

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА  
АГЕНТСТВО ПО ХИМИЧЕСКОЙ, БИОЛОГИЧЕСКОЙ,  
РАДИАЦИОННОЙ И ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

**УДК: 504.064:504.064.75 (575.3)**

*На правах рукописи*

**ББК: 20.18**

**М – 84**



**МУРОДЗОДА ШОХИН РУСТАМ**

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ  
БИОСРЕДЫ И МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ  
РЕГИОНОВ ТАДЖИКИСТАНА**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 2.9. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей  
среды (2.9.6. Экология)

**Научный руководитель:**

доктор медицинских наук,  
профессор, член-корреспондент

НАН Таджикистана

**Рахимов Исматулло**

**Фатхуллоевич**

Душанбе – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Перечень сокращений и условных обозначений.....	4
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ</b> .....	<b>7</b>
<b>ГЛАВА 1. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН (литературный обзор)</b> .....	<b>13</b>
1.1. Радиоактивные хвостохранилища уранового производства в Таджикистане: история, риск, рекомендации.....	13
1.1.1. История формирования поля радиоактивного загрязнения на территории северного Таджикистана.....	16
1.1.2. Радиэкологический риск в зоне влияния радиоактивных хвостохранилищ.....	25
1.1.3. Меры по улучшению радиэкологической обстановки в зоне влияния хвостохранилищ.....	36
1.2. Радиационная ситуация в Республике Таджикистан.....	41
1.2.1. Общая радиационная ситуация.....	41
1.2.2. Распределение радионуклидов в почвах и водах Таджикистана.....	47
1.2.3. Радионуклиды в воздушном бассейне Таджикистана.....	52
<b>ГЛАВА 2. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В БИОСФЕРЕ ТАДЖИКИСТАНА</b> .....	<b>56</b>
2.1. Изучение содержание природных радионуклидов в почвах юго-западных и восточных районов Республики Таджикистан.....	56
2.2. Содержание изотопа цезия-137 в почвенном покрове центрального и южного Таджикистана.....	63
2.3. Экологическое воздействие изотопа цезия-137 на окружающую среду Таджикистана.....	72
2.4. Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения цезия-137 в различных районах Таджикистана.....	78

2.5. Мониторинг радоновой активности в дошкольных и школьных зданиях юга Таджикистана.....	83
<b>ГЛАВА 3. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И КУЛЬТУРНО-ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТАДЖИКИСТАНА.....</b>	<b>98</b>
3.1. Радиоэкологический мониторинг минеральных руд Таджикистана.....	98
3.2. Радиоэкологический мониторинг на некоторых исторических и туристических объектах Таджикистана.....	103
3.2.1. Радиационное обследование древнего города Карон Дарвазского района Таджикистана.....	112
3.2.2. Радиационное обследование исторического объекта «Тахти Сангин», расположенного на территории Кабодиёнского района Таджикистана.....	121
3.2.3. Радиоэкологический мониторинг исторического объекта «Аджинатеппа» в районе Кушониён Таджикистана.....	126
<b>ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....</b>	<b>132</b>
4.1. Оценка радиационной ситуации в Таджикистане.....	132
4.2. Проблемы радиационной экологии в Республике Таджикистан.....	137
<b>Выводы.....</b>	<b>140</b>
<b>Рекомендации по практическому использованию результатов.....</b>	<b>140</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>142</b>
Список научных публикаций соискателя учёной степени по теме диссертации.....	160
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>165</b>

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ГРН	- Государственный регистрационный номер
МАГАТЭ	- Международное агентство по атомной энергии
МЭД	- Мощность экспозиционной дозы
ИИИ	- Источники ионизирующего излучения
СССР	- Союз Советских Социалистических Республик
ГП	- Государственное предприятие
ГУП	- Государственное унитарное предприятие
АЭС	- Атомная электростанция
ЭРОА	- Эквивалентная равновесная объёмная активность
НРБ	- Нормы радиационной безопасности
ГОСТ	- Государственный стандарт
ПОУ	- Пробоотборное устройство
МКРЗ	- Международная комиссия по радиологической защите
ЕРН	- Естественные радионуклиды
ДПР	- Дочерние продукты распада
ФБР	- Фабрика бедных руд
НТК	- научно-техническая конференция
ЖКХ	- Жилищной - коммунальное хозяйство

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность** и необходимость проведения исследований по данной проблеме. Вопросы, связанные с обеспечением радиоэкологической стабильности, приобретают особую значимость для Республики Таджикистан, учитывая наличие на её территории множества хранилищ радиоактивных отходов, оставшихся от уранового производства, активно развивавшегося в эпоху советской индустриализации. Эти техногенные объекты, сконцентрированные преимущественно в северных регионах страны, продолжают представлять собой потенциальный источник опасности как для здоровья населения, так и для состояния природной среды. Среди основных угроз – разрушение инженерных сооружений, предназначенных для удержания радиоактивных материалов, вымывание радионуклидов в поверхностные и подземные водные системы, а также распространение радиоактивных частиц с воздушными массами, что может привести к вторичному загрязнению обширных территорий и усугублению экологической ситуации. Радиационная обстановка в стране формируется не только под влиянием наследия уранодобывающей промышленности, но и в результате глобального переноса радионуклидов, таких как  $^{137}\text{Cs}$  и стронций-90, осевших в результате ядерных испытаний и аварий. Дополнительным фактором является природное присутствие радиоактивных элементов – урана, тория и радия – в почвах, горных породах и водоносных горизонтах. В ряде районов наблюдаются повышенные уровни радиации в источниках питьевой воды, в почвенном слое и в атмосфере. Особое внимание следует уделять систематическому радиационно-экологическому контролю на территории памятников культурного и исторического наследия, а также в районах природных месторождений, где фиксируются случаи превышения допустимого радиационного фона. Полученные данные имеют важное значение не только для защиты местных жителей и туристов, но и для формирования достоверной картины радиационной ситуации в масштабах всей республики.

**Степень изученности научной темы.** Степень разработанности рассматриваемой научной проблемы характеризуется проведением обзорного анализа и обобщением существующих научных исследований в области радиационной экологии. Вместе с тем следует отметить, что в условиях Республики Таджикистан методологические подходы и теоретические основы изучения данной проблемы на сегодняшний день остаются недостаточно сформированными и требуют дальнейшего углублённого научного осмысления и систематизации.

Теоретико-методологическую базу настоящего исследования составили труды отечественных и зарубежных учёных, посвящённые вопросам радиационной экологии радиационной безопасности и экологического мониторинга. В частности, в работе использованы научные исследования и публикации таких авторов, как Стегнар, П. [22], Reddy, R. G. [35], Башкин, В. Н. [37], Г. В. Лаврентьева, О. А. Мирзеабасов [38], Н. И. Беззубов, М. М. Юнусов [42], Цапалов, А. А. [47], Израэль, Ю. А. [50], Лазановский, И. Н. [51], А. М. Никанорова. [52], Кузин, А. М. [55], Платонов, А. П. [59] и других исследователей, внесших значительный вклад в развитие данного научного направления.

Особое значение для настоящей работы имеют исследования отечественных авторов, которые занимались радиационным мониторингом территорий, прилегающих к хвостохранилищам, изучением процессов миграции радионуклида цезия-137 в отдельных регионах Таджикистана, проведением радонового мониторинга в серверных районах страны, а также анализом пылевых и газовых загрязнений в аридных природных зонах, к числу таких исследователей относятся У.М. Мирсаидов [7, 33, 82, 83, 89], Х. Муртазаев [67, 70], И.У. Мирсаидов [28, 85, 95, 136], Х. И. Тиллобоев, [104-105], М. З. Ахмедов [97], Н. Хакимова [14, 96], Ф. А. Хамидов [81], Х.М. Назаров [41], Б.Б. Баротов [79-80], Дж.А. Саломов [91], Муминов, С. В. [75,77] и другие учёные.

**Связь работы с научными программами (проектами), темами;**  
Настоящее диссертационное исследование выполнено в рамках реализации ряда научных проектов и программ регионального масштаба, направленных на развитие радиоэкологических исследований и повышение уровня радиационной безопасности:

– *Физико-химические основы радиационной экологии*, включая разработку региональных радиоэкологических карт и организацию систематического радиационного мониторинга биосферы Таджикистана (ГРН 01115TJ00471, период реализации: 2015–2019 гг.).

– *Физико-химические принципы извлечения урановых концентратов из урансодержащих руд и техногенных отходов*, с целью повышения эффективности переработки и минимизации экологических рисков (ГРН 0120TJ01030, период реализации: 2020–2024 гг.).

– *Региональный проект технического сотрудничества МАГАТЭ RER9153 «Усиление регионального потенциала по контролю над долгосрочными рисками для населения за счёт радона в жилищах и на рабочих местах»*, (реализован в 2018–2020 гг.).

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Цель исследования:** радиоэкологическая оценка содержания, пространственного распределения и динамики как природных, так и антропогенных радионуклидов в пределах биосферы Республики Таджикистан. Определение уровней радиационного воздействия на ключевые компоненты окружающей среды – включая почвенные горизонты, водные ресурсы и атмосферный воздух – с целью выявления степени экологической нагрузки и потенциальных угроз для здоровья населения. Анализ факторов способствующих накоплению радионуклидов в различных природных средах, и оценка их биологического воздействия. Разработка комплекса научно обоснованных рекомендаций, направленных на минимизацию радиационных рисков, улучшение экологической ситуации и повышение уровня радиоэкологической безопасности на территории республики.

### **Задачи исследования:**

- провести анализ радиоэкологических проблем, связанных с радиоактивными хвостохранилищами уранового производства в Таджикистане, и оценит их влияние на окружающую среду и население;
- изучить современную радиационную обстановку в различных регионах республики с учётом природных и техногенных источников ионизирующего излучения;
- определить содержание и распределение природных радионуклидов (уран, торий, радий, калий-40) в почвах и водах Таджикистана;
- провести радиоэкологическую оценку накопления и распространения техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах различных районов и его воздействия на экосистемы;
- исследовать уровень ЭРОА радона в зданиях образовательных учреждений южных районов страны;
- провести радиоэкологический мониторинг минеральных руд, а также культурных, исторических и туристических объектов;

**Объекты исследования:** естественные и антропогенно трансформированные элементы биосферы, включая почвенные структуры, поверхностные и подземные водоёмы, атмосферный воздух, а также живые организмы, подвергающиеся воздействию радионуклидов. Территориальные зоны с различной степенью радиационного загрязнения.

**Тема исследования;** оценка процессов аккумуляции, пространственного распределения и трансформации концентраций радиоактивных элементов в различных компонентах биосферы. Изучение механизмов миграции радионуклидов в природной среде, разработка и совершенствование методологических подходов к оценке радиационной безопасности и экологическому контролю территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

### **Научная новизна исследования:**

- проведён радиоэкологический анализ состояния биосферы Республики Таджикистан, охватывающий ключевые природные компоненты – почвенный покров, водные ресурсы и атмосферный воздух. Оценка выполнена с учётом влияния как естественных, так и техногенных источников ионизирующего излучения, включая остаточное загрязнение, связанное с уранодобывающей деятельностью.
- выявлены характерные особенности пространственного распределения радионуклидов в почвах различных географических зон страны. Особое внимание уделено цезию-137, поступившему в результате глобальных атмосферных осадков.
- получена новая информация о концентрациях природных радионуклидов (включая уран, радий и торий) в водах, используемых для питьевого водоснабжения, а также в родниковых источниках, что обеспечивают более точную оценку радиационно-гигиенических рисков для населения.
- в южных регионах страны проведены измерения эффективной эквивалентной равновесной активности радона внутри зданий, предназначенных для пребывания детей – дошкольных учреждений и общеобразовательных школ.

**Теоретические основы исследования:** результаты проведённого исследования существенно расширяют представления о механизмах формирования, миграции и пространственного распределения как природных, так и техногенных радионуклидов в пределах биосферы Республики Таджикистан. Полученные результаты позволяют уточнить радиоэкологические параметры основных компонентов окружающей среды – почвенного покрова, гидросферы и атмосферного воздуха – выявить их роль в накоплении и трансформации радионуклидного загрязнения. Сформирована теоретическая основа для построения, прогностических моделей оценки радиационного риска, а также для анализа долгосрочных изменений

радиационной обстановки в специфических условиях горных экосистем Центральноазиатского региона.

**Положения, выносимые на защиту:**

- проведение всесторонней оценки потенциальной радиационной угрозы в отдельных районах Республики Таджикистан;
- исследование общей радиоэкологической ситуации на территории страны с учётом природных и техногенных факторов;
- анализ накопления и распределения радионуклидов в почвенных горизонтах различных регионов и изучение содержания радионуклидов в поверхностных и подземных водах, а также в атмосферном воздухе, включая аэрозольные компоненты.

**Практическая значимость исследования;** результаты исследования обладают высокой прикладной ценностью. Они могут быть использованы для оптимизации систем радиационного мониторинга, повышения точности оценки текущего состояния окружающей среды и разработки эффективных мер по снижению уровня радиоактивного загрязнения. На их основе возможно формирование рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности населения, особенно в районах, прилегающих к промышленным объектам и хвостохранилищам. Предложенные методические подходы могут быть внедрены в практику экологического контроля, управления радиоактивными и токсичными отходами, а также при разработке нормативно-правовых актов и стандартов в области радиоэкологии и охраны окружающей среды.

**Степень достоверность результатов** обеспечивается проведением серии независимых лабораторных и полевых экспериментов, включающих химический анализ множественных образцов, отобранных в разных точках наблюдения. Дополнительно выполнены измерения концентрации радона в закрытых помещениях с использованием современных высокоточных приборов последнего поколения.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности** (формуле и области исследования).

*Область исследования соответствует паспорту специальности 2.9.*

Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (2.9.6. Экология) (по отраслям: в строительстве и ЖКХ, энергетика) по пунктам:

– 2.3. Прикладная экология – разработка принципов и практических мер, направленных на охрану живой природы, как на видовом, так и экосистемном уровне; разработка принципов создания искусственных экосистем (строительные системы, урбосистемы, агроэкосистемы, объекты аквакультуры, ЖКХ и т.п.) и управления их функционированием. Исследование влияния антропогенных факторов на экосистемы различных уровней с целью разработки экологически обоснованных норм воздействия строительной, хозяйственной деятельности человека и эксплуатации ЖКХ на живую природу.

– 2.4. Экология человека – изучение общих законов взаимодействия человека и биосферы, исследование влияния условий среды обитания (в том числе созданной в результате строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ) на человека;

– 5.3. Комплексная оценка влияния объектов энергетики на природные и искусственные экосистемы, разработка методов и средств экологического мониторинга объектов энергетического комплекса, исследование и оценка воздействия энергетической отрасли на окружающую среду, в том числе на стадиях проектирования и строительства.

**Личный вклад автора.** Автором диссертационного исследования осуществлён всесторонний сбор и систематизация литературных источников, относящихся к тематике работы. Осуществлены полевые работы по отбору проб различных типов с последующим проведением радионуклидных измерений; выполнен комплексный анализ радиационного состояния исследуемых природных компонентов, включая статистическую обработку и интерпретацию полученных данных; проведена научная апробация результатов, включая участие в профильных конференциях, подготовку публикаций и обсуждение экспериментальных выводов в научном сообществе.

**Апробация диссертации и информация об использовании её результатов.** Основные выводы и результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на ряде научных конференций и тематических семинаров, посвящённых вопросам радиационной экологии, охраны окружающей среды и ядерной безопасности, включая следующие: Международная НТК «Перспективы использования материалов устойчивых к коррозии в промышленности РТ» (Душанбе, 2018); III Международная НТК «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий». (Душанбе, 2018); II Международный научный форум «Ядерная наука и технология» (Алматы, Казахстан, 2019); IV Международная научная конференция «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2019); XV Нумановские чтения «Академик И. У. Нуманов и развитие химической науки в Таджикистане» (Душанбе, Таджикистан, 2019); Республиканская НПК «Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики», посвящённая 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования. (Душанбе, Таджикистан, 2020); Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2017-2020 гг.: экологические проблемы XXI века» (Минск, Беларусь, 2020); Республиканская НПК (III-годовая) ГОУ «Хатлонский государственный медицинский университет», посвящённая 30-летию XVI-ой сессии Верховного Совета Республики Таджикистан (Дангара, Таджикистан, 2022); Международная НТК «Инновационные технологии одиарных, комплексных и органоминеральных удобрений» (Ташкент, Узбекистан, 2022); Международная НТК «Химическая, биологическая, радиационная и ядерная безопасность: достижения, проблемы и будущие перспективы» (Гулистан, Таджикистан, 2023).

**Публикации по теме диссертации.** На основе материалов диссертационного исследования опубликовано 21 научных работ, включая 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Республики Таджикистан. Представлено 13 тезисов докладов на международных и

национальных научных конференциях. Получен один Малый патент Республики Таджикистан, отражающий прикладной аспект исследования.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация оформлена на 166 страницах, включает 19 таблицу и 26 иллюстраций. Состоит из введения, четырёх содержательных глав, заключения, формулировки основных выводов и списка использованных источников, насчитывающего 139 наименований.

# **ГЛАВА 1. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН**

## **(литературный обзор)**

### **1.1. Радиоактивные хвостохранилища уранового производства в Таджикистане: история, риск, рекомендации**

В данном разделе проведён углублённый анализ исторических этапов формирования очагов радиоактивного загрязнения, возникших в результате деятельности уранодобывающей промышленности на территории северных районов Таджикистана. Особое внимание уделено оценке современных радиоэкологических рисков, связанных с функционированием и состоянием десяти радиоактивных хвостохранилищ, расположенных в этом регионе. Описаны ключевые параметры указанных объектов - объёмы накопленных отходов, уровень гамма-фона, степень герметичности и техническое состояние. Приведены данные о радиационном воздействии на окружающую среду, включая почву, водные системы и атмосферный воздух. Установлен радионуклидный состав водных объектов, формирующихся в местах размещения хвостохранилищ, с акцентом на присутствие долгоживущих изотопов, таких как уран-238, торий-232 и цезий-137. Результаты анализа свидетельствуют о том, что не законсервированные хвостохранилища представляют собой источник повышенной радиоэкологической опасности. Особенно уязвимыми являются прилегающие территории, где наблюдается миграция радионуклидов в почвенно-грунтовые слои и водоносные горизонты, что создаёт угрозу для здоровья населения, проживающего в непосредственной близости.

На основе анализа имеющихся данных выявлены радиоэкологические риски в зоне влияния хвостохранилищ и приведены конкретные меры для снижения рисков и даны практические рекомендации.

Учитывая, что Дигмайское хвостохранилище до сих пор остаётся с непокрытой поверхностью и представляет собой один из самых опасных источников радиационных рисков в регионе, рекомендовано организовать и

реализовать комплекс организационно-технических мероприятий по снижению рисков.

С целью снижения негативного воздействия Адрасманского хвостохранилища на окружающую среду и здоровье населения, предлагается передислоцировать хвосты в безопасное место. В случае непереноса хвостохранилища и с учётом водной эрозии следует провести работы по строительству водоотводного сооружения.

Для снижения рисков распространения радионуклидов из шахтных вод уранового месторождения Киик-Тал в окружающую среду, следует внедрить передовую технологию по очистке урансодержащих вод.

На территории северных регионов Таджикистана предметом радиозоологических изысканий выступают зоны хранения радиоактивных материалов, сформировавшиеся в результате начального этапа переработки урансодержащих руд методом гидрометаллургии. Эти процессы осуществлялись на промышленных площадках Табошарского и Адрасманского месторождений, функционировавших в период с 1945 по 1969 годы, а также в пределах современного города Бустон, ранее известного как Чкаловск.

После завершения добычи и переработки урановых руд, прилегающие населённые пункты начали активно расширяться, постепенно приближаясь к зонам размещения хвостохранилищ. Такое территориальное сближение привело к усилению негативного воздействия остаточных радиоактивных компонентов на здоровье и благополучие местного населения. Возникшая экологическая и санитарная обстановка потребовала комплексного научного подхода, включающего всесторонний мониторинг, оценку рисков и анализ последствий. На основании проведённых исследований были выработаны и приняты ряд решений по рекультивации хвостохранилищ и реабилитации загрязнённых территорий, очередности проведения этих мероприятий.

### *1.1.1. История формирования поля радиоактивного загрязнения на территории северного Таджикистана*

Радиоактивное загрязнение природной среды представляет собой результат проникновения в экосистему искусственно созданных радионуклидов - радиоактивных элементов, синтезированных в ходе техногенной деятельности человека и не встречающихся в естественных условиях. Эти вещества, чуждые природе, распространяются в атмосфере, почве и водоёмах. На севере Таджикистана формирование зон с повышенным радиационным фоном началось во второй половине двадцатого столетия, когда активно велась добыча и переработка урановых руд.

Создание урановой сырьевой базы в Советском Союзе началось с принятия стратегических решений Государственным комитетом обороны (ГОКО) СССР, которые датируются 27 ноября 1942 года. Эти постановления инициировали разработку урановых месторождений, известных на тот момент в пределах Средней Азии, с целью обеспечения сырья для зарождающейся атомной отрасли, имевшей оборонное значение. По предложению Народного комиссариата внутренних дел (НКВД) СССР, 15 мая 1945 года ГОКО утвердил постановление №8582 сс/ов, согласно которому было основано специализированное предприятие - Горно-химический комбинат №6. Его задачей стала переработка урановой руды и производство урановых концентратов. В дальнейшем комбинат претерпел несколько реорганизаций: в 1967 году он получил название Ленинабадский горно-химический комбинат, в 1990 году был преобразован в Государственное предприятие «Востокредмет», а с 2016 года функционирует как Государственное унитарное предприятие «Таджредмет».

