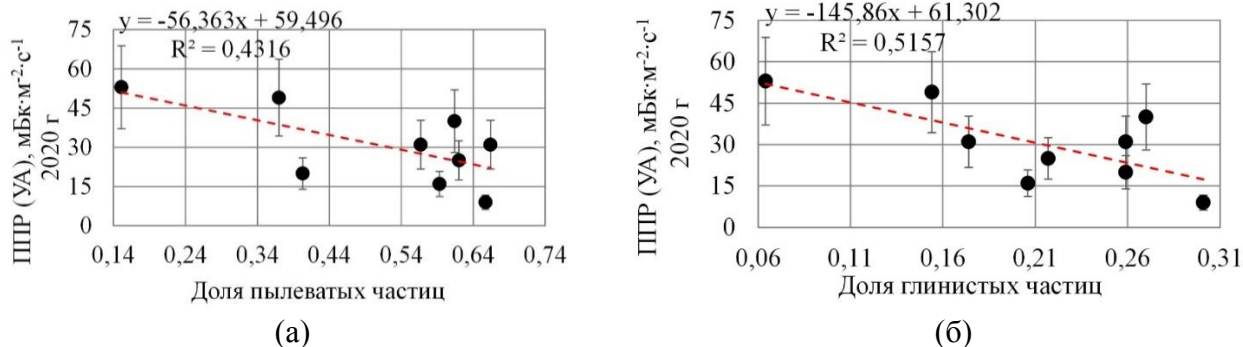


Рисунок 8 – Зависимость среднего значения ППР от доли: (а) пылеватых, (б) глинистых частиц

В разделе 4.2 изучено влияние различных характеристик влажности пород на плотность потока радона. Общей и значимой зависимости ППР от влажностных свойств пород в

исследованных диапазонах этих величин для разных видов осадочных пород выявить не удалось. Наибольшие значения параметра регрессии получены для зависимости ППР от естественной влажности пород. Для некоторых типов пород и достаточно узкого диапазона естественной влажности с помощью регрессионного анализа удалось выявить две основные тенденции изменения ППР. Для низких значений влажности пород в диапазоне от 4% до 7% наблюдается общая закономерность, характеризующаяся максимумом (рисунок 9). Аналогичные результаты получены также в работах, в которых изучали выход радона с поверхностного почвенного слоя.

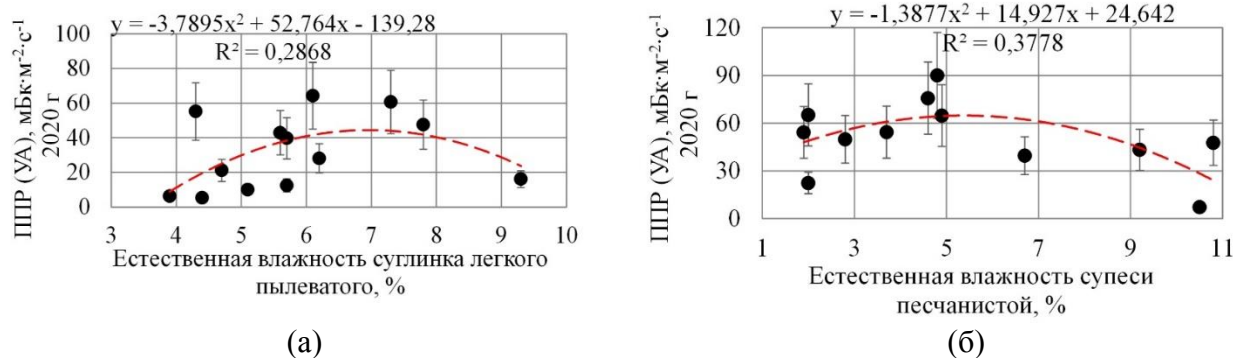


Рисунок 9 – Зависимость значений ППР от естественной влажности:

(а) суглинка легкого пылеватого; (б) супеси песчанистой.

Наличие максимума обнаружено также для лессовидного суглинка, но в более высоком диапазоне влажности (рисунок 10). Скорее всего это объясняется рыхлым сложением этих пород, наличием макропористости и хорошей водопроницаемостью. При сравнительно низком содержании влаги происходит вытеснение радона из открытых пор, что и приводит к увеличению ППР. При дальнейшем увеличении влажности содержащаяся в порах вода препятствует выходу радона из породы. Отметим, что в отличие от суглинков, исследованных на других площадках, лессовидный суглинок характеризуется более однородным и тонким гранулометрическим составом с преобладанием частиц менее 0,05 мм, малой долей частиц крупнее 0,1 мм и почти полным отсутствием частиц крупнее 0,25 мм и мельче 0,0015 мм.

