

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи

СТАВИЦКАЯ КСЕНИЯ ОЛЕГОВНА

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

Шифр и наименование специальности

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент

Рыжакова Надежда Кирилловна

Томск – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Критерии радоноопасности территорий и их анализ	11
1.1 Категориально-численные величины (радоновый потенциал, радоновый индекс)	11
1.2 Карты потенциальной радоноопасности.....	14
1.3 Плотность потока радона.....	19
Глава 2. Изучение влияния погодных условий и методов измерения на значения плотности потока радона	30
2.1 Планирование эксперимента в 2014-2018 гг.	30
2.2 Анализ результатов измерения ППР разными методами.....	37
2.3 Влияние параметров атмосферы на результаты измерения ППР	38
2.4 Изучение зависимости результатов измерения ППР от количества осадков	43
Глава 3. Результаты измерения плотности потока радона на поверхности пород разного типа.....	46
3.1 Осадочные горные породы	46
3.2 Основные геолого-физические свойства горных пород.....	53
3.3 Планирование эксперимента в 2020 г.	57
3.4 Результаты экспериментальных исследований в Томске и их анализ....	58
3.5 Результаты экспериментальных исследований в Горном Алтае и их анализ.....	60
Глава 4. Изучение влияния геофизических свойств пород на результаты измерения плотности потока радона.....	63
4.1 Изучение влияния вещественного и дисперсного состава пород	63
4.2 Изучение влияния влажности пород	65
4.3 Изучение влияния полной пористости, плотности пород и удельной активности радия.....	69
Заключение	72
Список литературы	74

Приложение А. Результаты измерений плотности потока радона и параметров атмосферы за 2014-2017 гг.	83
Приложение Б. Результаты измерений плотности потока радона, количество осадков и характеристики влажности пород, 2018 г.....	92
Приложение С. Результаты регрессионного анализа значений плотности потока радона от характеристик влажности.....	97
Приложение Д. Результаты измерений плотности потока радона, параметров атмосферы, геофизических свойств породы, 2020 г.....	101

ВВЕДЕНИЕ

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 $80 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [1]. В этом случае при проектировании строительства зданий предусматриваются меры противорадоновой защиты, что удорожает строительство. Однако, данный способ подвергается критике [2], так как 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 на глубинах 1 м ... 5 м. Данный недостаток учтен при разработке методики оценки радоноопасности территорий, основанной на расчете ППР с использованием диффузионной модели и данных о коэффициентах диффузии и эманирования радона в грунтах, расположенных в основании фундамента [3]. Однако, в данной методике при расчете плотности потока радона предлагается использовать значения коэффициентов диффузии и эманирования, полученные в лабораторных условиях для ограниченного числа пород. Хорошо известно, что значения этих коэффициентов для пород в естественном залегании значительно отличаются от значений, полученных в лабораторных условиях, когда в процессе пробоподготовки пород к измерениям изменяется их структура и влажность [4-8]. Во-вторых, результаты измерения ППР характеризуются сравнительно высокой вариабельностью, обусловленной влиянием погодных условий [9, 10] и неоднородностью подстилающих пород [11-14]. Изучению влияния погодных условий посвящено немало работ, однако выводы о зависимости значений ППР от атмосферного давления и температуры

неоднозначны [9, 10, 15-17]. Не удалось найти работы, в которых были бы представлены качественные зависимости ППР от количества осадков.

Обзор иностранной литературы показывает, что и за рубежом оценка радоноопасности территорий является до сих пор нерешенной до конца задачей. Из-за сравнительно высоких вариаций результатов измерений плотность потока радона при проведении оценок радоноопасности за рубежом не используют. Обычно измеряют объемную активность радона в почвенном воздухе (далее поровая активность) на глубинах 0,8 м ... 1 м [18]. 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 стали измерять газопроницаемость поверхностных пород. Затем по измеренным значениям поровой активности и газопроницаемости 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 грунтов отличается от газопроницаемости плотных пород, залегающих в основании фундаментов зданий. Следует отметить, что такой способ оценки является трудоемким и дорогостоящим. Для уменьшения объема работ при определении радоноопасности территорий в последние годы за рубежом 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 вероятность получаемых 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 проведено сравнение результатов измерения ППР разными 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 диссертационной работы 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 при разных погодных условиях 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 горных 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 распространённых 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, включенные 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 рисунка, 12 таблиц и 4 Приложения.

ГЛАВА 1. КРИТЕРИИ РАДОНООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Целью наших исследований является разработка основ метода оценки радоноопасности территорий с помощью геолого-физических свойств пород, позволяющего получать достоверные результаты при минимальных затратах. В этой главе проведен аналитический обзор работ, в которых излагаются различные подходы к проблеме оценке радоноопасности территорий как в Российской Федерации, так и за рубежом.

1.1 Категориально-численные величины (радоновый потенциал, радоновый индекс)

За рубежом при проведении локальных оценок радоноопасности в середине прошлого века измеряли поровую активность радона на глубинах 0,8 м ... 1 м [18, 19]. Однако по величине объемной активности на таких глубинах нельзя оценить количество радона, выделяющего с поверхности пород. Это количество определяется еще и способностью радона мигрировать к поверхности. В связи с этим во многих странах наряду с измерениями поровой активности радона стали измерять газопроницаемость поверхностных пород. Затем по измеренным значениям поровой активности и газопроницаемости рассчитывают радоновый потенциал, по которому классифицируют территорию по степени радоноопасности. Стоит отметить, что данные подходы имеют ряд недостатков, которые не позволяют достоверно определить радоноопасность территории застройки. Во-первых, измерения проводят на глубине не более 1 м от земной поверхности. Однако, основание фундаментов зданий располагается обычно на больших глубинах. Во-вторых, отсутствует аттестованный метод измерения газопроницаемости. Кроме того, значения этой величины имеют высокий разброс, что ставит под сомнение объективность соответствующих оценок. Проведение измерений поровой активности радона и газопроницаемости на больших территориях является затруднительным, поэтому такие исследования проводят на участках застройки.

В США и многих странах Европы используют радоновый индекс (RI) как критерий радоноопасности, являющийся категориально-численной величиной [13, 20-25]. На сегодняшний день не существует общепринятого метода нахождения RI. В качестве входных параметров при определении RI в разных странах используют различные наборы данных – объемную активность радона в почвенном воздухе, концентрацию радия, особенности геологического строения подстилающих пород, газопроницаемость пород и т.п. [13, 26]. Например, для определения RI площадок, предназначенных под застройку, в Чешской Республике производят расчет радонового потенциала (RP). Входными данными нахождения RP являются третий квартиль набора данных поровой активности радона (OA_3) и третий квартиль данных газопроницаемости пород (k_3), полученные путем измерения на глубине 0,8 м [13]. Выражение, используемое для расчета RP, приведено в выражении 1.1. Соответствия между величинами RP и RI представлены в таблице 1.1.

$$RP = \frac{OA_3 - OA_{\min}}{-\log k_3 - 10}, \quad (1.1)$$

где $OA_{\min}$ – минимальное значение поровой активности, которое принимают равным $1 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-3}$.

Территория без проведения расчета RP является безопасной по радоновому риску, если выполняется условие $OA_3 < OA_{\min}$.

Таблица 1.1 – Таблица соответствия радонового индекса от радонового потенциала

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

В Германии при определении RI используют максимальные значения поровой активности радона и газопроницаемости породы, измеренные на глубине 1 м [26].

Во Франции входными данными для определения RI являются значения газопроницаемости и параметры геологической структуры подстилающих пород [27].

В США [28] при оценке радоноопасности территории также используют радоновый индекс (RI). Однако, методика определения RI основывается на учете результатов измерения объемной активности радона в помещениях, геологии подстилающих пород, результатов наземной радиометрии, газопроницаемости породы и типа архитектуры строений. За исключением геологии подстилающих пород, каждый фактор оценивается в балльной системе. Оценка радонового потенциала по геологическим данным исходит из типа породы, соответствия между которыми представлены в таблице 1.2. Классификационная матрица для индикаторов, используемых для определения радонового индекса представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Таблица соответствия радонового потенциала от типа породы

Тип породы	Радоновый потенциал
Кварцевые пески, кремнезём, некоторые виды глин	Низкий
Разные типы пород с повышенным содержанием радия.	Средний
Коренные породы (углеродистые чёрные сланцы, фосфориты, бокситы, ледники)	Высокий

Таблица 1.3 – Классификационная матрица радонового индекса.

Фактор	Количество баллов		
	1	2	3
Средний уровень объемной активности 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	$< 1.5 \text{ ppm eU}$	(1.5 – 15) ppm eU	$> 2.5 \text{ ppm eU}$
Геология	низкий	средний	высокий
Проницаемость почвы	низкий	средний	высокий
Тип архитектуры	имеет фундамент	смешанная	в основном подвальное помещение

Полученная сумма баллов по каждому фактору формирует оценку радоноопасности. В таблице 1.4 представлено соответствие итоговой суммы баллов и радоноопасности, соответствующей одной из категорий радонового индекса.

Таблица 1.4 – Таблица соответствия суммы баллов факторов от категории радонового индекса

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

Такой подход к оценке радоноопасности является довольно трудоемким и финансово затратным. Кроме того, хотелось бы отметить, что использование объемной активности радона в помещении является необоснованным, так как не характеризуют территорию застройки по степени радоновых рисков.

1.2 Карты потенциальной радоноопасности

В последние годы за рубежом возникла идея построения карт потенциальной радоноопасности. Основной смысл 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.

Например, такая карта была построена для сравнительно небольшой территории Италии – региона Лацио [11]. Для моделирования карты использовали данные поровой активности радона, газопроницаемости пород, содержания радия, территориальной модели рельефа. Эти данные были предоставлены Лабораторией Римского университета. При моделировании карт использовали географически взвешенную регрессию, где поровая активность являлась зависимой переменной, а содержание радия, газопроницаемость, разломы территории и данные о рельефе являлись предикторами:

$$\text{SoilRn}_i = \beta_0(u,v) + \beta_1(u,v)\text{Ra} + \beta_2(u,v)\text{Perm} + \beta_3(u,v)\text{Fault} + \varepsilon_i, \quad (1.2)$$

где SoilRn – поровая активность радона, Бк·кг⁻¹;

Ra – содержание радия, Бк·кг⁻¹;

Perm – газопроницаемость верхнего почвенного слоя, м⁻¹;

Fault – разломы территории;

ε – остаток, характеризующий несовершенство модели.

Модель географически взвешенной регрессии неплохо описывает ($R^2 > 0,7$) зависимость поровой активности радона от выбранных параметров в северном секторе региона, где наблюдаются вулканические породы, обогащенные радием, а также в южном и восточном секторах, характеризующихся трещиноватыми и проницаемыми карбонатными породами. Коэффициенты регрессии при проведении локальных оценок на территории, заполненной континентальными отложениями, значительно ниже ($R^2 < 0,5$) из-за более сильной изменчивости их геолого-геохимических характеристик. Таким образом, имеются области, где эффективность модели должна быть улучшена.

С этой целью для данного региона была предпринята попытка найти зависимость поровой активности радона от типа подстилающих пород. В связи с этим на исследуемой территории выделили участки, характеризующиеся определенным типом породы. На рисунке 1.1 представлены результаты измерений поровой активности радона для типов пород, выявленных на изучаемой территории. Видно, что выраженной взаимосвязи обнаружить не удалось, за исключением вулканизированных пород, для которых значения поровой активности заметно выше.

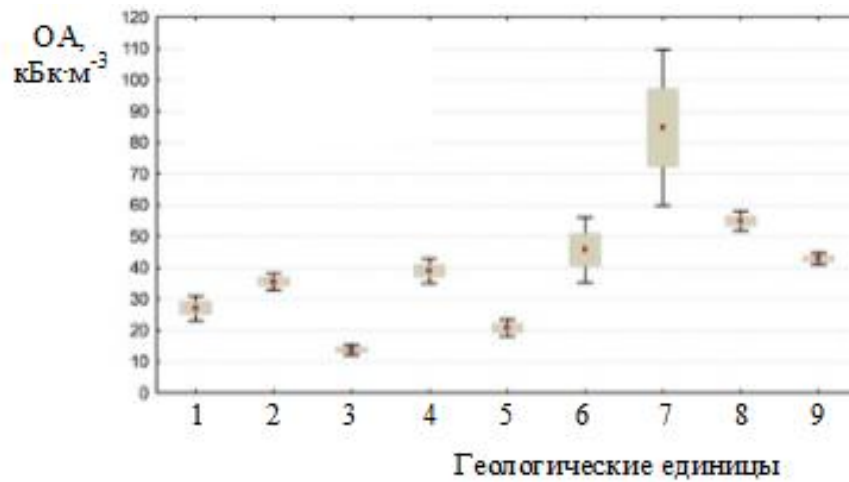


Рисунок 1.1 – Зависимость поровой активности радона от типа подстилающих пород: 1 - Континентальные отложения; 2 – Аллювированные; 3 - Морские отложения; 4 - Карбонат; 5 - Сабатини Вулканиды; 6 - Tolfa Вулканиды; 7- Вико Вулканиды; 8 - Volsini Вулканиды; 9 - Alban Hill Вулканиды

В Норвегии [29] для оценок потенциальной радоноопасности использовали накопленную за много лет базу по объемной активности радона в помещениях. Затем определяли радоновый потенциал RP 200 территории как процент жилых помещений, имеющих годовые концентрации радона выше порогового значения ($200 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$). Территория относится к радоноопасной, если RP 200 равен или превышает 20%, если меньше 20% – территория не является радоноопасной. Сначала попытались построить карту на основе полученных значений радонового потенциала. Однако, из-за отсутствия данных объемной активности радона в помещениях по всей территории страны было предложено при построении карт использовать еще и тип осадочных пород, характерных для населенной территории (рисунок 1.2). Как и следовало ожидать, какую-либо связь между геологией и объемной активностью радона в помещении обнаружить не удалось. Такой связи, как сказано выше, не удалось обнаружить даже для поровой активности радона. Тем более такой связи не может быть для объемной активности радона в помещении, так как содержание радона в помещении сильно зависит от особенности архитектуры зданий, образа жизни населения, а также от сезонности и климата.

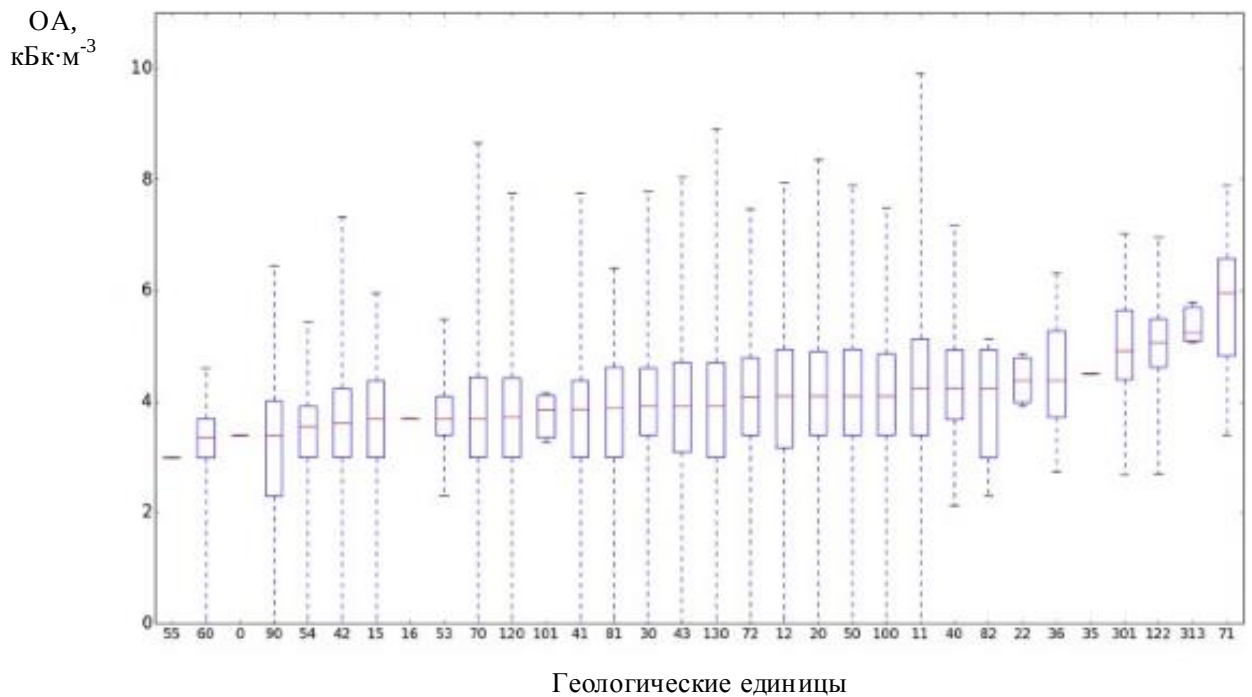
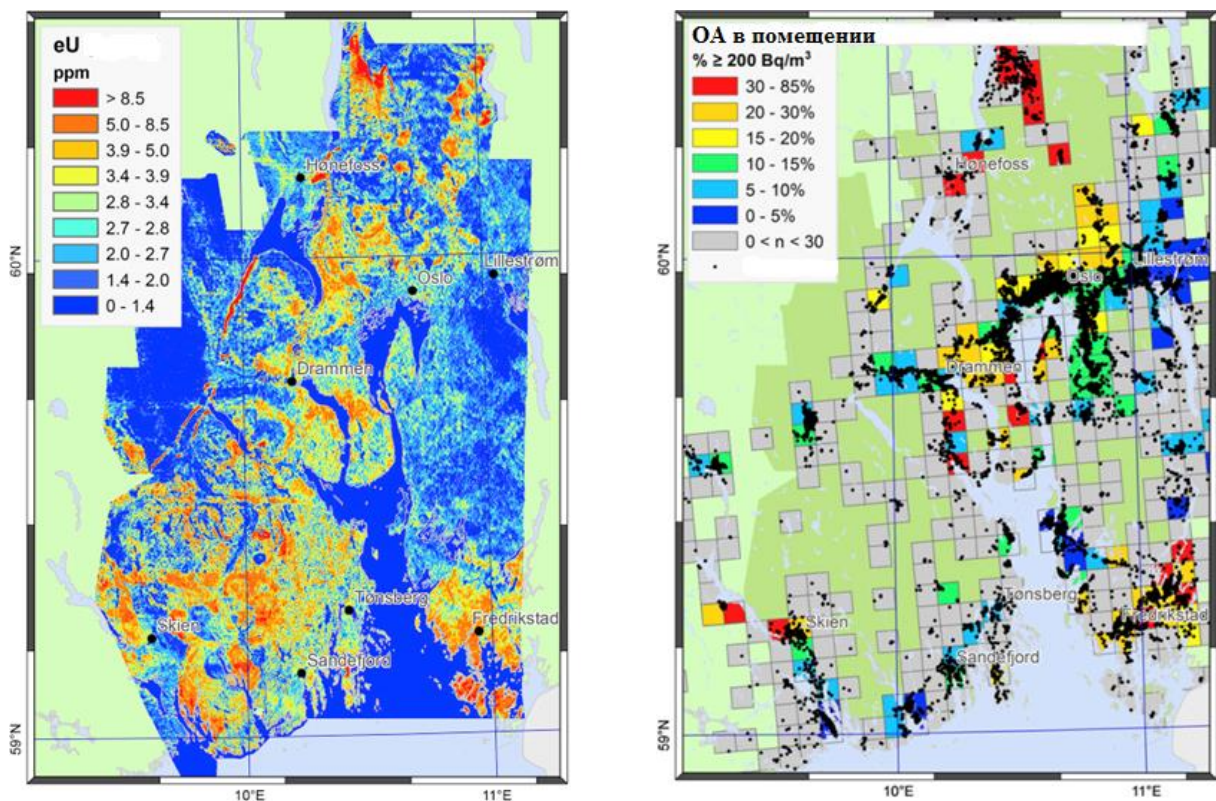


Рисунок 1.2 – Зависимость средней объемной активности радона измеренной в помещении от типа осадочных пород: 60-пойменные отложения; 90-торфяные отложения; 54-пойменные отложения; 42-морское пляжное месторождение; 15-боковая морёна; 53-пойменные отложения; 70-выветрившийся материал; 120-техногенные породы; 101-тонкий покров поверхностных отложений; 41-морские мелкозернистые отложения; 81-коллювий, сплошное покрытие, с большой мощностью; 30-гляцио-озерное месторождение; 43-морские мелкозернистые отложения, прерывистый покров; 130-обнаженная коренная порода; 72-выветрившийся материал, тонкий покров над коренной породой; 12-ледниковые отложения; 20- гляцио-речные отложения; 50-речные отложения; 100-гумасовые покров, тонкий торфяной покров над коренной породой; 11-ледниковые отложения, сплошное покрытие, преобладает большая мощность; 40-морские мелкозернистые отложения, мощность неуточненная; 82-коллювий, прерывистый или тонкий покров над коренной породой; 22-эскер; 36-гляцио-озерное месторождение; 35- озерное месторождение; 301-селевые отложения, с большой мощностью; 122-антропогенный материал; 313-поток обломочного материала, снежный поток; 71-выветрившийся материал, сплошное покрытие

На следующем этапе в Норвегии [30] наряду с объемной активностью в помещениях при построении карт стали использовать данные по содержанию урана. Измерения содержания урана проводили гамма-спектрометрическим методом с помощью бортовых обследований на высотах 100 м...500 м. Выбор такого параметра как содержание урана, возможно, является обоснованным, так как радон образуется в цепи радиоактивных распадов ядер урана-238. Однако, аэрогаммасъемка на практике применяется для выявления крупных радиоактивных рудных тел. Кроме того, аэрогаммасъемка не позволяет получить необходимого пространственного разрешения, особенно если ее проводить на высотах в сотни метров. Необходимо также отметить, что аэросъемка является финансово затратным методом обследования. На рисунке 1.3 представлены карты распределения объемной активности радона в помещениях и содержания урана в породах.



а) б)

Рисунок 1.3 – Карты распределений: а) содержания урана; б) объемной активности радона в помещениях

Из рисунка 1.3 видно, что корреляция между этими параметрами отсутствует. Это еще раз подтверждает вывод о том, что объемная активность радона в помещениях не может быть использована для построения карт радоновых рисков, так как эта величина зависит от внешних неконтролируемых факторов и никак не связана с геологией.

В Швейцарии [31] при построении карт потенциальной радоноопасности использовали данные по дозе гамма-излучения, геологии подстилающих пород, наличию разломов и газопроницаемости верхнего почвенного слоя. Информацию о геологических данных предоставило Федеральное топографическое управление Швейцарии. На основе результатов моделирования с помощью логистической регрессии авторы делают вывод о том, что доза гамма-излучения и информация о геологии пород являются более значимыми параметрами, влияющими на величину объемной активности радона в помещениях, чем линии разлома и газопроницаемость почвы. На наш взгляд, этот вывод является спорным, так как доза гамма излучения определяется не только содержанием урана/радия, но и другими природными радионуклидами. Кроме того, доза гамма-излучения не коррелирует с объемной активностью радона в помещениях (рисунок 1.3).

Конечно, использование карт потенциальной радоноопасности является хорошим вариантом для снижения трудозатрат и уменьшения объема измерений. Однако следует учесть, что использование данных карт для определения радоноопасности на площадках застройки может привести к 50% погрешности, что получено опытным путем применения карт в ряде стран. Поэтому практически во всех работах, посвященных картам потенциальной радоноопасности, сделан вывод о необходимости проведения локальных оценок. Как отмечено выше, используемые за рубежом методы проведения локальных оценок на основе измерений поровой активности радона и газопроницаемости не позволяет получить достоверные оценки радоноопасности.

1.3 Плотность потока радона

В нашей стране в соответствии с нормативными документами перед проведением строительных работ проводят измерения плотности потока радона.

Использование ППР как критерия радоноопасности является вполне обоснованным, так как эта величина определяет количество радона, выделяющегося с поверхности пород. Измерения плотности потока радона проводят на земной поверхности с помощью накопительных камер или угольных адсорберов. Однако, в последние годы данный подход к оценке радоноопасности подвергался критике, так как за время применения этого критерия накопилось большое количество экспериментальных данных, указывающих на значительные временные и пространственные вариации плотности потока радона [32, 33]. Пространственная изменчивость радонового поля обусловлена неоднородностями геологической среды – различным типом подстилающих пород, а также неоднородностью распределения макропор и трещин пород и т.п. Временная вариабельность связана с погодными условиями и стохастической природой радиоактивного распада.

В работе [34] проведено исследование пространственной вариабельности ППР. В качестве исходных данных в данной работе используются измерения ППР, проведенные в период 2002-2010 гг. организациями ОАО «Мосгоргеотрест», ООО «РЭИ» и ООО «Геокон». Всего для измерений были задействованы 803 участка. На каждом участке в не менее чем 20 точках измеряли плотность потока радона и удельную активность радия-226. Измерения ППР проводили методом сорбции радона на активированном угле с использованием многофункционального измерительного комплекса «Камера-01». Анализ результатов показал, что значения ППР на территории Москвы изменяются в очень широких пределах. В пределах отдельных участков измерений диапазон значений ППР варьируется от 10 до 200 мБк·м⁻²·с⁻¹, в редких случаях достигая 400 мБк·м⁻²·с⁻¹. Авторы работы полагают, что вариабельность значений ППР связана с пространственными различиями проницаемости пород, которые в пределах небольших площадей (0.5-1 га) также составляют примерно один порядок. При этом на вариабельность значений ППР может оказывать влияние влажность породы на участках. В работе была обнаружена связь ППР с геологическими особенностями территории. Для районов, характеризующихся возвышенностями, сложенными глинистыми

породами, значения ППР заметно выше, чем для районов с песчаными породами. Также в работе была обнаружена корреляция между плотностью потока и содержанием радия в породах. Однако, объяснить аномальные выбросы результатов измерения ППР геологией или высоким содержанием радия не удалось. Авторы склоняются к тому, что аномальные выбросы связаны с деформациями геологической среды, такими как колебательные подвижки земной поверхности с амплитудой порядка нескольких сантиметров.