В период с 1945 по 1949 годы на территории современного Таджикистана была развёрнута масштабная производственная сеть. В Табошаре были построены четыре перерабатывающих завода, в Адрасмане - один, в Б. Гафуровском районе - опытное предприятие, а в городе Чкаловск - крупнейший завод, ставший центральным звеном в цепочке уранового производства. Всего



*Адрасманское хвостохранилище.* В посёлке Адрасман в период с 1941 по 1957 годы, до прекращения работы местного гидрометаллургического завода (ГМЗ), было создано шесть отдельных хвостохранилищ, каждое из которых содержало от 60 до 100 тысяч тонн отходов, образовавшихся в процессе переработки уранового сырья. К концу 1970-х годов, в связи с сокращением объёмов добычи урановой руды, было принято решение о повторной переработке материалов из третьего хвостохранилища, расположенного рядом с поселковой автобазой. Эти отходы были направлены на ГМЗ в городе Чкаловск. Концентрация остаточного урана в данном хранилище достигала 0,05%. Однако переработка столкнулась с технологическими трудностями: щелочной характер адрасманских отходов вступил в реакцию с кислотоёмкими рудами, обрабатываемыми на чкаловском заводе, что вызвало сбои в работе узла выщелачивания. Нарушение химического баланса привело к необходимости пересмотра подходов к переработке. В результате было принято решение о консолидации всех шести хвостохранилищ в единый объект, что позволило оптимизировать управление отходами и снизить риски, связанные с их дальнейшей переработкой и хранением [8].

На территории посёлка Адрасман одно из наиболее крупных хранилищ радиоактивных отходов - второе хвостохранилище - было размещено в русле сезонной горной реки (сая). Первоначально оно содержало около 100 тысяч тонн отходов, образовавшихся в результате переработки уранового сырья. Благодаря значительному резервному объёму, позволяющему разместить до 300 тысяч тонн, было принято решение централизовать отходы из пяти других хвостохранилищ (№1, №3, №4, №5 и №6), находящихся в пределах 10-километровой зоны, и переместить их в этот объект. Особую сложность представляло хвостохранилище №5, где были захоронены металлические конструкции и ёмкости, загрязнённые радионуклидами. Из-за высокой степени радиоактивности этих материалов было принято решение об их приоритетной изоляции: металлолом был погребён на глубине 14–15 метров под основанием второго хвостохранилища.

Геологические условия местности, в частности отсутствие глинистых пород, затрудняли создание естественного барьерного слоя. В целях снижения радиационного воздействия и повышения экологической безопасности, поверхность хвостохранилища была изолирована специальным защитным покрытием толщиной от 0,5 до 0,7 метра. Этот барьер был сформирован из забалансовых горных пород, поступающих с действующего свинцово-цинкового обогатительного предприятия. Объект занимает площадь около 2,5 гектаров и состоит из двух функциональных зон. Верхняя площадка охватывает примерно две трети территории, отличается высокой степенью уплотнения и устойчивости. Нижняя часть сформирована из менее плотного материала. На нижнем участке сая, у подножья склона, были зафиксированы признаки выноса радиоактивных частиц, что свидетельствует о нарушении целостности защитного слоя. В этих зонах зарегистрированы повышенные уровни мощности амбиентной эквивалентной дозы (МАЭД) гамма-излучения, варьирующиеся от 1,2 до 2,5 мкЗв/час, что значительно превышает естественный радиационный фон [9].

*Гафуровское хвостохранилище.* Одним из первых объектов, связанных с урановой промышленностью на территории Таджикистана, стало Гафуровское хвостохранилище, сформированное в начале 1940-х годов. Его эксплуатация началась в 1942 году в рамках деятельности Министерства цветной металлургии СССР, в контексте добычи радия. В 1944 году, по решению Совета обороны СССР, расположенный рядом опытный завод был передан в ведение спецуправления НКВД СССР, входившего в структуру «Цветмет». Для размещения завода была выбрана малонаселённая пустынная местность, расположенная недалеко от современного железнодорожного узла города Гафурова. Производство на предприятии базировалось на переработке привозного уранового сырья, которое добывали вручную старатели в горных районах Табошара (Таджикистан) и Майлису (Кыргызстан). Технологический процесс включал сухое дробление карбонатных руд и последующее содовое

выщелачивание, что позволяло извлекать уран из высококачественного минерального материала.

После основания в 1945 году специализированного комбината по переработке урана, объёмы производства на гафуровском заводе значительно увеличились. Предприятие функционировало до 1955 года. Побочным результатом деятельности завода стало образование крупного хранилища радиоактивных отходов - Гафуровского хвостохранилища. Оно располагалось в непосредственной близости от производственной площадки и аккумулировало около 400 тысяч тонн отходов, содержащих остаточные концентрации урана и других радионуклидов [10].

В период с 1945 по 1955 годы в непосредственной близости от Гафуровского хвостохранилища началась активная застройка: появились жилые дома, объекты социальной инфраструктуры и отдельные государственные учреждения. В 1958 году производственная деятельность на заводе была окончательно прекращена. Спустя несколько лет, в 1963–1964 годах, было принято решение о демонтаже предприятия. Завод был частично разрушен взрывным способом, а его остатки - строительные конструкции, оборудование и загрязнённые материалы - были захоронены внутри тела хвостохранилища, что стало своеобразной формой технической ликвидации объекта.

Для стабилизации поверхности хвостохранилища и снижения риска распространения радиоактивных частиц, оно было покрыто слоем нейтральной гальки толщиной 0,5–0,7 метра. Однако с течением времени, под давлением общественности и в условиях растущей обеспокоенности экологическим состоянием территории, в 1991 году было принято совместное решение Хукумата Б. Гафуровского района и Государственного предприятия «Востокредмет» о проведении рекультивационных работ непосредственно на месте хвостохранилища. Захоронение хвостохранилища г. Гафурова проводилось в 1991-1992 годах. Согласно проектным заданиям, первый слой покрытия для предотвращения деятельности грызунов по разрушению поверхности был засыпан гравием. Толщина первого слоя составляла 0,4-0,5 м.

Кроме того было засыпано 5 слоёв глины, толщина каждого слоя составляла 0,4 м с их орошением и трамбовкой катком. Толщина общего слоя нейтральных грунтов при рекультивации Гафуровского хвостохранилища доходила до 2,4-2,5 м. Площадь объекта составляет около 5 гектаров, а его высота достигает 13 метров. Внутри хранилища аккумулировано значительное количество радиоактивных материалов, суммарная активность которых оценивается в 6,85 терабеккерелей (ТБк). Согласно проведённым измерениям, уровень мощности МАЭД гамма-излучения на поверхности составляет от 0,15 до 0,20 микрозиверт в час, что превышает естественный радиационный фон [1-4].

*Хвостохранилище «Карты 1-9».* Чкаловский гидрометаллургический завод, начавший работу в 1945 году, стал одним из ключевых предприятий по переработке уранового сырья в регионе. На раннем этапе завод перерабатывал карбонатные руды высокой концентрации, применяя технологию сухого измельчения. Образующиеся отходы после фильтрации вывозились автотранспортом на примыкающее хвостохранилище. В 1947 году предприятие было расширено, и в технологический процесс было внедрено кислотное выщелачивание, что позволило значительно повысить эффективность извлечения урана. Для размещения увеличивающихся объёмов отходов за пределами завода была выделена новая территория, где методом гидравлического намыва начали формировать серию хранилищ, получивших название «Карты 1–9». На протяжении 15 лет на площади около 18 гектаров было создано девять отдельных секций, в которых накопилось порядка 4 миллионов тонн радиоактивных отходов. Каждая карта представляет собой обособленную площадку, покрытую слоем грунта толщиной от 0,5 до 0,7 метра.

Общая радиоактивность накопленных материалов составляет приблизительно 29 ТБк. Измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы гамма-излучения на поверхности показывают значения от 0,4 до 0,6 мкЗв/час [11-15].

*Отвалы забалансовых руд и урановые хвостохранилища г.Истиклол.*  
История формирования поля радиоактивного загрязнения на промплощадке

Табошар (ныне г. Истиклол) и описание хвостохранилищ подробно приведены в работе авторов [14, 36].

Город Истиклол (бывший Табошар) представляет собой один из ключевых узлов радиоэкологического наследия Таджикистана, где на протяжении десятилетий велась интенсивная добыча и переработка уранового сырья. В результате деятельности горнодобывающих предприятий на территории города и его окрестностей сформировался комплекс объектов, связанных с накоплением радиоактивных отходов: отвалы вскрышных пород, участки кучного выщелачивания, хвостохранилища, разрушенные производственные корпуса, а также крупный техногенный объект - отвал «Фабрики бедных руд» (ФБР). Общая площадь зон, занятых хвостохранилищами и отвалами забалансовых руд, составляет порядка 63 гектаров.

Наиболее масштабным объектом является отвал ФБР, расположенный примерно в 4 километрах от центра Истиклола. Он представляет собой террикон - массивное конусообразное образование высотой около 60 метров, сформированное из отходов переработки бедных урановых руд. Первоначальная площадь объекта составляла 7,9 гектаров, а объём накопленного материала - около 1,13 миллиона кубических метров. На протяжении более 70 лет террикон подвергался разрушительному воздействию ветра, осадков и водной эрозии. После проведения рекультивационных работ в 2023 году, в результате выравнивания «жёлтой горы» площадь отвала «ФБР» увеличилась почти в два раза (с 7,9 га до 14,5 га). Крутизна наклона террикона понизилась от 60-70° и высотой 60 м до 18-22° и высоты 35 м. Усреднённые значения МАЭД гамма-излучения на поверхности отвала «ФБР» достигли на уровне фона 0,30 мкЗв/час при характерном диапазоне от 0,17 до 0,65 мкЗв/час [22-27].

Также была дополнительно усилена мощность покрытия поверхности 4-х хвостохранилищ нейтральными грунтами. В среднем толщина покрытия достигла 1,5 метра. При этом общая площадь хвостохранилища I очереди

составила 8,6 га, и усреднённые значения МАЭД гамма-излучения 0,27 мкЗв/час при характерном диапазоне от 0,17 до 0,38 мкЗв/час; хвостохранилища II очереди - 7,1 га и усреднённые значения МАЭД гамма-излучения 0,25 мкЗв/час при характерном диапазоне от 0,17 до 0,36 мкЗв/час; хвостохранилища III очереди площадь составила 8,7 га и усреднённые значения МАЭД гамма-излучения 0,28 мкЗв/час при характерном диапазоне от 0,18 до 0,35 мкЗв/час; хвостохранилища IV очереди - 17,1 га и усреднённые значения МАЭД гамма-излучения 0,28 мкЗв/час при характерном диапазоне от 0,18 до 0,36 мкЗв/час. Усреднённые значения МАЭД гамма-излучения на территории г.Истиклола вне зоны непосредственного влияния хвостохранилищ оцениваются величиной около 0,17 мкЗв/час.

*Хвостохранилище цеха №3 ГМЗ* - на расстоянии около 3 километров от центра города Истиклол расположено хвостохранилище, сформированное в результате деятельности цеха №3 гидрометаллургического завода (ГМЗ). В его теле захоронено приблизительно 1,17 миллиона тонн радиоактивных отходов, образовавшихся при переработке уранового сырья.

*Открытый карьер* создаёт дополнительную экологическую нагрузку, который расположен на промышленной площадке «Табошар». После завершения горных работ он остался без реабилитации. В непосредственной близости от карьера сосредоточены отвалы пустой породы и забалансовых руд, накопленные в процессе эксплуатации месторождения. Уровни МАЭД гамма-излучения в зоне отвалов варьируются от 0,4 до 0,7 микрозиверт в час, что существенно превышает естественный фон. Карьер заполнен рудничной водой и в нем имеется уран с активностью от 47000 до 60000 Бк/м<sup>3</sup>. В штольне №6 из карьера непрерывно просачиваются урансодержащие воды (3-5 мг/л уран) со скоростью 40 м<sup>3</sup>/час, которые негативно влияют на окружающую среду.

*Дигмайское хвостохранилище.* Одним из самых масштабных и радиоактивно насыщенных объектов урановой промышленности Таджикистана является Дигмайское хвостохранилище, введённое в эксплуатацию в 1963 году. Оно занимает обширную территорию площадью около 90 гектаров и служит

накопителем отходов, образовавшихся в процессе переработки урановых руд. За десятилетия функционирования в его теле сконцентрировано порядка 34 миллионов тонн техногенных материалов, включая остатки бедных руд и радиоактивные шламы. Согласно оценкам, совокупная радиоактивность накопленных отходов достигает 156,06 терабеккерелей (ТБк). Наиболее мощные слои хвостов расположены в зоне за основной плотиной, примерно в 40 метрах от её основания. Именно там сосредоточено около 500 тысяч тонн не переработанной бедной урановой руды, которая по сей день остаётся без изоляции и может представлять угрозу при нарушении целостности хранилища.

На сегодняшний день хвостохранилище заполнено примерно на 83% от своей проектной вместимости. Несмотря на длительный срок эксплуатации, объект официально не закрыт и продолжает функционировать. Отсутствие консервации, а также продолжающееся накопление отходов, создают риски для подземных вод, атмосферного воздуха и прилегающих территорий [15].

*Отвалы и дренажи шахтных вод в окрестностях г. Худжанд.* На склонах горного массива Моголтау, в непосредственной близости от города Худжанд, сохранились техногенные образования, оставшиеся после работы Рудника №3. Шахтные разработки велись в период с 1976 по 1985 годы, и в результате на расстоянии всего 2 километров от жилых кварталов были сформированы отвалы горных пород. Эти насыпи занимают площадь около 6 гектаров и были частично стабилизированы путём нанесения защитного слоя грунта толщиной 0,5–0,7 метра. Тем не менее, радиационный фон на поверхности остаётся повышенным: МАЭД гамма-излучения варьируется от 0,3 до 0,6 мкЗв/час.

Дополнительную экологическую нагрузку в регионе представляет бывшее месторождение Киик-Тал, которое в 1970-х годах разрабатывалось методом подземного выщелачивания. С 1973 по 1978 годы в недра было закачано около 8,6 миллиона кубических метров технологических жидкостей, содержащих серную кислоту в концентрации около 4,6 грамма на литр. Эти растворы использовались в рамках процесса подземного выщелачивания, при

котором происходило активное химическое взаимодействие с урановой рудой. В результате таких реакций формировались продуктивные потоки, насыщенные ураном, которые затем направлялись на специализированную сорбционную установку для извлечения целевого элемента. Всего в ходе данного технологического цикла было обработано свыше 11,6 миллиона кубометров растворов, содержащих уран, при этом средняя концентрация урана в них составляла порядка 33 миллиграммов на литр.

После завершения добычи большая часть оборудования, связанного с десорбцией и экстракцией урана, была демонтирована. Однако сорбционный узел продолжил функционировать, поскольку поступление загрязнённых шахтных вод не прекратилось. Для предварительной очистки этих вод от твёрдых примесей в конце 1990-х годов был построен седиментационный отстойник, который стал временным решением для локальной фильтрации. Несмотря на прекращение промышленной деятельности, остаточные процессы выщелачивания продолжаются, а загрязнённые потоки продолжают циркулировать в подземных горизонтах [18].

Параметры радиоактивных хвостохранилищ Таджикистана обобщены в таблице 1.1, показатели радиационного воздействия указанных хвостохранилищ на окружающую среду - в таблице 1.2.

### ***1.1.2. Радиоэкологический риск в зоне влияния радиоактивных хвостохранилищ***

Радиоэкологический риск в современном мире рассматривается как один из ключевых подходов к анализу состояния природной среды, особенно в контексте разработки и применения экологических стандартов. Важно подчеркнуть, что нормативное регулирование может охватывать не только концентрации вредных компонентов в элементах окружающей среды, но и уровень её структурных изменений, вызванных техногенным воздействием и загрязнением [37, 38].

При этом восприятие рисков, связанных с радиационным загрязнением, существенно различается между жителями, проживающими вблизи хвостохранилищ, и оценкой этих рисков с точки зрения экологической безопасности. Местное население поблизости от загрязненных мест часто бывает слишком безразличным по отношению к угрозам для их собственного здоровья. В то же время, есть и озабоченные группы населения и работающие на урановых предприятиях, которые слишком заостряют свое внимание на деталях воздействия загрязненных объектов, но не имеют прямого отношения к населению или существенно переоценивают воздействие этих объектов на состояние их здоровья.

**Таблица 1.1.** – Параметры радиоактивных хвостохранилищ Таджикистана

№ п/п	Наименование объекта и его месторасположение	Период эксплуатации	Тип хвостохранилища	Способ укладки хвостов	Крупности измельчённого масса, мм	Высота дамбы, М	Площадь, га	Количество отходов, млн. тонн	Среднее содержание урана, %	Слой грунтового покрытия, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Дигмайское хвостохранилище, пос. Газиён, 1.5 км	1963-1991 гг.	овражный	намывно-наливной	0.15÷0.043	35	90	33	0.006	отсут.
2	Гафуровское хвостохранилище, г.Гафуров, 0.5 км	1942-1955 гг.	равнинный	намывной	0.15÷0.043	16	5	0.4	0.018	2.4-2.5
3	Адрасманское хвостохранилище, пос.Адрасман, 1.0 км	1941-1957 гг.	овражный	насыпной	0.15÷0.043	11	2.5	0.4	0.05	0.5-0.7
4	Хвостохранилище «Карты 1-9», г.Бустон, 2.0 км	1945-1960 гг.	равнинный	намывной	0.15÷0.043	14	18	4.0	0.018	1.0-1.5
5	Хвостохранилище I-II очереди, г.Истиклол, 2.0 км	1945-1959 гг.	овражный	намывной	0.15÷0.043	16	15.7	2.8	0.013	1.0-1.5
6	Хвостохранилище III очереди, г.Истиклол, 0.5 км	1947-1963 гг.	овражный	намывной	0.15÷0.043	14	8.7	3.0	0.015	1.0-1.5
7	Хвостохранилище IV очереди, г.Истиклол, 1.0 км	1949-1965 гг.	овражный	намывной	0.15÷0.043	18	17.1	7.0	0.011	1.0-1.5
8	Отвалы «Фабрика бедных руд», г.Истиклол, 4.0 км	1950-1965 гг.	овражно-равнинный	насыпной	<0.15	30	14.5	2.0	0.006	1.0-1.5

Продолжение таблицы 1.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	Хвостохранилище цефа №3 г.Истиклол, 3.0 км	1949-1965 гг.	овражно- равнинный	насыпной	<400	-	0.06	1.7	0.01	0.5-0.7
10	Рудник-3, г.Худжанд, 2.0 км	1976-1985 гг.	косогорный	насыпной	<400	-	5.9	0.36	0.001	0.5-0.7

**Таблица 1.2.** – Показатели радиационного воздействия на окружающую среду

Объекты	Радиоэкологический фактор	Единицы измерения	Естественный фон	Значения радиационной характеристики	
				среднее	характерный диапазон
1	2	3	4	5	6
<b>Хвостохранилище I-II очереди</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.92	2.57	2.0-6.04
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.09	3.8	2.56-4.02
	Σα – активность ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/м <sup>3</sup>	1.0·10 <sup>-4</sup>	12.0·10 <sup>-4</sup>	8.04·10 <sup>-4</sup> -30.2·10 <sup>-4</sup>
Дренажная вода из-под хвостохранилища	Активность <sup>226</sup> Ra	Бк/м <sup>3</sup>	37	175	160-210
Хвосты	МАЭД гамма-излучения на поверхности хвостохранилища	мкЗв/час	0.2	0.26	0.20-0.38
	A <sub>эф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	1200	6485	5460-8500
	Суммарная активность	ТБк	8,07		

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4	5	6
<b>Хвостохранилище III-IV очереди</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.92	5.6	3.0-8.78
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.09	4.8	3.56-5.9
Почва	Σα – активность ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	1200	4126	1370-84117
Хвосты	МАЭД гамма-излучения на поверхности хвостохранилища	мкЗв/час	0.17	0.28	0.18-0.36
	A <sub>эфф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	1200	9759	1583-28134
	Суммарная активность	ТБк	27.45		
<b>Отвалы «Фабрика бедных руд»</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.92	17	16-92
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.09	0.9	0.86-1.06
Отвалы горных пород	Σα – активность ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	1200	1345	1260-1455
	МАЭД гамма-излучения на поверхности отвала	мкЗв/час	0.17	0.78	0.4-1.38
Отвалы «ФБР»	МАЭД гамма-излучения на поверхности отвала	мкЗв/час	0.17	0.30	0.17-0.65
	A <sub>эфф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	1200	2355	1480-3230
	Суммарная активность	ТБк	9.36		

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4	5	6
<b>Дигмайское хвостохранилище</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.8	109	10.3-464.1
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.02	6.2	2.1-17.89
Вода из наблюдательных скважин	Активность <sup>226</sup> Ra	Бк/м <sup>3</sup>	7	150	70-360
Почва	Σα – активность ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	200	47875	900-13500
Хвосты	МАЭД гамма-излучения на поверхности хвостохранилища	мкЗв/час	0.15	5.24	4-20
	A <sub>эфф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	30.29	17597	8492-27631
	Суммарная активность	ТБк	156.06		
<b>Адрасманское хвостохранилище</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.8	7.02	2.3-10
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.016	0.46	0.16-0.72
Почва	Σα – активность ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	750	1100	1070-5986
Хвосты	МАЭД гамма-излучения на поверхности хвостохранилища	мкЗв/час	0.15	0.30	0.2-1.25
	A <sub>эфф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	750	14800	1100-27300
	Суммарная активность	ТБк	5.92		

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4	5	6
<b>Хвостохранилище «Карты 1-9»</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.8	23	7-23
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.016	0.94	0.63-1.25
Почва	Σα – активность ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	85.19	1050	912-6598
Хвосты	МАЭД гамма-излучения на поверхности хвостохранилища	мкЗв/час	0.18	0.45	0.4-0.6
	A <sub>эфф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	85.19	4956	390-19230
	Суммарная активность	ТБк	28.82		
<b>Гафуровское хвостохранилище</b>					
Воздух	ЭРОА радона	Бк/м <sup>3</sup>	1.8	33	22-33
	ППР с поверхности	Бк/(м <sup>2</sup> •с)	0.016	0.3	0.22-0.83
Хвосты	МАЭД гамма-излучения на поверхности хвостохранилища	мкЗв/час	0.15	0.17	0.15-0.20
	A <sub>эфф.</sub> ЕРН ( <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>230</sup> Th, <sup>226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po)	Бк/кг	85.19	6693	200-15200
	Суммарная активность	ТБк	6.85		

Одним из факторов радиационного риска является отсутствие должной физической защиты для исключения беспрепятственного доступа населения на территорию хвостохранилищ. К другим факторам радиоэкологического риска относятся низкий уровень разъяснительно-просветительской работы с населением, выпас скота на территории хвостохранилищ со стороны местных жителей, их водопой из загрязненных ураном вод, их использование для полива огородов, а также использование материала отвалов в целях строительства частных домов и других объектов.