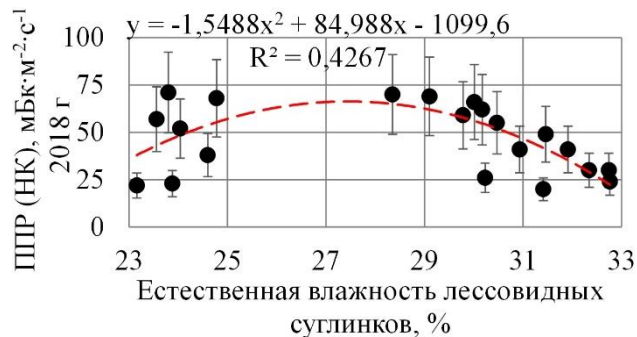


Рисунок 10 – Зависимость значений ППР от естественной влажности лессовидных суглинков

При значениях естественной влажности в диапазоне 13 % ... 30 % для белой глины и для суглинка тяжелого пылеватого наблюдается тенденция к убыванию ППР с ростом влажности (рисунок 11).

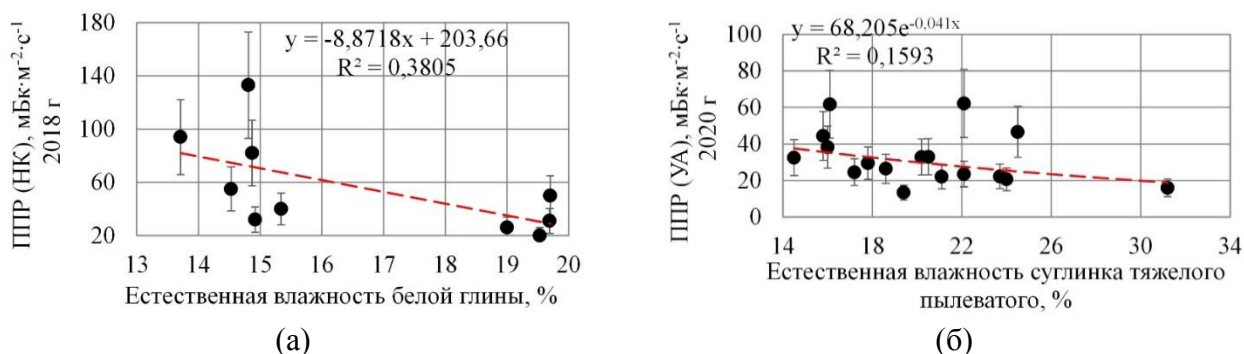


Рисунок 11 – Зависимость значений ППР от естественной влажности:

(а) белой глины; (б) суглинка тяжелого пылеватого

Противоречивые и неоднозначные данные о влиянии увлажнения пород на выход радона с их поверхности получены также и в работах других авторов. Очевидно, степень увлажненности породы влияет не только на количество пор, заполненных водой, но и на число микротрещин, глубина которых и количество содержащейся в них влаги зависит от интенсивности и времени выпадения осадков, а также от температуры и даже от скорости ветра. Сложный и практически неизученный процесс эманации радона из пород также зависит от степени их увлажнения. Комплексное влияние вышеперечисленных факторов с разнонаправленным характером воздействия как раз и обуславливает отсутствие каких-либо общих закономерностей для исследованных диапазонов влажности.

В разделе 4.3 изучено влияние полной пористости, плотности пород и удельной активности радия. В отличие от устоявшихся в литературе представлений об увеличении выхода радона с ростом пористости несколько неожиданным оказался результат наших исследований, представленный на рисунке 12. Еще раз подчеркнем, что в эксперименте определялась полная пористость.

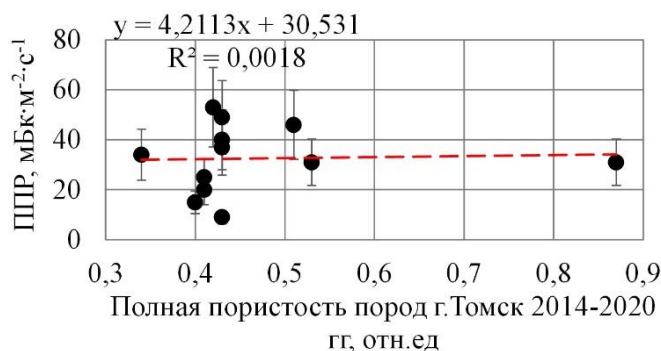


Рисунок 12 – Зависимость усредненных по количеству измерений на каждой площадке значений ППР и полной пористости осадочных пород г.Томска.