В работе [15] изучалась изменчивость плотности потока радона во времени и в пространстве на открытой экспериментальной площадке в г. Москве. Для этого с помощью сорбционного метода и измерительного комплекса «Камера-01» в течение года непрерывно проводили измерения ППР в 16 контрольных точках. Также параллельно с измерениями плотности потока проводили регистрацию температуры, атмосферного давления, температуры поверхностного слоя и влажности пород. Среднегодовое значение плотности потока радона составило $45.3 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, диапазон вариации в течение года $9 \dots 96 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В данном исследовании получены противоречивые данные о влиянии увлажнения пород осадками на плотность потока. Во всяком случае, неустойчивая погода, характеризующаяся выпадением осадков, приводит к значительным вариациям плотности потока радона. В работе также отмечено, что прямой связи между значениями ППР и температурой не наблюдается. Авторы полагают, что на сегодняшний день значительный практический интерес представляет установление зависимостей между количеством радона, выделяемого из пород различных типов и их влажностным состоянием. Также в работе говорится о том, что пространственная изменчивость плотности потока радона связана с газопроницаемостью пород, обусловленной как температурными, так и влажностными изменениями.

С целью изучения сезонной вариабельности авторы работы [35] систематически наблюдали за величиной ППР из почвы в контрольной точке, расположенной в г. Красноярске. Был выбран открытый участок площадью 4 м^2 . Выбор контрольной точки обусловлен отдаленным расположением от

транспортных потоков и подземных коммуникаций. Типы пород на участке характеризуются наличием песков, суглинков и галечников. В данной работе измерения плотности потока радона выполнялись методом сорбции с использованием измерительной системы для мониторинга радона «Камера-01». Пробоотборником выступала накопительная камера, внутри которой находится слой активированного угля массой 5 г. Для предохранения активированного угля от осадков и радона, поступающего из атмосферы, на накопительную камеру сверху устанавливается сорбционная колонка с углем. С целью уменьшения погрешности для каждого измерения в контрольной точке одновременно устанавливали три накопительных камеры. Продолжительность экспонирования каждой накопительной камеры составляла не менее 3 ч. Спустя три часа после момента окончания экспонирования проводили измерения активности радона в каждой навеске угля. На рисунке 1.4 представлены полученные результаты измерения ППР, охватывающие три сезона года – осень, зиму и весну. Разброс данных достаточно велик, однако, показывает годовой ход вариабельности значений ППР из почвы.

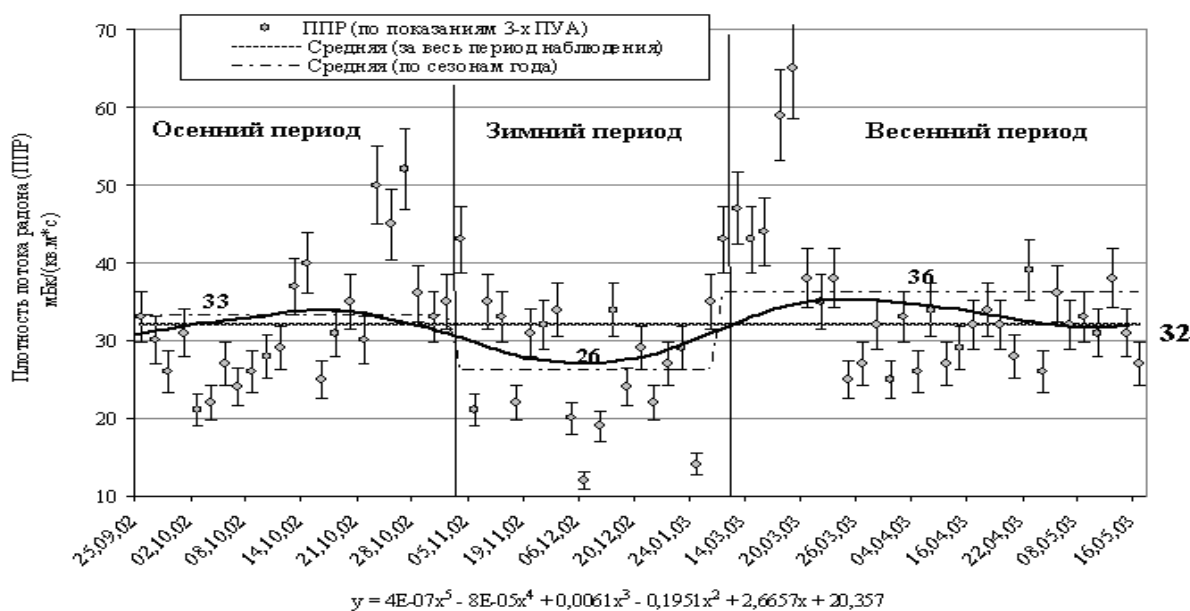


Рисунок 1.4 – Результаты долгосрочных наблюдений за плотностью потока радона из почвы на контрольной точке

По мнению авторов, возможной причиной понижения значений плотности потока радона в зимний период является промерзание пород, что подтверждается неоднократными наблюдениями за вариабельностью ППР. Обратило на себя внимание интенсивное изменение плотности потока радона в течение кратковременных периодов межсезонья. Авторы считают, что такие вариации не объясняются ни влиянием атмосферы, ни возможными землетрясениями. Зачастую такая вариабельность ППР в такие периоды связана со сменой сезонов года с холодного на теплый. Также, авторы считают, что перепад температур в период межсезонья приводит к образованию трещин в промерзших породах, что в свою очередь является причиной интенсивного выхода радона. В работе [36] было замечено, что при межсезонных похолоданиях в сухую погоду, выход радона с поверхности пород увеличивается, это объясняется интенсивным выходом почвенного воздуха в атмосферу за счет естественной конвекции.

В исследовании [10] в качестве экспериментального полигона был использован специальный неотапливаемый бокс, расположенный непосредственно на грунте и с запираемой входной дверью. Измерения ППР проводили с помощью накопительных камер с сорбционными колонками (активированный уголь). Регулярные измерения начались с июня 2007 года и проводились в рабочие дни в течение 21 месяца. Усредненные по месяцам результаты варьируются в пределах $2,9 \dots 5,2 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Авторы работы делают выводы о том, что среднемесячные значения ППР коррелируют с изменением температуры внешней среды, хотя и не являются мгновенным откликом на изменение температуры. Для зимнего сезона характерны наименьшие значения ППР, для летнего – наибольшие. Между ППР и атмосферным давлением зависимости не обнаружено. Стоит отметить, что условия проведения эксперимента с трудом можно назвать натуральными, т.к. в боксе отсутствовало прямое воздействие атмосферных осадков, ветра и солнечных лучей.

Анализируя экспериментальные данные и выводы коллег, авторы статьи [37] попытались рассмотреть и описать некоторые механизмы и закономерности формирования ППР с поверхности почв в атмосферу, в частности, рассмотреть влияние на этот процесс колебания метеофакторов и содержания радия в породах.

В работе говорится, что изменения метеорологических условий неоднозначно влияют на выход радона с поверхности породы. ППР варьируется при изменении давления и температуры атмосферного воздуха, и не зависит от их абсолютных значений.

В работе [38] проводили измерения ППР на промышленной площадке во Франции. Для этого был построен искусственный полигон размерами 14x15 м. Регулярные измерения ППР проводил с 1997 г по 1998 г каждые три часа с использованием измерительного комплекса AlphaGUARD. Также в работе проводили сравнение измеренной плотности потока радона с рассчитанной при моделировании с использованием модели TRACI. Полученные изменения плотности потока радона объясняются влиянием осадков: увеличение содержания влаги на поверхности уменьшают диффузию радона через слой, и, следовательно ППР на поверхности уменьшается (рисунок 1.5).

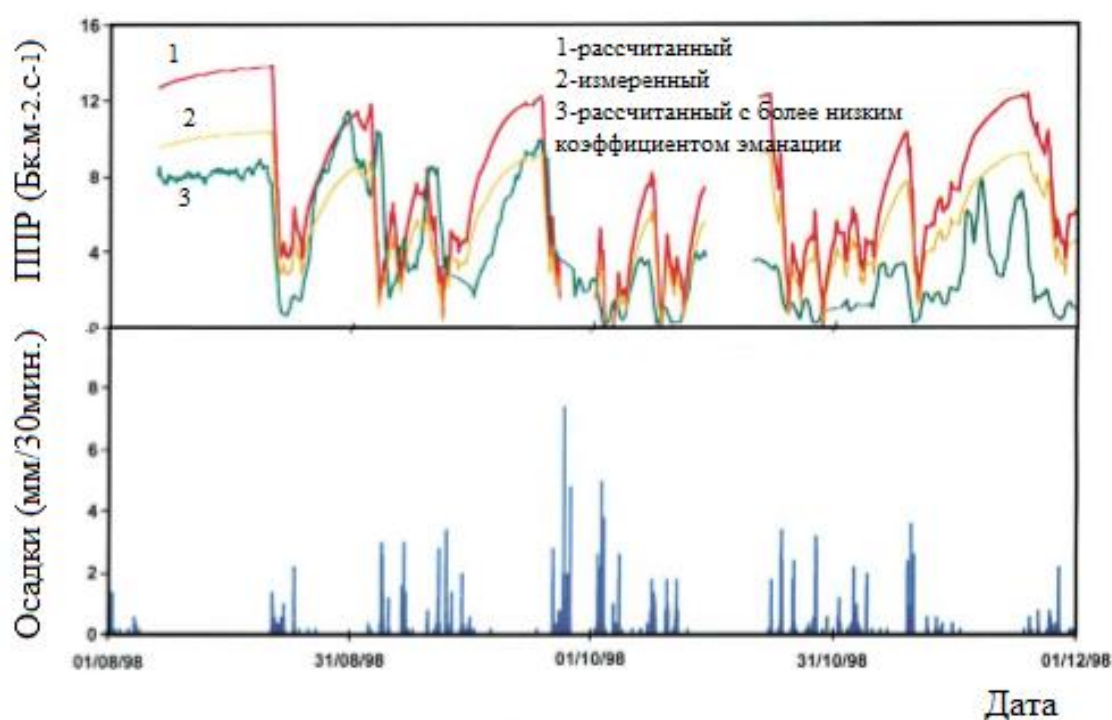


Рисунок 1.5 – Измеренные и рассчитанные плотность потока радона на поверхности, количество осадков

Плотность потока радона, рассчитанная с использованием TRACI, выше, чем измеренная с использованием AlphaGUARD. Существующую разницу авторы

объясняют влиянием эффекта гистерезиса водонасыщенности пород, возникающего при увлажнении и высушивании, которое не учитывается при моделировании. Причиной гистерезиса являются различия в диаметре почвенных пор в процессах набухания и высушивания пород. В момент, когда породы высыхают, плотность потока радона на поверхности ниже, нежели, когда поры пород наполнены влагой.

В работе [39] исследовали зависимость плотности потока радона от осадков и параметров атмосферы. Измерения плотности потока радона проводили непрерывно в течение двух лет, с использованием измерительной установки AlphaGUARD. Иллюстрация результатов измерения представлена на рисунке 1.6.

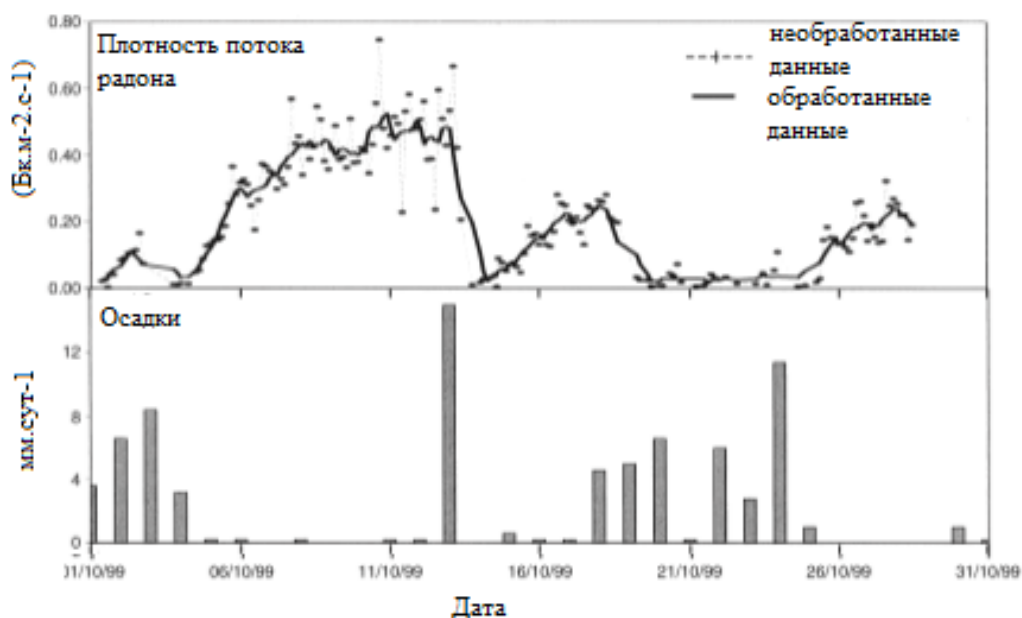


Рисунок 1.6 – Плотность потока радона, осадки, атмосферное давление и температура воздуха, зарегистрированные в октябре 1999 г.

Из представленных данных видно, что осадки оказывают большое влияние на плотность потока радона. В течение длительного периода без дождя плотность потока радона может увеличиться в десять раз, а после выпадения осадков плотность потока радона уменьшается до значений ниже $100 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В работе [40] представлена общая тенденция изменения плотности потока радона до и после выпадения осадков (рисунок 1.7). Полученные результаты показывают, что выпадение осадков приводит к значительному уменьшению

выхода радона из почвы. Увеличение потока радона после выпадения осадков авторы связывают с тем, что заполнение капилляров почвы водой приводит к ослабляющему эффекту, так как коэффициент диффузии радона в воде в 10^{-4} раза меньше, чем в воздухе. Когда поры освобождаются от воды в результате фильтрации и испарения, радон, накопленный в почве в течение периода выпадения осадков, выделяется вместе с почвенным газом и, наконец, достигает обычной постоянной скорости выдоха через несколько дней после дождя.

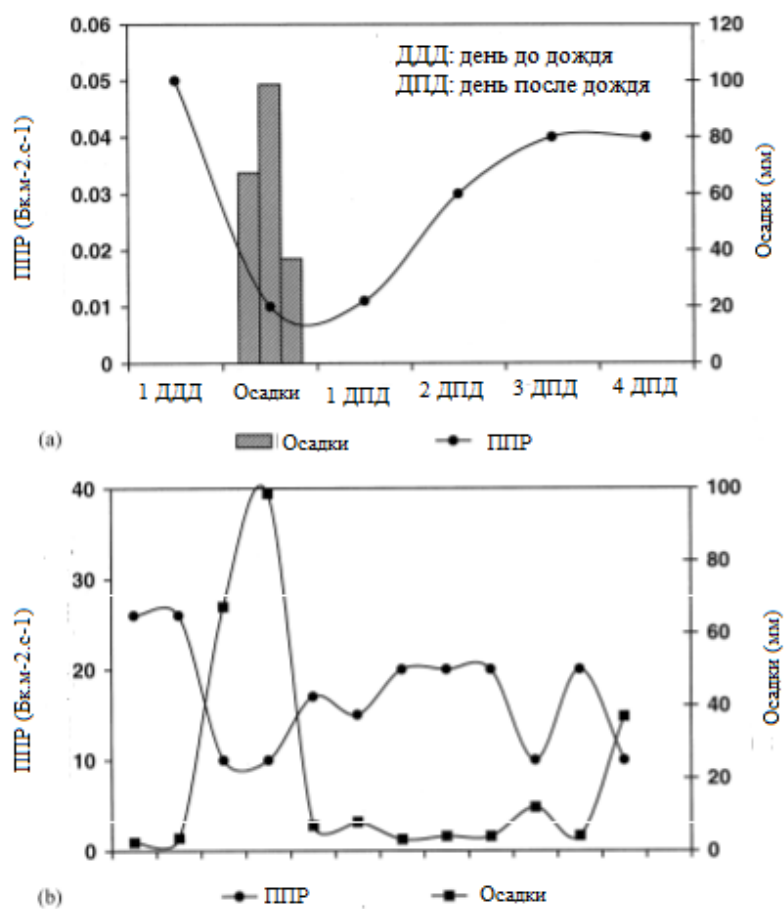


Рисунок 1.7 – Зависимость выхода радона от количества осадков.

(а) Общая тенденция потока радона от количества осадков. (б) Относительное ослабление потока радона от количества осадков

Для изучения зависимости ППР от влажности почвы в работе [41] было организовано комплексное исследование за величиной плотности потока радона на экспериментальной площадке, расположенной в Московской области. Исследование проводили в течение трех лет в период 2011-2014 гг. Измерения ППР

проводили методом сорбции радона на активированном угле при помощи измерительного комплекса «Камера-01». По результатам исследования сделан вывод о том, что существует обратная связь между влажностью почвы и плотностью потока радона. Следует отметить, что измерения проведены при высокой влажности от 25...30% и выше.

В работе [42] приведены результаты измерения плотности потока радона с поверхности предварительно измельченных и высушенных образцов при разных значениях массовой влажности. В исследовании авторы представляют данные о зависимости плотности потока радона от влажности в образцах породы, отобранных в провинции Пенджаб в Пакистане. Полученные результаты показали, что при влажности образцов в диапазоне 0...20% плотность потока радона сначала увеличивается с увеличением влажности во всех образцах, достигает максимального значения при влажности, равной 5...10% и уменьшается с дальнейшим увеличением влажности образца. Выявленную закономерность влияния влажности на плотность потока радона авторы объясняют следующим образом. При низком и умеренном содержании влаги диффузия происходит преимущественно в порах, заполненных воздухом, и радон распределяется между воздухом и водой в равновесии. В этих условиях концентрация радона в почве увеличивается с ростом влажности. При высоком содержании влаги диффузия происходит преимущественно в заполненных водой порах, а равновесие воздух и вода существует только вблизи границ раздела. В этих условиях концентрация радона в почвенном воздухе может быть низкой.

В исследовании [43] провели непрерывные измерения плотности потока радона и влажности почвы. Плотность потока радона измеряли методом накопительной камеры. Содержание влаги в почве на глубине 20 см и 50 см измеряли с помощью зондов влажности почвы. Полученные результаты показали, что при содержании воды, превышающей объемную долю порядка 35%, скорость выхода радона уменьшается с увеличением содержания воды. Это может быть вызвано двумя эффектами: эффект укупорки произошел на поверхности земли во время сильных осадков и снижения воздухопроницаемости в почве. При влажности

меньше 35%, также наблюдается тенденция уменьшения выхода радона с уменьшением содержания воды. Отметим, что измерения проведены при влажности почвы в диапазоне 33...41%. Данные по влажности почвы, полученные во время и после осадков, указывают на то, что наибольшее влияние осадки оказывают на влажность почвы до глубин 20 см. С другой стороны, влажность почвы на глубине 50 см нечувствительна к небольшому дождю, а увеличение содержания воды на этой глубине сопровождается временным отставанием порядка нескольких часов после начала ливня.

В работе [44] также исследовано влияние влажности на выход радона с поверхности пород. Показано, что общая тенденция увеличения ППР наблюдается, когда почва переходит из сухого состояния во влажное, а максимум зарегистрирован при объемной влажности почвы от 3 до 4%. Значения ППР быстро уменьшаются, когда влажность почвы превышает 5%; диапазон значений влажности составил от 1 до 12%.

Влияние влажности на плотность потока радона рассмотрено в работах [44, 45], в которых получены аналогичные результаты: при содержании влаги в почве ниже 8% измеренная скорость выхода радона имела тенденцию к увеличению. Когда влажность почвы превысила 8%, измеренная скорость выхода снижалась. До определенного уровня влажности вода вытесняет радон из почвы. Если содержание воды превышает определенный уровень, радон растворяется в воде, и, следовательно, выход подавляется.

На основе сделанного обзора литературы, посвященной подходам к оценкам радоноопасности территорий и результатам измерений ППР можно сделать следующие выводы. Во-первых, не выработана единая методология оценки радоноопасности, позволяющая достоверно определять радоновые риски территорий. Во-вторых, в некоторых работах отмечается сильное влияние осадков, типа пород и их влажности на результаты измерения ППР. Однако, систематические количественные исследования о влиянии вышеперечисленных факторов на выход радона с поверхности пород разного типа не проводились. Вследствие этого данные, полученные в разных исследованиях, имеют

отрывочный характер и не всегда согласуются между собой. В-третьих, выводы о влиянии температуры и давления атмосферы на результаты измерения ППР также противоречивы; кроме того, не проводилось сравнение результатов измерения ППР, полученных разными методами. В связи с этим за период 2014 - 2020 гг. нами проведено систематическое изучение влияния атмосферных условий – давления, температуры, влажности атмосферного воздуха, количества осадков, методов на результаты измерения ППР, а также изучение влияния типа пород и их геолого-физических свойств на количество выделяющегося с поверхности радона.

ГЛАВА 2. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЗНАЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА

Из обзора литературы следует, что однозначное мнение о влиянии атмосферных условий на выход радона с поверхности пород отсутствует. Кроме того, отсутствуют сравнительные данные о результатах измерения ППР, полученных разными методами. Известно, что в Российской Федерации для измерения плотности потока радона используется метод накопительных камер и угольных адсорберов. В наших исследованиях были использованы оба метода.

2.1 Планирование эксперимента в 2014-2018 гг.

Измерения ППР в весенне-летние периоды 2014 – 2018 гг. были проведены на 6 площадках г. Томска и 7 площадках Горного Алтая. Для измерения ППР использовали два аттестованных в Российской Федерации метода: метод накопительной камеры (НК) и метод угольных адсорберов (УА). Для метода НК использовали измерительный комплекс «Альфарад Плюс», для метода УА – измерительный комплекс «Камера-01». Погрешность обоих измерительных комплексов не превышает 30%. Время экспозиции для двух измерительных комплексов существенно отличается: для комплекса «Альфарад Плюс» – 15 мин, для комплекса «Камера-01» – 90 мин. Одновременно с измерениями ППР регистрировали температуру атмосферного воздуха и его влажность, давление атмосферы, а также учитывали количество выпавших накануне осадков.

Измерения ППР на первой площадке проводили на дне котлована, предназначенного для строительства жилого дома. Первая площадка размерами 20 м × 30 м расположена на суглинках на глубине 1,5 м. Остальные площадки размерами 1 м × 1 м находились на террасе реки Томь (рисунок 2.1). Измерения ППР на второй площадке проводили на глубине 0,5 м, тип породы – суглинок. Площадка №3 расположена рядом с площадкой №2 на земной поверхности, т.е. на рыхлом суглинистом слое; площадка №4 на поверхности лессовидных суглинков; площадка №5 на поверхности глинистых сланцев; площадка №6 на поверхности белой глины.

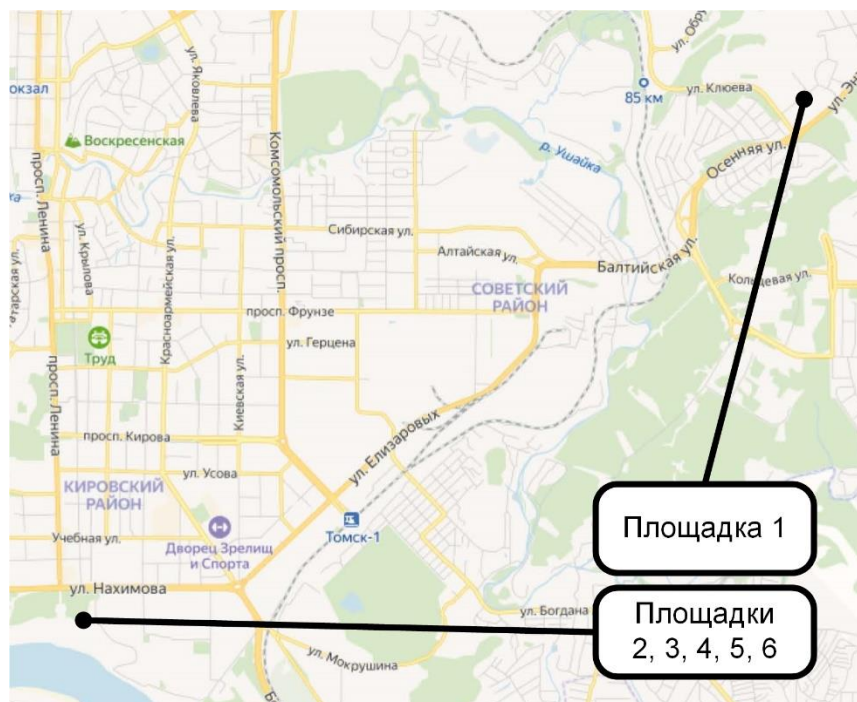


Рисунок 2.1 – Схема расположения точек измерения плотности потока в г. Томске в 2014, 2016, 2017, 2018 гг.

В 2014 году измерения ППР проводили на площадке №1 с помощью метода НК. На площадке было выбрано 12 контрольных точек на расстоянии 10 м друг от друга [46]. Для каждой контрольной точки проводилось по три измерения ППР (см. Приложение А, таблица А1). Результаты определения физических свойств породы – содержания радия, плотности сухой породы ρ_d и пористости η представлены в Приложении А (таблица А5).

На площадке №2 измерения ППР проводили в 2016 году методами НК и УА. При реализации метода УА использовали методику открытого объема камеры. Одновременно с измерениями ППР регистрировали выпавшее накануне количество осадков [47- 49] (см. Приложение А, таблицы А2, А3).

В 2017 году измерения ППР проводили на площадке №3 методом НК, одновременно регистрировали температуру, давление и влажность атмосферы (см. Приложение А, таблица А4).

В 2018 году измерения ППР провели на поверхности разных типов пород (площадки №4, №5, №6) методом НК. Одновременно с измерениями ППР проводили отбор образцов для определения плотности сухой породы, ее полной

пористости и различных характеристик влажности (естественной, объемной, абсолютной влажности, коэффициентов влажности и водонасыщения) методом режущего кольца, а также регистрировали количество осадков, выпавших накануне измерений (см. Приложение Б, таблицы Б1-Б4). Отметим, что метод режущего кольца можно использовать только для достаточно рыхлых, сцементированных горных пород. Для несцементированных осадочных пород (песчано-гравийные-галечные смеси, обломочные породы и т.д.) и очень плотных горных пород данный метод не применим. В этих случаях для определения основных физических свойств пород нужно использовать другие методы, требующие специального оборудования. Из-за отсутствия такого оборудования для некоторых исследованных горных пород вышеперечисленные физические свойства не были определены.