В современных условиях наибольшее значение в процессе распространения химических веществ из хвостохранилищ в окружающую среду приобретает водный путь миграции. Именно перемещение элементов с потоками жидкости, проходящими сквозь тело хранилища, определяет масштаб и характер загрязнения. На интенсивность этого переноса влияют как формы фиксации химических компонентов в отходах, так и состав водных растворов, взаимодействующих с хвостами. Эти растворы могут включать не только технологические жидкости, но и дождевую воду, талые осадки, поверхностные водотоки и подземные воды, особенно если они дренируют массив хвостохранилища и способствуют вымыванию загрязняющих веществ.

При оценке миграционных процессов важно учитывать различие между элементами, которые были извлечены в процессе выщелачивания урана, и теми, что остались в исходном сырье. Последние, как правило, обладают низкой подвижностью, поскольку агрессивные реагенты, применяемые в технологических операциях, уже удалили основную часть растворимых радиоактивных и токсичных соединений. Таким образом, остаточные элементы, не вступившие в реакцию, чаще всего находятся в устойчивых формах, малоподверженных дальнейшему распространению.

Существенное влияние на миграционную способность оказывает физико-химическая форма нахождения элементов в отходах. Если в ходе переработки они осаждаются в виде труднорастворимых соединений, их

дальнейшее перемещение в природной среде становится маловероятным. В дополнение к этому, современные методы экологического мониторинга и геохимического моделирования позволяют более точно прогнозировать поведение загрязняющих веществ. Учитываются не только химические свойства элементов, но и геологическая структура местности, климатические условия, гидрогеологические параметры и степень техногенной нагрузки. Такой комплексный подход обеспечивает более достоверную оценку радиоэкологических рисков [39, 40].

*По Дигмайскому хвостохранилищу* отмечается ряд радиоэкологических рисков, которые длительное время отрицательно влияют на экосистему в ареале данного хвостохранилища. После закрытия гидromеталлургического завода (ГМЗ) в 1996 году и на фоне продолжительных засух, водная поверхность хвостохранилища постепенно исчезла вследствие интенсивного испарения. Оставшиеся водные массы частично стекали по склонам, что вызвало значительные изменения в геоморфологии участка. На осушённой поверхности начали формироваться крупные трещины - так называемые «такыры», шириной до одного метра и глубиной более четырёх метров. Эти разломы стали активными зонами выхода радона-222, концентрация которого достигала от 540 до 2500 Бк/м<sup>3</sup> [23, 24].

Помимо радоновой эксхалации, на данной территории наблюдаются и другие опасные факторы: повышенные уровни гамма-излучения, создающие фоновую радиационную нагрузку на организм человека; распространение радиоактивной пыли, особенно в ветреную погоду, с риском её ингаляционного проникновения в дыхательные пути; устойчиво высокая концентрация радона в приземном слое атмосферы, особенно в условиях слабой вентиляции и температурной инверсии.

Комплекс неблагоприятных факторов, сформировавшихся после остановки работы хвостохранилища, стал катализатором активного выделения радиоактивного газа радона в приземные слои атмосферы над его поверхностью. Из-за деградации структуры хвостов, усиленного испарения

влаги и образования трещин, плотность потока радона (ППР) достигала значений от 10 до 65 Бк/(м<sup>2</sup>·с), а годовой объём его поступления в атмосферу превышал 30 ТБк.

Для сравнения, на участках, не подверженных влиянию Дигмайского хвостохранилища, МАЭД гамма-излучения составляет около 0,15 мкЗв/ч [25, 43, 44], что соответствует естественному фону. Однако результаты мониторинга, проведённого в 2023 году, показали, что на территории самого хвостохранилища и прилегающих участках наблюдаются значительно более высокие уровни гамма-излучения. Наибольшая интенсивность зафиксирована в центральной и северо-западной частях объекта, где значения МАЭД варьируются от 4,0 до 20 мкЗв/ч.

*По хвостохранилищам г. Истиклол.* Одной из наиболее острых экологических проблем, связанных с захоронениями в районе города Истиклол, является бесконтрольное просачивание остаточных кислотных растворов. Эти агрессивные жидкости выходят на поверхность в виде родников, формирующихся у подножья участков хранения отходов, особенно в зоне хвостохранилищ первой и второй очереди. Анализ состава воды из одного из таких источников показал чрезвычайно высокую концентрацию сульфат-ионов - от 9200 до 9600 мг/л, при крайне низком содержании карбонатных соединений - всего 18 мг/л.

Сводные данные по радионуклидному составу водных объектов северного Таджикистана представлены в таблице 1.3.

Изучение этих показателей демонстрирует значительные колебания концентраций урана и его изотопов - от 0,26 до 50,8 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация урана в родниковом питьевом водоснабжении составляют от 0,017 до 1,28 мг/дм<sup>3</sup>. Естественные радионуклиды в результате прохождения через рудные пласты или тела радиоактивных хвостохранилищ смываются водой и попадают в водные объекты. Уровень вмешательства  $УВ^{вода}$  равен 3,1 Бк/кг [45].

Также выявлено, что воды карьера в промплощадке «Табошар» содержат изотопы  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$ . Использование в качестве пищи 1,5 кг рыбы, обитающей в карьере, в месяц (50 г в день) с изотопом  $^{210}\text{Po}$  и удельной активностью 400 Бк/кг превысит норму и внесёт свой вклад до 8 мЗв/год в годовую эффективную дозу [30].

**Таблица 1.3.** – Радионуклидный состав водных объектов Таджикистана

Наименование объектов	Водо-обильность, м <sup>3</sup> /час	Конц. урана в воде, мг/дм <sup>3</sup>	Активность радионуклидов, Бк/дм <sup>3</sup>			$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$
			$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	
Шахтные воды Киик-Тал, г.Худжанд, 2 км	4.1-4.6	25	-	-	-	-
Карьер, г.Истиклол	-	2.92	26	28	0.54	1.08
Штольня №1, г.Истиклол	сезонный	1.26	15.0	16.5	0.12	1.10
Штольня №6, г.Истиклол	40	1.34	20.5	20.9	0.16	1.02
Дренажные воды из под хвостохранилища 1-2 очереди, г.Истиклол	сезонный	50.8	477.4	792.6	0.76	1.66
Родники питьевого водоснабжения, г.Истиклол, 8 км	20	0.26	0.86	1.03	0.017	1.2
Уровень вмешательства		1.8	3.1	2.8	0.5	

*По Адрасманскому хвостохранилищу.* По данным проведённых нами мониторинговых работ установлено, что смыв хвостового материала из тела хвостохранилища в окружающую среду имеет негативную тенденцию к увеличению радиационного риска.

*По дренажу шахтных вод в окрестностях г. Худжанд.* В настоящее время из штолен уранового месторождения Киик-Тал вытекают урансодержащие воды с концентрацией 20 мг/дм<sup>3</sup>, со скоростью 4,1-4,6 м<sup>3</sup>/час, которые уже длительное время загрязняют окружающую среду. В результате активного развития жилой застройки на прилегающих к месторождению Киик-Тал земельных участках, а также ввиду отсутствия установленной санитарно-защитной зоны вокруг данного горнодобывающего объекта, границы населённой территории постепенно смещаются в сторону рудника. С каждым годом жилые массивы всё ближе подступают к промышленной зоне, что создаёт потенциальные риски для здоровья населения.

### ***1.1.3. Меры по улучшению радиэкологической обстановки в зоне влияния хвостохранилищ***

С целью снижения потенциальных угроз, связанных с радиационным воздействием на здоровье населения и состояние окружающей среды, в Республике Таджикистан были приняты стратегические нормативные акты. В частности, постановлением Правительства утверждена и реализуется «Национальная концепция по реабилитации хвостохранилищ, отходов переработки урановых руд на период 2014–2024 гг.» (№505 от 01.08.2014 года). В дополнение к ней была разработана и внедрена «Программа практической реализации Национальной концепции по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2016–2024 годы» (№329 от 27.07.2016 года).

На основании указанных нормативно-правовых актов и с учётом выявленных радиэкологических рисков были определены приоритетные

урановые хвостохранилища, которые подлежали реабилитации в первоочередном порядке.

Учитывая многоаспектные сложности - как инженерно-технологического, так и финансово-организационного характера - связанные с восстановлением территорий, загрязнённых в результате деятельности уранодобывающей промышленности, Советом глав правительств стран СНГ было принято стратегическое решение. 29 мая 2015 года была официально одобрена Межгосударственная программа, получившая название «Программа рекультивации территорий государств-членов ЕВРАЗЭС, подвергшихся воздействию уранодобывающих производств». Данная стратегия была разработана с целью объединения усилий государств региона для системного решения проблем, связанных с радиоактивным загрязнением, возникшим в результате многолетней эксплуатации урановых месторождений, восстановлением экологической безопасности и снижением рисков для здоровья населения, проживающего вблизи бывших объектов добычи и переработки урана.

В рамках реализации межгосударственной программы по экологической реабилитации территорий основное финансовое обеспечение было обеспечено Российской Федерацией, на долю которой пришлось порядка 75% общего бюджета. Оставшиеся 25% расходов были распределены между другими странами-участницами: Казахстаном - 15%, Таджикистаном - 5% и Кыргызстаном - также 5%.

Программа охватывала широкий спектр восстановительных работ, включая рекультивацию техногенных образований - отвалов, известных под названием «ФБР», а также четырёх радиоактивных хвостохранилищ, расположенных в пределах города Истиклол. На территории Табошарской промплощадки были проведены всесторонние инженерные изыскания, проедено уточнение геологических и гидрологических характеристик участка. Также была выполнена детальная топографическая съёмка местности, в рамках экологических исследований осуществлены

эманационные и гамма-съёмки, проведены отборы образцов почвы и растительного покрова.

*По хвостохранилищам г. Истиклол.* В период с октября 2022 года по октябрь 2023 года были проведены рекультивационные работы на урановых хвостохранилищах с повышенным радиационным риском – «Фабрики бедных руд» хвостохранилищ I, II, III, IV Очереди в городе Истиклол.

Результаты проведённых работ позволили в значительной степени улучшить радиэкологическую ситуацию в городе Истиклол. Так, радиационный фон в периметре рекультивационного участка снизился в 10 раз и достиг значения 0,3 мкЗв/ч, что соответствует значению естественного фона данной местности. На заключительном этапе проведены работы по благоустройству рекультивированных площадок. Следует особо отметить, что реализация данного проекта значительно улучшила радиэкологическую обстановку не только данного региона Таджикистана, но и других соседних стран Центральной Азии – Узбекистана и Кыргызстана, а также укрепила межгосударственные отношения с Российской Федерацией в сфере снижения радиэкологических рисков.

В целях дальнейшего углубления международного сотрудничества между Республикой Таджикистан и Российской Федерацией в области рекультивации урановых хвостохранилищ на территории Таджикистана и с учётом положительного опыта рекультивации загрязнённых территорий г. Истиклол предлагается рассмотреть следующие проблемы Республики Таджикистан, в решении которых принимает активное участие госкорпорация «Росатом»:

1. Провести дальнейшие рекультивационные работы на участке хвостохранилища цех №3 ГМЗ г. Истиклол.

2. На площадке города Истиклол кроме рекультивированных пяти хвостохранилищ еще остались около 30 млн. тонн низкоактивных отвалов горных пород, образовавшихся при вскрышных работах. В связи с этим и в целях дальнейшего снижения радиационных рисков в промплощадке

«Табошар» захоронить указанные отвалы в бывшем карьере по добыче урановых руд. Кроме того, следует также в данном карьере захоронить разрушенные здания и сооружения бывших гидрометаллургических заводов г. Истиклол (вариант 1).

3. Установлено, что основными дозообразующими радионуклидами вод карьера и дренажа штольни №6 являются изотопы  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ , которые непригодны для хозяйственно-бытового водоснабжения. В связи с этим имеется острая необходимость очистки шахтных вод в городе Истиклол, требуется международное сотрудничество (вариант 2).

4. Для предотвращения радиационных рисков, связанных с накоплением доз жителями территорий, близлежащих к хвостохранилищам, исключить употребление рыбы, выловленной из водоёма г. Истиклол.

*По Дигмайскому хвостохранилищу.* Учитывая, что данное хвостохранилище является одним из крупнейших в странах Центральной Азии с непокрытой поверхностью и одним из самых опасных источников радиационных рисков следует организовать и реализовать комплекс организационно-технических мероприятий по снижению рисков.

В течение 2017-2018 гг. по инициативе Исполнительного органа государственной власти Согдийской области на площади 20 гектар поверхность Дигмайского хвостохранилища была покрыта нейтральным грунтом. В результате чего мощность радиационной дозы на поверхности хвостохранилища снизилась в несколько раз. Вместе с тем по причине неполного покрытия поверхности хвостохранилища Дигмай и климатического воздействия, оно нуждается в скорейшей реабилитации. Только совместными усилиями государства, заинтересованных участников и международных организаций возможно проведение запланированных реабилитационных работ на Дигмайском хвостохранилище в полном объёме. В связи с этим рекомендуется провести рекультивационные работы по покрытию поверхности хвостохранилища нейтральным грунтом из прилегающих холмов.

*По Адрасманскому хвостохранилищу.* С целью снижения негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения имеется необходимость передислоцировать хвосты в безопасное место.

В случае непереноса хвостохранилища и с учётом водной эрозии следует провести работы по строительству водоотводного сооружения.

*По шахтным урансодержащим водам в окрестностях г. Худжанд* для снижения рисков распространения радионуклидов и тяжелых металлов в окружающую среду следует внедрить передовую технологию по очистке урансодержащих вод.

**Таблица 1.4.** – Существующие риски и пути их минимизации

Объекты	Основной риск	Рекомендуемые меры снижения рисков
<b>По хвостохранилищам г. Истиклол</b>		
Вода из штольни №6	Использование для орошения и водопоя скота	Очистка загрязненных радионуклидами вод
Вода из открытого карьера	Употребление выловленной рыбы в качестве пищи и купание в водоеме	Исключить употребление рыбы, выловленной из водоёма, и купание населения
Отвал штольни №6	Внешнее облучение местного населения, в основном школьников, из-за близкого расположения школы №5	Перенос отвала штольни №6 на отвал №5 и их рекультивация
Все шахты на участке Табошар	Обвал поверхности, падение людей и скота в открытую шахту	Укрытие поверхности шахт бетонной плитой
Остальная инфраструктура и сооружения (здание, бункер, развалины) бывшего ГМЗ	Обрушение зданий, опасность для жизни	Демонтаж и покрытие
Хвостохранилище цех №3 ГМЗ	Недостаточность покрытия поверхности	Провести рекультивацию
<b>По Дигмайскому хвостохранилищу</b>		
Дигмайское хвостохранилище и прилегающие к нему территории	Высокие значения МАЭД гамма-излучения, высокое содержание радона в воздухе, выпас скота на территории хвостохранилищ	Провести рекультивацию

Продолжение таблицы 1.4.

Пульпопровод	Загрязненность радионуклидами, несанкционированный доступ населения	Демонтаж труб, захоронение на хвостохранилище Дигмай
Старая насосная станция №1 и №2	Загрязненность радионуклидами, несанкционированный доступ населения.	Демонтаж и покрытие, захоронение на хв.Дигмай
<b>По Адрасманскому хвостохранилищу</b>		
Адрасманское хвостохранилище и прилегающие к нему территории	Смыв хвостового материала из тела хвостохранилища	Передислоцировать хвосты в безопасное место (1-й вариант) или провести работы по строительству водоотводного сооружения (2-й вариант)

По результатам анализа выявлены основные радиоэкологические риски по всем урановым хвостохранилищам, расположенным на территории северного Таджикистана, которые ранжированы по степени опасности и предложен комплекс мер по снижению негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения (таблица 1.4).

## **1.2. Радиационная ситуация в Республике Таджикистан**

### ***1.2.1. Общая радиационная ситуация***

Общая радиационная ситуация для людей имеет особое значение. Как известно, Земля имеет собственный радиационный фон, который состоит из космических лучей, радиоактивных ископаемых и различных газов, в первую очередь радона. В работе Уткина В. И. [46] подробно описан собственный радиационный фон Земли, особое внимание уделено радону. В [47] приведены зависимости объёмной активности (ОА) радона в различных помещениях.

Радон - это природный радиоактивный газ, входящий в состав распадных цепочек таких радионуклидов, как уран-238, уран-235 и торий-232. Его атомные ядра формируются в окружающей среде в результате последовательного распада более тяжёлых «родительских» элементов.

Концентрация радона в земной коре в среднем составляет  $\sim 7.0 \cdot 10^{-16}\%$  по массе. Этот радиоактивный газ, обладающий высокой химической стабильностью и практически полной инертностью, не склонен вступать в реакции с другими веществами, радон легко высвобождается из кристаллической структуры минералов, содержащих уран или торий. После выхода из твёрдой фазы он может мигрировать в подземные водоносные горизонты, а также проникать в атмосферу [46-49].

Уровень содержания радона в воздухе в значительной степени определяется геологическими условиями конкретного региона. Например, гранитные породы, богатые ураном, являются мощными источниками радонового излучения, тогда как над морскими акваториями его концентрация обычно крайне низка. Существенное влияние на распространение радона оказывают и метеорологические факторы: в дождливую погоду микроскопические трещины в почве, через которые газ обычно выходит наружу, заполняются влагой, что ограничивает его эмиссию. Аналогично, снежный покров действует как физический барьер, препятствующий выходу радона в атмосферу.

Интересным феноменом является резкое увеличение концентрации радона в воздухе, наблюдаемое в преддверии сейсмических событий. Это связано с активизацией геодинамических процессов, вызывающих усиленный выход газа из недр Земли. Такое явление получило название радоновой эксхалляции [54-56].

Радиационный фон помещений (РФП), присутствующий в помещениях, представляет собой совокупность ионизирующих излучений, поступающих как из недр Земли, так и из космического пространства. Эти излучения непрерывно воздействуют на человека, находящегося внутри построек, формируя так называемый радиационный фон помещений (РФП). Он складывается из природных компонентов и может быть модифицирован в результате техногенных процессов.

Ключевыми природными радионуклидами, определяющими уровень

РФП, являются: радий-226, торий-232, калий-40. Кроме того, в строительных материалах может присутствовать цезий-137 - искусственный радионуклид, появившийся в результате ядерных испытаний и аварий. Внутренний воздушный слой помещений может содержать короткоживущие радиоактивные изотопы, преимущественно радия, а в редких случаях - тория. Эти нестабильные элементы обладают периодом полураспада, не превышающим десяти суток, что способствует временному усилению радиационного фона в замкнутом пространстве.

Уровень радиационного воздействия внутри зданий в значительной степени зависит от характера и интенсивности человеческой деятельности. Наиболее значимыми факторами являются: выбор участка строительства (геологические и радиационные характеристики местности); состав и происхождение строительных материалов; архитектурные и инженерные решения, включая планировку и этажность; эффективность и тип систем вентиляции, обеспечивающих воздухообмен.

Существует распространённое мнение, что в подвальных помещениях и на первых этажах концентрация радона выше, чем на верхних уровнях. Однако практические измерения не всегда подтверждают эту гипотезу - распределение радона может зависеть от множества локальных условий. Согласно установленным санитарным нормам, безопасным считается уровень плотности потока радона, выходящего с поверхности грунта, не превышающий:

- 80 мБк/м<sup>2</sup>·с - для многоквартирных жилых домов;
- 40 мБк/м<sup>2</sup>·с - для малоэтажных индивидуальных построек и коттеджей [57, 58].

Радоновые обследования представляют интерес тем, что они являются одним из основных элементов радоновой программы. Они необходимы для оценки степени риска для населения от облучения, связанного с присутствием радона в жилых и рабочих помещениях. Проведение радоновых исследований служит основой для формирования достоверной

информационной базы, необходимой для принятия обоснованных решений о введении, корректировке или пересмотре референтных уровней содержания радона в окружающей среде. Эти данные позволяют оценить степень радиационного воздействия на население. Ключевым результатом таких обследований является разработка радоновых карт [58-61].

Важное значение для администраций городов и районов имеют радиоэкологические карты местностей, которые позволят выбрать места для строительства различных объектов [62-70].

Для проведения строительных работ и переработки минерального сырья необходимы предварительные измерения радионуклидов в этих материалах [33].

Разработка радиационного нормирования, мер радиационной безопасности, выявление путей проникновения радионуклидов также являются актуальной задачей. Особое значение имеет воздействие на окружающую среду отходов уранодобывающих производств [34-35].

Изучение действия ионизирующего излучения на живые объекты является актуальной задачей. Перед тем, как изучить действие ИИ на микроорганизмы, растения и другие живые организмы, необходимо изучить общую радиационную обстановку территорий [54-55].

Особое значение имеет действие ИИ на человека. Накопленный экспериментальный материал действия ИИ на человека и животных при однократном полном гамма-облучении, были систематизированы и представлены в таблице 1.5.

**Таблица 1.5.** – Биологические эффекты однократного равномерного гамма-облучения всего тела человека [48-71]

Доза, Гр*	Последствия
100	Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы
10-50	Смерть наступает через 1-2 недели вследствие внутренних кровоизлияний

Продолжение таблицы 1.5.