Возможно, отсутствие какой-либо зависимости результатов измерения ППР от полной пористости объясняется тем, что данная величина определяет долю объема породы, приходящуюся на все поры. Однако, выход радона из породы происходит только через открытые поры, доля которых зависит от структуры породы, в особенности от способа упаковки зерен, от степени увлажнения породы и глубины проникновения влаги, наличия макро-и микротрещин. Отметим, что методика определения открытой пористости достаточно трудоемка и требует специального оборудования; из-за отсутствия такого оборудования в нашем эксперименте не представилось возможности определить эту величину. Помимо открытых породы содержат и закрытые поры, доля которых также зависит от вышеперечисленных факторов. Доли открытых и закрытых пор изменяются в течение суток в результате влияния меняющихся погодных условий, в то время как полная пористость является неизменной характеристикой породы и определяется ее дисперсным составом и структурой.

На рисунке 13 представлены результаты регрессионного анализа усредненных по количеству измерений на каждой площадке значений ППР от плотности сухих осадочных пород; видно, что рост плотности породы приводит к увеличению выхода радона.

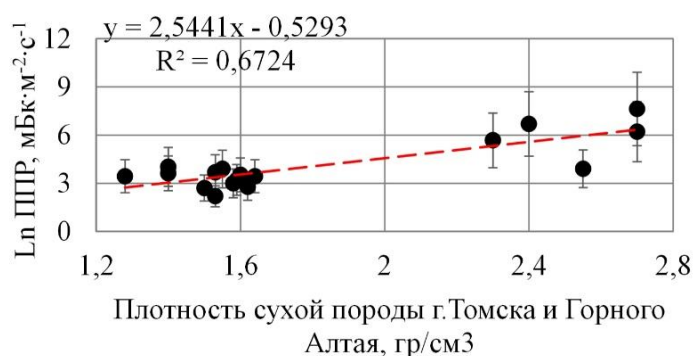


Рисунок 13 – Зависимость усредненных по количеству измерений на каждой площадке значений ППР и плотности сухих пород г.Томска и Горного Алтая.

Полученную зависимость можно объяснить тем, что высокие значения ППР получены для плотных пород Горного Алтая, характеризующихся очень низкой гигроскопичностью. Следовательно, на поверхности зерен породы отсутствует водная пленка, препятствующая выходу радона из породы.

Несколько неожиданным является также тот факт, что в наших исследованиях не обнаружена прямая зависимость между ППР и удельной активностью радия. Этот результат противоречит устоявшимся представлениям о том, что количество выделяющегося из породы радона увеличивается с ростом содержания радия. Более того, в РФ составлены карты потенциальной радоноопасности на основе содержания урана/радия в поверхностных породах. Удельная активность радия используется в качестве одного из параметров при составлении карт

радоноопасности территорий за рубежом. Однако, вывод об отсутствии прямой зависимости между содержанием радия и плотностью потока радона сделан также по результатам большого количества измерений ППР на территории г. Москвы. К сожалению, в этих работах не обсуждаются причины отсутствия такой зависимости. На наш взгляд, количество выделяющегося с поверхности породы радона зависит от множества факторов, оказывающих комплексное и разнонаправленное воздействие на процессы эманации и диффузии радона в породах и нивелирующих вклад удельной активности радия. В частности, очень сложным и неизученным является процесс эманации радона из зерен с учетом их размера и упаковки в породах, гигроскопичности пород и влагосодержания в воздухе пор.

Заключение

В диссертационной работе проведен анализ существующих методов оценки радоноопасности территорий. Отмечено, что на сегодняшний день нет единой методологии проведения таких оценок, в том числе до сих пор не выявлены параметры, однозначно коррелирующие с количеством выделяющегося с поверхности пород радона. Впервые проведены систематические измерения плотности потока радона для наиболее распространенных в природе горных пород разного типа и выявлены основные закономерности выхода радона с их поверхности в зависимости от геофизических свойств и погодных условий.