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, схема расположения которых представлена на рисунке 2.2.

Площадки измерения находились на следующих типах пород: песчано-гравийные отложения, скальный известняк, глинистый известняк, андезитобазальтовый порфирит и кварцит.

На измерительных площадках дополнительно проводили отбор проб пород для дальнейшего определения его естественной влажности методом высушивания до постоянной массы. Дополнительно на участках были отобраны образцы пород для измерения удельной активности радия (A_{Ra}). Масса отобранных образцов составляла от 0,3 кг до 1,5 кг [50, 51]. Образцы породы высушивали при высокой температуре (приблизительно 100°C) и тщательно измельчали, очищая от излишков растительности. В зависимости от объема измельченной породы использовали две геометрии измерений: сосуд «Дента» объемом 250 мл и сосуд «Маринелли» объемом 1 л. При этом перед непосредственным измерением удельной активности радия подготовленную породу выдерживали в герметично закрытом сосуде приблизительно один месяц с целью достижения радиоактивного

равновесия между образующимся при распаде радия радоном и его дочерними продуктами. Измерения проводили по наиболее интенсивным линиям дочерних продуктов распада радона – Pb-214 (295,21; 351,92 кэВ) и Bi-214 (609,32 кэВ) с помощью гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором 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). Погрешность измерений не превышала 15%. Для обработки аппаратных гамма-спектров использовалась программа CANBERRA «Genie-2000».

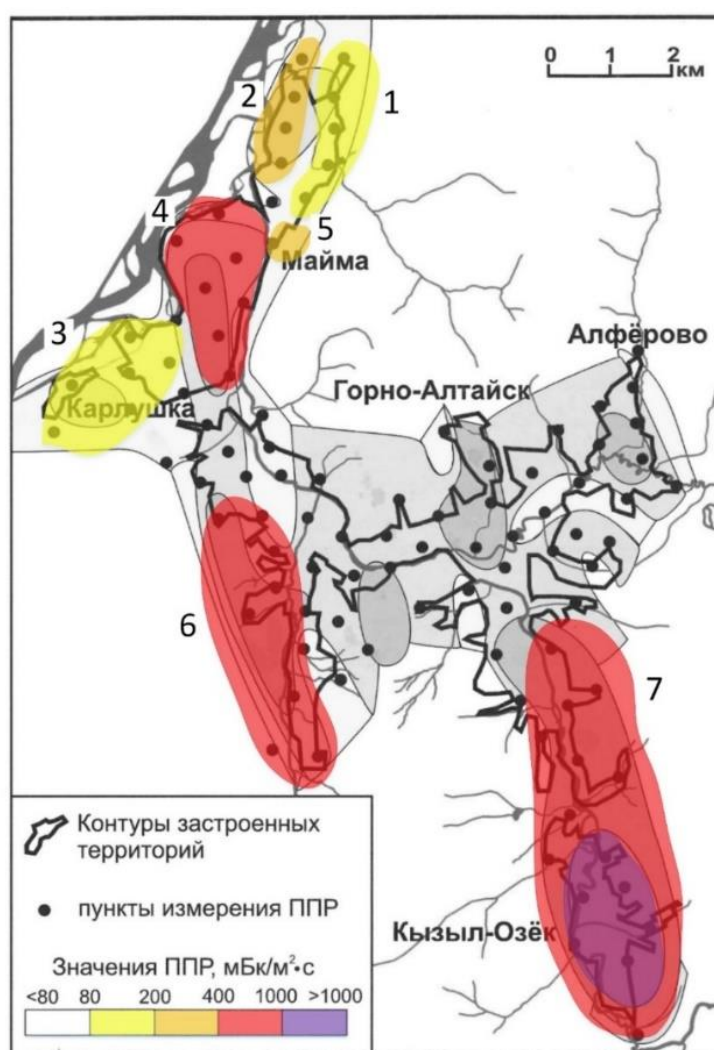


Рисунок 2.2 – Схема расположения площадок измерения ППР в Горном Алтае, 2018 г.

За период с 2014 по 2018 гг. было получено 385 результатов измерений ППР (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Сводные данные по количеству измерений ППР на поверхности осадочных пород г. Томска, 2014-2018 гг.

Год	Количество измерений ППР		Всего
	Метод НК	Метод УА	
2014	36	–	36
2016	95	60	155
2017	56	–	56
2018	138	–	138
Итого	325	60	385

Результаты измерения ППР характеризуются разбросом, поэтому для корректного их анализа следует воспользоваться статистическими методами обработки. При этом большое количество статистических методов нацелены для работы со случайной выборкой данных с нормальным распределением. Поэтому в первую очередь необходимо провести проверку гипотезы о нормальном распределении результатов измерения ППР, например, согласно критерию Пирсона [47].

Проверка показала, что полученные значения ППР соответствуют либо нормальному, либо логнормальному закону распределения. Аналогичные выводы по распределению результатов измерений ППР приведены в работах [12, 52-55]. Следовательно, для полученных выборок ППР можно воспользоваться известными формулами для расчета основных характеристик: среднее значение, стандартное отклонение и коэффициент вариации.

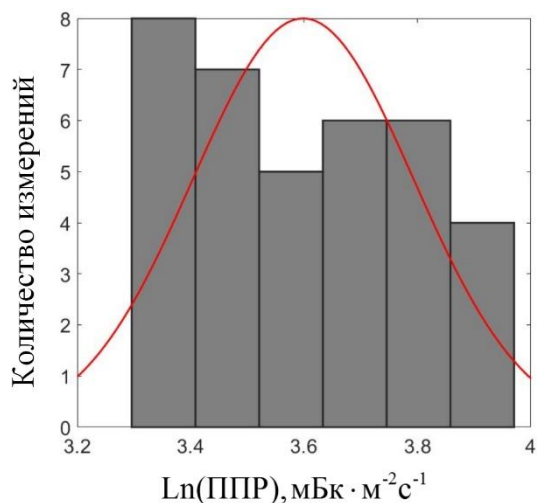
Для логнормального распределения расчеты средних значений и стандартных отклонений проведены согласно формулам [56]:

$$\bar{x} = \exp(\overline{\ln(x)}) \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{\ln x}^2}{2}\right), \quad (2.1)$$

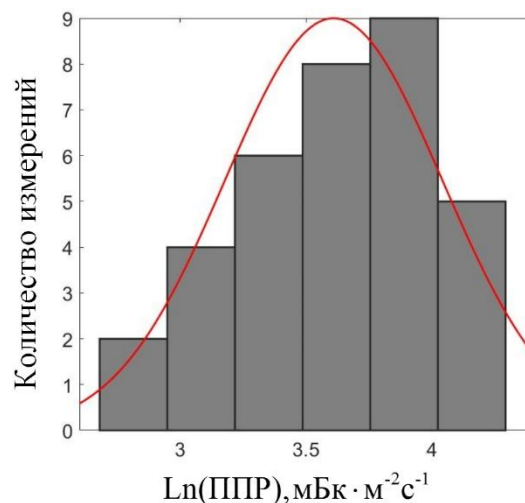
$$\text{где } \sigma_{\ln x}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\ln(x)_i - \overline{\ln(x)})^2}{(n-1)}; \quad (2.2)$$

$$\sigma_x = \sqrt{[\exp(\ln(x))]^2 \cdot \exp(\sigma_{\ln x}^2) \cdot [\exp(\sigma_{\ln x}^2) - 1]} \quad (2.3)$$

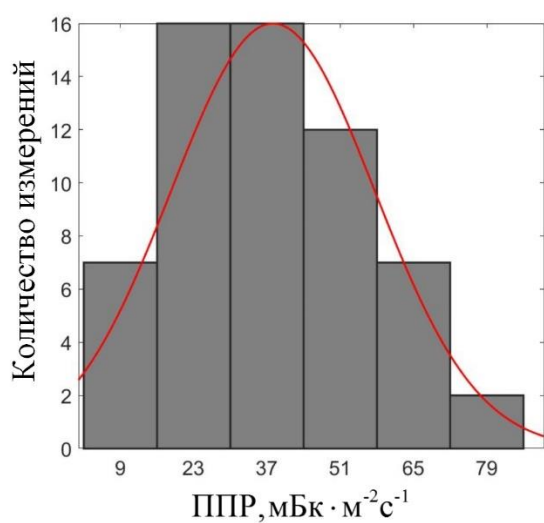
На рисунках 2.3 и 2.4 приведены гистограммы результатов измерений ППР, полученных в 2014, 2016, 2017 и 2018 гг.



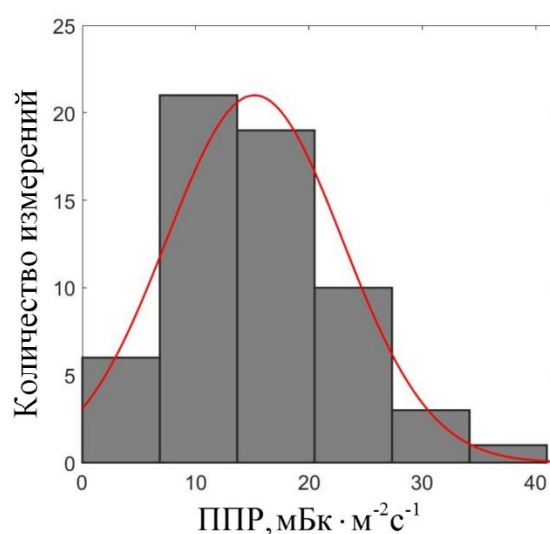
а) 2014 НК (площадка 1)



б) 2016 НК (площадка 2)

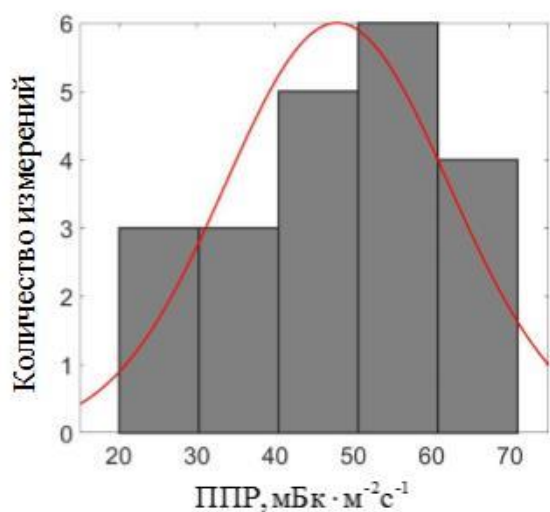


в) 2016 УА (площадка 2)

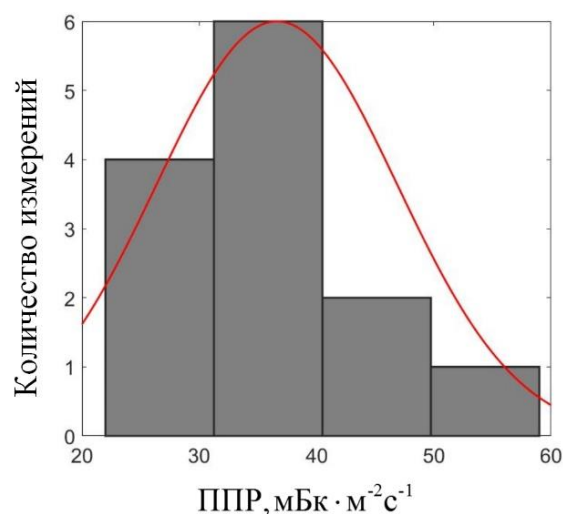


г) 2017 НК (площадка 3)

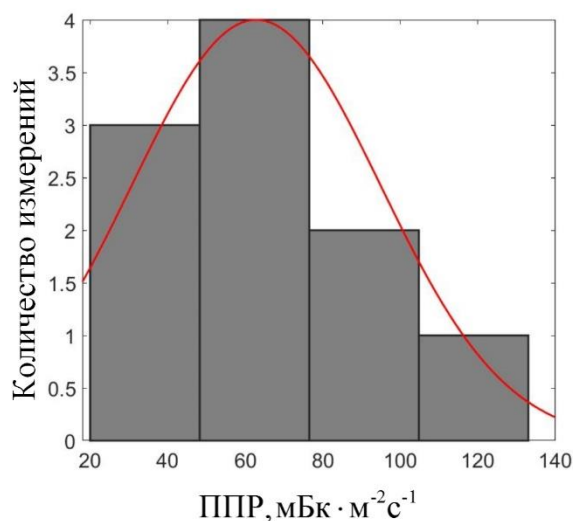
Рисунок 2.3 – Гистограммы плотности потока радона, измеренной разными методами: а) метод накопительной камеры, 2014 г; б) метод накопительной камеры, 2016 г; в) метод угольных адсорбторов, 2016 г; г) метод накопительной камеры 2017 г



а) 2018 НК (площадка 4)



б) 2018 НК (площадка 5)



в) 2018 НК (площадка 6)

Рисунок 2.4 – Гистограммы плотности потока радона, измеренной метод накопительной камеры в 2018 г для разных площадок

Известно, что на результаты измерений воздействует множество случайных факторов. Эффект от влияния случайных факторов может быть аддитивным в случае нормального распределения случайной величины или мультипликативным в случае логнормального распределения. Аддитивный характер формирования случайной величины предполагает суммирование эффектов от воздействия независимых друг от друга факторов. Мультипликативный характер воздействия предполагает наличие факторов, усиливающих влияние некоторых других

факторов. В нашем случае увеличение количества микро- и макротрещин в поверхностном слое породы приводит к росту количества выделяющегося радона. Большое количество микро- и макротрещин в приповерхностном слое образуется при высокой температуре и малом количестве осадков [47].

Условия с высокой температурой и трещиноватостью поверхностного слоя наблюдались при измерениях ППР в 2014 ($\bar{T}^{\circ}\text{C}=21^{\circ}\text{C}$) и в 2016 гг ($\bar{T}^{\circ}\text{C}=19^{\circ}\text{C}$) (см. Приложение А, таблицы А1-А3). Полученные в эти периоды методом НК значения ППР соответствуют логнормальному закону распределения.

Противоположные условия наблюдались для измерений в 2017 г (см. Приложение А, таблица А4). В этот период средняя температура воздуха составляла меньше 15°C и регулярно выпадали осадки в виде дождя. Итогом таких условий послужило отсутствие большого количества микро- и макротрещин в приповерхностном слое пород [47].

2.2 Анализ результатов измерения ППР разными методами

Результаты измерения ППР, полученные в 2016 году с помощью двух методов – накопительной камеры и угольных адсорберов – представлены на рисунке 2.3 и в таблице 2.2. Необходимо подчеркнуть, что измерения методами НК и УА в 2016 г проведены на одной площадке и одновременно, т.е. при одинаковых погодных условиях.

Таблица 2.2 – Основные результаты измерений ППР разными методами в 2016 г.

Площадка, год измерения	Метод измерения	Количество измерений	Диапазон значений, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$\bar{x}$, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	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
Примечание: $\bar{x}$ – среднее значение; σ_x – стандартное отклонение; V_x – коэффициент вариации.						

Из рисунка 2.3 видно, что значения ППР, измеренные методом НК, подчиняются логнормальному закону распределения, а методом УА – нормальному. Причиной такого различия может служить разная площадь земной

поверхности, с которой происходит накопление радона при проведении измерений. Для метода НК данная площадь составляла $132,8 \text{ см}^2$, для метода УА почти в четыре раза меньше – $33,2 \text{ см}^2$. Следовательно, для метода УА мультипликативное воздействие микро- и макротрещин на результаты измерения ППР будет гораздо слабее или вовсе отсутствовать [47].

Отметим (таблица 2.2), что средние значения ППР, измеренные разными методами, практически совпадают и составляют $38 - 39 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. 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. Скорее всего, это связано с тем, что период экспозиции для метода УА (1,5 ч) в несколько раз больше, чем для метода НК (15 мин.). Поэтому влияние стохастической природы радиоактивных распадов проявляется слабее. Таким образом, методы влияют только на вариабельность результатов измерений ППР. Метод накопительной камеры более прост в исполнении и менее трудоемок. Однако, для однократных измерений плотности потока радона предпочтителен метод УА.

2.3 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 (рисунки 2.5, 2.7-2.11); при обработке результатов использованы усредненные по трем/четырем измерениям значения ППР и средние для периода наблюдения значения параметров атмосферы для каждого дня измерений в 2014 и в 2016 гг. (см. Приложение А, табл. А1-А3). В 2017 г. при обработке использован массив данных, представленный в Приложении А (таблица А4). Обработка показала, что большое значение $R^2=0.84$ соответствует экспоненциальной зависимости ППР от температуры для метода УА (рисунок 2.5а).

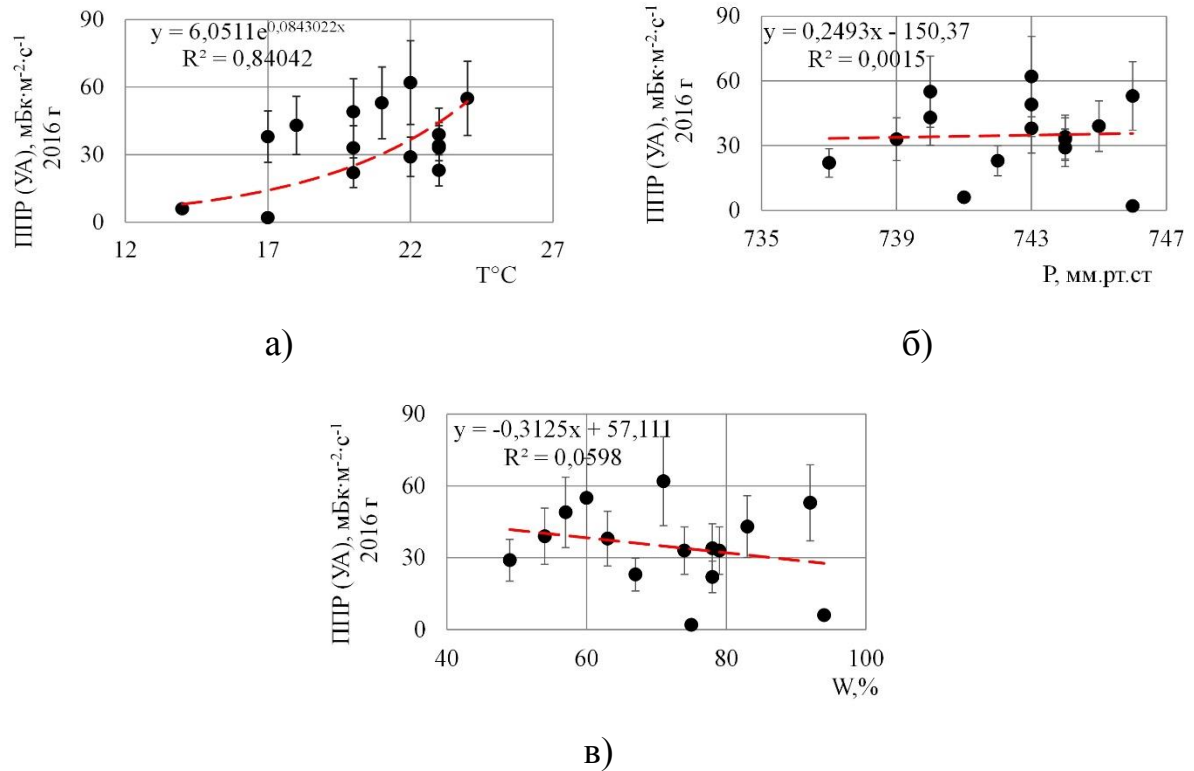


Рисунок 2.5 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом УА (2016 г), от параметров атмосферы: а) от температуры (Т); б) от давления (Р); в) от влажности атмосферного воздуха (W)

Представленную на рисунке 2.5а зависимость значений ППР от температуры можно объяснить тем, что измерения ППР проведены с открытым объемом камеры. Количество атмосферной влаги уменьшается с ростом температуры в течение первой половины дня, когда проводились измерения (рисунок 2.6), что в свою очередь приводит к усилению процесса сорбции радона на угле.

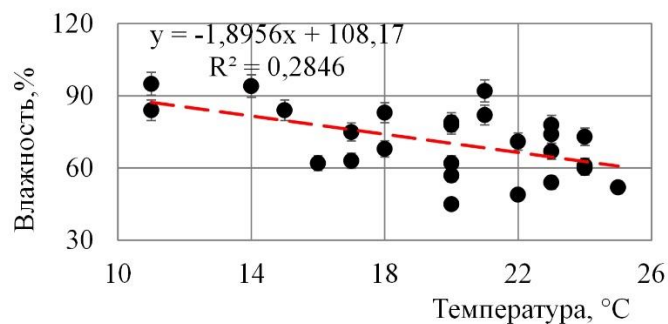
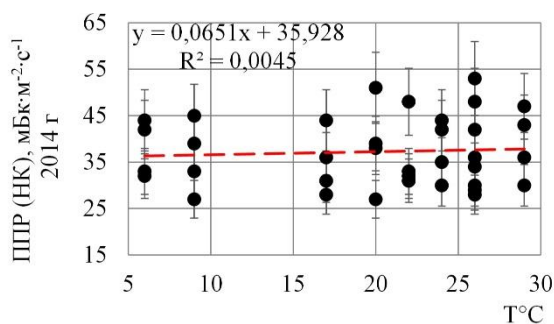
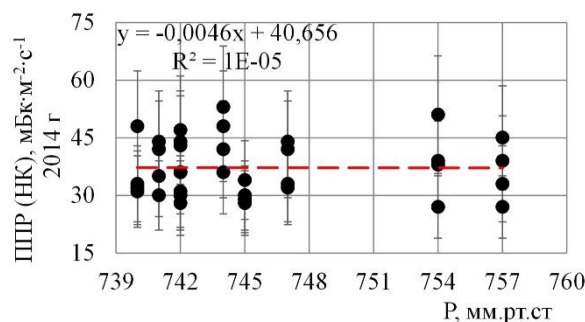


Рисунок 2.6 – Результат регрессионного анализа влажности атмосферного воздуха от температуры.

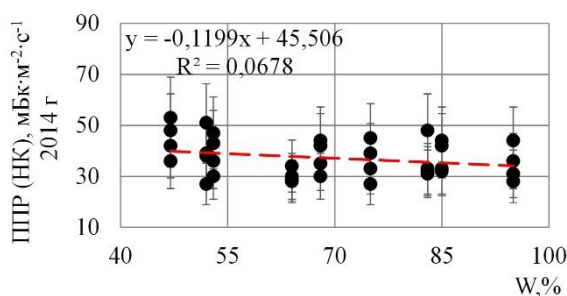
Отметим, что высокие значения влажности атмосферного воздуха – 70% и более наблюдаются при сравнительно низких утренних температурах, не превышающих 15°C. Не удалось обнаружить корреляционных зависимостей между результатами плотности потока радона, полученных с помощью метода угольных адсорберов, от давления и влажности атмосферного воздуха (рисунки 2.5б и 2.5в). Значимая зависимость между плотностью потока радона, измеренной методом накопительных камер, и параметрами атмосферы (рисунки 2.7-2.9) также отсутствует.