4-5	50% облученных умирает в течение 1-2 месяцев вследствие поражения клеток костного мозга
2-4	Нетрудоспособность. Возможна смерть.
1	Начальная стадия лучевой болезни
0,75	Незначительные кратковременные изменения в составе крови
0,3	Разовая доза при проведении рентгеноскопии желудка
0,25	Предельно допустимая аварийная доза для персонала (однократное воздействие)
0,1	Предельно допустимая аварийная доза для населения (однократное воздействие)
0,05	Годовой предел облучения для персонала при нормальных условиях
0,005	Годовой предел облучения для населения при нормальных условиях
0,0035	Среднегодовая эквивалентная доза от всех источников радиации
* для $\gamma$ - и электронного облучения поглощенная доза (Гр) равна эквивалентной дозе (Зв).	

При получении умеренных доз радиации восстановительные процессы в организме человека, как правило, протекают достаточно быстро. В случаях лёгкой степени лучевой болезни выраженные клинические симптомы могут вовсе отсутствовать или быть минимальными. Однако при более тяжёлых формах заболевания период полного реабилитационного восстановления может затянуться на срок до одного года и более. Среди отсроченных эффектов, возникающих после перенесённого облучения, у женщин может наблюдаться временное нарушение репродуктивной функции, вплоть до бесплодия, а у мужчин - снижение или полное отсутствие сперматозоидов. Эти изменения, как правило, носят обратимый характер, особенно при своевременном медицинском вмешательстве. В отдельных случаях, спустя месяцы или даже годы после воздействия радиации, может развиваться лучевая катаракта - патологическое помутнение хрусталика глаза, связанное с повреждением клеточных структур.

После перенесённой острой формы лучевой болезни у некоторых пациентов сохраняются стойкие невротические расстройства, нарушения мозгового кровообращения, а также признаки сосудистой патологии. В долгосрочной перспективе возможно развитие склеротических процессов, онкологических заболеваний (включая лейкозы), а также появление врождённых аномалий и наследственных патологий у потомства [55-58].

Характер и степень влияния радиации на организм человека зависят от множества факторов, включая локализацию источника излучения по отношению к телу, его мощность, продолжительность воздействия и биологическую восприимчивость тканей. Радиационные эффекты могут проявляться по-разному - от кратковременных функциональных нарушений до тяжёлых системных поражений, требующих длительного лечения и наблюдения, в частности могут являться:

- внешними;
- внутренними.

В зависимости от происхождения:

- естественными;
- техногенными (антропогенными).

С учётом агрегатного состояния нуклидного материала:

- газообразными;
- жидкими;
- твердыми.

В зависимости от активности:

- высокоактивными;
- низкоактивными.

В зависимости от нахождения источника ионизирующего излучения:

- земными;
- космическими.

На участках с выраженным техногенным загрязнением, где в почве присутствуют значительные концентрации цезия-137 и стронция-90,

содержание природного радиоактивного калия-40 зачастую многократно превышает их совокупные уровни. Вклад К-40 в общий уровень естественного облучения костного мозга человека - одного из наиболее радиочувствительных органов - составляет около 12,3% от средней дозы. Причём именно он обеспечивает основную долю внутреннего радиационного воздействия, обусловленного наличием радиоактивных элементов внутри организма. Общее естественное облучение костного мозга складывается из нескольких источников: космического излучения, которое в среднем даёт около 0,50 микрозиверта в год, и радиации, исходящей от литосферы и атмосферы, с аналогичным годовым вкладом - ещё 0,50 микрозиверта [59-61].

Среди радионуклидов, постоянно присутствующих в теле человека, наибольшее значение имеет калий-40, обеспечивающий внутреннюю дозу порядка 0,15 микрозиверта в год. Менее значительное влияние оказывают другие радионуклиды, находящиеся внутри организма. Так, радон-222, способный адсорбироваться в крови, даёт приблизительно 0,03 мкЗв/год. Радиоактивный изотоп углерода - углерод-14 - вносит вклад в годовую дозу внутреннего облучения человека, варьирующийся в пределах от 0,02 до 0,14 микрозиверта. Изотопы радона, в частности радон-226 и радон-228, а также их радиоактивные дочерние продукты, в совокупности обеспечивают дополнительную дозовую нагрузку, оцениваемую примерно в 0,02 микрозиверта в год. Наименьший вклад приходится на полоний-210 и его производные, которые обеспечивают дозу примерно 0,004 мкЗв/год [62-71].

### ***1.2.2. Распределение радионуклидов в почвах и водах Таджикистана***

Человеческий организм подвергается внешнему ионизирующему воздействию, источниками которого являются радиоактивные элементы, присутствующие в окружающей среде - в земной коре, водных ресурсах, атмосферном воздухе, а также в материалах, используемых при строительстве зданий. Дополнительным фактором служит космическое

излучение, проникающее из глубин Вселенной и достигающее поверхности Земли [72].

Внутреннее (эндогенное) облучение, вызванное естественными радионуклидами, за исключением радона, составляет приблизительно четверть от общего объёма природного радиационного фона. Это соответствует примерно пятой части совокупной годовой дозы, получаемой человеком от всех источников - как природных, так и техногенных. В числовом выражении эта доза составляет около 4.06 миллизиверта в год, из которых примерно 0.77 мЗв/год приходится на антропогенные источники [73]. Природные радионуклиды ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) в горных породах дают дозу, вдвое превышающую вклад космических лучей, но ниже радона и медицинского облучения. Радиоактивные элементы необходимы для живых организмов, но высокие дозы вызывают рак, нарушения кровообращения и хронические заболевания.

В исследовании, представленном в источнике [74], проведён анализ пространственного распределения уровней естественного радиационного фона. Особое внимание уделено влиянию процессов почвообразования и антропогенной деятельности на формирование и перемещение природных радионуклидов в различных геологических и экологических условиях.

Исследования [74-83] показывают, что почвы Таджикистана разнообразны и имеют поясное распределение. Работы Муминова С.В. и др. [76-78] выявили накопление цезия-137 в почвах юго-запада Таджикистана из-за атмосферных выпадений, а также изучили радионуклиды в стройматериалах [77] и хранение радиоактивных отходов [78]. Изучен радионуклидный мониторинг различных населённых пунктов Таджикистана [79-83]. В прежние годы в Таджикистане не фиксировалось присутствие радиоактивного изотопа цезия-137 в почвенном покрове. Однако, согласно результатам исследований, проведённых специалистами ХБРЯ Национальной академии наук Таджикистана, ситуация изменилась: в

результате ядерных испытаний, осуществлённых в соседних странах - Китае, Индии и Пакистане - началось постепенное накопление цезия-137 в почвах.

Таджикистан представляет собой преимущественно горную страну, рельеф которой отличается резкими перепадами высот - от низменных участков, расположенных на уровне около 300 метров над морем, до самых высоких точек, достигающих 7495 метров. Благодаря такому экстремальному диапазону высот, более половины территории республики находится на отметках выше 3000 метров, что делает её одной из наиболее высокогорных стран в пределах Центральноазиатского региона. Геоморфология региона демонстрирует чётко выраженную вертикальную дифференциацию, которая условно подразделяется на несколько поясов высотности: низинный пояс - охватывает участки от 300 до 900 метров над уровнем моря; зона предгорий - располагается в пределах от 900 до 1600 метров; низкогорный пояс - от 1600 до 2300 метров; среднегорная зона - простирается от 2300 до 3500 метров; высокогорный пояс - начинается от 3500 метров и выше, где природные условия становятся экстремальными.

Следует отметить, что равнинные участки занимают лишь около 7% общей площади страны [84].

На основе проведённых научных наблюдений [83–85] были составлены картографические материалы, отражающие усреднённые показатели удельной радиоактивности (УА) изотопа цезия-137 в почвенных горизонтах различных регионов Таджикистана. Согласно выводам ряда специалистов [84–86], существует предположение, что в горных районах страны - таких как Раштская зона, Сари-Хосор (юго-восток страны), Хонако в пределах ущелья Алмазы (центральная часть республики), а также южные склоны Кураминского хребта (север Таджикистана) - обусловлена специфическими геологическими и орографическими характеристиками этих местностей. Рассматриваемые участки представляют собой природные образования, замкнутые в пределах массивных горных хребтов, покрытых густыми лесами и альпийскими лугами. Их изолированная конфигурация - протяжённостью

свыше 35 километров и с единственным узким выходом - создаёт уникальные условия для накопления и осаждения радиоактивных частиц, переносимых воздушными потоками, пылевыми массами и аэрозольными осадками. Такие атмосферные процессы особенно характерны для высокогорных систем Таджикистана, где циркуляция воздуха ограничена сложным рельефом, а самоочищение атмосферы затруднено.

Вода, обладая высокой растворяющей способностью, играет ключевую роль в процессах мобилизации и переноса тяжёлых элементов, включая уран и радон, в природной среде. Проникая в толщу земной коры через трещиноватые зоны и поровые пространства, она вступает в контакт с минерализованными породами, способствуя растворению солей радиоактивных элементов. В результате этих процессов происходит вынос радионуклидов на поверхность. Кроме того, вода переносит частицы пород и откладывает их в виде осадков на значительном расстоянии от места первичной эрозии. Высокое содержание радона обычно обнаруживается в областях с подстилающими гранитами и подобными породами, которые обычно содержат большее количество урана, чем другие типы горных пород.

Гидрохимия поверхностных вод Таджикистана подробно описана в монографиях и трудах учёных Таджикистана [87, 88].

В работах и монографиях [89, 100] подробно изучено содержание различных изотопов в водных бассейнах Таджикистана. В [89] изучено содержание изотопов  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в воде искусственного озера города Истиклол и их бионанохимия в организме рыб. Состояние радионуклидов в дренажных водах хвостохранилище г. Истиклол описано в работе [90]. Мирсаидов И.У и сотрудники изучили физико-химическое состояние урана в шахтных урансодержащих водах, определили количество урана и предложили пути выделения концентрата  $\text{U}_3\text{O}_8$ .

В рамках докладов, представленных на Сахаровских чтениях «Экологические проблемы XXI века», были рассмотрены вопросы, связанные

с извлечением урана из шахтных вод, поступающих с месторождения Киик-Тал, расположенного на территории Таджикистана [92].

В работе [93] изучены изотопные отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в водах бассейна реки Сырдарья. Физико-химические основы накопления радионуклидов в бассейне реки Сырдарья подробно изучены в работах [94-97]. В рамках этих исследований были охарактеризованы ключевые параметры водных ресурсов Сырдарьинского бассейна, включая источники, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Установлено, что данные воды отличаются повышенным содержанием соединений серы (сульфидов), углекислых солей (карбонатов), а также азотистых компонентов - нитратов [94]. Разработаны технологические основы очистки ураносодержащих вод [95]. Исследования, проведённые в [94], показали, что поверхность воды реки Сырдарья содержит незначительные количества радионуклидов в пределах нормы. Суммарная альфа- и бета-активности радионуклидов в следовых количествах.

Установлено содержание урана в шахтных водах, выходящих из шахтных вод месторождения Табошар, где количество урана составляет 25-30 мг/л [96, 97].

Ряд работ посвящён [101-106] определению тяжёлых металлов в водах хвостохранилищ (Дигмай, Адрасман) и экологическому состоянию очистных сооружений некоторых городов с определёнными радионуклидами.

В [107-111] изучены физико-химические характеристики загрязнения природных вод северного Таджикистана. Аспекты качества воды водохранилища г. Гулистан исследованы в работах [112].

Авторы работы [113] изучили распространение и миграцию радионуклидов в водных средах некоторых районов Таджикистана.

Методика измерения радона в водной среде, рекомендации по уменьшению его концентрации в водах приводятся в работе [114].

Определение радона в воде и миграция продуктов распада радона изучены в работах [115-117].

В работах [118-121] исследовано загрязнение подземных вод тяжёлыми радиоактивными металлами, процессы очистки вод, сорбционная методика очистки различными эффективными сорбентами. Кинетика сорбционного процесса очистки дренажных вод от ионов тяжёлых металлов и радионуклидов эффективными адсорбентами изучена в работе [122].

Оценка состояния воды и многостадийная очистка вод, содержащих радионуклиды, изучены в [123-125].

Таким образом, очистка вод от радионуклидов и тяжёлых металлов является трудной задачей и полностью воды очистить невозможно. Многостадийная очистка вод различными сорбентами даёт необходимый результат. Особый подход имеет радон в водной среде, и в [114] разработана методика измерения Rn и рекомендации по уменьшению его концентрации в воде [114].

### ***1.2.3. Радионуклиды в воздушном бассейне Таджикистана***

Атмосфера Земли подвергается постоянному воздействию радиоактивных компонентов, поступающих из различных источников. Часть этих веществ формируется непосредственно в воздушной среде под действием космического излучения, способного инициировать ядерные реакции в верхних слоях атмосферы. Дополнительный вклад вносят микрочастицы космической пыли, оседающие на планету в процессе её движения по орбите. Значительное количество радионуклидов также поступает из земной коры - в результате распада природных радиоактивных элементов, таких как уран, радий и торий, содержащихся в почве и горных породах. Эти вещества способны мигрировать в атмосферу через процессы диффузии, испарения и аэрозольного переноса. Особую роль в накоплении радиоактивных изотопов играет антропогенная деятельность, особенно ядерные испытания [121].

При взрыве ядерного заряда образуется мощный восходящий поток, поднимающий радиоактивные частицы в верхние слои атмосферы. Несмотря

на то, что эти изотопы постепенно осаждаются на поверхность Земли с осадками, их глобальные запасы в атмосфере остаются значительными.

Одной из ключевых экологических угроз, связанных с радиоактивным загрязнением атмосферы, является высокая мобильность радионуклидов, способных беспрепятственно распространяться по всей поверхности планеты. Из-за своей летучести и способности перемещаться с воздушными потоками, эти вещества невозможно локализовать или изолировать в пределах ограниченных территорий. Особую сложность представляют инертные радиоактивные газы - такие как ксенон-133 и криптон-85.

В последние десятилетия в рамках международных экологических инициатив и технологических модернизаций предприятий ядерно-топливного цикла были предприняты меры по снижению выбросов благородных газов в атмосферу. Эти усилия привели к заметному уменьшению концентраций таких изотопов, как Xe-133 и Kr-85, в воздушной среде. Тем не менее, из-за отсутствия эффективных методов утилизации, единственным способом устранения этих газов остаётся их естественный радиоактивный распад. В этом контексте особое значение приобретает радон, который играет важную роль в формировании внутреннего радиационного фона.

Среди природных источников ионизирующего излучения, оказывающих влияние на население, наибольший вклад в суммарную дозу облучения вносят гамма-излучение от земной поверхности, космические лучи, и особенно радон - радиоактивный газ, образующийся при распаде урана в почве и горных породах [127].

Наибольшую угрозу для здоровья человека радон представляет в условиях ограниченного воздухообмена - внутри помещений, где он способен накапливаться в воздухе до значительных концентраций. Уровень содержания этого инертного радиоактивного газа зависит от множества факторов, включая: геохимический состав почвы и подстилающих пород; способность горных пород выделять радон (эманирующая активность);

климатические особенности региона; конструктивные и архитектурные параметры зданий; эффективность вентиляционных систем и кратность воздухообмена.

Концентрация радона в помещениях может варьироваться в широких пределах в зависимости от географического положения, типа постройки и времени года. По данным Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), индивидуальная годовая доза облучения от радона может отличаться в 0,5–100 раз от модального значения. В отдельных случаях зарегистрированные уровни превышают не только допустимые значения для населения, подвергающегося техногенному воздействию, но и профессиональный предел в 20 мЗв/год, установленный для работников, контактирующих с источниками ионизирующего излучения [128].

Для оценки радоновой активности в воздухе на территории Таджикистана были применены пассивные трековые экспозиметры - пластиковые детекторы, способные регистрировать ОА радона в широком диапазоне от 15 до 25 000 Бк/м<sup>3</sup>. Трековые экспозиметры обеспечивают длительный период наблюдений - от двух до шести месяцев, позволяя получить усреднённые значения, отражающие сезонные колебания.

Помимо измерения радоновой концентрации, проводился также мониторинг гамма-фона. Исследования охватывали как зимний период (в условиях отопления и ограниченного воздухообмена), так и тёплое время года, по три месяца в каждый период [129–130].

Анализ полученных данных показал, что концентрация радона в помещениях, расположенных на первых этажах зданий, как правило, выше, чем на вторых. В частности, в районах Хатлонской области среднегодовое значение эффективной эквивалентной объемной активности радона (ЭРОА) на первом этаже составляло около 70 Бк/м<sup>3</sup>, тогда как на втором - примерно 60 Бк/м<sup>3</sup> [131]. Разница в уровнях радона между этажами подтверждает влияние близости к источнику - почве и фундаменту - на степень радиационного воздействия.

Анализ взаимосвязи между эффективной эквивалентной объемной активностью радона (ЭРОА) и геологическим строением почвы в районах размещения зданий показал выраженную закономерность лишь вблизи урановых хвостохранилищ, расположенных на севере Таджикистана. Наибольшие значения содержания радона были зафиксированы в ряде зданий посёлка Старый Табошар, ныне - город Истиклол. Концентрации радона в воздухе помещений достигали от 527 до 826 Бк/м<sup>3</sup>, что значительно превышает средние показатели по региону. Причинами повышенного уровня радона являются использование при строительстве фундаментов и стен материалов, обладающих высоким содержанием природных радионуклидов (ПРН), таких как уран, торий и радий. Дополнительным фактором выступает отсутствие эффективных систем вентиляции в ряде зданий. Недостаточная кратность воздухообмена и слабая циркуляция воздуха способствуют накоплению радона и его дочерних продуктов распада, особенно в подвальных и цокольных помещениях [130].

Для определения средней индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленного короткоживущими продуктами распада радона (такими как полоний-218, свинец-214 и висмут-214), использовались данные о его объемной активности, полученные в результате измерений в жилых и общественных зданиях. Для вычислений применялся дозовый коэффициент, рекомендованный Комитетом ООН по научным исследованиям воздействия радиации (НКДАР) в отчётах за 2000 и 2006 годы, который составляет  $9,0 \times 10^{-6}$  мЗв на (Бк·ч/м<sup>3</sup>) [132–133].

В ряде исследований [134–137] подробно рассматривается уровень радона в жилых зданиях различных населённых пунктов Таджикистана. В частности: в работе [134] представлены данные по концентрации радона в воздухе жилых помещений городов Чкаловск и Кайрокум; исследование [135] посвящено оценке радоноопасности территории Б. Гафуровского района; мониторинг радонового фона в Дж. Расуловском районе описан в источнике [136]; в работе [137] рассматриваются уровни радона в воздухе жилых зданий Спитаменского района.

В работах [138, 139] описана оценка радоноопасности территории Дигмайского хвостохранилища.

## **ГЛАВА 2. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В БИОСФЕРЕ ТАДЖИКИСТАНА**

### **2.1. Изучение содержания природных радионуклидов в почвах юго-западных и восточных районов Республики Таджикистан**

Человеческий организм ежедневно подвергается внешнему воздействию ионизирующего излучения, исходящего от множества природных источников. К ним относятся радиоактивные элементы, содержащиеся в земной коре, почвенных слоях, атмосферных аэрозолях, водных системах и строительных материалах, используемых в жилой и промышленной архитектуре. Существенную роль также играет космическое излучение.

Однако не менее значимым компонентом радиационного фона является внутреннее облучение, обусловленное присутствием в организме человека естественных радионуклидов - за исключением радона. Согласно обобщённым оценкам, вклад внутренних радионуклидов превышает 25% от общего воздействия природных источников и составляет порядка 0,77 мЗв/год. В совокупности с техногенными компонентами, общая годовая эффективная доза облучения человека достигает 4,06 мЗв/год.

Среди естественных радионуклидов, наиболее распространённых в земной коре, ключевыми являются: торий-232 ( $^{232}\text{Th}$ ), радий-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) и калий-40 ( $^{40}\text{K}$ ). Их вклад в облучение населения примерно в два раза превышает влияние космических лучей, уступая лишь радону и медицинским источникам.

Радиоактивные вещества являются естественной частью окружающей среды и играют важную роль в биологических процессах. Они входят в состав питательных сред, необходимых для роста и развития растений, животных и человека. Однако при превышении допустимых концентраций они могут оказывать негативное влияние на здоровье - способствуя развитию онкологических заболеваний, таких как лейкемия, нарушая кровообращение, снижая функциональную активность жизненно важных органов и систем.

Хроническое воздействие даже низких доз радиации может привести к накоплению мутаций и ослаблению иммунной защиты организма.

Изотопы тория-232 (Th-232), радия-226 (Ra-226) и калия-40 (K-40) принадлежат к различным природным радиоактивным группам, отличающимся по происхождению, типу распада и дочерним цепочкам, и демонстрируют заметные различия в своих ландшафтно-геохимических характеристиках. Торий-232 преимущественно присутствует в почвах в виде изоморфных примесей, встроенных в структуру первичных кислых силикатных минералов. Благодаря своей химической природе, он легко включается в кристаллическую решётку таких пород, особенно в граниты и другие кислые магматические образования. Радиоактивный изотоп калия, K-40, также может входить в состав минералов в виде изоморфной примеси. Кроме того, он активно сорбируется глинистыми минералами - особенно гидрослюдами и монтмориллонитом. Такая способность к сорбции делает калий подвижным элементом в почвенно-грунтовой среде. Радий-226 отличается более сложным происхождением: он является продуктом радиоактивного распада урана-238, что делает его содержание в почвах напрямую зависимым от наличия урановых минералов. Помимо изоморфного замещения, радий проявляет способность к биологическому накоплению - он избирательно поглощается высшими растениями. Это свойство, вероятно, связано с эволюционным наследием древних форм жизни, для которых радиоактивность радия могла служить дополнительным источником энергии.