По результатам диссертации сформулированы основные выводы:

1. Оценка радоноопасности территорий является до сих пор нерешенной до конца задачей, т.к. используемые в настоящее время различные критерии радоноопасности не позволяют получить достоверные результаты, а способы проведения оценок являются трудоемкими.
2. Основным фактором, определяющим количество выделяющегося с поверхности радона, является тип породы. Средние значения плотности потока радона для различных видов распространенных в природе дисперсных осадочных пород - суглинков, супесей, глин, обломочных пород не превышают двух сотен $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; средние значения ППР на поверхности плотных скальных пород достигают $800 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.
3. На выход радона с поверхности рыхлых осадочных пород наибольшее влияние оказывает их дисперсный и вещественный состав, влагоемкостные свойства и способ упаковки зерен, а также наличие разломов и глубоких трещин в подстилающих коренных породах.
4. Для исследованных диапазонов естественной влажности и полной пористости дисперсных осадочных пород значимой зависимости плотности потока радона от этих свойств не обнаружено.
5. Выход радона с поверхности исследованных пород не коррелирует с содержанием радия-226, что обусловлено влиянием множества факторов, оказывающих комплексное и

разнонаправленное воздействие на процессы эманации и диффузии радона в породах и нивелирующих вклад удельной активности радия в количество выделяющегося на поверхность породы радона.

6. Выявленные в исследовании закономерности выхода радона с поверхности распространенных в природе горных пород могут быть использованы при разработке простого и дешевого метода оценки радоноопасности территорий на основе их геофизических свойств.

В приложениях А-Д представлены сводные данные значений ППР, измеренной разными методами, параметров атмосферы, количества осадков, геофизические свойства пород, а также результаты регрессионного анализа значений ППР от характеристик влажности.

Список публикаций по теме диссертации

1. Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Альмяков П.Э., Ложников Ф.И. Результаты измерения плотности потока радона на поверхности различных типов осадочных пород // Атомная энергия // (в печати)

2. Ryzhakova, Nadezhda Kirillovna. Using Radon Measurements Results At Two Small Depths In Local Radon Risk Assessments / N. K. Ryzhakova, K. O. Stavitskaya, Ph. Lozhnikov // Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online) proceedings of 7th International Congress, September 14-26, 2020, Tomsk, Russia: / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU) ; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ; ed. N. A. Ratakhin . — New York : IEEE , 2020 . — [P. 1041-1044] . — Title screen. — [References: p. 1044 (4 tit.)]. — Режим доступа: по договору с организацией-держателем ресурса..

3. Рыжакова Н. К., Ставицкая (Шилова) К.О., Удалов А.А. Новый подход к проблеме оценки радоноопасности участков застройки = A new approach to the problem of assessing the radon hazard of building sites // Радиационная гигиена = Radiatsionnaya Gygienna. - 2020 - Т. 13 - №. 2. - С. 57-64. doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-57-64

4. Рыжакова Н. К., Ставицкая (Шилова) К.О., Удалов А.А. Проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки = Issues in assessment of potential radon hazard at building sites // Радиационная гигиена = Radiatsionnaya Gygienna. - 2018 - Т. 11 - №. 2. - С. 37-44

5. Stavitskaya (Shilova) K.O., Ryzhakova N.K., Udalov A.A., Almyakov P.E. Comparative analysis of the measuring results of the radon flux density and Ra-226 specific activity for different soils types // AIP Conference Proceedings. - 2019 - Vol. 2101, Article number 020013. - p. 1-5

6. Ryzhakova N.K., Shilova K.O., Udalov A.A., Demjyanenko N. V. Methods of radiation and environmental studies of build-up areas and their analysis // Journal of Physics: Conference Series. - 2017 - Vol. 830, Article number 012144 . - p. 1-6

7. Шилова К., Рыжакова Н.К., Ключникова Ю.О. Измерение и анализ величин, используемых при оценке радоноопасности территорий в Российской Федерации и Чешской Республике // Альтернативная энергетика и экология. - 2015 - №. 23. - С. 60-68
8. Шилова К. О., Рыжакова Н. К., Ключникова Ю. О., Иванов М. И., Матюшкина Ю. А. Анализ методов и результатов измерения выхода изотопа Rn-222 на участке застройки г. Томска // Известия вузов. Физика. - 2015 - Т. 58 - №. 2/2. - С. 172-176
9. Пат. №2017119384/28 (033598). Способ оценки радоноопасности участков застройки / Н.К. Рыжакова, К.О. Шилова; опубл. 18.12.2017