а)



б)



в)

Рисунок 2.7 –Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2014г) от параметров атмосферы: а) от температуры (Т); б) от давления (Р); в) от влажности атмосферного воздуха (W)

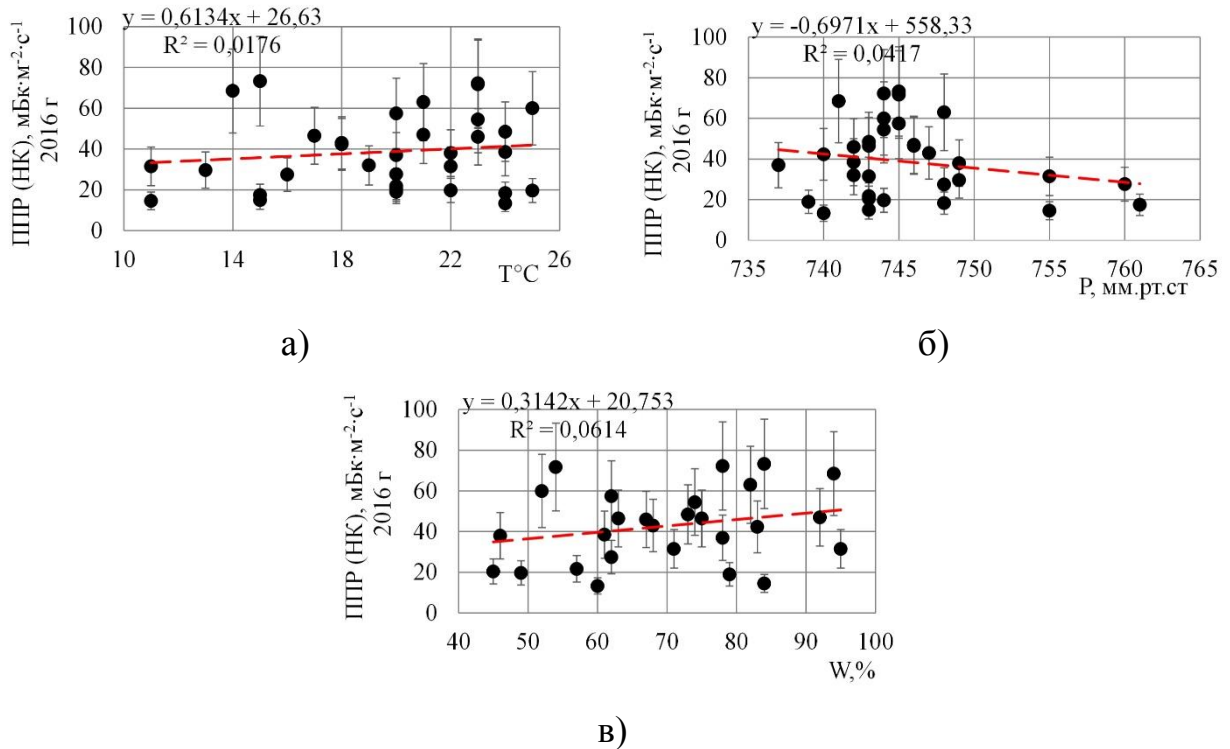


Рисунок 2.8 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2016г) от параметров атмосферы: а) от температуры (Т); б) от давления (Р); в) от влажности атмосферного воздуха (W)

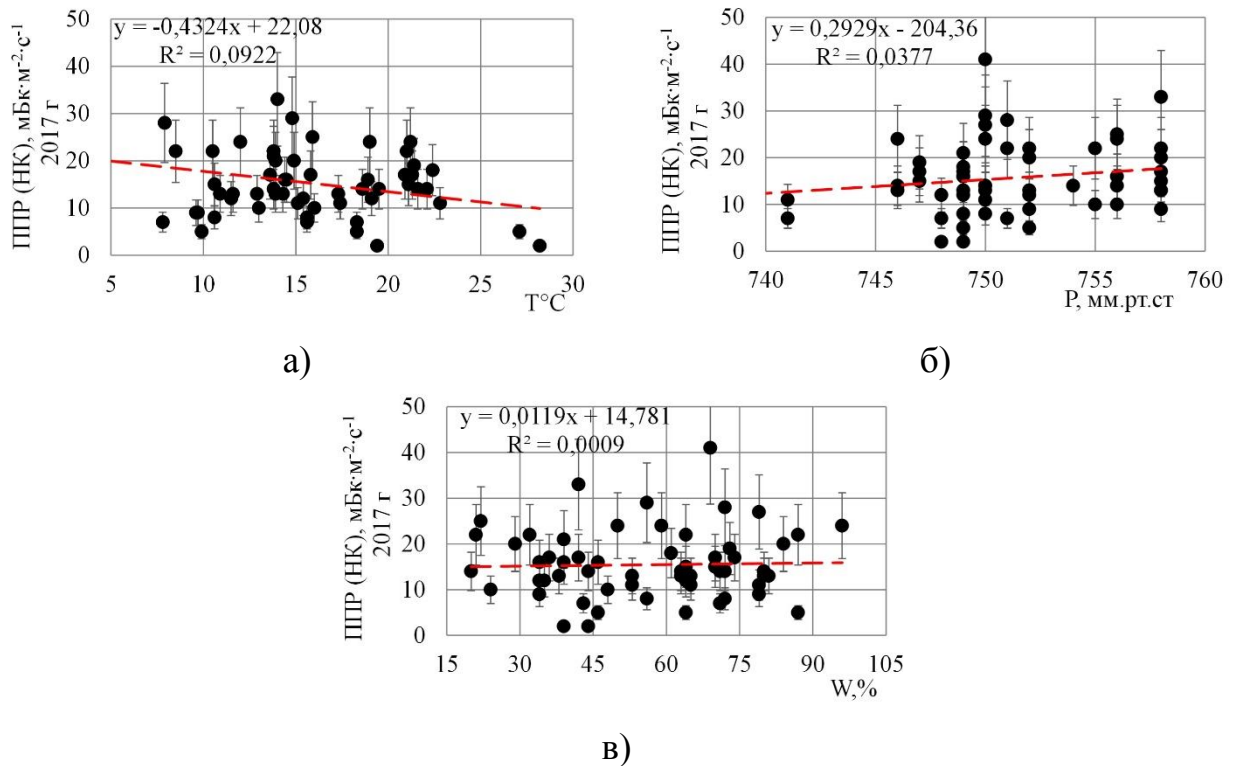


Рисунок 2.9 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2017г) от параметров атмосферы: а) от температуры (Т); б) от давления (Р); в) от влажности атмосферного воздуха (W)

Из рисунков 2.5, 2.7-2.9 и данных таблиц А1, А2, А3 (Приложение А) видно, что регистрируемые в 2014 и 2016 гг. параметры атмосферы (температура, влажность, давление) имеют примерно одинаковый диапазон значений. Однако, отличительной особенностью является тот факт, что за период измерения ППР в 2016 году регулярно выпадали слабые осадки, а в 2014 году осадки отсутствовали. Поэтому разброс значений ППР, полученных в 2016 году, гораздо выше, чем в 2014 году. Влияние осадков на вариабельность результатов измерения ППР отмечается также в работе [39].

В исследованиях, проведенных другими авторами [10], высказано предположение о том, что на результаты измерения ППР влияние оказывают не абсолютные значения атмосферных параметров, а их изменение за период наблюдений. В связи с этим для результатов, полученных в 2017 году, был проведен регрессионный анализ, который показал, что изменения параметров атмосферы (с учетом их величины и знака) не оказывают влияния на значения ППР. На рисунке 2.10 представлены результаты регрессионного анализа средних значений ППР от модуля изменения температуры, давления и влажности атмосферного воздуха.

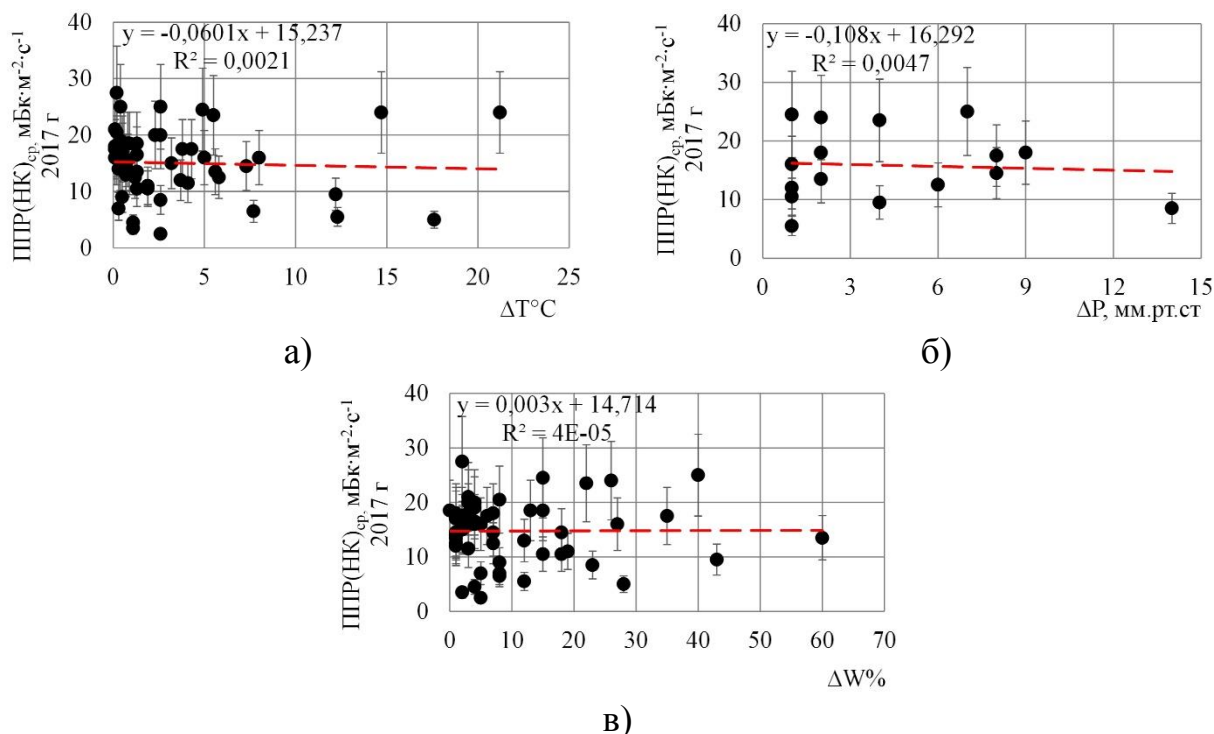


Рисунок 2.10 – Результаты регрессионного анализа средних значений $ППР_{ср}$, полученных методом НК (2017 г) от изменения параметров атмосферы:

а) $|\Delta T|$ – изменение температуры; б) $|\Delta P|$ – изменение атмосферного давления;

в) $|\Delta W|$ – изменение влажности атмосферного воздуха

Регрессионный анализ показал, что изменения атмосферных параметров также не влияют на вариабельность значений ППР. Однако, исключать зависимость выхода радона от атмосферных условий не корректно. Можно предположить, что на величину выхода радона атмосфера оказывает комплексное влияние. Например, с ростом температуры возникают дневные конвективные потоки почвенных газов и паров воды, содействующие выделению радона с поверхности. При этом рост температуры в летний период, как правило, сопровождается повышением атмосферного давления, что в свою очередь приводит к противоположному эффекту [47].

2.4 Изучение зависимости результатов измерения ППР от количества осадков

На рисунках 2.11-2.1 приведены результаты регрессионного анализа значений ППР на поверхности суглинков, глинистых сланцев, белой глины от количества осадков, выпавших накануне измерений (2016 и 2018 гг.). Результаты измерения ППР, параметры атмосферы, а также количество осадков представлены в Приложениях А, Б. Результаты регрессионного анализа значений ППР от характеристик влажности исследованных пород представлены в Приложении С.

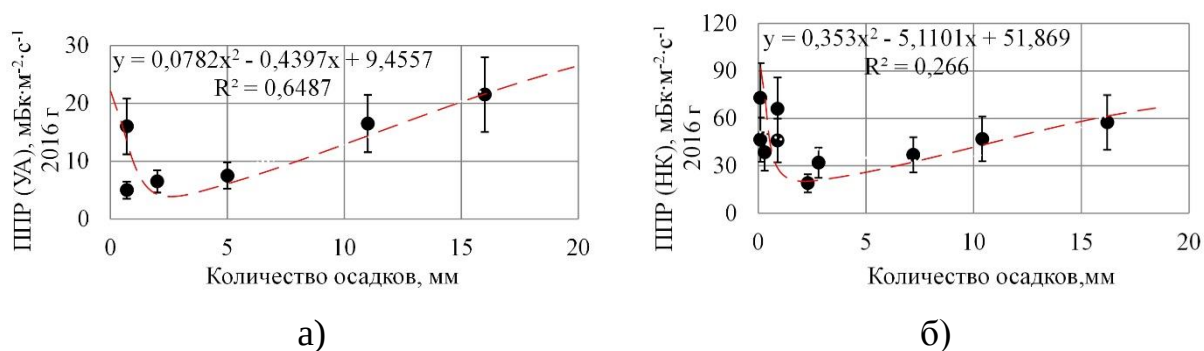


Рисунок 2.11 – Результаты регрессионного анализа значений ППР на поверхности суглинков (2016 г.) от количества осадков: а) ППР, измеренная методом УА; б) ППР, измеренная методом НК

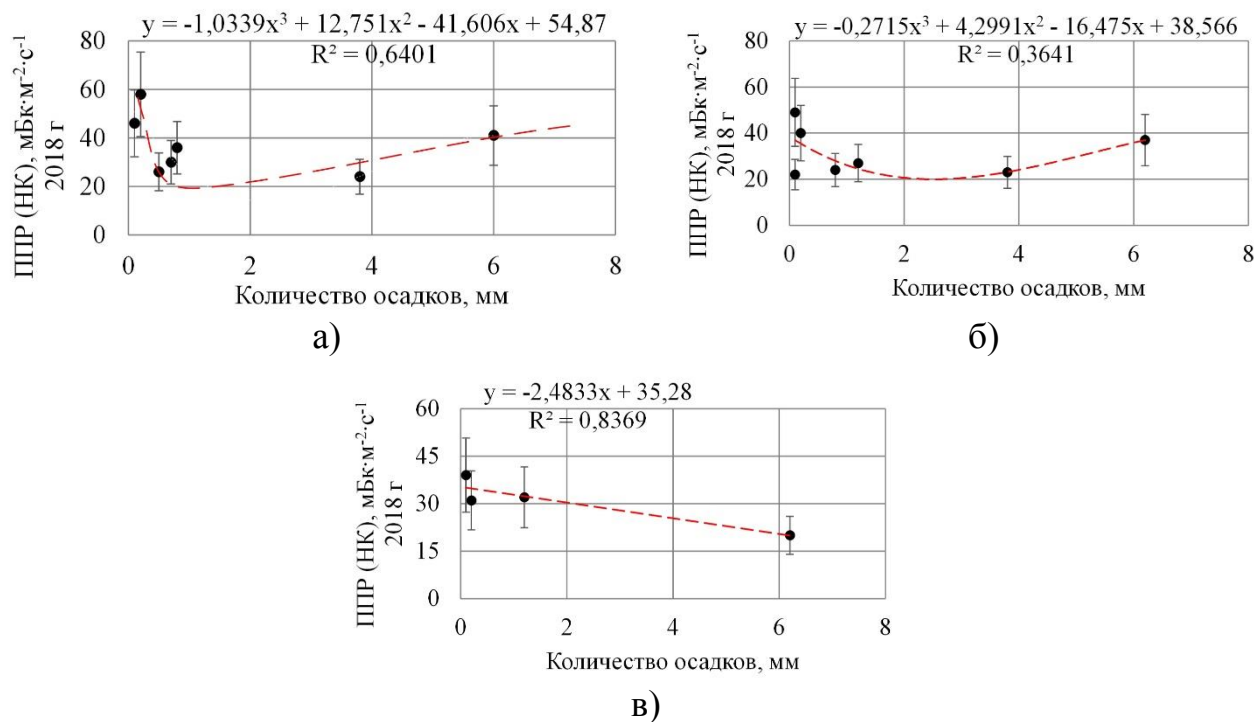


Рисунок 2.12 – Результаты регрессионного анализа значений ППР (2018 г.) от количества осадков для: а) лессовидных суглинков, б) глинистых сланцев, в) белой глины

Из приведенных на рисунках 2.11 и 2.12а результатов регрессионного анализа значений ППР на поверхности суглинков видно, что при небольшом количестве выпавших осадков выход радона уменьшается. Затем с увеличением количества выпавшей влаги величина ППР начинает возрастать. Аналогичный характер зависимости значений ППР от осадков наблюдается и для сланцевой породы (рисунок 2.12б). Данный характер зависимости можно объяснить следующим образом. Выпадение небольшого количества осадков приводит к заполнению поверхностных пор породы, что затрудняет выделение радона в атмосферу. С увеличением количества осадков влага начинает фильтроваться на относительно большие глубины и вытеснять радон из пор породы. Отметим, что концентрация радона на больших глубинах гораздо выше, чем у поверхности породы. Помимо вытеснения, радон, благодаря высокой степени растворимости в жидкостях, дополнительно растворяется в поступившей влаге. При увеличении температуры насыщенная радоном влага начинает испаряться, увеличивая тем самым величину выхода радона. Необходимо отметить, что результаты измерения

ППР, полученные после выпадения дождей методом УА, характеризуются сравнительно большим разбросом. Возможно, это связано с ростом температуры и, соответственно, быстрым уменьшением влажности в дневные часы после выпадения осадков.

Для глин (рисунок 2.12в) 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, в результате чего объем открытых пор, через которые происходит выход радона на поверхность, уменьшается.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОД РАЗНОГО ТИПА

Анализ результатов, полученных нами в 2014-2017 гг. показал, что количество выделяющегося с поверхности радона зависит от типа и геофизических свойств породы. В частности, в 2017 г. было обнаружено, что ППР на поверхности плотных суглинков, залегающих на глубинах 0.5...1.5 м, выше, чем на поверхности верхнего почвенного слоя, почти в 2,5 раза. Каждый тип породы характеризуется определенными свойствами – вещественным и дисперсным составом, структурой и текстурой, упаковкой зерен породы, от которой во многом зависит плотность и пористость, а также влажностью породы, которые влияют на эманацию и перенос радона к поверхности породы. Целью наших дальнейших исследований являлось определение свойств пород, которые оказывают наиболее сильное влияние на выход радона с их поверхности. Изучение влияния типа породы и ее геофизических свойств на плотность потока радона проводили в весенне-летние периоды 2018 г. и 2020 г. Исследование проведено, в основном, для наиболее распространенных осадочных пород. В данной главе рассмотрена классификация осадочных пород и их основные геофизические свойства, а также приведены основные результаты измерения ППР на поверхности пород разного типа.

3.1 Осадочные горные породы

Осадочной породой называют геологические образования, представляющие собой скопление минеральных и/или органических продуктов, возникших при физическом и химическом разрушении литосферы. Данные породы покрывают поверхность суши почти на три четверти [57].

Осадочные породы — это скопление различного вида минералов, состав которых зависит от исходного вещества (состав материнской породы и продукты её разрушения) и условий осадкообразования. К таким условиям относятся: климат, рельеф, геотектонический режим территории. Из перечисленных условий климат является наиболее значимым фактором.

Образование осадочных пород можно разделить на следующие этапы:

1. Возникновение исходных веществ (продуктов). Источником продуктов могут служить разрушения материнских пород или, например, вулканические выбросы.
2. Перенос и осаждение вещества. На пути переноса в состав исходных продуктов могут поступать дополнительные вещества, изменяя общий состав вещества. Перенос продуктов, как правило, осуществляется водой, ветром и ледниками.
3. Трансформация осадков в осадочные породы. Трансформация осадков происходит за счет внутренней энергии веществ и постоянно протекающих химико-биологических процессов.
4. Уплотнение осадочной породы. На данном этапе изменяется минералогический состав и структура осадочной породы.
5. Глубокое изменение структурно-минералогических свойств осадочной породы.

После образования осадочные породы либо опускаются на большие глубины, либо поднимаются на поверхность земли (поднятие территории), где затем выветриваются и разрушаются.

При определении типа осадочных пород используют их классификацию с помощью различных признаков – происхождение, текстурные и структурные особенности и вещественный состав. Существуют несколько базовых классификаций осадочных пород по происхождению. По одной из классификаций осадочные породы выделяют на следующие типы: глинистые, обломочные и хемобиогенные; по другой – химические, обломочные и органогенные. Затем внутри выделенных типов пород можно провести классификацию по минеральному или вещественному составам.

При классификации типов осадочных пород также могут применять текстурные и структурные особенности и условия залегания породы.

Однако, на сегодняшний день выделяют гораздо больше классификаций пород. При составлении классификации могут учитываться такие факторы как:

химическое и механическое разделение, принцип формирования породы и фаза исходного материала, из которого она образуется, и др. Однако, в силу их сложности они не распространены и не являются базовыми. Поэтому при классификации пород следует руководствоваться генетическим принципом, при этом учитывая, что большая часть пород является полигенетическими (таблица 3.1). Проанализировав состав и происхождение осадочных пород, можно сделать вывод, что только обломочные породы, ископаемые угли и соли являются моногенетическими. Все остальные возникают вследствие различных процессов, то есть являются полигенетическими. Поэтому классификация крупных групп пород по генетическому признаку не удобна.

Таблица 3.1 – Состав и происхождение осадочных пород

Происхождение	Состав									
	Песок, галечник, песчаник.	Глина	Боксит	Железистые породы	Марганцевые	Фосфатные	Кремнистые	Известняк	Сульфатные, хлоридные и другие соли	Торф, уголь, нефть
Обломочный	+	+	+	+				+		
Химический		+	+	+	+	+	+	+	+	
Хемобиогенный (главным образом бактериальный)				+	+	+	+	+		
Биогенный						+	+	+		+

Можно было бы предположить, что классификация будет лучше и точнее, если за основу подразделения пород взять вещественный состав. Но даже в таком случае учесть все разнообразие пород не представляется возможным: исключаются из общей классификации обломочные породы, а также большие сложности возникают с солями.

Существует мнение, что для классификации осадочных пород необходимо за основу принять происхождение и вещественный состав. Наряду с этим не стоит выделять крупные генетические группы, а использовать более широко

генетический признак. Генетический признак, в свою очередь, нужно сочетать с минеральным составом пород [58]. При этом стоит учитывать текстурные и структурные особенности пород.

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 частиц обломочные породы подразделяют на песчаные, грубообломочные, глинистые и алевроитовые породы. Затем породы классифицируют по происхождению и минералогическому составу. Для группы кремнистых пород на первой позиции выступает генетический признак, разделяя породы на хемобиогенные, хемогенные и биогенные. Дальнейшее разделение проводится по структуре, минеральному составу и др. Такое разделение пород наиболее соответствует классификации Страхова И. М., разработанной на основе типов литогенеза [59].

По происхождению и вещественному составу можно выделить следующие породы: глинистые, обломочные, железистые, глиноземистые, марганцевые, кремнистые, фосфатные, карбонатные, соли, каустобиолиты.

Стоит отметить, что осадочные породы редко состоят из одного компонента, обычно они сложены из нескольких компонентов в различных соотношениях.

Рассмотрим наиболее часто встречаемые породы.

Крупнообломочные породы.

Крупнообломочные породы представляют собой обломки горных пород, иногда минералов, размеры которых превышают 1 мм. Пространство между обломками заполнено более тонким материалом, например, песком. Связующим веществом (цементов) выступают кальциты, кварцы и др. Довольно крупный размер обломков позволяет проводить классификацию и описание этих пород непосредственно в местах их обнаружения. К конгломератам относят крупнообломочные породы окатанной формы, к брекчиям – угловатой формы. По происхождению крупнообломочные породы разделяются на: осадочные, вулканогенно-осадочные, вулканогенные, тектонические и сопочные [60].

В зависимости от состава минералов и компонентов крупнообломочные породы подразделяются на мономинеральные (один минерал), полиминеральные (несколько минералов) и олигомиктовые (несколько компонентов) [61].

Крупнообломочные породы встречаются в виде отдельных слоев или линз небольших мощностей практически во всех осадочных породах разного геологического возраста.

Песчаные породы.

Песчаными породами (псаммитами) называют мелкообломочные породы, состоящие из обломков минералов (кварц, шпаты, слюды) и горных пород.

К песчаным породам относятся пески и песчаники. Отличительной особенностью данных типов является отсутствие (пески) или наличие (песчаники) сцементированности частиц. Цемент песчаников может быть глинистым, карбонатным, кремнистым, железистым и др.

Размеры частиц песчаных пород классифицируют на грубозернистые (2,0 – 1,0 мм), крупнозернистые (1,0 – 0,5 мм), среднезернистые (0,5 – 0,25 мм), мелкозернистые (0,25 – 0,05 мм) и иногда на тонкозернистые (0,1 – 0,05 мм).

Структуры песчаных пород могут иметь множество видов. К таким видам относятся: псаммитовая, псаммо-псефитовая, псаммо-алевритовая, псаммо-пелитовая, мозаичная конформнорегенерационная, стилолитовая шиповидная и др.

Песчаные породы по текстуре могут быть косо- и диагонально-слоистыми, волнистыми и горизонтально-слоистыми.

Образование песчаных пород обуславливается различными условиями. В связи с этим пески и песчаники подразделяются на: морские, озерные, речные, флювиогляциальные (талые воды ледников), эоловые (ветреные).

Алевритовые породы.

Алевритовые (пылеватые) породы практически схожи с песчаными. Одной из главных отличительной особенностей является меньший размер частиц, который лежит в диапазоне от 0,01 до 0,1 мм. Второе главное отличие алевритовых пород от песчаных это минералогический состав. В алевритах, в отличие от песков

и песчаников, накапливается значительное количество глинистых минералов и слюды, при этом практически или вовсе отсутствуют обломки горных пород.

К алевроитовым породам относят различного рода рыхлые образования (лёссы и илы) и сцементированные породы (алевролиты). Основными минералами алевроитовых пород, аналогично песчаным породам, служат кварц, шпат, слюда и глауконит. В качестве цемента алевролитов выступают в основном глинистые минералы, а также кремнистые, карбонатные и другие виды минералов.

Алевроитовые породы имеют следующую структуру: алевро-псаммитовую или алевро-пелитовую. Также структура алевроитовых пород характеризуется структурой цемента, которая может быть ориентированной или микрослоистой.

Алевроитовые породы имеют следующие виды текстур: горизонтально-, волнисто-, косо- и диагонально-слоистые.

Образование алевроитовых пород, как правило, происходит в морях, озерах, реках и на склонах.

Алевроитовым породам свойственно залегать слоями, пластами и линзами.

Глинистые породы

Глинистые породы составляют больше половины всех осадочных пород. Сюда относятся различные виды глины, аргиллиты, глинистые сланцы и некоторые другие виды пород. Достоверность оценки распространенности глинистых пород затруднительна в силу того, что существует много переходных пород, содержащих глинистые частицы. Примерами таких пород могут служить вулканогенно-осадочные и осадочно-метаморфизованные породы, в составе которых находится довольно большое количество глинистого материала.

Глинистые породы подразделяются на две подгруппы:

1. Глины.
2. Аргиллиты и глинистые сланцы.

Глины представляют собой связные породы. Благодаря сцеплению между частицами глина способна держаться в куске. Пористость глины имеет довольно высокое значение и может достигать до 50-60%. Глины пластичны.

Аргиллиты и глинистые сланцы – это сцементированные и метаморфозные породы. Пористость аргиллитов и глинистых сланцев низкая и составляет всего 1-2%, иногда чуть выше, поэтому являются довольно плотными породами. Данные породы не обладают пластичностью и плохо или вовсе не размываются в воде.

Глинистые породы состоят из частиц разного размера, что определяет их как полидисперсные. При этом, частицы, величина которых меньше 0,005 мм, составляют основной объем глинистых пород (30-50%). Помимо глинистых частиц, в породах присутствуют песчаные и алевритовые частицы; песчаные частицы, как правило, присутствуют в небольшом количестве.

В основе глинистых пород лежат глинистые минералы (каолинит, гидрослюда и др.), а также другие виды веществ, такие как: хлориты, опал, гидраргиллит, глауконит и др.

По структуре глинистые породы могут быть довольно разнообразны. В общем случае данные породы имеют пелитовую, алевро- или псаммо-пелитовую структуры. У глинистых пород различают и другие виды структур: в зависимости от расположения и формы глинистых частиц: ориентированные и неориентированные структуры; в зависимости от кристалличности вещества: аморфные и кристаллические структуры.

Глинистые породы имеют в основном слоистую текстуру и залегают различными способами: пласты, линзы и слои.

Смешанные породы (суглинки, супеси).