Учитывая вышеописанные механизмы, можно ожидать повышенного содержания естественных радионуклидов (ЕРН) в почвах тяжёлого гранулометрического состава, особенно в тех, что сформированы на кислых магматических породах. Для радия дополнительным фактором является степень гумусированности почвы, а также наличие урана как исходного элемента радиоактивного семейства.

В этом разделе представлена оценка закономерностей распределения естественного радиационного фона на территории Республики Таджикистан, с фокусом на Хатлонскую область. Исследование направлено на выявление роли почвообразования и антропогенного воздействия в миграции и накоплении природных радионуклидов -  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{40}\text{K}$ .

Площадь полевых исследований составляет около 14 000 км<sup>2</sup>, охватывая типичные ландшафты Бохтарского и Кулябского регионов. Территория включает участки с различными природными условиями, что позволяет проследить влияние геологических и климатических факторов на радиационный фон. Было изучено более 50 образцов почв различных генетических типов, а также почвообразующих пород. Пробы отбирались по стандартной методике с глубины до 25 см - в пределах наиболее активного слоя почвенного профиля. Удельная активность радионуклидов определялась с помощью гамма-спектрометра с германиевым детектором высокой чистоты (CANBERA), с применением программного обеспечения Genie-2000 (таблица 2.1).

В условиях климатической однородности региона основным фактором, влияющим на пространственное распределение радионуклидов, оказался гранулометрический состав почв. Более тяжёлые фракции, особенно глинистые, способствуют сорбции радионуклидов, ограничивая их миграцию и способствуя локальному накоплению.

В таблице 2.1 приведены результаты измерения удельной активности (Бк/кг) образцов почв на гамма-спектрометре. В таблице 2.1 жирным шрифтом отмечены максимальные значения удельной активности образцов для каждого столбца.

Анализ содержания естественных радионуклидов (ЕРН) в почвах Хатлонской области выявил статистически значимые различия между почвами различного гранулометрического состава. При уровне значимости  $p > 99\%$  установлено, что наиболее выраженные контрасты наблюдаются между лёгкими (песчаными) и тяжёлыми (глинистыми) почвами.

В песчаных почвах содержание ЕРН существенно ниже. Так, согласно данным таблицы 2.1, образец «Шаартуз 2», отобранный на территории Айвача, демонстрирует минимальные значения активности радионуклидов. Это объясняется слабой сорбционной способностью песчаных фракций и высокой водопроницаемостью, способствующей выщелачиванию изотопов под воздействием осадков и других природных факторов.

В отличие от песчаных, глинистые почвы обладают высокой способностью к удержанию радионуклидов. В таких образцах, как «Н. Хусрав 2», «Кабодиян 3», «Фархор 4», «Темурмалик 2», «Хамадони 1» и других, фиксируется присутствие практически всех радиоизотопов семейств  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Это связано с плотной структурой глин, высоким содержанием коллоидных частиц и способностью к сорбции, что делает их эффективным барьером для миграции радионуклидов.

**Таблица 2.1.** – Удельная активность радионуклидов в почвенных образцах (Бк/кг)

Район	Ka-40	Bi-214	Pb-214	Pb-210	Bi-212	Pb-212	Ac-228	Th-228	U-238	Ra-226
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Н. Хусрав	542.866	31.347	31.083	38.034	22.554	29.018	32.885	-	23.002	66.4798
Н. Хусрав 2	589.413	29.724	30.341	26.867	20.294	34.425	36.088	<b>120.138</b>	<b>125.886</b>	36.380
Н. Хусрав 3	460.530	<b>37.894</b>	35.897	26.470	27.435	20.156	34.391	-	27.530	<b>80.514</b>
Н. Хусрав 4	320.901	5.425	23.768	23.174	15.856	21.071	24.456	-	16.574	44.581
Шаартуз 1	645.099	22.266	21.023	27.389	17.295	23.067	26.673	60.103	15.486	10.335
Шаартуз 2	594.437	26.611	-	-	-	-	-	-	-	-
Шаартуз 3	605.775	32.171	31.673	25.795	23.720	36.400	40.746	-	-	-
Кабодиян 1	507.373	30.231	24.994	-	23.444	-	-	-	-	43.280
Кабодиян 2	624.673	30.928	29.153	29.979	25.023	32.532	37.399	-	21.432	38.058
Кабодиян 3	626.553	37.019	35.193	31.332	<b>39.659</b>	28.218	43.143	107.535	45.715	46.712
Кабодиян 4	601.886	29.568	25.487	23.209	24.324	33.271	38.949	88.169	22.131	-
Ховалинг 1	678.144	31.568	28.171	-	33.483	-	46.948	-	-	-
Ховалинг 2	555.680	31.370	30.442	38.903	25.370	38.517	39.555	-	23.520	-
Ховалинг 3	661.583	34.583	33.728	49.230	31.965	46.202	46.440	-	29.981	-

Продолжение таблицы 2.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ховалинг 4	<b>787.757</b>	36.961	<b>37.212</b>	50.108	33.600	<b>49.885</b>	<b>52.070</b>	-	23.804	-
Ховалинг 5	547.016	32.675	32.219	25.135	26.862	39.702	41.304	-	-	-
Куляб 1	443.353	25.521	23.784	31.191	19.511	27.904	29.007	73.805	19.958	56.313
Куляб 2	520.644	33.469	32.683	33.403	24.775	37.357	39.946	99.376	27.961	74.908
Восе 1	578.860	37.058	35.345	33.694	26.895	36.768	41.022	-	-	-
Восе 2	526.575	35.387	35.801	33.190	25.039	33.685	36.909	-	24.876	66.888
Восе 3	365.382	22.881	22.379	24.022	16.479	24.285	25.180	-	18.360	-
Восе 4	545.480	26.764	26.477	21.608	21.115	26.764	33.175	-	17.451	-
Восе 5	611.384	30.489	29.186	24.840	24.401	37.041	37.152	-	23.837	-
Фархор 1	484.751	27.169	26.475	26.042	20.701	30.962	33.306	-	23.012	-
Фархор 2	485.644	30.457	29.401	-	22.751	33.132	34.223	-	23.778	66.164
Фархор 3	496.468	32.737	30.286	33.826	21.725	31.466	35.152	-	-	68.881
Фархор 4	560.737	30.799	31.132	29.271	22.486	35.119	36.437	99.658	23.375	40.121
Темурмалик 1	567.175	29.841	28.437	-	25.597	-	-	-	-	-
Темурмалик 2	532.354	28.754	28.131	31.896	22.387	32.900	34.153	80.957	24.891	34.595

Продолжение таблицы 2.1.

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
Хамадони 1	413.168	26.077	25.466	23.381	19.346	27.941	30.075	62.605	17.822	55.396
Хамадони 2	460.530	37.894	35.897	26.470	20.156	27.435	34.391	-	27.530	80.514
Хамадони 3	445.031	25.809	24.153	22.218	17.275	27.146	29.136	68.594	20.659	49.435
Сари Хосор 1	472.973	22.118	21.796	<b>120.387</b>	19.367	28.747	29.084	74.783	21.74203	17.516
Сари Хосор 2	779.305	30.286	30.398	22.080	24.639	34.280	37.483	-	24.630	27.783
Сари Хосор 3	418.319	22.595	22.148	26.997	15.775	24.469	24.992	-	15.773	14.208

## 2.2. Содержание изотопа цезия-137 в почвенном покрове центрального и южного Таджикистана

Последствия масштабных атмосферных ядерных испытаний, активно проводившихся в начале 1960-х годов, а также техногенные катастрофы на Чернобыльской АЭС и японской атомной станции «Фукусима», в совокупности с интенсивным развитием атомной энергетики и широким внедрением радионуклидов в медицине, промышленности и научных исследованиях, обусловили необходимость системного изучения поведения искусственных радионуклидов в природной среде. Вопросы их миграции, накопления и воздействия на биосферу приобрели особую значимость в контексте оценки экологических рисков и радиационной безопасности.

Одним из наиболее распространённых и устойчивых техногенных радионуклидов является цезий-137. Он обладает высокой химической стабильностью и выраженной способностью к сорбции, широко распространён в различных компонентах окружающей среды. Его присутствие фиксируется в почвенных горизонтах, донных отложениях пресноводных и морских водоёмов, а также в составе атмосферных осадков. Благодаря этим свойствам,  $^{137}\text{Cs}$  используется как индикатор радиационного загрязнения и как инструмент ретроспективного анализа техногенных воздействий.

В рамках настоящего раздела представлены результаты исследований, направленных на выявление пространственной структуры распределения цезия-137 в почвенном покрове ряда районов центральной и южной части Таджикистана. Исследование основано на анализе проб, отобранных в период с 2018 по 2020 годы. Особое внимание уделено влиянию рельефа местности и механического состава грунтов на концентрацию  $^{137}\text{Cs}$ .

Для достижения поставленных целей исследования, направленного на изучение пространственного распределения техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвенном покрове центрального и южного Таджикистана, был реализован комплекс задач, включающий следующие ключевые этапы:

- идентификация объектов исследования и анализ рельефа местности;
- выбор репрезентативных точек и отбор почвенных проб;
- лабораторная обработка и анализ проб;
- оценка характера пространственного распределения радионуклида;
- картографирование содержания  $^{137}\text{Cs}$  - с использованием полученных данных составлена тематическая карта, отражающая уровни загрязнения почв цезием-137 в центральной и южной части Республики Таджикистан.

Таджикистан - это государство, чья территория почти полностью охвачена горными массивами, что делает его ярким примером высокогорной страны. Рельеф страны отличается исключительным разнообразием и выраженной вертикальной расчленённостью. Абсолютные высоты на её территории варьируются от 300 до 7495 метров над уровнем моря, причём более половины всей площади располагается выше отметки 3000 метров. Рельеф страны подразделяется на несколько высотных поясов: от 300 до 900 метров - равнинные участки, от 900 до 1600 метров - предгорные зоны, далее следуют низкогорья (1600–2300 м), среднегорья (2300–3500 м) и, наконец, высокогорные области, превышающие 3500 метров над уровнем моря. Такая вертикальная расчленённость рельефа формирует сложную природную среду с резкими переходами между ландшафтами. Равнинные участки, составляющие менее 7% от общей площади республики, подчёркивают преобладание горных территорий.

Почвенный покров Таджикистана также представлен широким разнообразием. Изменчивость высот, сопряжённая с климатическими контрастами, обуславливает чётко выраженную вертикальную зональность почв. Территория Таджикистана условно делится на четыре основных почвенных пояса, каждый из которых характеризуется специфическим механическим составом, водоудерживающей способностью и сорбционными свойствами, влияющими на миграцию и накопление радионуклидов.

Выбранные для проведения почвенных исследований районы охватывают широкий диапазон природных условий, отражающих богатство

и контрастность географических форм Таджикистана. Пространственный охват включает: высокогорные пустынные плато, альпийские луга, равнинные участки, глубокие ущелья, скалистые хребты. Такое ландшафтное разнообразие создаёт уникальные условия для изучения пространственного распределения техногенных радионуклидов, в частности цезия-137, в различных типах почв и рельефных формах.

Полевые исследования охватывали обширную территорию площадью около 45 000 км<sup>2</sup>, включающую четыре крупных региона: Гиссарский, Раштский, Бохтарский и Кулябский. В рамках работы было собрано 92 образца почв, охватывающих широкий спектр типов и условий формирования (таблица 2.2). В каждом районе было определено от 3 до 8 контрольных точек, расположенных на расстоянии 4–7 км друг от друга, что обеспечило репрезентативность выборки.

Пробоотбор проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01–2017, с глубины до 25 см от поверхности земли - в пределах наиболее активного слоя почвенного профиля. Все образцы были разделены на две категории: почвы с обрабатываемых сельскохозяйственных участков и почвы с необрабатываемых земель.

Каждый образец почвы, отобранный в рамках исследования, проходил предварительную подготовку, включающую удаление органических остатков, каменистых включений и иных посторонних фрагментов. Из объединённой массы, полученной методом квартования, формировались репрезентативные образцы объёмом около 10 дм<sup>3</sup>. Затем каждый образец высушивался на открытом воздухе, дробился механическим методом, просеивался через сито с диаметром ячеек 2,0 мм, что обеспечивало однородность фракционного состава.

Для определения активности радионуклидов применялись стандартные измерительные ёмкости типа «Маринелли» объёмом 1 литр. Радиологический анализ проводился с использованием высокоточного гамма-спектрометра, оснащённого детектором из особо чистого германия

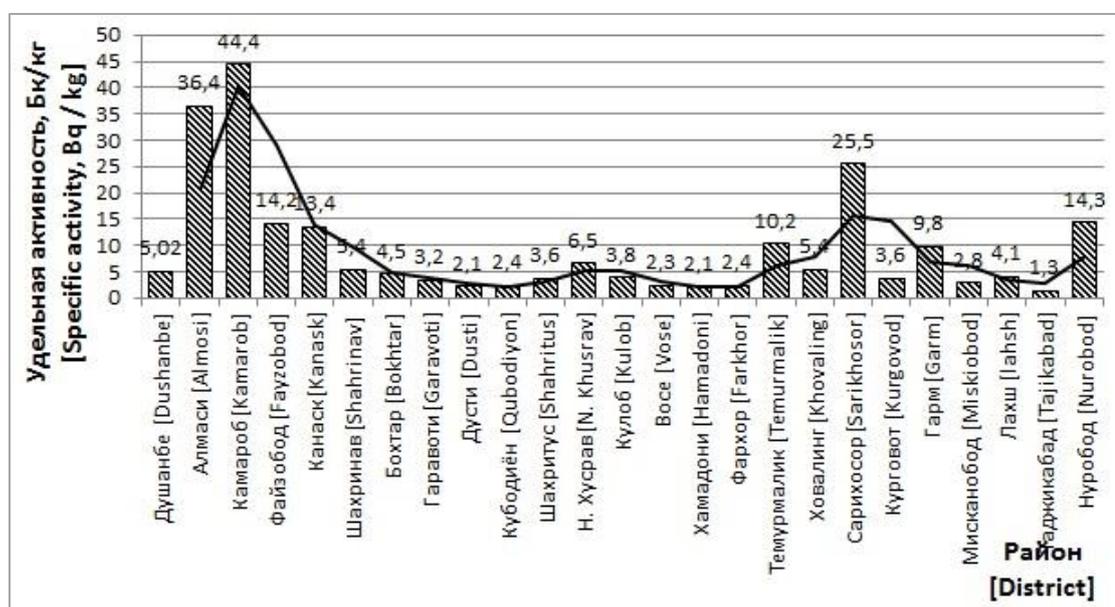
(CANBERA), в сочетании с аналитическим программным обеспечением Genie-2000. Все измерения выполнялись в условиях аккредитации в Лаборатории технических услуг Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Республики Таджикистан.

Полученные данные об удельной активности цезия-137 в почвенных образцах, собранных в различных территориях центральной и южной части Таджикистана, систематизированы в таблице 2.2. На рисунке 2.1 представлена диаграмма, отражающая средние значения активности радионуклида цезия-137. Полученные данные позволяют оценить пространственное распределение цезия-137, а также выявить потенциальные зоны накопления радионуклидов в зависимости от типа почвы и характера землепользования.

**Таблица 2.2.** – Распределение цезия-137 в почвах Таджикистана: точки пробоотбора и их количество

Район	Широта	Долгота	Кол-во проб	Средняя удельная активность, Бк/кг
Душанбе	38.573060	68.786390	4	5.02
Алмоси	38.585700	68.560300	3	36.4
Камароб	38.942500	69.683400	4	44.4
Файзобод	38.5313442	69.2601323	8	14.2
Канаск	38.680978	69.214411	3	13.4
Шахринав	38.577222	68.329722	5	5.4
Бохтар	37.8319905	68.7803554	3	4.5
Гаравоти	37.6711698	68.5490378	3	3.2
Дусти	37.348611	68.673333	3	2.1
Кубодиён	37.3467744	68.1673638	5	2.4
Шахритус	37.259444	68.134722	5	3.6
Н. Хусрав	37.250000	68.000000	4	6.5
Кулоб	37.911944	69.780833	3	3.8

Воце	37.833333	69.583333	4	2.3
Хамадони	37.656667	69.629167	3	2.1
Фархор	37.483333	69.416667	4	2.4
Темурмалик	38.178611	69.569167	3	10.2
Ховалинг	38.341940	69.975310	4	5.4
Сари Хосор	38.600610	69.919600	3	25.5
Курговат	39.028710	70.374460	3	3.6
Гарм	39.1690888	70.8909218	3	9.8
Мисканобод	38.5687075	69.3623526	3	2.8
Лахш	39.3028047	71.4696426	3	4.1
Таджикабад	38.508817	68.954507	3	1.3
Нуробод	38.781692	70.073327	3	14.3



**Рисунок 2.1.** – Средняя удельная активность цезия-137 в почвах: графическое представление по центральному и южному регионам Таджикистана.

Анализ показал, что уровень активности  $^{137}\text{Cs}$  варьируется в зависимости от региона, что может быть обусловлено как природными

факторами (рельеф, тип почвы, климат), так и антропогенными воздействиями (сельскохозяйственная деятельность, исторические техногенные выбросы).

Диаграмма на рисунке 2.1 демонстрирует неоднородность распределения удельной активности радионуклида цезия-137 в почвах различных районов центрального и южного Таджикистана. Наибольшие значения средней активности цезия-137 зафиксированы на территории Сари-Хосора и Раштской зоне (преимущественно в высокогорьях). Такая концентрация может быть обусловлена рядом природных факторов, включая сложный орографический рельеф, специфические климатические условия (высокая влажность, пониженные температуры, ограниченная циркуляция воздушных масс), а также минимальный уровень антропогенного вмешательства.

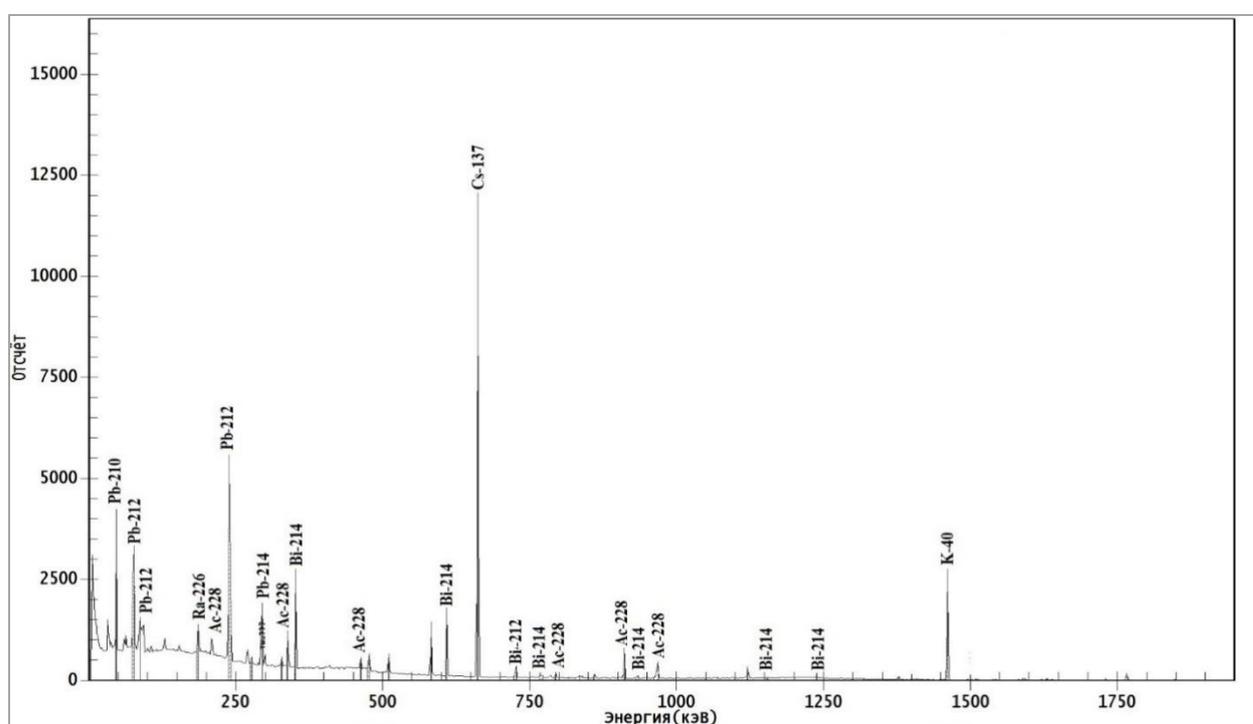
В противоположность этому, минимальные значения активности  $^{137}\text{Cs}$  были зарегистрированы в районе Таджикабада, где средняя УА составила всего 1,3 Бк/кг. Наибольшее значение удельной активности было обнаружено в пробе почвы, отобранной у подножия горы в местности Камароб (Раштский район), где оно составило 147.5 Бк/кг. Средняя активность по району - 44.4 Бк/кг, что значительно превышает показатели других исследованных территорий.

На рисунке 2.2 отображён энергетический спектр гамма-излучения, зарегистрированный при исследовании пробы почвы №1, отобранной в районе Камароб.

Энергетический спектр гамма-излучения, представленный на рисунке 2.2, демонстрирует выраженный пик полного поглощения, соответствующий изотопу  $^{137}\text{Cs}$  с энергией 661 кэВ. Его интенсивность значительно превышает уровни активности природных радионуклидов —  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ .

Сделано заключение, что высокая концентрация  $^{137}\text{Cs}$  обусловлена географическими и геологическими особенностями ущелья Камароб.

Рассматриваемая долина представляет собой изолированную геоморфологическую структуру протяжённостью около 35 км, окружённую высокими горными массивами, склоны которых покрыты чередующимися лесными и луговыми формациями. Единственный выход из этого ущелья - узкий горный проход, расположенный между вершинами, что создаёт замкнутую циркуляционную систему и ограничивает воздушный обмен с внешней средой. Такая конфигурация способствует интенсивному накоплению аэрозольных осадков, пылевых частиц и других атмосферных компонентов, включая техногенные радионуклиды.