Переходы между крупнообломочными, песчаными, алевритовыми и глинистыми породами являются плавными, что вызывает проблемы классификации вышеперечисленных пород по содержанию частиц определенной размерности.

Принято, что если зерна соответствующей размерности содержатся в породе на 50 и более процентов от общего объема, то порода относится к соответствующим типам зернистости песчаных или алевритовых пород. Если же содержание соответствующих зерен меньше 50% – породу считают разномерной [62].

Суглинками или супесями называют смешанные породы, если содержание песчаного, алевритового и глинистого материала примерно одинаково.

При классификации смешанных пород нужно принять во внимание следующие факторы: объемные доли песчаного, алевритового и глинистого материалов, а также степень пластичности смешанной породы. Пластичность обусловлена тем, что смешанная порода представляет собой связанную породу за счет сцепления между частицами и некоторой сцементированности.

Смешанные породы классифицируют следующим образом. Если объемная доля глинистого материала находится в диапазоне от 10% до 30%, то порода относится к суглинкам; от 5% до 10% – к супесям. Порода относится к глинистой, если содержание глинистых частиц больше 30%. Если глинистых частиц меньше 5%, то породы относятся к песчаным или алевритовым.

Если в суглинках и супесях песчаных частиц больше, чем алевритовых, то породы называются также: суглинки и супеси. Иначе, если алевритовых частиц больше, то породы называют алевритовыми суглинками или алевритовыми супесями. Суглинки могут также выделять на валунные и лёссовидные, в зависимости от содержания примеси валунов или обломков и признаков, схожих с лёссами.

Суглинки и супеси могут иметь алевро-пелитовую, псаммо-алевритовую, псаммо-алевро-пелитовую структуру.

По текстуре суглинки и супеси могут быть слоистыми и неслоистыми (землистые, пятнистые).

3.2 Основные геолого-физические свойства горных пород

Основными геолого-физическими свойствами пород, которые могут повлиять на выход радона, являются дисперсный и вещественный состав, строение и структура породы, её плотность, пористость и влажность. Дисперсный состав типичных осадочных пород представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Дисперсный состав 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 [61]. Структура определяется зернистостью породы, т.е. размером и формой зерен. Текстура определяется расположением зерен, например, их слоистое или неслоистое расположение. Укладка (упаковка зерен) характеризуется степенью сближенности зерен. В последнее время укладку зерен рассматривают как одну из основных характеристик строения породы (плотная или рыхлая), представляющих особый интерес в инженерной геологии. При этом укладка определяет прочность, пористость и проницаемость пород [60, 63, 64].

Зернистость породы является важным показателем в гранулометрическом ряду. По типу взаимоотношений зерен друг к другу выделяют две группы: конформно-зернистые и неконформно-зернистые структуры.

Конформно-зернистые структуры характеризуются приспособленностью зерен друг к другу, т.е. зерна плотно без промежутков прилегают друг к другу, тем самым заполняя пространство. Например, пластичные и менее крепкие зерна глин, сланцев, алевроитов, известняков и т.д. приспособляются к прочным – кварцу, обломкам кварцитов, кремнию, плотно прилегая к ним без промежутков.

Неконформно-зернистые структуры характеризуются несовпадением контуров зерен, т.е. зерна прилегают неплотно, пространство между ними остается пустым, пористым или заполняется связующим веществом – цементом.

Плотность – физическая характеристика, отражающая связь между массой и объемом породы. Такой параметр, как плотность, широко используется в инженерных расчетах, например, при определении устойчивости оползневых откосов, напряжения в породах под фундаментом и др. Плотность породы в естественном залегании равна массе единицы объема породы с естественной влажностью и ненарушенным сложением. Плотность сухой породы ρ_d , (г/см³ или

кг/м³) определяется массой твердой компоненты в единице объема породы, высушенного до постоянной массы m . Плотность используют для определения таких геолого-физических свойств как пористость и коэффициента пористости. Плотность твердых частиц породы ρ_s (или минеральная плотность частиц породы) определяется как средневзвешенная масса твердой компоненты, представленной органо-минеральной, минеральной и органической составляющей, содержащейся в единице объема твердой компоненты. Для большинства песчано-глинистых пород минеральная плотность меняется в пределах 2.5-2.8 г/см³ (таблица 3.3). Высокие значения обычно связаны с содержанием в породе тяжелых глинистых минералов (каолинит, монтмориллонита и т.п.). Низкие же значения обусловлены наличием органических примесей (торфа, гумуса и т.п.). На величину плотности частиц влияют также растворимые соли, содержащиеся в породе.

Таблица 3.3 – Средние значения минеральной плотности частиц наиболее распространенных видов осадочных пород.

Тип породы	Плотность частиц, г/см ³
Песок	2,66
Супесь	2,70
Суглинок	2,71
Глина	2,74
Лесс	2,68
Торф	0,60

Пористость относится к наиболее важному параметру осадочных пород. Выделяют полную пористость, открытую и эффективную.

Полная пористость это объем всех пор различной формы, которые в той или иной степени сообщаются друг с другом или расположены изолировано друг от друга.

Открытая пористость это объем связанных пор, через которые может протекать жидкость или газ при насыщении порового пространства.

Эффективной пористостью называют ту часть порового пространства, через которое протекает пластовая жидкость или по-другому флюид.

Пористость может изменяться в довольно широком диапазоне от 1-2% до 80-90%. Такой широкой диапазон пористости в глинистых породах зависит от гранулометрического состава породы, формы зерен, их упаковки и укладки. Для других пород определяющими факторами пористости являются условия образования породы и ее изменение.

Для расчетов в грунтоведении применяют два показателя пористости пород: абсолютную или полную пористость η и коэффициент пористости e :

$$\eta = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (3.1)$$

$$e = \frac{\rho_d}{\rho_s} - 1 = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad (3.2)$$

Как отмечено во второй главе, плотность потока радона с поверхности породы зависит от степени ее увлажнения. На практике используют несколько влажностных характеристик пород. Естественная или природная влажность породы равна доле массы воды в породе к массе всей породы. Весовая или абсолютная влажность определяет долю массы воды в породе к массе сухой породы. Объемная влажность определяет долю объема породы, заполненной водой.

Не всегда достаточно информации о влажности породы для полного описания физической составляющей породы. Также необходимо знать степень заполнения пор водой. Для этого необходимо определить коэффициент влажности породы и относительную влажность.

Коэффициент влажности (G) определяется отношением доли пор, заполненных водой, к доле объема породы, приходящихся на поры. Величина коэффициента влажности изменяется в диапазоне от 0 до 1.

Степень влажности или коэффициент водонасыщения S_r характеризует относительную долю объема воды в объеме пор породы. Степень влажности используется для определения расчетных сопротивлений породы при проектировании естественных оснований зданий и сооружений и может представлять интерес при изучении выхода радона из пород. Степень влажности определяется отношением объема воды к объему пор породы. Коэффициент

водонасыщения является классификационным показателем для дисперсных несвязных пород. Породы называются маловлажными при коэффициенте водонасыщения меньше 0,5, влажными при коэффициенте водонасыщения от 0,5 до 0,8 и насыщенными водой при коэффициенте водонасыщения более 0,8.

3.3 Планирование эксперимента в 2020 г.

Измерения ППР на поверхности разных пород проведены на площадках г. Томска (2014-2020 гг.) и Горного Алтая (2018 г.). Планирование измерений ППР в 2014 - 2018 гг. подробно описано в Главе 2, п.2.1.

В 2020 году измерения в г. Томске проведены методом угольных адсорберов на 11 экспериментальных площадках (районы Лагерного сада и Бактина) (рисунок 3.1). Выбранные площадки представляют осадочные породы с разным вещественными и дисперсным составом. Еще раз отметим, что осадочные породы наиболее распространены на земной поверхности. Осадочные горные породы являются фундаментом (в прямом и фигуральном смысле) развития жизни на земле, сформированном под воздействием биосферы в результате сложных биохимических и физических процессов.

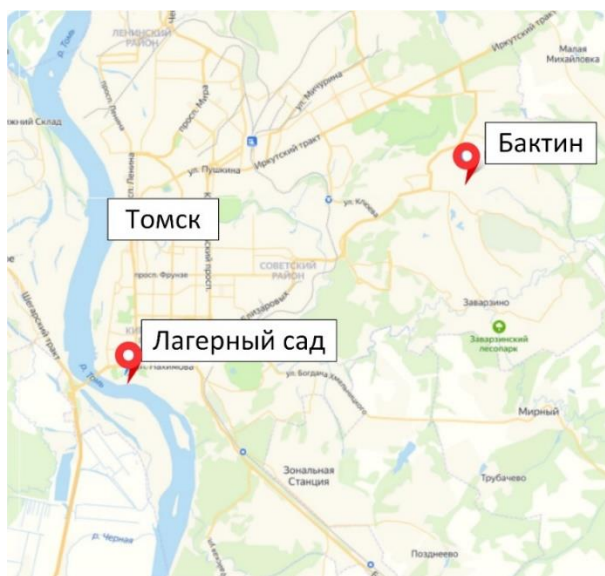


Рисунок 3.1 – Схема измерения плотности потока радона в г. Томске

В 2020 г в день проводили в среднем по восемь измерений плотности потока радона. Одновременно регистрировали параметры атмосферы на моменты установки и снятия накопительной камеры. 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 (см. Приложение Д, таблицы Д1-Д11). Также проводили отбор проб массой примерно 1,5 кг для измерения удельной активности радия.

3.4 Результаты экспериментальных исследований в Томске и их анализ

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 рыхлых осадочных пород с разным вещественным и дисперсным составом. После проверки полученных результатов измерения ППР на промахи с помощью критерия Романовского и проверки гипотезы о нормальном распределении значений ППР (см. Главу 2, п.2.1) были рассчитаны средние значения и коэффициенты вариации полученных выборок. Регрессионный анализ результатов, полученных в 2020 году методом угольных адсорберов показал, что в отличие от результатов 2016 года (см. Главу 2, п.2.3), значимой зависимости ППР от температуры атмосферного воздуха не наблюдается. Поэтому введение поправочного коэффициента, который учитывал бы эту зависимость, не потребовалось. Отсутствие зависимости значений ППР от температуры объясняется тем, что в 2020 году измерения проведены при более высоких температурах атмосферного воздуха ($>15^{\circ}\text{C}$), при которых влажность воздуха не зависит от температуры (рисунок 2.6). Проверка значений ППР на соответствие нормальному распределению подтвердила выдвинутую гипотезу с помощью критерия Пирсона, следовательно, средние соответствующих выборок являются представительными. В сводной таблице 3.4 представлены диапазоны, средние значения и коэффициенты вариации результатов измерений ППР на разных площадках, а также некоторые физические свойства исследованных пород – усредненная по количеству измерений на каждой площадке естественная влажность (w), полная пористость (η), плотность сухой породы (ρ_d), удельная активность радия (A_{Ra}). Виды дисперсных осадочных пород г. Томска и их

некоторые физические свойства определены в грунтоведческой лаборатории АО «ТомскТИСИЗ».

Таблица 3.4 – Основные результаты измерения: вид породы, диапазоны и средние значения ($\bar{x}$) ППР, коэффициент вариации ППР (V_x), средние значения влажности в естественном залегании (w), полная пористость (η), плотность сухой породы (ρ_d), удельная активность радия (A_{Ra}) на каждой площадке

Площадка, год измерения	Тип породы	Диапазон значений, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	$\bar{x}$, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	V_x , %	w , %	ρ_d , г·см ⁻³	η , о.е.	A_{Ra} , Бк/кг
Площадка №1, 2014 г	Суглинок	27...53	37	19	-	1,4	0,43	26,5
Площадка №2, 2016 г	Суглинок	2...96	39	68	-	-	-	-
Площадка №3, 2017 г	Почвенный суглинок	2...41	15	49	23	1,5	0,40	-
Площадка №4, 2018 г	Лессовидный суглинок	20...71	46	37	29	1,2	0,51	30
Площадка №5, 2018 г	Глинистые сланцы	22...59	34	31	23	1,6	0,34	160
Площадка №6, 2018 г	Белые глины	20...133	56	57	17	1,4	0,43	190
Площадка №7, 2020 г	Суглинок легкий песчанистый	15...87	49	38	16	1,55	0,43	110
Площадка №8, 2020 г	Суглинок легкий пылеватый	5...64	31	66	6,8	1,64	0,87	124
Площадка №9, 2020 г	Супесь песчаная	7...90	53	38	7,5	2,55	0,42	112
Площадка №10, 2020 г	Суглинок тяжелый пылеватый	1...20	9	66	20	1,53	0,43	177
Площадка №11, 2020 г	Суглинок тяжелый пылеватый	11...73	40	37	5,1	1,53	0,43	165
Площадка №12, 2020 г	Суглинок легкий пылеватый	0,7...42	20	58	17	1,58	0,41	124
Площадка №13, 2020 г	Грунт крупнообломочный, галечниковый	0,7...35,7	20	50	0,30	-	-	-

Продолжение таблицы 3.4

Площадка, год измерения	Тип породы	Диапазон значений, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$\bar{x}$, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	V_x , %	w , %	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	η , о.е.	A_{Ra} , Бк/кг
Площадка №14, 2020 г	Суглинок легкий пылеватый	16,5...36	25	23	11	1,59	0,41	167
Площадка №15, 2020 г	Суглинок тяжелый пылеватый	13...62	31	44	20	1,28	0,53	125
Площадка №16, 2020 г	Грунт крупнообломочный, гравийный	6...38	22	45	3,0	-	-	-
Площадка №17, 2020 г	Суглинок легкий пылеватый	5...22	16	33	11	1,62	0,40	127

Из данных таблицы 3.4 видно, что для рыхлых осадочных пород г. Томска средние значения плотности потока радона не превышают $60 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ при коэффициентах вариации не более 70%; наибольшие средние значения ППР – $56 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и $53 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ получены для белой глины и супеси песчанистой соответственно. Отметим, что в отличие от других суглинистых пород плотность супеси песчанистой на площадке 9 заметно выше.

Невысокие значения плотности потока радона, полученные на площадках г. Томска, характерны для суглинистых пород [15], на которых расположен г. Томск. Мощность рыхлых отложений (в основном, суглинков и супесей), как правило, составляет не менее нескольких метров, что превышает толщину «активного слоя», из которого радон выходит на поверхность.

3.5 Результаты экспериментальных исследований в Горном Алтае и их анализ

При проведении исследований в Горном Алтае получено 74 результата измерений плотности потока радона на поверхности трех типов пород: дисперсных осадочных пород (песчано-гравийно-галечные отложения (ПГС), террасы 1-3); плотных осадочных пород (глинистый и скальный известняк); магматической горной породы (андезитно-базальтовый порфирит); метаморфической горной породы (кварцит) (таблица 3.5). В 2018 г определение вида пород, исследованных в Горном Алтае, проведено в Алтайском региональном институте экологии

(таблица 3.5). Из-за трудностей пробоотбора очень плотных пород Горного Алтая не удалось использовать метод режущего кольца, поэтому в исследовании определена только естественная влажность методом высушивания образца до постоянной массы. В таблице 3.5 представлены диапазон, средние значения ($\bar{x}$) и коэффициент вариации (V_x) плотности потока радона, а также плотность сухой породы (ρ_d), естественная влажность породы (w) и содержание радия (A_{Ra}), полученные на площадках Горного Алтая.

Таблица 3.5. Основные результаты измерения на площадках Горного Алтая, 2018 г

Участок	Тип породы	Диапазон значений, мБк·м ² ·с ⁻¹	$\bar{x}$, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	V_x , %	ρ_d , г/см ³	w , %	A_{Ra} , Бк/кг
1	ПГС 3 терраса	64...140	110	20	—	3	—
2	ПГС 2 терраса	114...320	220	24	—	5,5	140
3	ПГС 1 терраса	130...200	170	12	—	2	—
4	Глинистый известняк	220...370	292	22	2,3	6	180
5	Скальный известняк	310...690	500	24	2,7	6	180
6	Андезитобазальтовый порфирит	500...1100	760	20	2,7	5	170
7	Кварцит	540...1300	810	24	2,4	3	150

Из представленных результатов видно, что породы Горного Алтая характеризуются повышенными значениями плотности потока радона, что согласуется с известными из литературных источников данными [65-67]. Сравнительно небольшие значения ППР получены для песчано-гравийно-галечных отложений, для которых характерна высокая газопроницаемость. Эти типы породы имеют сложный минералогический и гранулометрический состав, поэтому средние значения ППР для трех террас заметно отличаются. Наибольшие средние значения характерны для кварцита (метаморфическая горная порода) и порфирита (магматическая горная порода). Предполагалось, что высокие значения ППР связаны с большим содержанием радия в горных породах. Однако, содержание

радия в породах Горного Алтая лишь незначительно выше, чем в породах г. Томска (см. таблицы 3.4 и 3.5).

Сравнительно высокие значения ППР для дисперсных осадочных пород Горного Алтая, скорее всего, объясняются геологическими особенностями строения земной коры на этой территории. В Горном Алтае выделяются два главных типа структурных элементов: глубинные разломы и структурно-формационные зоны. Глубинные разломы трактуются как крутые разрывные структуры длительного развития, проникающие в мантию и формирующиеся в зонах максимальной неоднородности земной коры на границах между главными геотектоническими структурными элементами. В связи с глыбовыми движениями они становятся зонами повышенной проницаемости для магматических расплавов и мантийных флюидов (в т. ч. радона) [65]. В Горном Алтае выделяются разновозрастные складчатые зоны, с различным набором осадочных, магматических и метаморфических формаций, на которых располагались экспериментальные площадки. Таким образом, более высокие значения ППР для рыхлых осадочных горных пород Горного Алтая можно объяснить наличием глубинных разломов и трещин, через которые происходит выделение радона. Сильное влияние разломов из глубоких трещин на выход радона обнаружено и в других работах [16, 68, 69]. Возможно, высокие значения ППР для плотных осадочных (глинистый и скальный известняки), магматических (андезито-базальтовый порфирит) и метаморфических (кварцит) горных пород обусловлены низкой гигроскопичностью этих пород. Наличие даже тонкой водной пленки на поверхности зерен породы препятствует выделению радона в открытые поры, так как пробеги ионов радона-222, образующихся при радиоактивном распаде, крайне малы.

ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА

С помощью дисперсионного анализа значений ППР, измеренных на поверхности 11 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). Виды и дисперсный состав осадочных пород г. Томска представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Виды пород и их дисперсный состав.

№ площадки	Наименование грунта по ГОСТ 25100			Доля песчаных частиц (%)						Доля пылеват. частиц (%)			Доля глинист. частиц (%)
				2.0-1.0	1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	Σ	0.05-0.01	0.01-0.002	Σ	
7	Суглинок	легкий	песчаный	-	0,5	1,6	23,2	22,3	47,6	19,6	17,4	37	15,4
8	Суглинок	легкий	пылеватый	-	0,3	1,3	6,5	9,3	17,4	45	11,7	56,7	25,9
9	Супесь	песчаная		-	1,7	9	57,4	10,4	78,5	7,9	7,2	15,1	6,4
10	Суглинок	тяжелый	пылеватый	-	-	0,1	1,5	4,1	5,7	40,3	25,4	65,7	30,1
11	Суглинок	тяжелый	пылеватый	-	0,1	0,6	4,8	6,1	11,6	38,6	22,8	61,4	27
12	Суглинок	легкий	пылеватый	-	0,1	1,7	15,3	16,7	33,8	24,4	15,9	40,3	25,9
13	-	Грунт крупнооблом. Галечниковый		2,9	2,2	8,8	5,2	6,2	25,3	-	-	-	-
14	Суглинок	легкий	пылеватый	-	1,9	6	7,8	2	17,7	41,9	20,1	62	21,7
15	Суглинок	тяжелый	пылеватый	-	0,2	1,1	2,4	12,5	16,2	52,7	13,7	66,4	17,4
16	-	Грунт крупнооблом. Галечниковый		3,4	1,9	6,6	3,5	4,7	20,1	-	-	-	-
17	Суглинок	легкий	пылеватый	-		0,4	1,2	18,5	20,1	41,8	17,5	59,3	20,6

4.1 Изучение влияния вещественного и дисперсного состава пород

На рисунке 4.1 представлены результаты регрессионного анализа измеренных в 2020 г средних значений ППР от усредненных по гранулометрическому составу размеров частиц породы для каждой площадки. Видно, что увеличение среднего размера частиц породы ведет к росту ППР.

Выявленную тенденцию можно объяснить увеличением доли открытых пор с ростом средних размеров зерен породы.

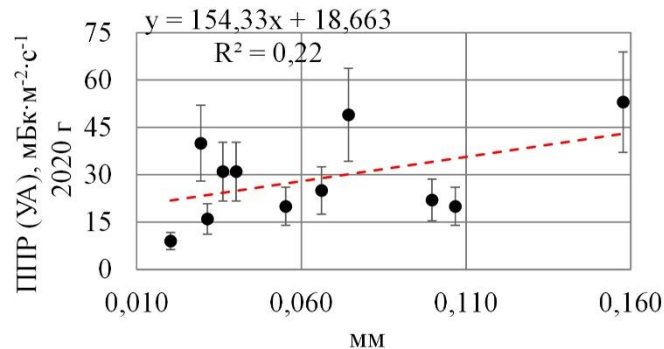


Рисунок 4.1 – Зависимость среднего значения ППР от усреднённого по гранулометрическому составу размера частиц пород на каждой площадке

Более четко проявляется зависимость ППР от содержания песчаных, пылеватых и глинистых частиц (рисунки 4.2-4.4), причем наибольший рост ППР наблюдается с увеличением доли песчаных частиц размерами 0,25-0,1 мм. Напротив, увеличение доли пылеватых и глинистых частиц приводит к уменьшению ППР. Результат понятен, так как увеличение доли песчаных частиц приводит к увеличению объема свободных пор, в то время как мелкие пылеватые и глинистые частицы заполняют пространство между более крупными песчаными частицами, что затрудняет выход радона из пород.

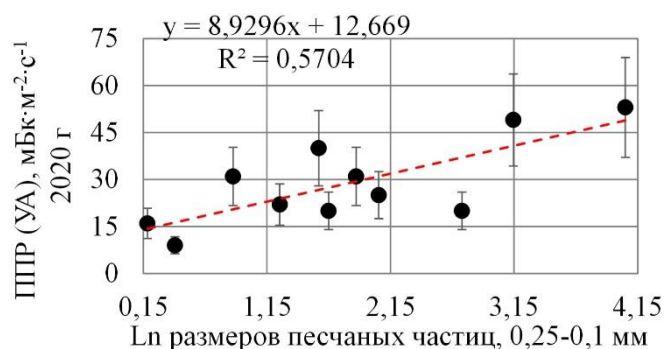


Рисунок 4.2 – Зависимость среднего значения ППР от логарифма размеров песчаных частиц для каждой площадки

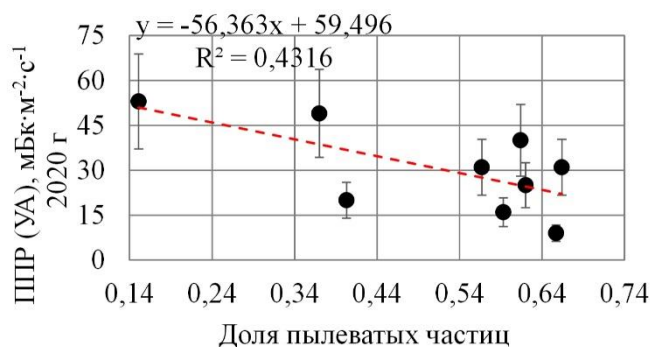


Рисунок 4.3 – Зависимость среднего значения ППР от доли пылевых частиц

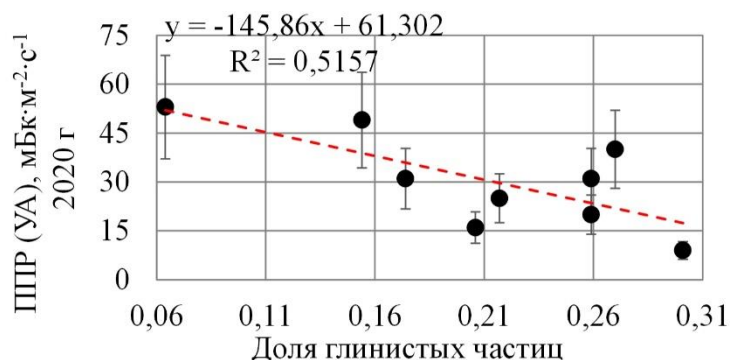


Рисунок 4.4 – Зависимость среднего значения ППР от доли глинистых частиц

4.2 Изучение влияния влажности пород

Регрессионный анализ результатов измерения ППР показал, что какая-либо общая закономерность изменения ППР в зависимости от влажности (таблица 3.4) в исследованных диапазонах этой величины для разных видов осадочных пород г. Томска отсутствует. На рисунках 4.5-4.7 представлены результаты регрессионного анализа в зависимости от естественной влажности. Зависимости значений ППР от других характеристик влажности имеет аналогичный вид (см. Приложение С, рисунки С1-С12). Отметим, что естественная влажность определяется при проведении инженерно-геологических изысканий. Также отметим, что диапазон изменения естественной влажности на экспериментальных площадках определялся погодными условиями и не превышал обычно десятка процентов.

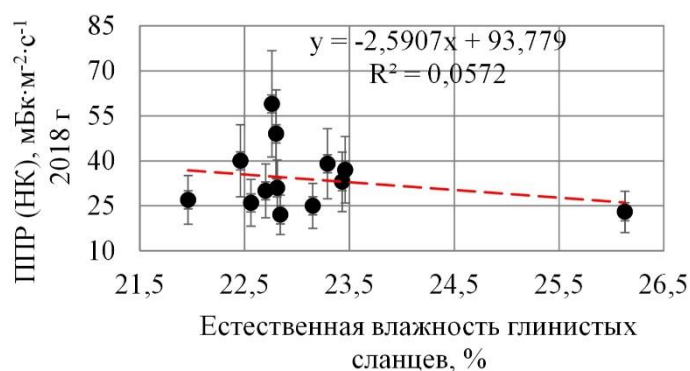


Рисунок 4.5 – Зависимость значений ППР от естественной влажности глинистых сланцев (площадка 5)



Рисунок 4.6 – Зависимость значений ППР от естественной влажности суглинка легкого песчанистого (площадка 7)

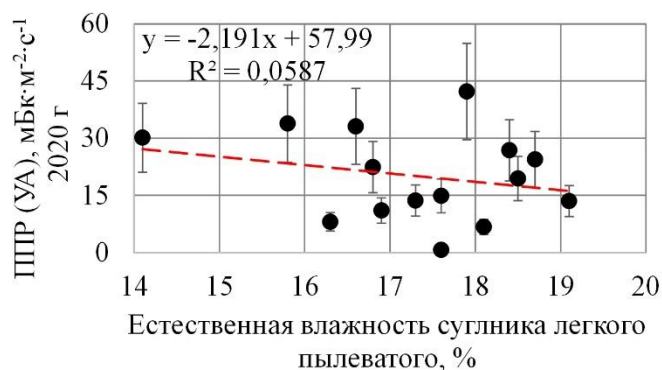


Рисунок 4.7 – Зависимость значений ППР от естественной влажности суглинка легкого пылеватого (площадка 12)

Однако, для некоторых пород и диапазонов влажности с помощью регрессионного анализа все-таки удалось выявить две основные тенденции изменения ППР. Для низких значений влажности пород г. Томска в диапазоне от 4% до 7% (на площадках 8, 9 г. Томска) наблюдается общая закономерность,

характеризующаяся максимумом (рисунки 4.8-4.9), что совпадает с результатами, полученными в работах [17, 42-45].

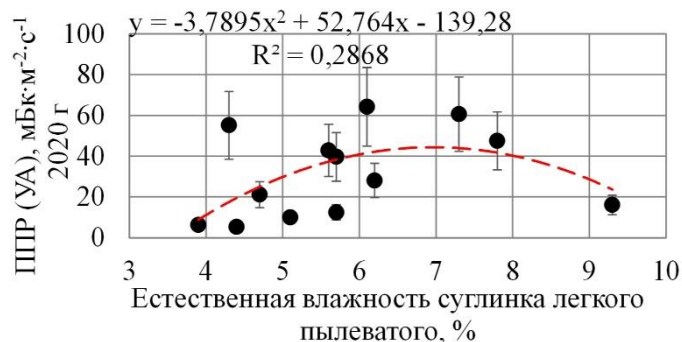


Рисунок 4.8 – Зависимость значений ППР от естественной влажности суглинка легкого пылеватого (площадка 8)

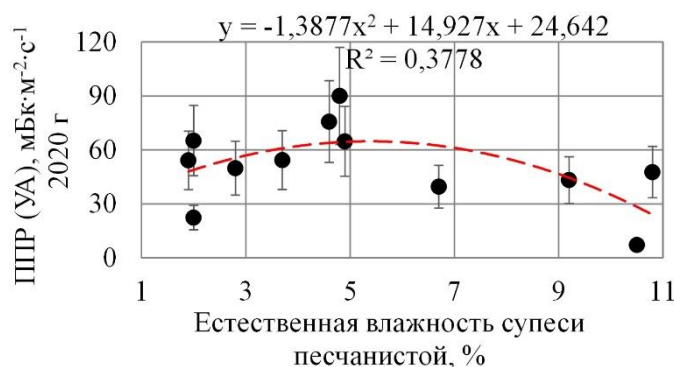


Рисунок 4.9 – Зависимость значений ППР от естественной влажности супеси песчанистой (площадка 9)

Наличие максимума обнаружено также для лессовидного суглинка (площадка 4), но в более высоком диапазоне влажности (рисунок 4.10). Скорее всего, наличие максимума объясняется рыхлым сложением этой породы, наличием макропористости и хорошей водопроницаемостью. Сначала с увеличением содержания влаги происходит вытеснение радона из пространства пор, а затем с ростом влажности выходу радона на поверхность препятствует находящаяся в порах вода. 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, что способствует конформно-зернистому типу структуры породы.

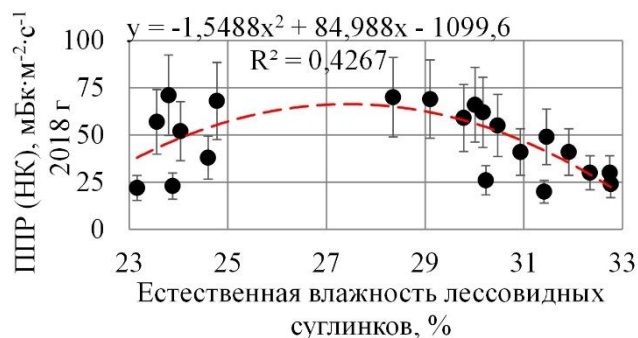


Рисунок 4.10 – Зависимость значений ППР от естественной влажности лессовидных суглинков (площадка 4)

При значениях естественной влажности в диапазоне 13...20% для белой глины (площадка 6) и в диапазоне 14...30% для суглинка тяжелого пылеватого (площадка 15) наблюдается тенденция к убыванию ППР с ростом влажности (рисунки 4.11 и 4.12).

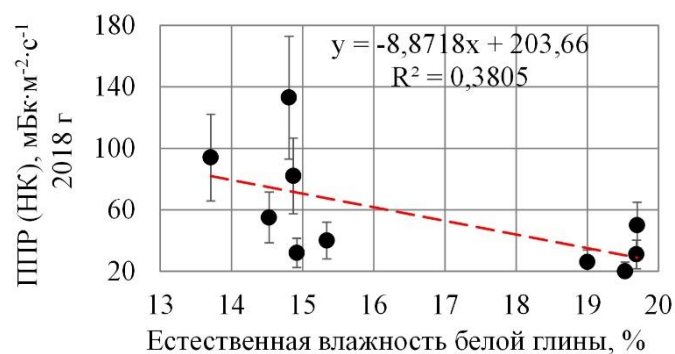


Рисунок 4.11 – Зависимость значений ППР от естественной влажности белой глины (площадка 6)

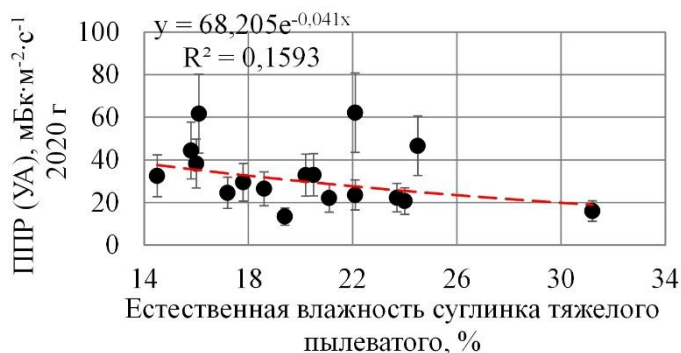


Рисунок 4.12 – Зависимость значений ППР от естественной влажности суглинка тяжелого пылеватого (площадка 15)

Противоречивые и неоднозначные данные о влиянии увлажнения пород на выход радона с их поверхности получены также в работах [15, 17, 43]. Очевидно, степень увлажненности породы влияет на число микротрещин, глубина которых и количество содержащейся в них влаги зависят от интенсивности и времени выпадения осадков, а также от температуры и даже от скорости ветра. Комплексное влияние многих вышеперечисленных факторов с разнонаправленным характером воздействия как раз и обуславливает отсутствие каких-либо общих закономерностей.

4.3 Изучение влияния 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 о влиянии полной пористости на выход радона, представленный на рисунке 4.13.

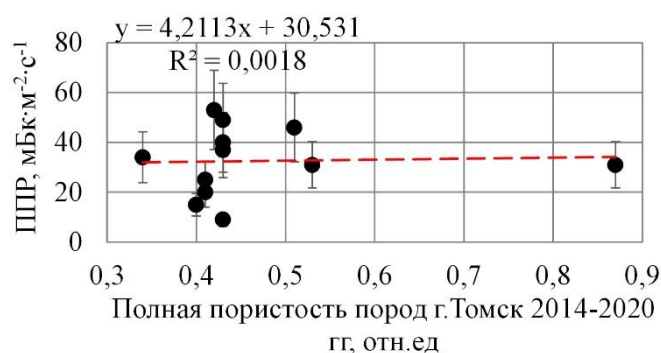


Рисунок 4.13 – Зависимость усредненных по количеству измерений на каждой площадке значений ППР и полной пористости осадочных пород г. Томска

Возможно, отсутствие какой-либо зависимости результатов измерения ППР от полной пористости объясняется тем, что данная величина определяет долю объема породы, приходящуюся на все поры (см. Глава 3, п.3.2). Однако, выход радона из породы происходит только через открытые поры, доля которых зависит от структуры породы, в особенности от упаковки зерен, от степени увлажненности породы и глубины проникновения влаги, наличия макро- и микротрещин. Отметим, что методика определения открытой пористости достаточно трудоемка и

требует специального оборудования [70]; из-за отсутствия такого оборудования в нашем эксперименте не представилось возможности определить эту величину. Помимо открытых пор породы содержат и закрытые поры, доля которых также зависит от вышеперечисленных факторов. Доли открытых и закрытых пор могут изменяться в течение суток при меняющихся температуре атмосферного воздуха и скорости ветра, в то время как полная пористость является неизменной характеристикой породы и определяется ее структурой.

На рисунке 4.14 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.

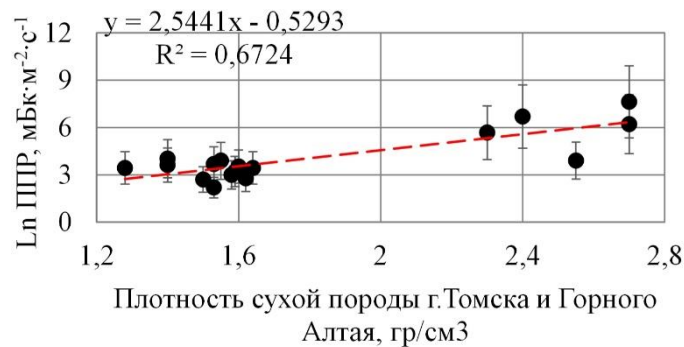


Рисунок 4.14 – Зависимость усредненных по количеству измерений на каждой площадке значений ППР и плотности сухих пород г. Томска и Горного Алтая

Очевидно, плотность сухой породы увеличивается с уменьшением полной пористости. Но как мы показали выше, от полной пористости выход радона не зависит. 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 тот факт, что в наших исследованиях не обнаружены корреляционные связи между ППР и удельной активностью радия (см. таблицы 3.4 и 3.5). Этот результат противоречит устоявшимся представлениям о том, что количество выделяющегося из породы радона увеличивается с ростом

содержания радия [71-73]. Более того, в РФ составлены карты потенциальной радоноопасности на основе содержания урана/радия в поверхностных породах. Удельная активность радия используется также в качестве одного из параметров при составлении карт радоноопасности территорий за рубежом [28].

Вывод об отсутствии прямой зависимости между содержанием радия и плотностью потока радона сделан и по результатам большого количества измерений ППР на территории г. Москвы [34], а также в работах [68,74, 75]. К сожалению, в этих работах не обсуждаются причины отсутствия такой зависимости. На наш взгляд, отсутствие корреляции между содержанием радия-226 и количеством выделяющегося с поверхности породы радона зависит от множества других 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. В частности, очень сложным и неизученным является процесс эманации радона из зерен с учетом их упаковки в породах, гигроскопичности пород и влагосодержания в воздухе пор [76]. Например, в работе [77] с помощью метода Монте-Карло показано, что эманация радона заметно увеличивается с ростом размеров зерен 0,01-0,1 мм и достигает постоянной величины 50% для сухой породы и равномерном распределении радия на поверхности зерна. Кроме того, значительное увеличение эманации обнаружено с увеличением влагосодержания в поровом пространстве для зерен с меньшим размером. На основе проделанных расчетов авторы делают вывод о том, что количество эманацирующего радона сильно зависит от расстояния между зернами и степени увлажнения породы.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 МУ 2.6.1.2398-08. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания.—М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. - 27 с.
- 2 Баннов Ю.А. Лаборатория радиационного контроля ООО "ГЕОКОН". Два года: опыт работы // АНРИ. - 2005. - N 2. - С.54-71.
- 3 МУ 2.6.1.038. Методические указания: «Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий» МУ 2.6.1.038 – 2016. - 36 с., 1 вклейка
- 4 Рыжакова Н.К., Раменская Г.А. Методы и результаты определения коэффициентов эманирования глинистых грунтов города Томска // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2012 - №.2. - С. 168-176.
- 5 Ryzhakova N.K. A new method for estimating the coefficients of diffusion and emanation of radon in the soil // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. - Vol. 135. - p. 63-66.
- 6 Ryzhakova N.K. Parameters of modeling radon transfer through soil and methods of their determination // Journal of Applied Geophysics. – 2012. - Vol. 80. - p. 151-157.
- 7 Huynh Nguyen Phong Thu, Nguyen Van Thang, Truong Thi Hong Loan. Natural radioactivity and radon emanation coefficient in the soil of Ninh Son region, Vietnam // J. Applied Geochemistry – 2019. - Vol.104. - p. 176-183.
- 8 Fatema S.Abd Ali, Khalid H. Mahdi, Enas A. Jawad. Humidity effect on diffusion and length coefficient of radon in soil and building materials // J. Energy Procedia January - 2019. - Vol.157. - p.384-392.
- 9 Данильченко О.В., Юдакова Д.В., Кургуз С.А. Межсезонные кратковременные вариации величины плотности потока радона из почвы // М81 Молодежь и наука: начало XXI века: Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7ч. Ч.5 /

Сост.: Дружинкин С.В.; МИОЦ ФГОУ ВПО «СФУ». – Красноярск - 2008. - С. 133-134.

10 Белецкая Ю.В., Крупный Г.И., Мамаев А.М., Расцветалов Я.Н. Вариации плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // АНРИ. – 2010. - №1(60). - С.34-37.

11 Ciotoli G. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. - Vol.(166-2). - p.355-375.

12 Микляев П.С., Макаров В.И. Радоновое поле Москвы // Геоэкология инженерная геоэкология Гидрогеология. Геокриология. - 2013. №2. - С.172-187.

13 Neznal M., Neznal M., Matolín M., Barnet I., Mikšová J. The new method for assessing the radon risk of building sites [Nová metodika stanovení radonového indexu pozemku] // Prace Ceskeho Geologickeho Ustavu – 2004. – Vol.16. - p. 7-47.

14 Alonso H., Rubiano J.G., Guerra J.G., Arnedo M.A., Tejera A., Martel P. Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils // J. Science of The Total Environment. – 2019. - Vol.664. - p. 449-460.

15 Гулабянц Л.А., Заболотский Б.Ю. Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки // АНРИ. – 2004. - № 4. - С.46-50.

16 Miklyaev P. S., Petrova T.B, Shchitov D.V., Sidyakin P.A., Murzabekov M.A., Marennyy A.M., Nefedov N.A., Sapozhnikov Y.A. The results of long-term simultaneous measurements of radon exhalation rate, radon concentrations in soil gas and groundwater in the fault zone // J. Applied Radiation and Isotopes. - 2021. - Vol.167.

17 Yang J., Busen H., Scherb H., Hürkamp K., Guo Q., Tschiersch J. Modeling of radon exhalation from soil influenced by environmental parameters // J. Science of The Total Environment.- 2019. - Vol. 656. - p. 1304-1311.

18 Jönsson G. Soil radon depth dependence // Radiation Measurements. – 2001. -Vol.34. - p. 415-418.

- 19 Mazur D., Janik M., Łoskiewicz J., Olko P., Swakoń J. Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors // Radiation Measurements. – 1999. - Vol.31. - p.295-300.
- 20 Neznal M., Neznal, M., Šmarda J. Assessment of radon potential of soils - A five-year experience // Environ. Int. – 1996. – Vol. 22(S1). - p.819-828.
- 21 Katalin Zsuzsanna Szabó, Gyozo Jordan, Ákos Horváth, Csaba Szabó Permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series // Journal of Environmental Radioactivity. - 2013. – Vol. 124. - p. 74-83.
- 22 László Pásztora, Katalin Zsuzsanna Szabób, Gábor Szatmária, Annamária Laborczia, Ákos Horváthc Mapping geogenic radon potential by regression kriging // Science of The Total Environment. - 2016. – Vol. 544. – p. 883-891.
- 23 Katalin Zsuzsanna Szabóa, Gyozo Jordanb, Ákos Horváthc, Csaba Szabóa Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. - Vol. 129. - p. 107-120.
- 24 Appletona J.D., Milesb J.C.H. A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk // Journal of Environmental Radioactivity. - 2010. - Vol. 101 (10). - p.799-803.
- 25 Pascullia A., Palermib S., Sarrac A., Piacentinia T., Miccadeia E. A modelling methodology for the analysis of radon potential based on environmental geology and geographically weighted regression // Environmental Modelling & Software. - 2014. - Vol.54. - p.165-181.
- 26 Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M. Mapping the geogenic radon potential in Germany // The Science of the Total Environment. - 2001. - Vol. 272.- p.217-230.
- 27 Ielsch G., Cushing M.E., Combes Ph., Cuney M. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne // Journal of Environmental Radioactivity. - 2010. - Vol. 101. - p. 813-820.

- 28 EPA (US Environmental Protection Agency) 1993 EPA Map of Radon Zones (Report 402-R-93- 071) (www.epa.gov/radon/zonemap.html, accessed 28 February 2012).
- 29 Watson Robin J., Smethurst Mark A. The use of mapped geology as a predictor of radon potential in Norway //Journal of Environmental Radioactivity. - 2017. - Vol.166-2. - p.341-354.
- 30 Smethurst M.A. The predictive power of airborne gamma ray survey data on the locations of domestic radon hazards in Norway: A strong case for utilizing airborne data in large-scale radon potential mapping //Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. - Vol.166-2. – p. 321-340.
- 31 Kropat G., Bochud F., Murith C., Palacios (Gruson) M., Baechler S. Modeling of geogenic radon in Switzerland based on ordered logistic regression. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – Vol.166. – p.376-381.
- 32 Зайцев В.В., Рогалис В.С., Кузьмич С.Г. Исследования влияния временных условий на потоки радона на строительных площадках // АНРИ. - 2008. - № 2. - С. 34–36.
- 33 Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А. Принципы оценки потенциальной радоноопасности территорий // АНРИ. - 2008. - № 4. - С. 14 – 19.
- 34 Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Маренный А.М., Дорожко А.Л., Макеев В.М. Карта плотности радона на территории Москвы // АНРИ. – 2012. - №3(70). - С.15-25.
- 35 Кургуз С.А., Воеводин В.В. Вариации плотности потока радона из почвы в контрольной точке на территории г.Красноярска // ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае.
- 36 Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная безопасность и защита // Справочник. М.: Медицина. – 1996. - 336 с.
- 37 Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. – 2007. - №2(49). – С. 2-16.

38 Ferry C., Richon P., Beneito A., Robe M.-C. Evaluation of the effect of a cover layer on radon exhalation from uranium mill tailings: transient radon flux analysis // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 63. – p.49–64.

39 Ferry C., Beneito A., Richon P., Robe M.-C. An automatic device for measuring the effect of meteorological factors on radon-222 flux from soils in the long term // *Radiation Protection Dosimetry*. - 2001. - Vol. 93 (3). - p. 271– 274.

40 Jha S., Khan A.H., Mishra U.C. A study of the ^{222}Rn flux from soil in the U mineralised belt at Jaduguda // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2000. – Vol. 49. – p. 157-169.

41 Маренный А.М., Микляев П.С., Пенезев А.В., Цапалов А.А. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 3. Результаты мониторинга плотности потока радона с поверхности грунта // *АНРИ*. -2015. - №2 (81). - С.27-41.

42 Munazza Faheem, Matiullah Radon exhalation and its dependence onmoisture content fromsamples of soil and buildingmaterials // *Radiation Measurements*. - 2008. – Vol.43. - p.1458–1462.

43 Kojima H., Nagano K. The influence of meteorological and soil parameters on radon exhalation // *Radon in the Living Environment*. - 1999. - Vol. 071. – p. 19- 23.

44 Lawrence C. E., Akber R. A., Bollho A., Martin P. Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2009. – Vol. 100. – p.1–8.

45 Hosoda M., Shimo M., Sugino M., Furukawa M., Fukushi M. Effect of Soil Moisture Content on Radon and Thoron Exhalation // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2007. – Vol. 44:4. – p.664-672.

46 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.

47 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 Gygiena. - 2018 - Т. 11 - №. 2. - С. 37-44.

48 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.

49 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.

50 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 Gygiena. - 2020 - Т. 13 - №. 2. - С. 57-64.

51 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.

52 Микляев, П. С. Закономерности миграции и эсхалации радона из грунтов на территории г. Москвы : дис. ... канд. геолого-минералогических наук / П. С. Микляев. – М., 2002. – 170 с.

53 Микляев П. С., Томашев А. В, Охрименко С. Е., Петрова Т. Б. Оценка радионуклидного состава грунтов, сглаживающих территорию г. Москвы // АНРИ. – 2000. – № 1.

54 Полосин В. Г., Тертычная С. В. Методы исследования источника радона по форме статистического распределения его объемной активности Известия вузов. Геология и разведка. – 2008. – № 5. – С. 68–74.

55 Ярмошенко И. В., Жуковский В., Кирдин И. А. Использование свойств логнормального распределения при анализе результатов радоновых обследований // Актуальные проблемы ограничения облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. Радон – 2000 : материалы научно-

практической конференции (18–20 апреля 2000 г.) / под ред. В. Я. Голикова, Э. М. Крисюхина. – М., 2000.

56 Sakalys J., Kvietkus K., Sucharová J., Suchara I., Valiulis D. Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005// J. Chemosphere. – 2009. – Vol.76(1). – p.91-97.

57 Фролов В.Т Литология Кн.1:Учебное пособие: Издательство МГУ, 192-336 с Рухин Л.Б. «Учение об осадочных породах». – Л. : Недра, 1969 – 703с.

58 Рухин Л.Б. «Учение об осадочных породах». – Л. : Недра, 1969 – 703с.

59 Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования): Учебник для студентов геолог. спец. вузов. – 3-е изд., перераб., и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 416 с.

60 Крамаренко В.В. Грунтоведение: учебное пособие; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 431с.

61 Классификации структур пород в Справочник по литологии, 1983, с.35-36.

62 Суглинок// Геологический словарь: [в 3Т.]/гл.ред.О.В.Петров 3-е изд.перераб.и доп.-СПБ:ВСЕГЕИ, 2010-2012.

63 Рыжакова Н.К. К вопросу о моделировании переноса радона через пористые среды // Геоэкология. инженерная геология. гидрогеология. Геокриология. – 2009. – № 1. – С. 80-84.

64 Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы / Под ред. акад. Сергеева Е.М. – М.: Недра, 1985, 332 с.

65 Тектонические покровы Горного Алтая, Буслов М.Н., Труды института геологии и геофизики вып.786, Наука.Сиб.отд-ие, Новосибирск,1992 г, 96с.

66 Дехандшуттер Б., Бобров В. А., Хус Р., Астахов Н. Е., Андросова Н. В., Попов Ю. П. Радоновые аномалии как показатель активности западно-саянского разлома в северной части Телецкого озера (Горный Алтай) // Геоэкологи и геофизика. – 2002. – №2. – С. 128-141.

- 67 Шитов А.В. Роль геологических факторов в изменении заболеваемости населения Республики Алтай // Вестн.Том.гос.ун-та. – 2010. – №332. – С.192-196.
- 68 Immé G., Catalano R., Mangano G. Radon exhalation measurements for environmental and geophysics study // J. Radiation Physics and Chemistry. – 2014. – Vol.95. – p. 349-351.
- 69 Miklyaev P. S., Petrova T.B, Marennyy A.M. High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions) // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol.219.
- 70 Горшков А.М. Методика определения пористости ультранизкопроницаемых пород баженовской свиты на дезинтегрированном керне // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 12 – С. 129-133.
- 71 Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М., Нефедов Н.А, Остапчук Т.В., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. Уровни эксхалации радона на западном склоне горы Бештау, кавказские минеральные воды, геоэкология // Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2018. – №5 – С.20-30.
- 72 Микляев П.С. Петрова Т.Б., Цапалов А.А., Борисов А.П. Опыт применения изотопного геохимического метода для исследования условий переноса радона к дневной поверхности // АНРИ. – 2012. – № 1(68). – С. 15-20.
- 73 Scott A.G. Modeling radon sources and ingress. The 1993 International Radon Conference. September 20-22, Denver, Colorado. IV 66-74.
- 74 Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информационный сборник. – СПб., 2013. – 67 с.
- 75 Dentoni V., Da Pelo S., Aghdam M.M. Natural radioactivity and radon exhalation rate of Sardinian dimension stones // J. Construction and Building Materials. – 2020. – Vol.247.
- 76 Sakoda A., Ishimori Yu., Yamaoka K. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash // Applied Radiation and Isotopes. – 2011. – Vol. 69(10). – p.1422-1435.

77 Sakoda A., Ishimori Yu., Hanamoto K., Kataoka T., Kawabe A., Yamaoka K. Experimental and modeling studies of grain size and moisture content effects on radon emanation // Radiation Measurements. – 2010. – Vol.45(2). – p.204- 210.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА И
ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ЗА 2014-2017 ГГ.**

Таблица А1 – Значения ППР, измеренной методом НК, и параметры атмосферных условий – температура, давление и влажность атмосферного воздуха, 2014 г.

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$\overline{\text{ППР}}$, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$T^{\circ}\text{C}$	P, мм.рт.ст	W%
15.08.2014	30	38,2	21	740	83
	48				
	28				
	36				
	34				
	53				
16.08.2014	42	35	25	742	51
	36				
	29				
	31				
	28				
	44				
21.08.2014	43	40,8	20	754	43
	38				
	47				
	39				
	51				
	27				
22.08.2014	44	36,5	21	749	51
	30				
	31				
	36				
	30				
	48				
25.08.2014	33	38,2	24	741	68
	42				
	44				
	32				
	45				
	33				
26.08.2014	39	34,7	18	742	84
	27				
	35				
	33				
	32				
	42				

Таблица А2 – Значения ППР, измеренной методом НК, и параметры атмосферных условий – температура, давление и влажность атмосферного воздуха, 2016 г.