**Рисунок 2.2.** – Характеристика гамма-активности почвы: спектр пробы №1 из Камароб.

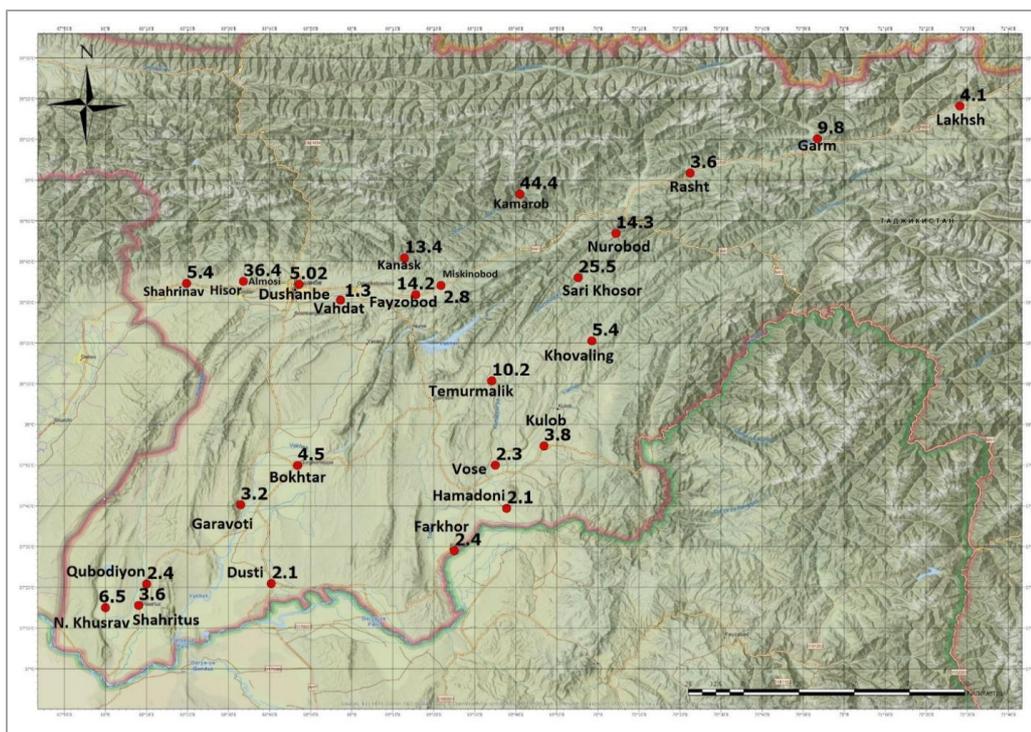
Аналогичные геоэкологические условия характерны для многих горных районов Таджикистана, где сложный рельеф и замкнутая структура ущелий оказывает влияние на пространственное распределение радионуклидного загрязнения.

Кроме того, процессы водной и ветровой эрозии способствуют смыву верхнего слоя почвы, который оседает у подножья склонов. Именно в этих

зонах происходит накопление техногенных радионуклидов, включая  $^{137}\text{Cs}$ , что подтверждается спектром, полученным при анализе пробы.

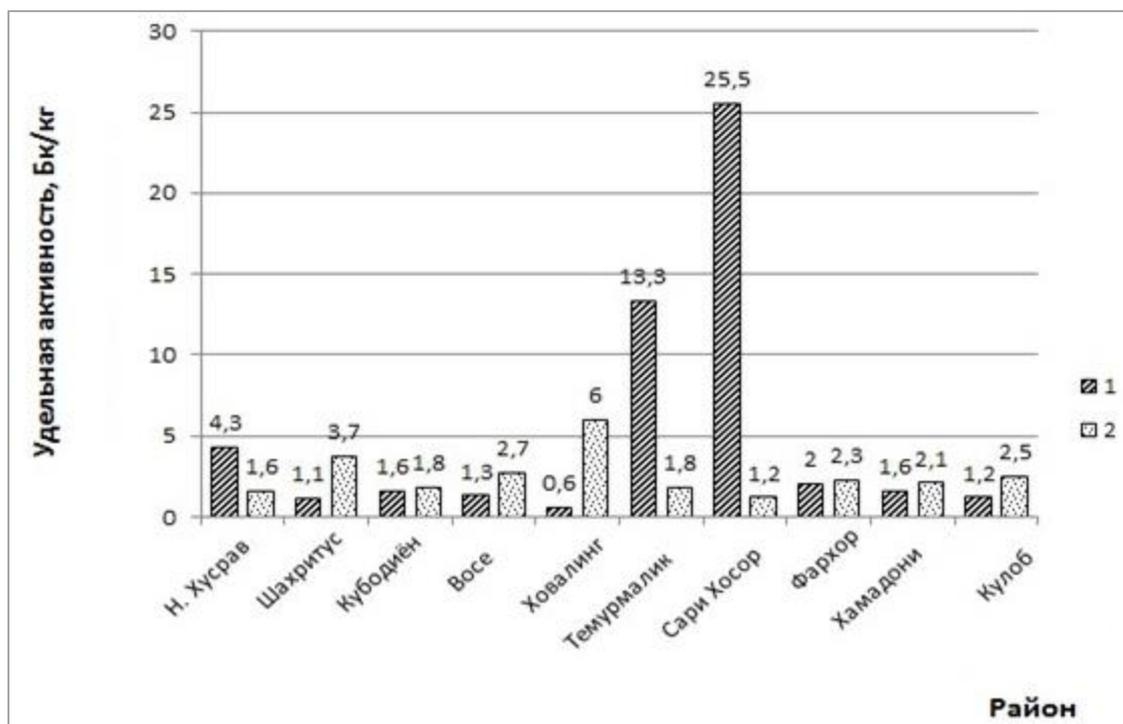
В отдельных образцах почвы, таких как проба №2 из пустынной зоны Айвадж (район Шахритус) и проба №4 из района Фархор, радионуклид  $^{137}\text{Cs}$  не был обнаружен. Обе пробы характеризуются песчаным типом почвы, что, вероятно, связано с высокой проницаемостью песчаных пород: вертикальная миграция радионуклидов в таких условиях происходит интенсивно, и они быстро уходят в глубинные слои, недоступные для поверхностного анализа.

На рисунке 2.3 представлена тематическая карта, демонстрирующая географическое распределение средних значений удельной активности радионуклида цезия-137 в почвах различных регионов страны. Все значения выражены в беккерелях на килограмм (Бк/кг). Визуализация на карте наглядно отражает выраженную пространственную неоднородность радиационного фона, обусловленного как природными, так и антропогенными факторами. Чётко прослеживаются участки с повышенным содержанием  $^{137}\text{Cs}$ , что может быть связано с особенностями рельефа, климатическими условиями, характером почв и историческим выпадением радионуклидов в результате глобальных ядерных событий.



**Рисунок 2.3.** – Геопространственное распределение активности Cs-137 в почвах на территории Таджикистана (Бк/кг)

Степень вертикального перемещения радионуклидов в почвенном профиле существенно зависит от типа почвы и её физико-химических характеристик. Согласно результатам исследований, от 60 до 95% общего содержания радионуклидов, локализованных в верхнем 30-сантиметровом слое, может подвергаться нисходящей миграции под действием диффузионных и гравитационных процессов. Изучено пространственное распределение техногенного радионуклида цезия-137 в почвах Хатлонской области Таджикистана. Исследование охватывало как необрабатываемые участки, сохраняющие природную структуру, так и сельскохозяйственные земли, подвергнутые агротехническому воздействию. На рисунке 2.4 представлена диаграмма, демонстрирующая вариативность содержания цезия-137 в зависимости от типа землепользования.



**Рисунок 2.4.** – Сравнительная диаграмма удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Хатлонской области: 1 - необрабатываемые участки, 2 – обрабатываемые сельскохозяйственные поля.

Анализ почвенных образцов (рисунок 2.4) показал, что удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в горных необрабатываемых районах заметно выше, чем на сельскохозяйственных участках. Однако на равнинных территориях наблюдаются случаи, когда содержание  $^{137}\text{Cs}$  в обработанных почвах превышает уровень в необрабатываемых. Это явление, вероятно, связано с агротехническими процессами: при вспашке радионуклиды, ранее ушедшие в глубину, возвращаются в верхние слои почвы.

В ходе исследований, проведённых в 2018–2020 гг., было установлено, что уровень загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  зависит от рельефа местности и физико-химических свойств грунта. Наибольшие концентрации радионуклида зафиксированы в горных районах Раштской зоны, на территории Сари Хосора, а также в необрабатываемых землях Хатлонской области. В песчаных почвах  $^{137}\text{Cs}$  зачастую не обнаруживается, что может свидетельствовать о его высокой миграционной способности и слабой сорбции в таких типах грунта.

Полученные данные позволили выявить устойчивые закономерности в пространственном распределении цезия-137, что имеет важное значение для мониторинга радиационной обстановки на территории почв центрального и южного Таджикистана.

### **2.3. Экологическое воздействие изотопа цезия-137 на окружающую среду Таджикистана**

В данном разделе рассматриваются особенности пространственного распределения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах различных регионов Таджикистана с учётом рельефа местности и гранулометрического состава грунта.

Работы по отбору проб охватывали широкий спектр природных ландшафтов, отражающих географическое и экологическое разнообразие территории Таджикистана. Исследуемые участки включали альпийские луга с плотным травяным покровом, высокогорные и равнинные пустынные зоны

с минимальной растительностью, а также узкие речные ущелья, окружённые скалистыми хребтами, формирующими замкнутые орографические структуры. Географический охват включал ключевые регионы страны: Гиссарский, Раштский, Бохтарский и Кулябский административные округа, а также Согдийскую область.

**Таблица 2.3.** – Сведения об отобранных пробах и характеристике местности

Территориальное деление	Тип площадки	Тип почвы	Количество проб	Усредненная УА цезия-137 в почве, Бк/кг
Северные районы	Среднегорный с горными коричневыми почвами	Скалистый, глинистый	41	11,5
Центральные районы	Среднегорный с горными коричневыми почвами	Глинистый	30	11,42
Южные районы	Равнинно-низкогорный в основном с серозёмными почвами	Песчаный	44	4,5
Юго-восточные районы	Высокогорный с высокогорными пустынно-степными, занговыми и пустынными почвами	Скалистый	19	17,0

В рамках исследования было отобрано 134 образца почв различных типов, что отражено в таблице 2.3. Пробоотбор осуществлялся поэтапно:

первый этап (2018–2020 гг.) - охватывал центральные, южные и юго-восточные районы страны, включая участки с разнообразным рельефом и климатическими условиями. Второй этап (2021–2022 гг.) - был сосредоточен на северных территориях, с акцентом на горные и предгорные зоны. Выбор точек пробоотбора осуществлялся с учётом геоморфологических особенностей местности, механического состава почв, что позволило охватить широкий спектр природных условий (рисунок 2.5).



**Рисунок 2.5.** – Территориальное деление Таджикистана по областям и районам.

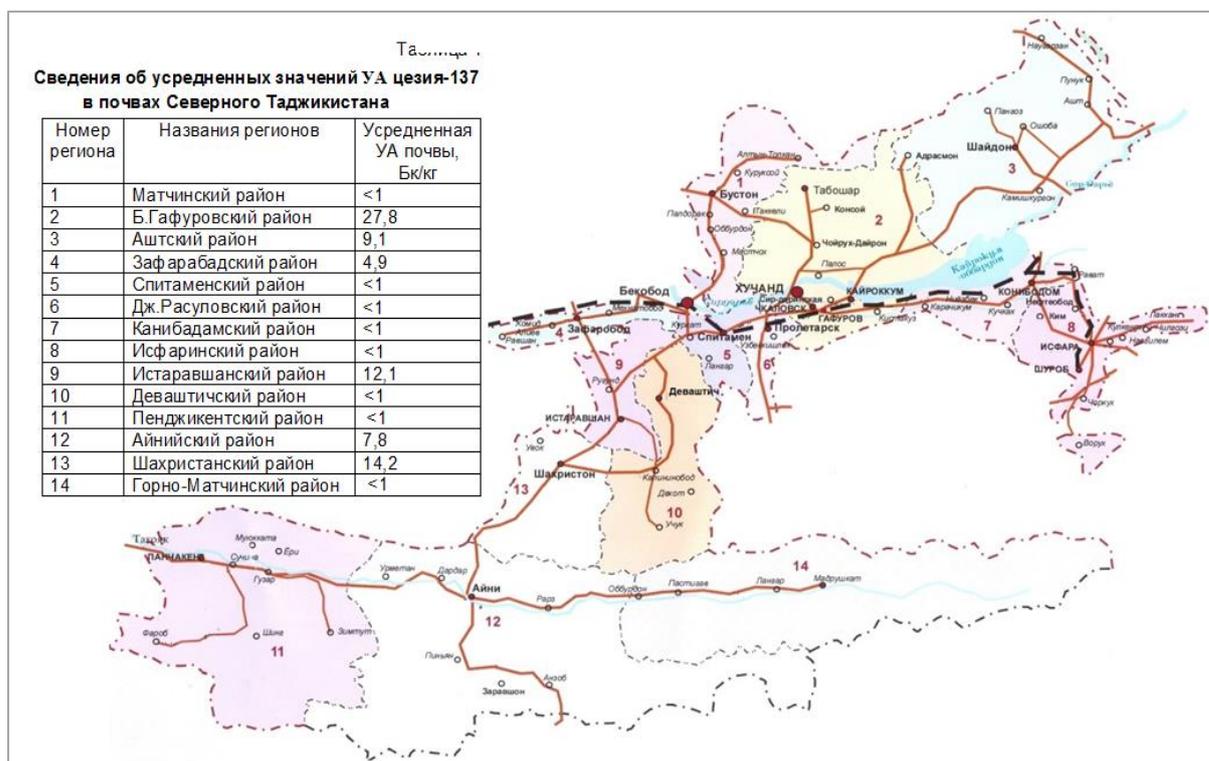
В каждом регионе Таджикистана было выбрано от 20 до 40 точек для отбора проб, расположенных на расстоянии 5–7 км друг от друга. Пробоотбор осуществлялся в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01–2017, с глубины до 25 см от поверхности - в пределах верхнего слоя почвы, наиболее подверженного техногенному воздействию.

Все пробы были разделены на две группы: почвы с необрабатываемых участков (естественные ландшафты) и почвы с сельскохозяйственных территорий, активно используемых в производственной деятельности.

Перед проведением спектрометрического анализа каждый образец проходил многоступенчатую процедуру подготовки. Сначала материал очищался от посторонних включений - камней, корневых фрагментов и мусора. Из общей массы методом квартования отбирался объём, превышающий 1 литр, обеспечивающий репрезентативность выборки. Далее образцы сушили до состояния воздушно-сухой почвы, дробили механическим методом, просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм для получения однородной фракции.

Для определения удельной активности цезия-137 использовались стандартные измерительные ёмкости типа «Маринелли» объёмом 1 литр. Измерения проводились с использованием гамма-спектрометра, оснащённого высокочувствительным детектором из особо чистого германия (CANBERA), в сочетании с программным обеспечением Genie-2000, обеспечивающим точную обработку спектральных данных. Погрешность измерений варьировалась в пределах от 6% до 13%. Все аналитические процедуры выполнялись в условиях аккредитации Лаборатории технических услуг Агентства по ХБРЯ безопасности НАНТ.

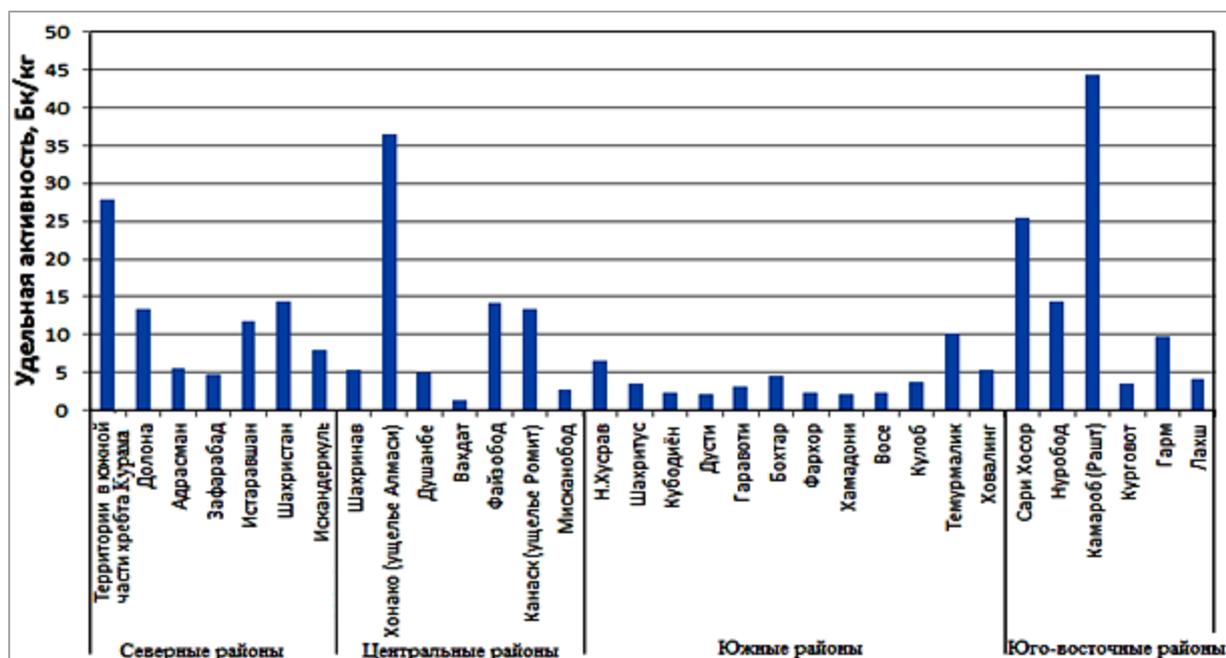
Рисунок 2.6 отражает тематическую карту, демонстрирующую пространственное распределение средних значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах различных районов Таджикистана. Значения выражены в беккерелях на килограмм (Бк/кг).



**Рисунок 2.6.** – Географическое распределение средней удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах северного Таджикистана.

На основе сопоставления данных по удельной активности  $\text{Cs-137}$  в различных регионах Таджикистана выявлены устойчивые закономерности пространственного распределения радионуклида. Результаты измерений, представленные на рисунке 2.7, демонстрируют значительную вариативность уровней загрязнения в зависимости от географического положения и рельефа местности.

Максимальные значения средней удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  зафиксированы в горных районах Раштской зоны, на территории Сари Хосора (юго-восток страны), в районе Хонако, расположенном в ущелье Алмасы (центральный Таджикистан), а также в южной части Кураминского хребта (северные районы). Эти зоны характеризуются сложным орографическим строением, способствующим осаждению и накоплению радионуклидов.



**Рисунок 2.7.** – Распределение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвенном покрове: сравнительный анализ по регионам.

Основным источником поступления  $^{137}\text{Cs}$  в почвенный покров являются атмосферные осадки и аэрозольный перенос. Воздушные массы, движущиеся с юга и юго-востока, транспортируют радиоактивные частицы, оседающие на поверхности горных хребтов. Особенно значимым фактором выступает региональная пылевая взвесь, известная как «Афганец» - многокомпонентный аэрозоль, содержащий радионуклиды, способные накапливаться в верхних частях горных систем. После осаждения на возвышенных участках, радионуклиды подвергаются перераспределению под действием природных процессов - водной и ветровой эрозии, гравитационного смыва, а также селевых потоков. Эти механизмы способствуют нисходящей миграции загрязняющих веществ, приводя к их концентрации у подножий склонов, что подтверждается результатами пробоотбора, фиксирующими повышенные уровни активности в нижних частях рельефа.

Наиболее высокие значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  среди всех обследованных участков были зафиксированы в районе Камароб

(административный район Рашт), расположенного в юго-восточной части Таджикистана. Здесь концентрация радионуклида достигла 147,5 Бк/кг, что значительно превышает средний уровень активности по региону - 44,4 Бк/кг. Наименьшее значение среди всех исследованных точек было определено на территории города Вахдат, где средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  составила всего 1,3 Бк/кг. Такая разница между максимальными и минимальными значениями может быть связана с географическим положением: Вахдат расположен на относительно низкой высоте, что снижает вероятность осаждения радиоактивных частиц, переносимых воздушными потоками.

#### **2.4. Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения цезия-137 в различных районах Таджикистана**

В данном разделе подробно рассмотрено пространственное распределение радиоактивного изотопа цезия-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) в почвенных горизонтах ряда административных территорий Таджикистана. Представлены обобщённые результаты анализа содержания  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы, собранных в период с 2018 по 2020 год. Особое внимание уделено влиянию геоморфологических особенностей местности и гранулометрического состава грунтов на концентрацию радионуклида. В результате проведённого комплексного анализа были выявлены ключевые закономерности, характеризующие пространственное распределение техногенного радионуклида цезия-137 в почвенном покрове центральных и южных регионов республики.

Для достижения поставленных научных целей была реализована последовательная методологическая схема, включающая следующие этапы:

- картографическая идентификация исследуемых территорий с последующим анализом их топографических и геоморфологических характеристик;

- выбор репрезентативных точек пробоотбора в пределах каждого района с учётом рельефа, типа почвы и характера землепользования, а также

проведение полевого сбора образцов;

- лабораторная обработка проб, включающая физико-химическую подготовку, радиометрический анализ и статистическую обработку полученных результатов;

- изучение пространственной дифференциации содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, с целью выявления зон локального накопления, оценки степени техногенного воздействия и построения карт загрязнения;

- применение результатов анализа для составления тематической карты, отражающей уровни загрязнения почв радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  на территории Таджикистана.

Районы, охваченные исследованием, включают широкий спектр природных ландшафтов, что позволило получить более полную картину распределения радионуклида. Среди изученных географических зон - альпийские луга с богатой флорой, высокогорные и равнинные пустынные участки, а также узкие речные каньоны, окружённые массивными скалистыми хребтами.