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	Р, мм.рт.ст	W%
19.05.2016	21	18	15	761	–
	14				
20.05.2016	44	28	20	760	–
	11				
	28				
26.05.2016	34	32	19	742	–
	30				
1.06.2016	14	15	15	743	–
	18				
	13				
2.06.2016	41	30	13	749	–
	17				
	31				
6.06.2016	20	20	25	744	–
	11				
	28				
7.06.2016	31	18	24	748	–
	13				
	11				
27.06.2016	23	21	20	743	45
	18				
28.06.2016	36	39	24	742	61
	41				
29.06.2016	61	58	20	745	62
	54				
4.07.2016	36	37	20	737	78
	38				
5.07.2016	19	19	20	739	79
	19				
6.07.2016	51	46	23	742	67
	41				
7.07.2016	16	32	22	743	71
	47				
8.07.2016	65	72	23	744	78
	67				
	81				
	76				

Продолжение таблицы А2

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	Р, мм.рт.ст	W%
9.07.2016	32	49	24	743	73
	65				
12.07.2016	65	55	23	744	74
	44				
13.07.2016	55	47	21	746	92
	39				
15.07.2016	24	13	24	740	60
	6				
	10				
18.07.2016	41	42	18	740	83
	35				
	51				
19.07.2016	42	47	17	743	63
	51				
20.07.2016	27	20	22	744	49
	27				
	13				
	12				
21.07.2016	96	72	23	745	54
	47				
	86				
	58				
25.07.2016	47	60	25	744	52
	73				
26.07.2016	68	47	17	746	75
	25				
27.07.2016	93	69	14	741	94
	53				
	46				
	82				
	39				
28.07.2016	93	73	15	745	84
	53				
	91				
	56				

Продолжение таблицы А2

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	Р, мм.рт.ст	W%
29.07.2016	6	22	20	743	57
	16				
	3				
	23				
	35				
	27				
	36				
	28				
2.09.2016	13	15	11	755	84
	16				
	9				
	12				
	23				
6.09.2016	46	63	21	748	82
	80				
8.09.2016	19	43	18	747	68
	67				
12.09.2016	34	28	16	748	62
	21				
15.09.2016	45	32	11	755	95
	18				
19.09.2016	54	38	22	749	46
	22				

Таблица А3 – Значения ППР, измеренной методом НК, и параметры атмосферных условий – температура, давление и влажность атмосферного воздуха, 2016 г.

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	Р, мм.рт.ст	W%
19.05.2016	21	18	15	761	–
	14				
20.05.2016	44	28	20	760	–
	11				
	28				
26.05.2016	34	32	19	742	–
	30				
1.06.2016	14	15	15	743	–
	18				
	13				

Продолжение таблицы АЗ

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	T°C	P, мм.рт.ст	W%
2.06.2016	41	30	13	749	—
	17				
	31				
6.06.2016	20	20	25	744	—
	11				
	28				
7.06.2016	31	18	24	748	—
	13				
	11				
27.06.2016	23	21	20	743	45
	18				
28.06.2016	36	39	24	742	61
	41				
29.06.2016	61	58	20	745	62
	54				
4.07.2016	36	37	20	737	78
	38				
5.07.2016	19	19	20	739	79
	19				
6.07.2016	51	46	23	742	67
	41				
7.07.2016	16	32	22	743	71
	47				
8.07.2016	65	72	23	744	78
	67				
	81				
	76				
9.07.2016	32	49	24	743	73
	65				
12.07.2016	65	55	23	744	74
	44				
13.07.2016	55	47	21	746	92
	39				
15.07.2016	24	13	24	740	60
	6				
	10				
18.07.2016	41	42	18	740	83
	35				
	51				

Продолжение таблицы АЗ

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	T°C	P, мм.рт.ст	W%
19.07.2016	42	47	17	743	63
	51				
20.07.2016	27	20	22	744	49
	27				
	13				
	12				
21.07.2016	96	72	23	745	54
	47				
	86				
	58				
25.07.2016	47	60	25	744	52
	73				
26.07.2016	68	47	17	746	75
	25				
27.07.2016	93	69	14	741	94
	53				
	46				
	82				
	39				
28.07.2016	93	73	15	745	84
	53				
	91				
	56				
29.07.2016	6	22	20	743	57
	16				
	3				
	23				
	35				
	27				
	36				
	28				
2.09.2016	13	15	11	755	84
	16				
	9				
	12				
	23				
6.09.2016	46	63	21	748	82
	80				
8.09.2016	19	43	18	747	68
	67				

Продолжение таблицы А3

Дата	ППР «НК», мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	ППР НК, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	Р, мм.рт.ст	W%
12.09.2016	34	28	16	748	62
	21				
15.09.2016	45	32	11	755	95
	18				
19.09.2016	54	38	22	749	46
	22				

Таблица А4 – Значения ППР, измеренной методом НК, и параметры атмосферных условий – температура, влажность и давление атмосферного воздуха, количество осадков, 2017 г.

Дата	Время	ППР, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	W%	Р, мм.рт.ст	Осадки, мм
10.05.2017	12:50	25	15,9	22	756	0
10.05.2017	13:00	10	16	24	756	0
10.05.2017	14:47	22	21	21	755	0
10.05.2017	15:05	10	13	48	755	0
11.05.2017	15:10	7	15,6	71	741	0
11.05.2017	15:20	11	15,1	79	741	0
12.05.2017	13:10	18	22,4	61	749	0
12.05.2017	13:18	5	18,3	64	749	0
12.05.2017	13:30	8	10,6	72	749	0
12.05.2017	15:56	2	28,2	44	749	0,1
12.05.2017	16:03	5	27,1	46	749	0,1
15.05.2017	9:58	11	17,4	53	750	0
15.05.2017	10:06	29	14,8	56	750	0
15.05.2017	10:14	8	15,6	56	750	0
16.05.2017	10:10	13	14,3	38	749	0
16.05.2017	10:19	21	13,8	39	749	0
16.05.2017	10:27	16	14,4	39	749	0
16.05.2017	13:02	16	14,5	34	749	0
16.05.2017	13:11	17	15,8	36	749	0
16.05.2017	13:19	12	15,4	35	749	0
16.05.2017	15:01	12	19,1	34	748	0
16.05.2017	15:09	2	19,4	39	748	0
16.05.2017	15:17	7	18,3	43	748	0
17.05.2017	12:25	41	3,6	69	750	1,2
17.05.2017	12:32	14	3,4	71	750	1,2
17.05.2017	12:40	27	3,6	79	750	1,2
17.05.2017	14:44	22	8,5	64	751	0,1

Продолжение таблицы А4

Дата	Время	ППР, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Т°С	W%	Р, мм.рт.ст	Осадки, мм
17.05.2017	14:51	7	7,8	71	751	0,1
17.05.2017	15:01	28	7,9	72	751	0,1
18.05.2017	11:15	22	10,5	32	758	0
18.05.2017	11:24	9	9,7	34	758	0
18.05.2017	12:41	13	11,6	53	758	0
18.05.2017	12:50	13	10,9	65	758	0
18.05.2017	12:57	15	10,6	64	758	0
18.05.2017	15:05	20	14,9	29	758	0
18.05.2017	15:16	17	13,6	42	758	0
18.05.2017	15:23	33	14	42	758	0
19.05.2017	13:45	14	19,5	20	754	0
20.05.2017	10:45	13	13,9	80	752	0
20.05.2017	10:54	20	13,9	84	752	0
20.05.2017	11:02	22	13,8	87	752	0
20.05.2017	12:56	14	13,8	80	750	0,2
20.05.2017	13:04	13	12,9	81	750	0,2
20.05.2017	13:13	24	12	96	750	0,2
22.05.2017	13:36	15	21,1	70	747	0
22.05.2017	13:44	17	21,3	74	747	0
22.05.2017	13:55	19	21,4	73	747	0
24.05.2017	10:32	17	20,9	70	738	0
24.05.2017	10:40	14	21,6	72	738	0
24.05.2017	10:48	11	22,8	65	738	0
25.05.2017	16:30	24	19	59	746	0
25.05.2017	16:38	14	18,6	63	746	0
25.05.2017	16:46	13	17,3	63	746	0
26.05.2017	11:25	12	11,5	64	752	0,2
26.05.2017	11:33	9	9,6	79	752	0,2
26.05.2017	11:41	5	9,9	87	752	0,2
27.05.2017	13:43	14	22,1	44	756	0
27.05.2017	13:51	16	18,9	46	756	0
27.05.2017	13:59	24	21,2	50	756	0

Таблица А5 – Физические свойства породы – содержание радия A_{Ra} , плотность сухой породы ρ_d и пористость η , 2014 г.

№ точки	A_{Ra} , Бк/кг	ρ_d , г/см ³	η , о.е.
1	27,7	1,47	0,41
2	28,2	1,43	0,43
3	23,1	1,33	0,47
4	26,6	1,5	0,4
5	23,3	1,29	0,48
6	26,5	1,33	0,47
7	25,3	1,5	0,4
8	27,5	1,42	0,43
9	28,9	1,49	0,4
10	29,9	1,3	0,48
11	23,1	1,45	0,42
12	28,1	1,4	0,44
Среднее	26,5	1,4	0,43

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА, КОЛИЧЕСТВО ОСАДКОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВЛАЖНОСТИ ПОРОД, 2018 Г**

Таблица Б1 – Плотность потока радона, количество осадков и характеристики влажности суглинков, 2018г

Дата	ППР, мБк·м ⁻² с ⁻¹	Кол-во осадков, мм	m(г)	$\rho(\text{г} \cdot \text{м}^{-3})$	m _d (г)	$\rho_d(\text{г} \cdot \text{м}^{-3})$	$\Delta m(\text{г})$	$\omega(\%)$	$\omega_a(\%)$	$\omega_v(\%)$	G	S _r
14.05.2018	35	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	25		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	33		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15.05.2018	24	3,8	89,19	1,68	59,97	1,13	29,22	32,76	48,72	59,44	1,17	1,08
	41		—	—	—	—	—	30,93	44,89	54,76	1,07	
	69		95,16	1,79	67,47	1,27	27,69	29,10	41,04	50,07	0,98	1,02
16.05.2018	57	0	81,65	1,53	62,41	1,17	19,24	23,56	30,82	37,60	0,74	0,71
	71		—	—	—	—	—	23,80	31,23	38,11	0,75	
	52		81,72	1,54	62,07	1,17	19,65	24,04	31,65	38,61	0,76	0,72
17.05.2018	41	6	100,46	1,89	68,40	1,29	32,06	31,91	46,87	57,18	1,12	1,18
	70		—	—	—	—	—	28,35	39,92	48,69	0,95	
	68		86,54	1,63	65,09	1,22	21,45	24,78	32,95	40,20	0,79	0,79
18.05.2018	55	0,2	100,88	1,90	70,14	1,32	30,74	30,47	43,83	53,47	1,05	1,13
	20		—	—	—	—	—	31,41	45,82	55,90	1,10	
	30		100,48	1,89	67,98	1,28	32,50	32,34	47,81	58,33	1,14	1,20
21.05.2018	22	0	83,797	1,58	64,39	1,21	19,41	23,16	30,14	36,77	0,72	0,72
	23		—	—	—	—	—	23,88	37,70	38,29	0,75	
	38		86,357	1,62	65,113	1,22	21,24	24,60	32,63	39,80	0,78	0,78
22.05.2018	30	0,7	100,357	1,89	67,5	1,27	32,86	32,74	48,68	59,39	1,16	1,21
	49		—	—	—	—	—	31,46	47,04	56,05	1,10	
	62		87,541	1,65	61,13	1,15	26,41	30,17	43,20	52,71	1,03	0,97

Продолжение таблицы Б1

[illegible]

Таблица Б2 – Плотность потока радона, количество осадков и характеристики влажности суглинистых сланцев, 2018 г

[illegible]

Таблица Б3 – Плотность потока радона, количество осадков и характеристики влажности белой глины, 2018 г.

[illegible]

Таблица Б4 – Количество измерений, средние значения естественной влажности (ω), абсолютной влажности (ω_a) объемной влажности (ω_v), коэффициента относительной влажности (G), коэффициента водонасыщения (S_r) и их коэффициенты вариации, 2018 г.

Характеристики влажности	Количество измерений	Диапазон	Среднее значение	Коэффициент вариации (%)
ω (%) на поверхности лессовидных суглинков	21	23 – 32	29	12
ω (%) на поверхности сланцев	13	22 – 26	23	4
ω (%) на поверхности глин	10	14 – 20	17	15
ω_a (%) на поверхности лессовидных суглинков	21	30 – 49	41	16
ω_a (%) на поверхности сланцев	13	28 – 35	30	6
ω_a (%) на поверхности глин	10	17 – 25	20	18
ω_v (%) на поверхности лессовидных суглинков	21	37 – 59	49	17
ω_v (%) на поверхности сланцев	13	46 – 58	49	6
ω_v (%) на поверхности глин	10	23 – 35	28	18
G на поверхности лессовидных суглинков	21	0,72 – 1,17	0,96	17
G на поверхности сланцев	13	1,25 – 1,57	1,33	6
G на поверхности глин	10	1,19 – 1,83	1,5	18
S_r на поверхности лессовидных суглинков	14	0.71 – 1.21	0.96	19
S_r на поверхности сланцев	11	1.28 – 1.53	1.34	5
S_r на поверхности глин	8	1,24 – 1,79	1,54	16

**ПРИЛОЖЕНИЕ С. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ЗНАЧЕНИЙ ПЛОТНОСТИ
ПОТОКА РАДОНА ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНОСТИ**

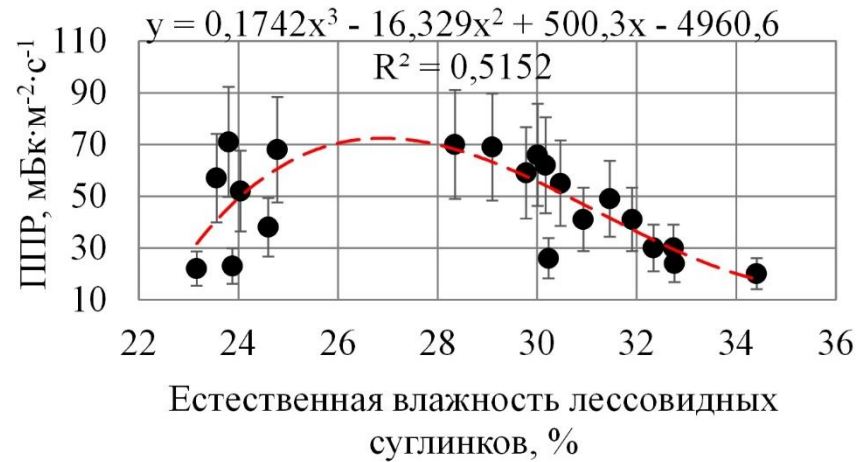


Рисунок С1 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от естественной влажности лессовидных суглинков

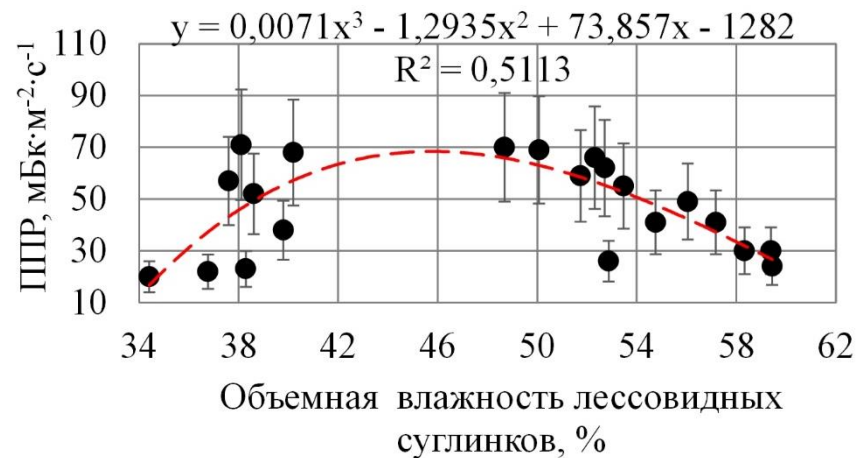


Рисунок С2 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от объемной влажности лессовидных суглинков

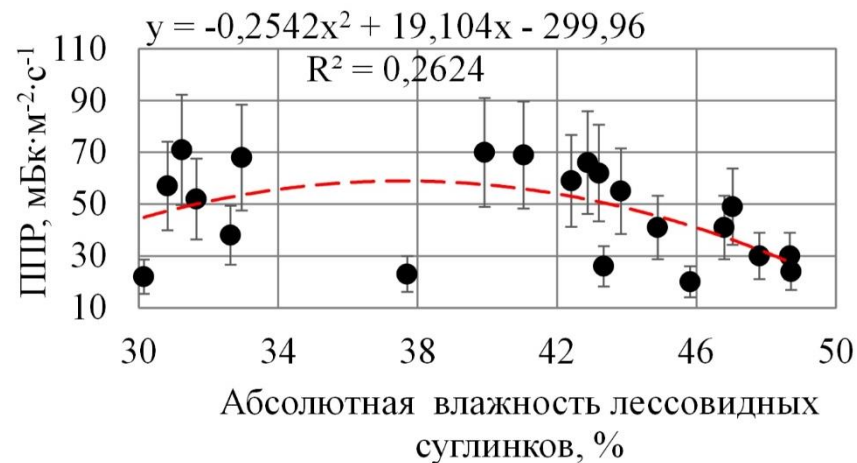


Рисунок С3 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от абсолютной влажности лессовидных суглинков

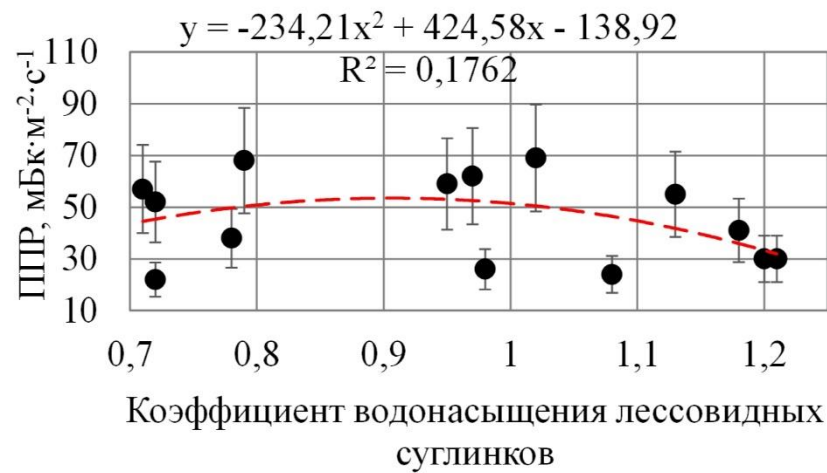


Рисунок С4 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от коэффициента водонасыщения лессовидных суглинков

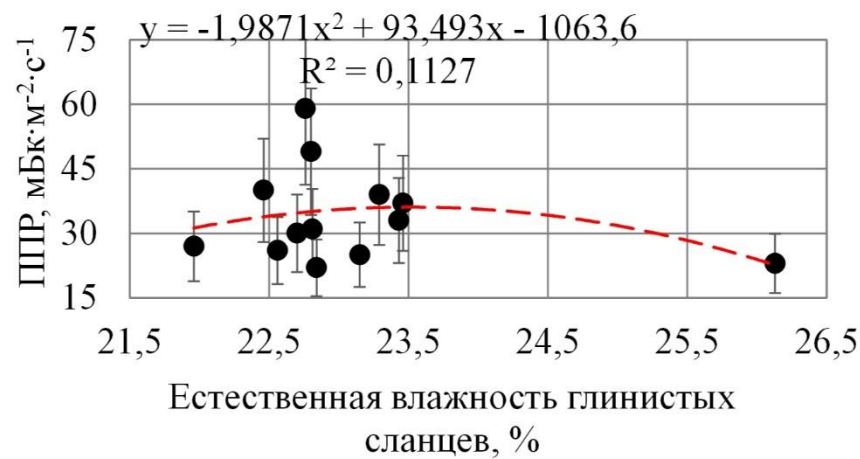


Рисунок С5 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от естественной влажности глинистых сланцев

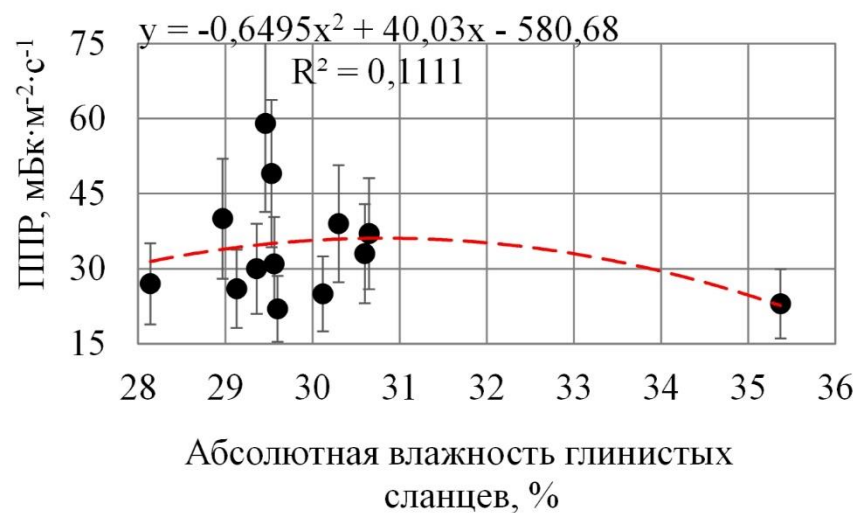


Рисунок С6 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от абсолютной влажности глинистых сланцев

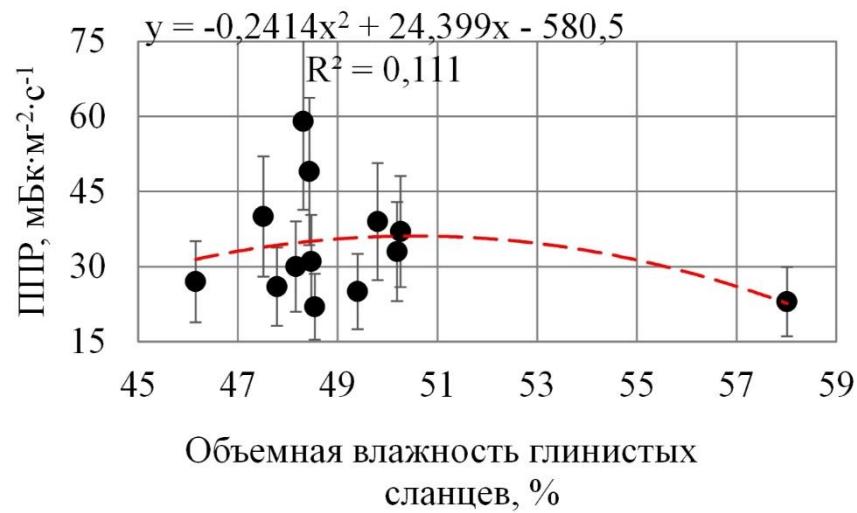


Рисунок С7 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от объемной влажности глинистых сланцев

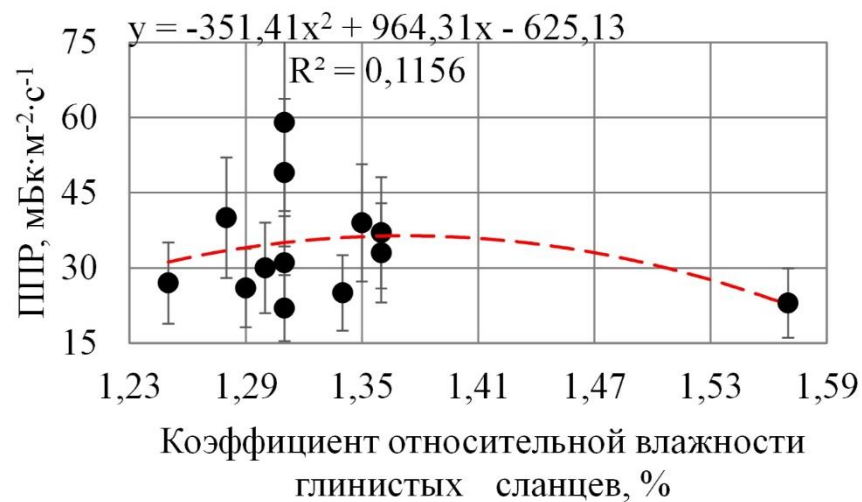


Рисунок С8 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от коэффициента относительной влажности глинистых сланцев

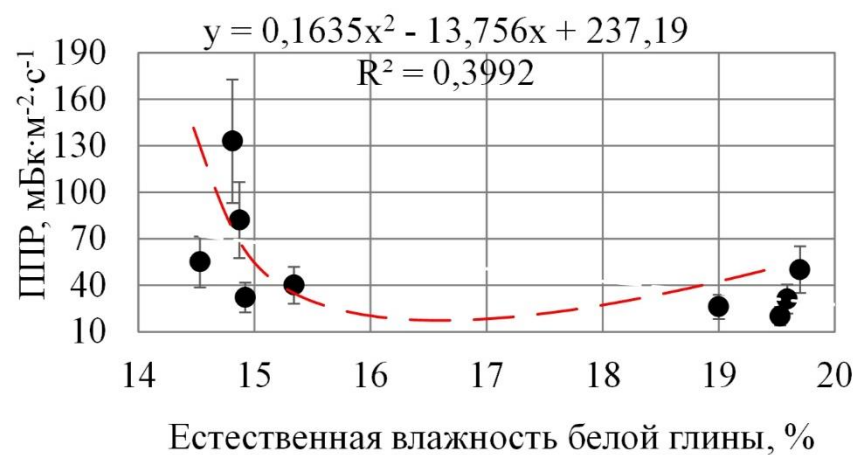


Рисунок С9 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от естественной влажности белой глины