Полевые работы по сбору почвенных образцов охватывали территорию площадью порядка 45 000 квадратных километров, включающую четыре крупных региона Таджикистана: Гиссарский, Раштский, Бохтарский и Кулябский. В рамках исследования было собрано 92 образца почвы, представляющих различные типы почвенных горизонтов, как указано в таблице 2.5. В каждом из исследуемых районов было определено от трёх до восьми точек отбора, при этом расстояние между соседними точками составляло не менее 4–7 километров.

Процедура отбора проб проводилась в строгом соответствии с требованиями национального стандарта ГОСТ 17.4.3.01-2017, предусматривающего забор почвы с поверхности до глубины 25 сантиметров. Все собранные образцы были классифицированы на две основные группы: почвы с участков, не подвергавшихся аграрной обработке, и почвы с территорий, активно используемых в

сельскохозяйственных целях.

На каждом пункте отбора проводилась предварительная очистка образцов от посторонних включений - таких как камни, корневые остатки и органические фрагменты. Из общей массы почвы, полученной на точке, методом квартования выделяли приблизительно один литр материала, предназначенного для дальнейшего анализа. Отобранные образцы подвергались сушке до состояния воздушно-сухой массы, затем измельчались с использованием лабораторной мельницы и просеивались через сито с размером ячеек 2 мм, что обеспечивало однородность фракции.

Для проведения радиологического анализа использовались стандартные измерительные ёмкости типа «Маринелли» объёмом 1 литр. Измерения активности радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  осуществлялись с применением гамма-спектрометра, оснащённого высокочувствительным детектором из особо чистого германия (CANBERRA), при использовании специализированного программного обеспечения Genie-2000. Все аналитические процедуры выполнялись в аккредитованной Лаборатории технических услуг, действующей при Агентстве по ХБРЯ безопасности НАНТ.

В таблице 2.4 представлены сведения о количестве отобранных проб, а также мест их отбора, что позволяет проследить пространственную структуру выборки и оценить охват исследования.

Учитывая, что в зависимости от морфологического типа почвенного покрова от 60% до 95% общего содержания радионуклидов, локализованных в верхнем 30-сантиметровом горизонте, подвержено миграции посредством диффузионных процессов, в рамках настоящего исследования была проведена оценка соотношения распределения радиоактивного изотопа цезия-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) в различных категориях земель Хатлонской области Республики Таджикистан.

В частности, сравнивались показатели удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, не подвергавшихся сельскохозяйственной обработке, и в почвах, активно используемых в аграрной деятельности.

**Таблица 2.4.** – География точек отбора и количество проб

Район	Количество проб	Район	Количество проб
Душанбе	4	Восе	4
Алмоси	3	Хамадони	3
Камароб	4	Фархор	4
Файзобод	8	Темурмалик	3
Канаск	3	Ховалинг	4
Шахринав	5	Сари Хосор	3
Бохтар	3	Курговат	3
Гаравоти	3	Гарм	3
Дусти	3	Мисканобод	3
Кубодиён	5	Лахш	3
Шахритус	5	Точикобод	3
Н. Хусрав	4	Нуробод	3
Кулоб	3		

Результаты проведённого анализа представлены в виде диаграммы на рисунке 2.8, которая наглядно демонстрирует различия в накоплении радионуклида между двумя типами земель. Согласно визуализированным данным, в образцах, отобранных с гористых участков, не подвергавшихся механической обработке, концентрация  $^{137}\text{Cs}$  оказалась заметно выше по сравнению с обработанными сельскохозяйственными полями. Это может быть связано с тем, что на необрабатываемых территориях отсутствует регулярное перемешивание почвенных горизонтов, что способствует сохранению радионуклида в верхних слоях.



**Рисунок. 2.8.** – Сравнительный анализ содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Хатлонской области.

В противоположность этому, на обрабатываемых землях, где регулярно проводятся агротехнические мероприятия (вспашка, рыхление, посев), происходит активное перемешивание почвы, что способствует более равномерному распределению радионуклида по вертикальному профилю и, как следствие, снижению его концентрации в поверхностных слоях.

Интересным наблюдением в ходе исследования стало то, что в образцах, отобранных с обработанных сельскохозяйственных участков равнинных территорий, средняя удельная активность радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  оказалась выше, чем в почвах, не подвергавшихся аграрному воздействию. Такая закономерность, на первый взгляд противоречащая ожиданиям, вероятно, объясняется географической близостью пахотных земель к необрабатываемым участкам, с которых происходит перенос наносов - особенно в условиях эрозионных процессов и сезонных осадков. В

результате регулярной механической обработки почвы, включая вспашку и рыхление, цезий-137 перемещается вглубь профиля и накапливается преимущественно на глубине 20–25 см.

В целом, характер распределения  $^{137}\text{Cs}$  в исследованных образцах можно считать типичным для регионов с аналогичными природными условиями. Проведённые исследования подтвердили, что вертикальное распределение радионуклида тесно связано с происхождением и морфологией почв. Наибольшие значения удельной активности были зафиксированы в горных районах и на участках, не подвергавшихся сельскохозяйственной обработке, что согласуется с ранее выявленными закономерностями миграции радионуклидов в условиях слабой механической трансформации почвенного профиля.

В то же время в ряде образцов, отобранных с песчаных почв,  $^{137}\text{Cs}$  не был обнаружен вовсе. Это может быть связано с низкой сорбционной способностью песчаных субстратов, высокой водопроницаемостью и, как следствие, ускоренной миграцией радионуклида за пределы исследуемого слоя.

## **2.5. Мониторинг радоновой активности в дошкольных и школьных зданиях юга Таджикистана**

Основной вклад в суммарную дозу радиационного воздействия на человека в условиях повседневной жизни вносят природные источники ионизирующего излучения. К ним относятся гамма-излучение, исходящее от земной поверхности, космические лучи, проникающие из внешнего пространства, а также радон - радиоактивный газ, образующийся в результате распада урана и тория, присутствующих в земной коре. Особую значимость приобретает мониторинг уровней облучения именно в закрытых помещениях, поскольку именно здесь человек проводит большую часть времени и подвергается наиболее продолжительному воздействию радона и его дочерних продуктов распада.

Радиационный фон внутри зданий формируется преимущественно за счёт активности трёх основных природных долгоживущих радионуклидов: радия-226, тория-232 и калия-40. Эти элементы естественным образом присутствуют в строительных материалах, горных породах и почве, и их излучение оказывает постоянное фоновое воздействие на человека. Дополнительный вклад в радиационную нагрузку может вносить техногенный радионуклид - цезий-137, который иногда обнаруживается в строительных конструкциях.

Кроме того, воздух внутри помещений может содержать активные изотопы радона и его дочерние продукты, такие как полоний-218 и полоний-214, которые оседают на поверхностях и могут быть ингалированы, представляя собой значительный фактор внутреннего облучения.

С целью обеспечения радиационной безопасности населения, в нормативных документах Республики Таджикистан — НРБ-2006 (СанПиН 2.6.1.001-06) - установлены контрольные уровни содержания радона в воздухе помещений. Для зданий, находящихся на стадии строительства или недавно введённых в эксплуатацию, предельное значение концентрации радона составляет  $\leq 100$  Бк/м<sup>3</sup>. Для жилых объектов, заселённых ранее, допустимый уровень повышается до  $\leq 200$  Бк/м<sup>3</sup>.

Дети и подростки представляют собой особенно уязвимую категорию населения в контексте воздействия радона - природного источника ионизирующего излучения. Повышенная чувствительность развивающегося организма к радиационному фону делает проблему радонового облучения в детской среде особенно актуальной. Именно поэтому во многих странах мира образовательные программы по радиационной безопасности включают отдельные модули, посвящённые радону, ориентированные на школьников и молодёжь.

В рамках настоящего исследования, направленного на оценку радонового воздействия и разработку профилактических мер, был реализован комплекс мероприятий, включающих следующие этапы:

- определены здания и помещения, представляющие интерес с точки зрения потенциального радонового риска, в которых были установлены экспозиметры для длительного сбора данных;

- проведена систематизация полученных измерений, рассчитаны индивидуальные дозы облучения с учётом конструктивных особенностей зданий, вентиляции, плотности застройки и других факторов;

- выполнено геологическое зонирование территорий с учётом состава грунта, наличия тектонических нарушений и других параметров, влияющих на миграцию радона из недр;

- сформулированы практические меры по снижению уровня радонового облучения в помещениях, включая улучшение вентиляции, герметизацию строительных швов, использование материалов с низкой радиоактивностью;

- на основе собранных данных составлена радоновая карта Хатлонской области, отражающая уровни потенциальной опасности и позволяющая выделить зоны, требующие приоритетного внимания и регулярного мониторинга.

Для проведения оценки уровня радонового загрязнения воздуха в помещениях, используемых дошкольными организациями и образовательными учреждениями Хатлонской области, а также для контроля соблюдения санитарных норм по эффективной дозе внутреннего облучения от радона (ЭРОА), регламентированных нормативом НРБ-2006, была применена методика интегрального мониторинга с использованием трековых сенсоров и последующим анализом полученных данных.

В рамках исследования, в комнатах детских садов и учебных классах школ были размещены специальные устройства - экспозиметры, представляющие собой герметичные пассивные пластиковые камеры, оснащённые чувствительными трековыми детекторами типа "Radtrak" (Швеция). Эти измерительные приборы экспонировались в течение длительного временного интервала - от двух до шести месяцев, что

обеспечивало возможность регистрации концентраций радона в диапазоне от 15 до 25 000 Бк/м<sup>3</sup>, охватывая как низкие, так и высокие уровни загрязнения.

Установка и предоставление детекторов осуществлялись в рамках регионального проекта технического содействия, реализуемого при поддержке Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). В ряде обследуемых помещений, параллельно с измерением объёмной активности радона, проводился мониторинг гамма-излучения.

Измерения проводились в течение трёх месяцев, охватывая как тёплый сезон, так и отопительный период, что позволило учесть сезонные колебания концентрации радона, связанные с изменениями вентиляционного режима и герметичности помещений. По завершении экспозиционного периода детекторы демонтировались и направлялись в специализированную лабораторию “Radonova Laboratories AB” (г. Уппсала, Швеция), где осуществлялась их обработка, считывание и интерпретация результатов в соответствии с международным стандартом ISO 11665-4, обеспечивающим высокую точность и воспроизводимость измерений.

В процессе проведения измерений радоновой активности и последующего анализа полученных данных были учтены ряд значимых параметров, способных оказывать влияние на достоверность результатов. Среди них: возраст здания и срок его эксплуатации; этажность, то есть уровень, на котором размещался измерительный прибор; сезонные климатические условия на момент проведения мониторинга; общая длительность экспозиционного периода; интенсивность воздухообмена, включая частоту проветривания и наличие систем вентиляции; среднее время пребывания людей в исследуемом помещении; а также уровень мощности доз гамма-излучения, зафиксированный в данной зоне.

Для обеспечения корректности измерений, экспозиметры - пассивные трековые детекторы - размещались в местах, удалённых от потенциальных источников теплового воздействия, таких как отопительные приборы, и от оконных проёмов, чтобы исключить влияние внешних факторов. Устройства

устанавливались на высоте от одного до двух метров от уровня пола, что соответствует зоне дыхания человека и обеспечивает репрезентативность данных.

Каждое помещение, а также характеристики установленных детекторов, включая их точное расположение, были документированы в специально предназначенном журнале регистрации. Эта информация впоследствии использовалась при обработке результатов.

Для перевода значений объёмной активности радона в эквивалентную равновесную объёмную активность (ЭРОА) в рамках настоящего исследования использовался стандартный коэффициент равновесия, принятый равным 0,4. Данный коэффициент отражает среднее соотношение между концентрацией радона и его дочерними продуктами распада, обладающими способностью оказывать биологически значимое радиационное воздействие на организм человека.

Продолжительность тёплого и отопительного периода, учитываемая при интерпретации данных, была определена на основании официальных распоряжений региональных административных структур (хукуматов), регламентирующих даты начала и завершения отопительного сезона.

На основе собранных данных о равновесной эквивалентной объёмной активности радона (ЭРОА), зафиксированной в воздухе обследуемых помещений, и с применением дозового коэффициента  $9,0 \times 10^{-6}$  мЗв/(Бк·ч/м<sup>3</sup>), рекомендованного Комитетом ООН по научным исследованиям воздействия атомной радиации (НКДАР) в отчётах за 2000 и 2006 годы, были произведены расчёты среднегодовых индивидуальных эффективных доз внутреннего облучения. Эти дозы отражают воздействие короткоживущих дочерних продуктов распада радона, поступающих в организм человека преимущественно через дыхательные пути.

Для оценки радиационного воздействия на детей, посещающих дошкольные и школьные учреждения, учитывалась продолжительность их пребывания в соответствующих помещениях. Расчёт дозы для воспитанников

детских садов проводился с использованием временного коэффициента 0,33, основанного на предположении, что ребёнок находится в учреждении в среднем 8 часов в день, что эквивалентно приблизительно 2000 часам в год.

Для школьников применялся коэффициент 0,25, исходя из средней продолжительности нахождения в учебных классах - около 6 часов в день, что составляет примерно 1200 часов в год. Эти расчётные параметры позволили адаптировать дозиметрические оценки к реальным условиям пребывания детей в образовательной среде.

Исследование уровней внутреннего облучения, вызванного присутствием радона и его дочерних продуктов в воздухе, охватывало здания 18 дошкольных учреждений и 48 общеобразовательных школ, расположенных в южной части Республики Таджикистан (Хатлонская область). Географический охват мониторинга включал 22 административных района и города, что обеспечило широкую территориальную репрезентативность.

Для получения достоверных данных в каждом обследуемом здании были выбраны четыре помещения: два на первом этаже и два на втором. Такой подход позволил учесть вертикальную дифференциацию радонового фона. Всего в исследование вошли 264 отдельных помещения, что обеспечило достаточный массив информации для проведения статистического анализа.

Большинство зданий, в которых проводился мониторинг, были построены по типовым проектам советского периода, характерным для региона. Конструктивная основа включала железобетонные элементы фундамента и несущих стен, а основным материалом для возведения стен служил кирпич. Эти инженерные решения оказывали прямое влияние на уровень проникновения радона, поскольку плотность материалов, наличие трещин и степень герметичности конструкций определяют интенсивность эмиссии из почвы.

По результатам технического обследования установлено, что около 80% зданий, включённых в программу радиационного контроля, были возведены в период с 1950 по 1990 годы. Из общего числа объектов шесть являются одноэтажными: четыре из них - здания дошкольных учреждений, а два - школьные постройки. Кроме того, два исследуемых помещения (учебные классы) также располагались на первом этаже, что дополнительно учитывалось при анализе распределения радона по вертикали здания.

При выборе мест размещения экспозиметров для измерения радоновой активности в зданиях дошкольных и школьных учреждений учитывался ключевой фактор - максимальное время пребывания детей в конкретных помещениях. В связи с этим, в школах детекторы устанавливались преимущественно в учебных классах, где учащиеся проводят основную часть дня. В детских садах выбор помещений включал зоны, наиболее активно используемые детьми: комнаты для занятий, игровые пространства и спальни.

Мониторинг проводился в два сезонных периода, охватывающих как холодное время года - с декабря 2018 по февраль 2019 года, соответствующее отопительному сезону, так и тёплый период - с апреля по июнь 2019 года. Все обследуемые помещения функционировали в обычном режиме, без изменений в графике эксплуатации.

Для обеспечения территориального охвата и разнообразия условий, здания для размещения экспозиметров выбирались в различных населённых пунктах Хатлонской области. Минимальное расстояние между исследуемыми объектами составляло от 5 до 7 километров, что позволило учесть геологические и климатические различия между районами. Измерения проводились в помещениях, расположенных на первом и втором этажах, при этом пары помещений располагались вертикально друг над другом, что обеспечивало возможность анализа влияния этажности на концентрацию радона.

В каждом здании размещались по четыре экспозиметра: два на нижнем уровне и два на верхнем. Такой подход позволил получить сбалансированные данные по вертикальному распределению радона в пределах одного объекта. По завершении экспозиционного периода была проведена сборка детекторов, в ходе которой были зафиксированы незначительные потери оборудования - около 1% от общего числа.

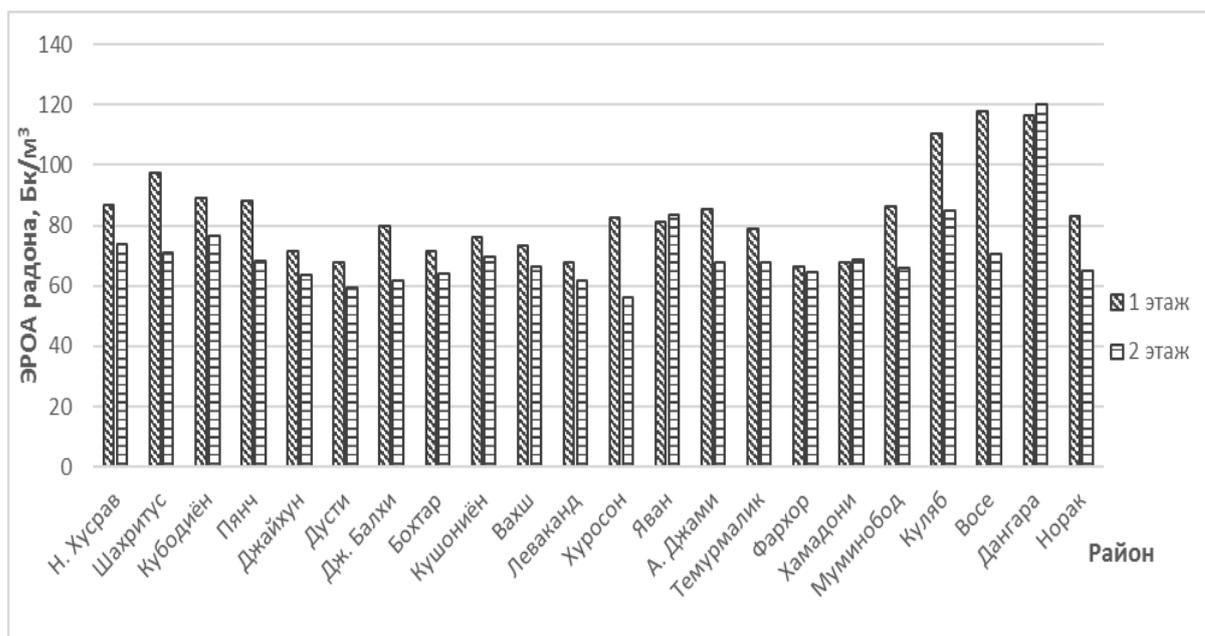
В ходе радиационного мониторинга, проведённого в помещениях образовательных учреждений, были зафиксированы значения мощности AMBIENTНЫХ эквивалентов доз гамма-излучения. Измерения осуществлялись с использованием спектрометрического оборудования модели “МКС-6102”, разработанного и произведённого компанией “Атомтех”. Полученные данные варьировались в пределах от 0,06 до 0,18 микрозиверт в час, при этом среднее значение составило 0,12 мкЗв/ч.

Анализ собранных результатов позволил сделать вывод о том, что архитектурные особенности зданий, включая их тип и этажность помещений, не оказывают статистически значимого влияния на уровни гамма-облучения. Независимо от того, располагались ли помещения на первом или втором этаже, зарегистрированные дозы оставались в пределах одного диапазона, что свидетельствует о равномерном распределении гамма-фона внутри зданий.

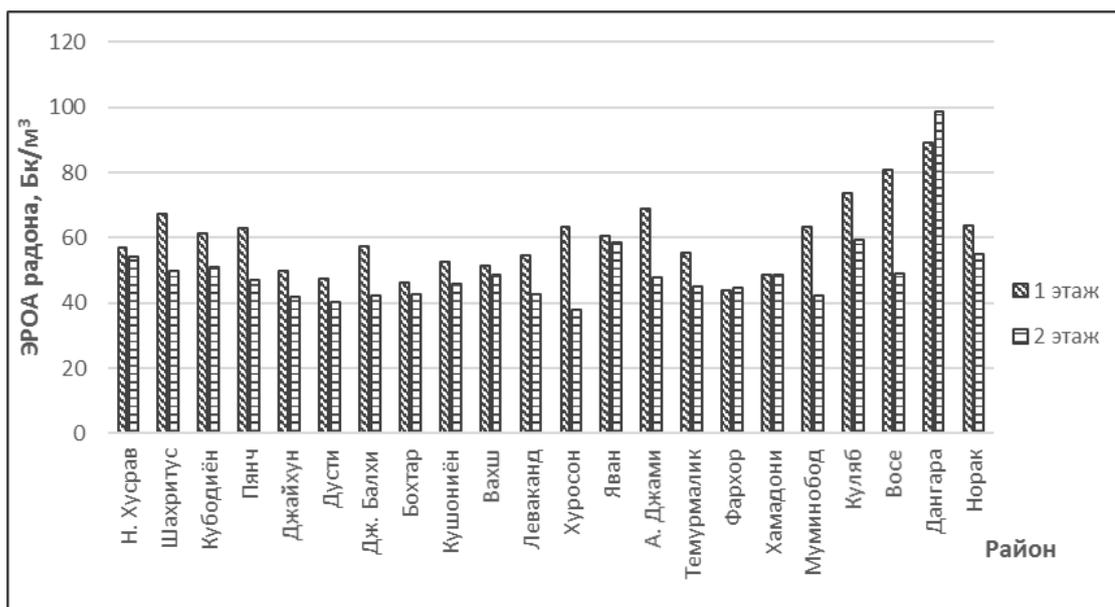
Дополнительно были проведены измерения эквивалентной равновесной объёмной активности радона (ЭРОА) в помещениях, расположенных на разных этажах зданий школ и детских садов, в два сезонных периода - в отопительный сезон и в тёплое время года. Результаты этих измерений были систематизированы и визуализированы в виде диаграмм: для школьных классов данные представлены на рисунках 2.9 и 2.10, а для помещений дошкольных учреждений - на рисунках 2.11 и 2.12.