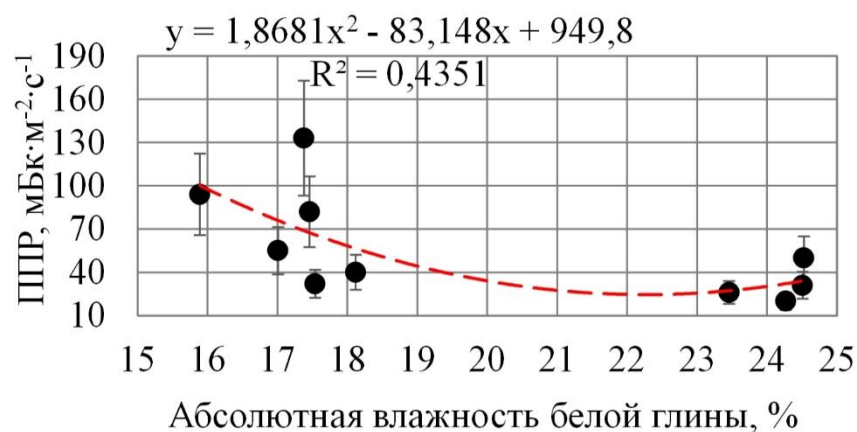


Рисунок С10 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от абсолютной влажности белой глины

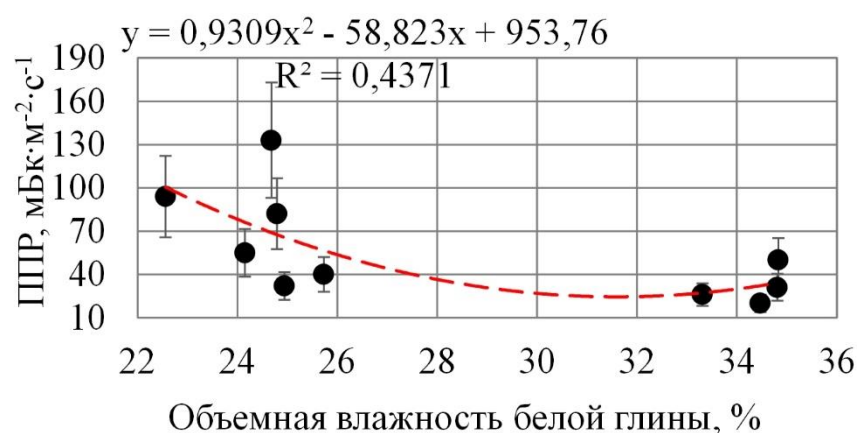


Рисунок С11 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от объемной влажности белой глины

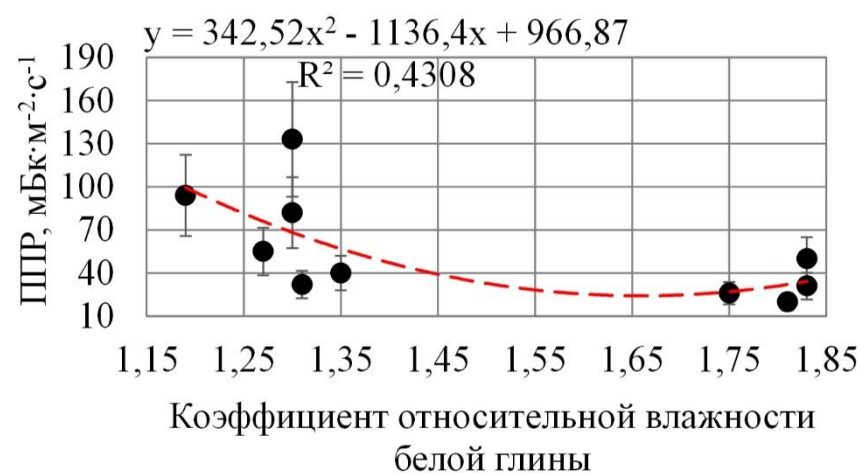


Рисунок С12 – Результаты регрессионного анализа значений ППР, полученных методом НК (2018 г.) от коэффициента относительной влажности белой глины

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА, ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ, ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ПОРОДЫ, 2020 г.**

Таблица Д1 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P , мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка легкого песчанистого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 7, 2020г.

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η о.е.	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.2020	72,99	14,1	0,164	0,18	0,3	0,594	0,3	1,28	22	24	59	50	758,45	758,45
16.06.2020	61,15	16	0,19	0,187	0,29	0,637	0,29	1,17	15	16	52	49	761,49	761,75
17.06.2020	49,41	15,7	0,186	0,163	0,24	0,675	0,24	1,04	15	17	47	51	758,45	757,68
16.07.2020	15,22	15,7	0,186	0,189	0,3	0,623	0,3	1,21	20	21	55	50	754	753
17.07.2020	34,43	18,9	0,233	0,206	0,31	0,671	0,31	1,09	21	22	55	50	750,8	750,8
22.07.2020	37,82	18,5	0,227	0,189	0,27	0,692	0,27	1,02	17	18	70	70	744,1	744,1
23.07.2020	43,05	16,6	0,2	0,168	0,24	0,687	0,24	1,01	15	16	55	50	745,6	745,6
27.07.2020	36,85	16,9	0,203	0,16	0,23	0,707	0,23	0,95	17	18	65	55	747,1	747,1
28.07.2020	33,97	19	0,234	0,218	0,33	0,654	0,33	1,15	18	20	65	60	746,3	746,3
29.07.2020	86,9	13,2	0,153	0,139	0,21	0,662	0,21	1,05	21	21	65	65	743,3	743,3
01.08.2020	53,99	16,8	0,203	0,195	0,3	0,642	0,3	1,16	20	22	60	50	750,8	750,8
04.08.2020	50,72	20,3	0,254	0,274	0,46	0,601	0,46	1,35	25	26	50	40	750,8	750,1
05.08.2020	46,49	17,3	0,209	0,196	0,3	0,653	0,3	1,13	24	26	50	40	750,1	750,1
06.08.2020	61,89	13,3	0,153	0,163	0,27	0,605	0,27	1,23	24	25	50	45	749,3	749,3

Таблица Д2 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка легкого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 8, 2020г.

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.2020	11,28	13,4	0,154	0,13	0,19	0,69	0,19	0,97	22	24	59	50	758,45	758,45
16:06:2020	60,6	7,3	0,079	0,057	0,08	0,735	0,08	0,78	15	16	52	49	761,49	761,75
17.06.2020	47,52	7,8	0,085	0,084	0,13	0,635	0,13	1,07	18	18	47	50	758,45	757,68
26.06.2020	21,14	4,7	0,049	0,058	0,1	0,563	0,1	1,24	27	27	40	41	753,11	752,86
16.07.2020	12,46	5,7	0,061	0,068	0,12	0,591	0,11	1,18	20	21	55	50	754	753
17.07.2020	39,69	5,7	0,06	0,058	0,09	0,642	0,09	1,03	21	22	55	50	750,8	750,8
22.07.2020	16,1	9,3	0,102	0,107	0,17	0,614	0,17	1,15	17	18	70	65	744,1	744,1
23.07.2020	28,05	6,2	0,066	0,058	0,09	0,673	0,09	0,94	15	16	55	50	745,6	745,6
27.07.2020	42,84	5,6	0,059	0,06	0,1	0,629	0,09	1,07	17	18	65	55	747,1	747,1
28.07.2020	64,23	6,1	0,065	0,071	0,12	0,603	0,12	1,15	18	21	65	55	746,3	746,3
29.07.2020	55,17	4,3	0,045	0,043	0,07	0,644	0,07	1,01	21	21	65	65	743,3	743,3
01.08:2020	47,17	11,8	0,134	0,142	0,23	0,61	0,23	1,2	21	22	55	50	750,8	750,8
04.08.2020	9,99	5,1	0,054	0,061	0,1	0,581	0,11	1,2	25	26	50	40	750,8	750,1
05.08.2020	6,29	3,9	0,041	0,042	0,07	0,623	0,07	1,06	24	26	50	40	750,1	750,1
06.08.2020	5,32	4,4	0,046	0,042	0,06	0,665	0,06	0,95	24	25	50	45	749,3	748,6

Таблица ДЗ – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства супеси песчанистой – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 9, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.2020	73,84	17,6	0,214	0,15	0,2	0,737	0,2	0,85	22	24	59	50	758,45	758,45
16.06.2020	49,87	2,8	0,029	0,034	0,06	0,56	0,06	1,21	15	16	52	49	761,49	761,75
17.06.2020	54,19	1,9	0,019	0,018	0,03	0,66	0,03	0,92	18	18	47	50	758,45	757,68
26.06.2020	54,34	3,7	0,038	0,036	0,06	0,646	0,06	0,98	27	27	40	41	753,11	752,86
16.07.2020	47,68	10,8	0,121	0,084	0,11	0,74	0,11	0,78	20	21	55	50	754	753
17.07.2020	43,29	9,2	0,101	0,061	0,08	0,774	0,08	0,66	21	22	55	50	750,8	750,8
22.07.2020	54,62	16,7	0,2	0,145	0,2	0,728	0,2	0,87	17	18	70	65	744,1	744,1
23.07.2020	7,23	10,5	0,117	0,071	0,09	0,77	0,09	0,68	15	16	55	50	745,6	745,6
27.07.2020	39,58	6,7	0,072	0,046	0,06	0,761	0,06	0,68	17	18	65	55	747,1	747,1
28.07.2020	64,8	4,9	0,052	0,04	0,06	0,705	0,06	0,82	18	21	65	55	746,3	746,3
29.07.2020	90,07	4,8	0,05	0,038	0,05	0,718	0,05	0,79	21	21	65	65	743,3	743,3
01.08.2020	56,48	13,6	0,157	0,136	0,2	0,676	0,2	1	21	22	55	50	750,8	750,8
04.08.2020	65,19	2	0,02	0,023	0,04	0,574	0,04	1,16	25	26	50	40	750,8	750,1
05.08.2020	22,37	2	0,021	0,018	0,03	0,681	0,03	0,87	24	26	50	40	750,1	750,1
06.08.2020	75,71	4,6	0,048	0,035	0,05	0,725	0,05	0,77	24	26	50	40	749,3	748,6

Таблица Д4 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка тяжелого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 10, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{гр}\cdot\text{см}^3$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.2020	15,76	21,1	0,267	0,221	0,32	0,697	0,32	1,05	22	24	59	50	758,45	758,45
16.06.2020	7,66	21,1	0,268	0,251	0,38	0,657	0,38	1,19	15	16	52	49	761,49	761,75
17.06.2020	11,74	21,1	0,267	0,282	0,46	0,615	0,46	1,34	18	18	47	50	758,45	757,68
26.06.2020	18,01	19,6	0,244	0,399	0,99	0,405	0,98	2,03	27	27	40	41	753,11	752,48
16.07.2020	9,53	20,7	0,261	0,298	0,51	0,585	0,51	1,44	20	21	55	50	754	753
17.07.2020	12,5	20,3	0,255	0,256	0,4	0,633	0,4	1,26	22	22	50	50	750,8	750,8
22.07.2020	20,29	21	0,266	0,305	0,52	0,583	0,52	1,45	17	18	70	62	744,1	744,1
27.07.2020	1,9	20,3	0,254	0,255	0,4	0,633	0,4	1,26	15	16	55	50	754,6	745,6
28.07.2020	8,27	20,7	0,262	0,288	0,48	0,599	0,48	1,39	17	18	65	50	747,1	747,1
29.07.2020	8,54	20	0,251	0,279	0,47	0,595	0,47	1,39	18	21	65	55	746,3	746,3
01.08.2020	11,29	18,7	0,23	0,243	0,4	0,614	0,4	1,3	21	21	65	65	743,3	743,3
04.08.2020	1,13	19,8	0,247	0,279	0,48	0,586	0,48	1,41	21	22	55	50	750,8	750,8
05.08.2020	1,37	20	0,249	0,285	0,49	0,583	0,49	1,43	25	26	45	40	750,1	750,1
06.08.2020	2,42	20	0,25	0,286	0,49	0,584	0,49	1,43	24	26	50	40	750,1	750,1

Таблица Д5 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка тяжелого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 11, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.20	42,25	5,2	0,055	0,043	0,06	0,714	0,06	0,83	22	24	59	50	758,45	758,45
16.06.20	23,28	6,2	0,066	0,046	0,06	0,746	0,06	0,74	15	16	52	49	761,49	761,75
17.06.20	27,55	4,9	0,051	0,045	0,07	0,684	0,07	0,91	18	18	47	50	758,45	757,68
17.07.20	32,92	6,2	0,066	0,057	0,08	0,685	0,08	0,92	22	22	50	50	750,8	750,8
22.07.20	42,31	8,2	0,089	0,087	0,14	0,64	0,14	1,07	17	18	70	65	744,1	744,1
23.07.20	46,1	8	0,087	0,081	0,12	0,659	0,12	1,01	15	16	55	50	754,6	745,6
25.07.20	33,46	5,5	0,058	0,058	0,09	0,634	0,09	1,06	17	18	65	65	744,8	744,8
27.07.20	54	4,4	0,046	0,043	0,07	0,658	0,07	0,98	17	18	65	50	747,1	747,1
28.07.20	52,43	3,4	0,035	0,034	0,05	0,649	0,05	1	18	21	65	55	746,3	746,3
29.07.20	72,84	3,6	0,038	0,036	0,06	0,647	0,06	1	21	21	65	65	743,3	743,3
01.08.20	35,98	9,5	0,105	0,089	0,13	0,69	0,13	0,94	21	22	55	50	750,8	750,8
04.08.20	41,02	3,9	0,04	0,039	0,06	0,643	0,06	1,02	25	26	45	40	750,1	750,1
05.08.20	11,06	2,9	0,03	0,03	0,05	0,637	0,05	1,03	24	26	50	40	750,1	750,1
06.08.20	57,11	2,1	0,022	0,022	0,03	0,636	0,03	1,02	24	26	50	40	749,3	748,6
11.08.20	35,43	2,1	0,022	0,019	0,03	0,685	0,03	0,88	26	28	45	40	740,3	740,3

Таблица Д6 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка легкого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 12, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.2020	42,25	17,9	0,218	0,174	0,25	0,707	0,25	0,97	22	24	59	50	758,45	758,45
16.06.2020	26,84	18,4	0,226	0,195	0,29	0,682	0,29	1,06	15	16	52	49	761,49	761,75
17.06.2020	13,49	19,1	0,236	0,233	0,37	0,636	0,37	1,22	18	18	47	50	758,45	757,68
16.07.2020	14,87	17,6	0,214	0,257	0,46	0,557	0,46	1,46	20	21	55	50	754	753
17.07.2020	33,83	15,8	0,188	0,188	0,3	0,63	0,3	1,19	22	22	50	50	750,8	750,8
22.07.2020	19,4	18,5	0,227	0,26	0,45	0,575	0,45	1,41	17	18	70	65	744,1	744,1
23.07.2020	24,43	18,7	0,229	0,248	0,41	0,602	0,41	1,33	15	16	55	50	754,6	745,6
25.07.2020	13,65	17,3	0,21	0,189	0,28	0,667	0,28	1,09	17	18	65	65	744,8	744,8
27.07.2020	33,11	16,6	0,199	0,205	0,33	0,623	0,33	1,23	17	18	65	50	747,1	747,1
29.07.2020	22,4	16,8	0,202	0,222	0,37	0,595	0,37	1,32	21	21	65	65	743,3	743,3
01.08.2020	8,04	16,3	0,195	0,223	0,39	0,578	0,39	1,37	21	22	55	50	750,8	750,8
04.08.2020	10,99	16,9	0,203	0,242	0,43	0,561	0,43	1,43	25	26	45	40	750,1	750,1
05.08.2020	6,71	18,1	0,22	0,24	0,4	0,597	0,4	1,33	24	26	50	40	750,1	750,1
06.08.2020	30,13	14,1	0,164	0,167	0,27	0,627	0,27	1,18	24	26	50	40	749,3	748,6
11.08.2020	0,7	17,6	0,214	0,229	0,38	0,604	0,38	1,3	26	28	45	40	740,3	740,3

Таблица Д7 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства крупнообломочного галечника – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 13, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12.06.2020	19,07	0,4	0,004	0,003	0,004	0,745	0,004	0,68	22	24	59	50	758,45	758,45
16.06.2020	29,15	3	0,031	0,03	0,05	0,639	0,05	0,99	16	16	50	50	761,49	761,49
17.06.2020	11,34	1,1	0,011	0,015	0,03	0,483	0,03	1,39	18	18	47	51	758,45	757,68
16.07.2020	25,44	0,6	0,006	0,008	0,02	0,449	0,02	1,47	20	21	55	50	754	753
17.07.2020	8,29	0,4	0,004	0,005	0,01	0,535	0,01	1,24	22	22	50	50	750,8	750,8
22.07.2020	28,22	1,4	0,014	0,019	0,04	0,507	0,04	1,33	17	18	70	65	744,1	744,1
23.07.2020	20,3	0,9	0,009	0,009	0,01	0,617	0,02	1,03	15	16	55	45	745,6	745,6
25.07.2020	35,67	0,8	0,008	0,011	0,02	0,472	0,02	1,41	17	18	65	65	744,8	744,8
27.07.2020	32,44	0,5	0,005	0,005	0,01	0,567	0,01	1,16	17	18	65	50	747,1	747,1
28.07.2020	22,31	0,6	0,006	0,009	0,02	0,45	0,02	1,47	20	21	60	55	746,3	746,3
01.08.2020	9,84	0,6	0,006	0,008	0,02	0,496	0,02	1,35	21	22	55	50	750,8	750,8
04.08.2002	0,68	0,8	0,008	0,011	0,02	0,463	0,02	1,44	25	26	45	40	750,1	750,1
05.08.2020	22,14	0,8	0,008	0,011	0,02	0,492	0,02	1,36	25	26	40	40	750,1	750,1
06.08.2020	17,14	0,7	0,007	0,009	0,02	0,5	0,02	1,34	24	26	50	40	749,3	748,6

Таблица Д8 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка легкого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 14, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
16.06.2020	23,84	22,6	0,292	0,208	0,28	0,732	0,28	0,92	16	16	50	50	761,49	761,49
17.06.2020	35,72	11,8	0,134	0,14	0,23	0,605	0,23	1,19	18	18	47	51	758,45	757,68
16.07.2020	28,42	9,4	0,103	0,115	0,2	0,582	0,2	1,23	20	21	55	50	754	753
22.07.2020	18,1	11,4	0,129	0,116	0,18	0,661	0,18	1,02	17	18	70	65	744,1	744,1
23.07.2020	20,49	9,1	0,1	0,091	0,14	0,659	0,14	1	15	16	55	45	745,6	745,6
25.07.2020	33,51	9,7	0,108	0,12	0,21	0,58	0,21	1,24	17	18	65	65	744,8	744,8
28.07.2020	25,37	8,6	0,094	0,095	0,15	0,62	0,15	1,11	20	21	60	55	746,3	746,3
29.07.2020	23,95	8,1	0,088	0,097	0,17	0,584	0,17	1,2	21	21	65	65	743,3	743,3
01.08.2020	23,61	11,9	0,135	0,147	0,25	0,588	0,25	1,24	21	22	55	50	750,8	750,8
05.08.2020	16,47	9,1	0,1	0,097	0,15	0,635	0,15	1,07	25	26	40	40	750,1	750,1
06.08.2020	27,74	7	0,076	0,072	0,11	0,644	0,11	1,02	24	26	50	40	749,3	748,6
11.08.2020	25,31	7,1	0,077	0,063	0,09	0,688	0,09	0,89	26	28	45	40	740,3	740,3

Таблица Д9 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка тяжелого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 15, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12:08:2020	62,11	22,1	0,283	0,185	0,25	0,753	0,25	0,84	22	24	70	65	739,6	739,6
13.08.2020	23,56	22,1	0,284	0,192	0,26	0,746	0,26	0,87	24	25	55	50	739,6	739,6
17:08:2020	46,63	24,5	0,325	0,218	0,29	0,748	0,29	0,89	15	17	85	80	747,1	746,3
18.08.2020	22,29	23,7	0,311	0,183	0,24	0,778	0,23	0,77	23	25	60	50	739,6	739,6
21.08.2020	26,46	18,6	0,229	0,184	0,26	0,696	0,26	0,99	15	18	65	50	743,3	742,6
24.08.2020	32,82	20,2	0,253	0,194	0,27	0,71	0,27	0,96	18	20	70	65	742,6	741,8
25.08.2020	33,01	20,5	0,257	0,186	0,26	0,728	0,26	0,91	18	19	70	65	741,1	741,1
26.08.2020	13,47	19,4	0,241	0,173	0,24	0,732	0,24	0,89	13	16	80	70	745,6	746,3
28.08.2020	22,07	21,1	0,268	0,203	0,28	0,716	0,28	0,96	13	17	85	65	749,3	750
31.08.2020	20,73	24	0,316	0,202	0,27	0,761	0,27	0,84	21	23	55	50	753	752
09.09.2020	16,04	31,2	0,453	0,315	0,43	0,737	0,43	1,01	6	8	95	90	751,6	751,6
21.08.2020	61,71	16,1	0,191	0,167	0,25	0,671	0,25	1,04	15	18	65	50	743,3	742,6
24.08.2020	44,39	15,8	0,188	0,172	0,26	0,656	0,26	1,09	18	20	70	60	742,6	741,8
25.08.2020	38,28	16	0,191	0,178	0,27	0,649	0,27	1,11	18	19	70	65	741,1	741,1
26.08.2020	24,53	17,2	0,207	0,168	0,24	0,694	0,24	0,98	13	16	80	70	745,6	746,3
28.08.2020	32,56	14,5	0,169	0,143	0,21	0,682	0,21	0,99	13	17	85	65	749,3	750
31.08.2020	29,52	17,8	0,216	0,178	0,26	0,692	0,26	1	21	23	55	50	753	752

Таблица Д10 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства крупнообломочной гравийной породы – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 16, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
12:08:2020	34,34	6	0,063	0,073	0,13	0,567	0,13	1,23	22	24	70	65	739,6	739,6
13.08.2020	27,74	9,8	0,109	0,069	0,09	0,763	0,09	0,7	24	25	55	50	739,6	739,6
17.08.2020	9,91	2,2	0,022	0,037	0,1	0,379	0,1	1,69	15	17	85	80	747,1	746,3
18.08.2020	27,8	1,1	0,011	0,016	0,03	0,468	0,03	1,43	23	25	60	50	739,6	739,6
21.08.2020	19,32	1,6	0,016	0,022	0,04	0,491	0,04	1,37	15	18	65	50	743,3	742,6
24.08.2020	24,17	1,2	0,012	0,016	0,03	0,488	0,03	1,38	18	20	70	65	742,6	741,8
25.08.2020	30,72	1,1	0,011	0,013	0,02	0,523	0,03	1,28	18	19	70	65	741,1	741,1
26.08.2020	22,03	1	0,01	0,013	0,03	0,478	0,03	1,4	13	17	80	60	745,6	746,3
28.08.2020	21,56	2,1	0,021	0,026	0,05	0,539	0,05	1,25	15	17	80	65	750	750
31.08.2020	10,16	3,4	0,035	0,046	0,09	0,509	0,09	1,35	22	23	50	50	752	752
09.09.2020	8,01	5,8	0,062	0,074	0,13	0,549	0,13	1,27	6	8	95	90	751,6	751,6
26.08.2020	38,34	1,9	0,02	0,026	0,05	0,506	0,05	1,34	13	17	80	65	745,6	746,3
28.08.2020	29,25	3	0,031	0,042	0,09	0,486	0,09	1,41	15	17	80	65	750	750
31.08.2020	24,28	3,7	0,039	0,049	0,09	0,526	0,09	1,31	22	23	50	50	752	752
09.09.2020	5,84	3,9	0,041	0,054	0,11	0,503	0,11	1,38	6	8	95	90	751,6	751,6

Таблица Д11 – Значения ППР, измеренной методом УА, параметры атмосферы на момент установки и снятия накопительной камеры – температуру $T^{\circ}\text{C}$, давление P мм.рт.ст, влажность $W\%$ атмосферного воздуха, а также геофизические свойства суглинка легкого пылеватого – естественная влажность (ω), абсолютная влажность (ω_a), объемная влажность (ω_v), пористость η , плотность ρ_d , коэффициент влажности G , коэффициент водонасыщения S_r на площадке 17, 2020г

Дата	ППР, $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	ω , %	ω_a , %	ω_v , %	G	η , отн.ед	S_r	ρ_d , $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	T_2 , $^{\circ}\text{C}$	W_1 , %	W_2 , %	P_1 , мм.рт.ст.	P_2 , мм.рт.ст.
13.08.2020	11,85	8,9	0,097	0,098	0,16	0,619	0,16	1,11	24	25	55	50	739,6	739,9
17.08.2020	21,46	16,7	0,2	0,219	0,37	0,589	0,37	1,31	17	19	80	70	746,3	746,3
18.08.2020	19,93	14,4	0,168	0,188	0,32	0,579	0,32	1,31	23	25	60	50	739,6	739,6
21.08.2020	19,95	12,6	0,144	0,144	0,23	0,622	0,23	1,15	17	18	60	50	743,3	742,6
24.08.2020	17,02	9,7	0,107	0,122	0,21	0,573	0,21	1,26	18	20	70	65	742,6	741,8
25.08.2020	15,63	8,6	0,094	0,102	0,17	0,593	0,17	1,19	18	20	70	60	741,1	740,3
26.08.2020	15,75	7,3	0,079	0,069	0,1	0,672	0,1	0,94	13	17	80	65	745,6	746,3
28.08.2020	11,59	9,3	0,103	0,118	0,21	0,571	0,21	1,26	15	18	80	60	750	750
31.08.2020	18,85	9,9	0,109	0,129	0,23	0,554	0,23	1,31	22	23	50	50	752	752
25.08.2020	20,55	10,7	0,119	0,143	0,26	0,548	0,26	1,34	18	20	70	60	741,1	740,3
26.08.2020	13,95	12,4	0,142	0,163	0,29	0,57	0,29	1,31	13	17	80	65	745,6	746,3
28.08.2020	4,66	11,9	0,135	0,146	0,25	0,594	0,25	1,23	15	18	80	60	750	750
31.08.2020	14,27	12	0,137	0,147	0,25	0,595	0,25	1,22	22	23	50	50	752	752