Анализ данных, представленных на диаграммах (рисунки 2.9–2.12), демонстрирует выраженную вариативность значений эквивалентной равновесной объёмной активности радона (ЭРОА) в зависимости от

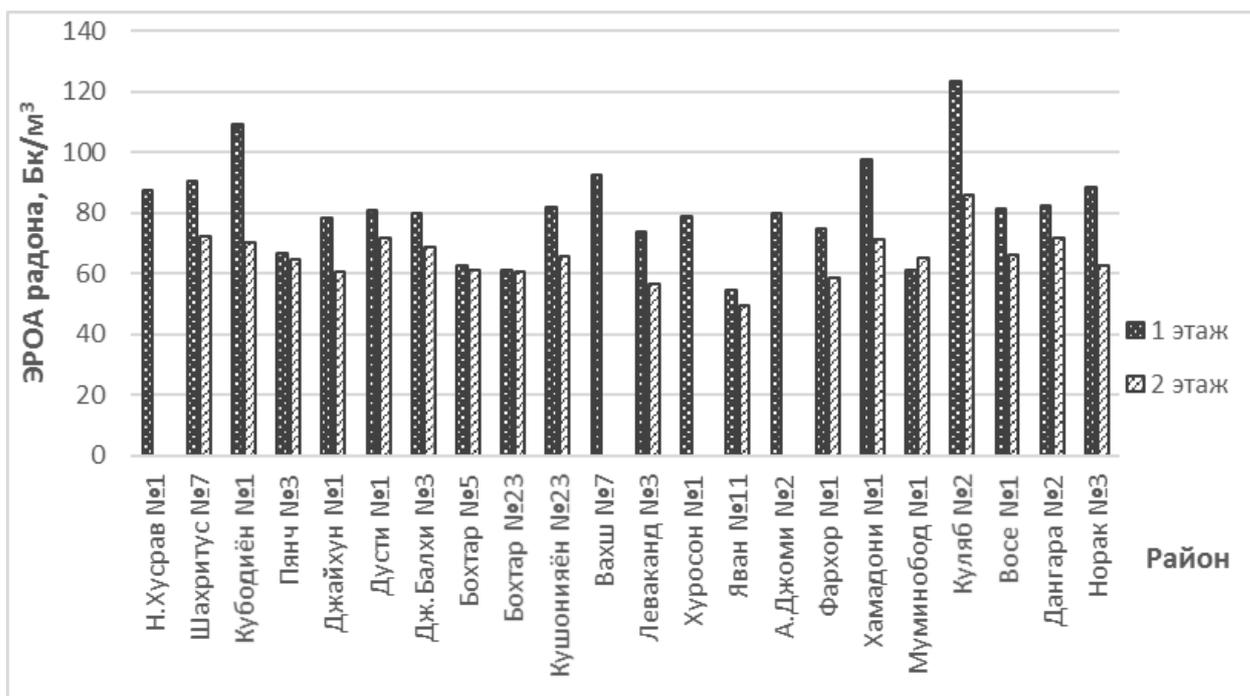
этажности помещений и времени года, в рамках одного и того же здания. Установлено, что в отопительный сезон концентрации радона в воздухе значительно превышают показатели, зафиксированные в тёплое время года. Это различие объясняется более интенсивным проветриванием помещений в тёплый период, что способствует снижению уровня радонной активности за счёт усиленного воздухообмена.



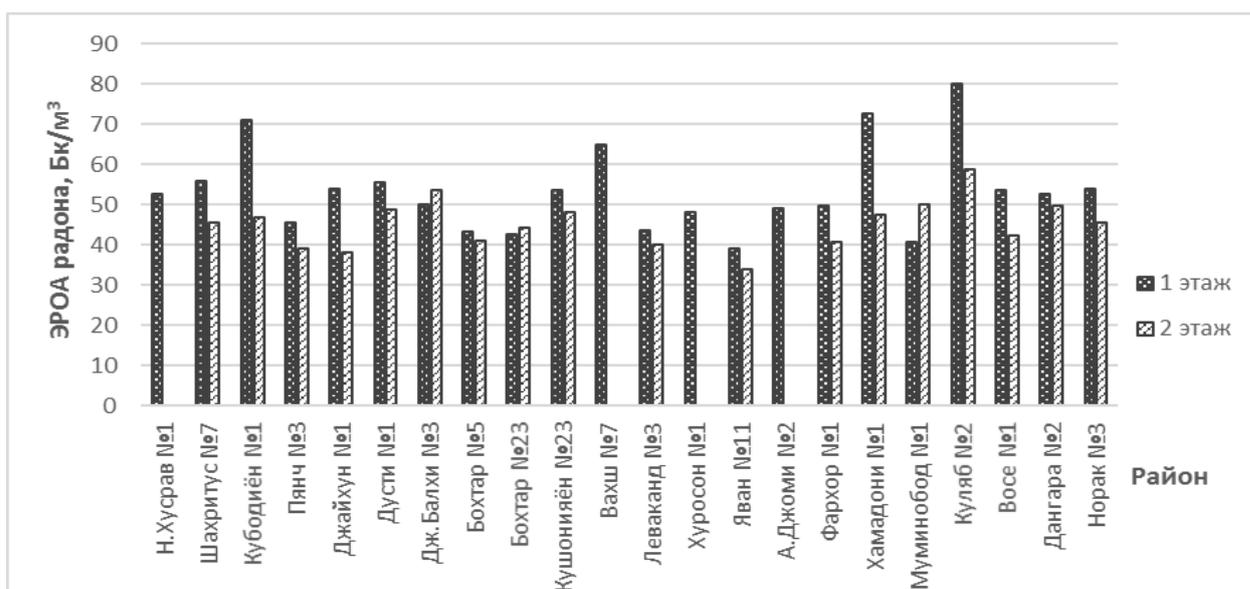
**Рисунок 2.9.** – ЭРОА радона в школьных учреждениях Хатлона: данные мониторинга в течение отопительного сезона.



**Рисунок 2.10.** – ЭРОА радона в школьных учреждениях Хатлона: данные мониторинга в тёплое время года.



**Рисунок 2.11.** – ЭРОА радона в (дошкольных учреждениях (детских садах) Хатлона: данные мониторинга в течение отопительного сезона.

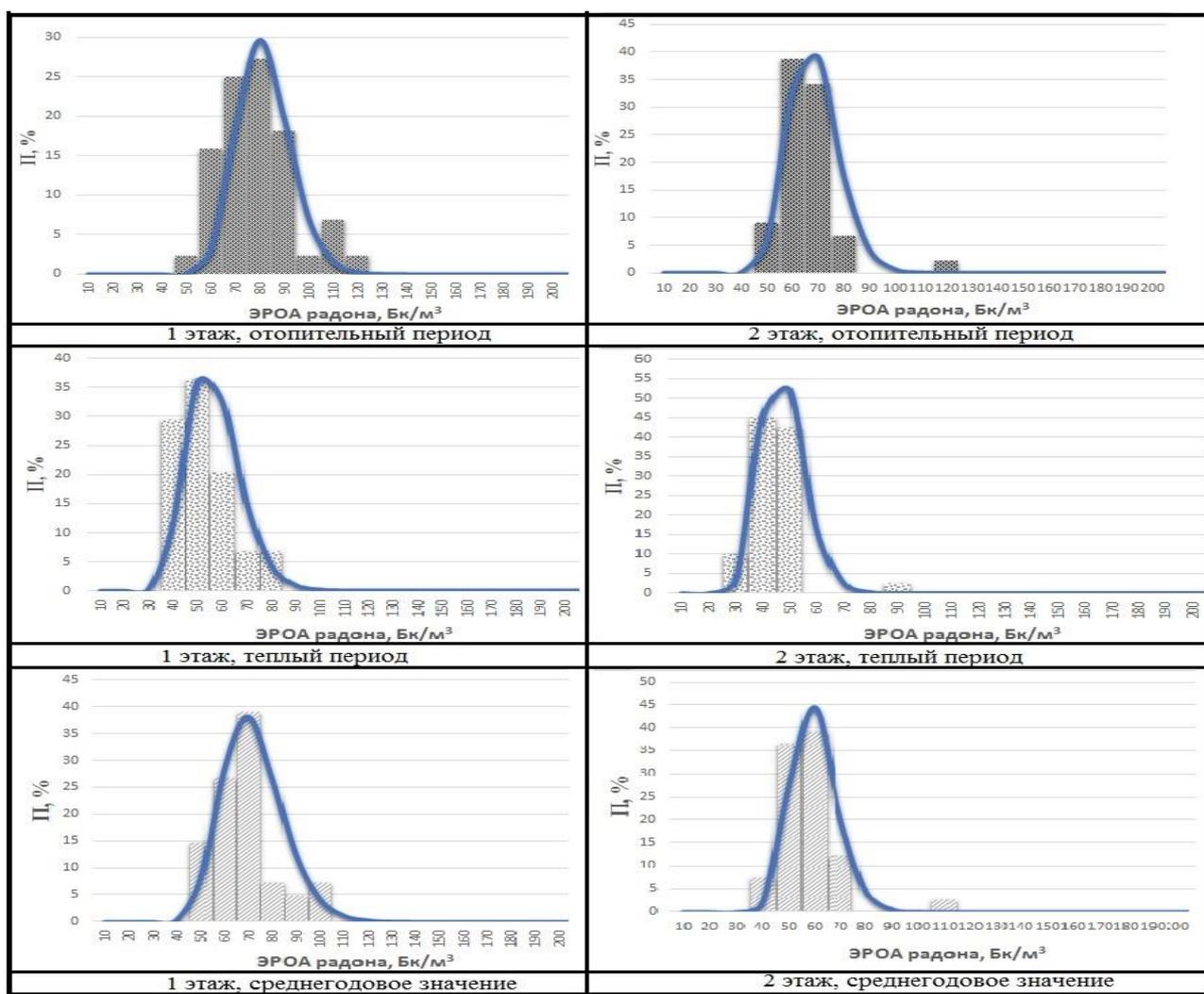


**Рисунок 2.12.** – ЭРОА радона в (дошкольных учреждениях (детских садах) Хатлона: данные мониторинга в тёплое время года.

Дополнительно выявлена устойчивая закономерность: помещения, расположенные на вторых этажах зданий, характеризуются более низкими значениями ЭРОА радона по сравнению с аналогичными помещениями на первых этажах. Причём данная зависимость сохраняется независимо от

сезона, что указывает на влияние конструктивных особенностей зданий и близость к грунту как ключевые факторы, определяющие уровень радонового загрязнения.

Для статистического подтверждения выявленных закономерностей были построены гистограммы, отражающие частотное распределение вычисленных значений ЭРОА радона во всех обследованных помещениях дошкольных и школьных учреждений, расположенных на первых и вторых этажах. Эти графические материалы позволили визуализировать характер распределения радона в зависимости от этажности и сезонного периода. Кроме того, были рассчитаны средние геометрические значения (медианные показатели) (рисунок 2.13).



**Рисунок 2.13.** – Анализ этажной зависимости ЭРОА радона с логнормальной аппроксимацией (оггибающие линии – логнормальные распределения).

Согласно данным, визуализированным на рисунке 2.13, основная доля статистически обработанных значений среднегодовой эквивалентной равновесной объёмной активности радона (ЭРОА) в помещениях, расположенных на первых этажах зданий в районах Хатлонской области, сосредоточена в пределах 70 Бк/м<sup>3</sup>. В то же время, на вторых этажах аналогичных объектов преобладающее значение ЭРОА составляет около 60 Бк/м<sup>3</sup>.

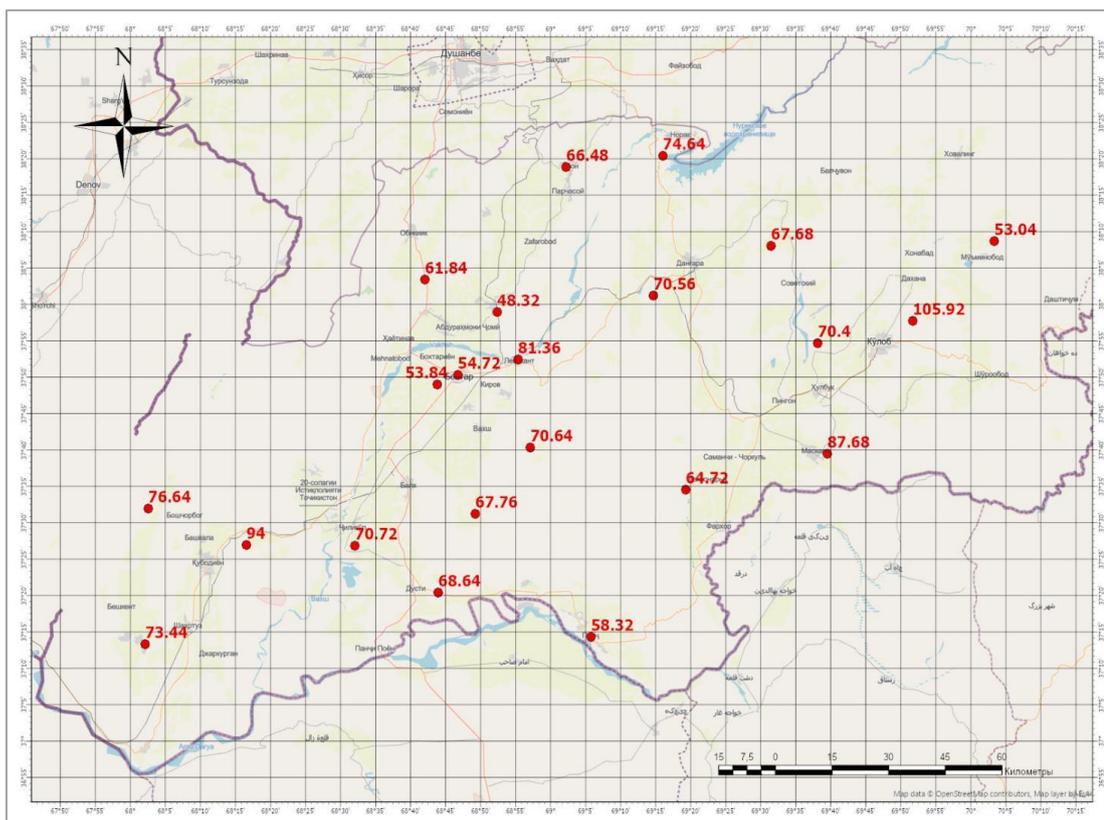
На основе медианных значений ЭРОА, полученных в результате обработки данных, были произведены расчёты среднегодовых индивидуальных эффективных доз внутреннего облучения, обусловленного ингаляцией короткоживущих дочерних продуктов распада радона. Эти расчёты охватывают помещения дошкольных и школьных учреждений Хатлонской области и представлены в таблице 2.5.

**Таблица 2.5.** –Радоновая нагрузка на детей в образовательных учреждениях: годовые значения ЭРОА и доз

№	Величина	Образовательные учреждения			
		Школы (1 этаж)	Школы (2 этаж)	Детсады (1 этаж)	Детсады (2 этаж)
1.	Диапазон значений среднегодовой ЭРОА радона, Бк/м <sup>3</sup>	57-105	48-111	48-105	43-75
2.	Среднее значение среднегодовой ЭРОА радона, Бк/м <sup>3</sup>	74	62	70	56
3.	Интервал величин среднегодовых индивидуальных эффективных доз облучения, мЗв	0.63–1.15	0.53–1.22	0.86–1.91	0.78–1.35
4.	Усреднённая величина среднегодовой индивидуальной эффективной дозы облучения, мЗв	0.82	0.68	1.26	0.99

Таким образом, определены ориентировочные дозовые нагрузки, получаемые детьми в течение календарного года при нахождении в зданиях образовательных учреждений. При этом учтено сезонное распределение - отдельно для тёплого периода, характеризующегося повышенной вентиляцией, и для отопительного сезона, при котором воздухообмен ограничен.

На рисунке 2.14 представлена тематическая карта, отражающая усреднённые показатели эквивалентной равновесной объёмной активности радона (ЭРОА) в помещениях, расположенных на первых этажах школьных зданий, обследованных в различных районах Хатлонской области. Данная визуализация позволяет оценить территориальное распределение радоновой активности в образовательных учреждениях региона и выявить зоны с повышенным уровнем потенциального радиационного воздействия.



**Рисунок 2.14.** – Пространственное распределение ЭРОА радона в школьных зданиях Хатлона (1 этаж, в Бк/м³).

Сравнительный анализ значений эквивалентной равновесной объёмной активности радона (ЭРОА), полученных в ходе измерений, с геологическими характеристиками почвенного покрова в местах расположения обследованных школьных зданий Хатлонской области не выявил устойчивых закономерностей.

На основании проведённого анализа установлено, что среднегодовые индивидуальные эффективные дозы внутреннего облучения, получаемые детьми и подростками при нахождении в помещениях дошкольных и общеобразовательных учреждений, варьируются в пределах от 0,68 до 1,26 мЗв. Эти значения находятся в пределах допустимых норм и указывают на благоприятную радиационную обстановку в обследованных объектах.

Дополнительно подтверждена ранее выявленная тенденция: концентрация радона в помещениях, расположенных на первых этажах зданий, стабильно превышает аналогичные показатели, зафиксированные на вторых этажах. Большинство статистических данных по среднегодовому значению ЭРОА радона на первых этажах укладываются в диапазон около 70 Бк/м<sup>3</sup>, тогда как на вторых этажах преобладают значения порядка 60 Бк/м<sup>3</sup>.

Таким образом, разработана карта, отображающая средние значения эквивалентной равновесной объёмной активности радона (ЭРОА) на первых этажах школьных зданий в районах Хатлонской области.

Соответственно, для формирования более полной и комплексной картины, отражающей уровни радонового загрязнения в зданиях общеобразовательных школ и дошкольных учреждений, требуется расширение спектра исследований. В частности, необходимо включить в мониторинг все типы помещений, включая подвальные и технические зоны, где, согласно радиационной практике, концентрация радона может быть существенно выше из-за непосредственной близости к источнику его миграции - почве.

Кроме того, актуальной задачей становится разработка методических рекомендаций, направленных на реализацию комплекса мероприятий по

снижению воздействия радона в каждом обследуемом здании. Такие рекомендации должны учитывать архитектурные особенности объектов, режим их эксплуатации, вентиляционные характеристики и результаты проведённых измерений. Это позволит сформировать эффективную систему профилактики, минимизировать дозовые нагрузки на детей и персонал учреждений.

## **ГЛАВА 3. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И КУЛЬТУРНО-ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТАДЖИКИСТАНА**

### **3.1. Радиоэкологический мониторинг минеральных руд Таджикистана**

Таджикистан, обладая статусом индустриально-аграрной республики, сталкивается с острой необходимостью в развитии технологий переработки минерального сырья. В связи с этим задача всесторонней и эффективной переработки рудных ресурсов приобретает первостепенное значение для экономики страны и её устойчивого развития.

В рамках научного исследования нами был осуществлён радиоэкологический анализ, включающий широкий спектр радиометрических наблюдений, охватывающих различные геологические объекты на территории Республики Таджикистан. Мониторинг охватил месторождения нерудных минералов, таких как данбурит, фосфорит, флюорит и другие, а также участки добычи рудного золота, цветных и редкоземельных металлов. Дополнительно были изучены образцы строительных материалов, используемых в промышленности и инфраструктуре. В пределах рудных залежей естественные радионуклиды (ЕРН) преимущественно присутствуют в виде второстепенных компонентов, входящих в состав основных полезных ископаемых. В ряде случаев они формируют самостоятельные минерализованные участки, наложенные на первичную структуру месторождения. Радиоактивные элементы, относящиеся к урановой и ториевой сериям, широко распространены в породах, служащих вмещающей средой для рудных тел. Они часто встречаются в виде акцессорных минералов и обнаруживаются в россыпных золотоносных образованиях, что требует особого внимания при оценке экологических рисков.

В таблице 3.1 представлены данные по удельной активности радионуклидов, полученные при анализе проб, собранных с различных месторождений минерального сырья на территории Таджикистана.

**Таблица 3.1.** – Результаты измерений удельной активности (Бк/кг) радионуклидов в минеральных пробах (Таджикистан)

Пробы руды	Удельные активности			
	<b>K-40</b>	<b>Ra-226</b>	<b>Th-232</b>	<b>U-238</b>
Данбурит	3.2±1.1	14.4±1.3	3.0±0.4	-
Нефелин-сиенитовые руды	1649.3±68.4	63.0±5.9	33.7±0.7	21.1±2.5
Руда флюоритовая	30.56±4.3	92.2±8.1	34.2±1.0	-
Айни – сурьмяные и ртутные руды	106.8±4.6	15.0±7.5	-	12.4±1.4
Тарор - золотоносные руды	108.4±4.6	32.4±2.6	-	12.5±1.0
Дуоба - золотоносные руды	786.4±32.8	59.7±5.4	30.6±0.7	14.4±3.5

Определение содержания естественных радионуклидов (ЕРН) в образцах минерального сырья, добытого на территории Таджикистана, проводилось с применением гамма-спектрометрического метода, обладающего высокой чувствительностью и точностью. Результаты спектрального анализа показали, что в ряде исследованных проб содержание радионуклидов оказалось крайне низким. Концентрации урановых и ториевых элементов, формирующих рудные скопления, обнаруживаются в геологических образованиях различных возрастов - от древнейших архейских кристаллических пород до современных россыпей. Однако, несмотря на широкую геохронологическую представленность, уровни содержания соединений урана и тория в этих породах остаются незначительными. В связи с этим, геологоразведочные и горнодобывающие работы на указанных участках могут осуществляться без введения специальных ограничений, связанных с радиационной безопасностью.

Особое внимание в контексте настоящего исследования уделяется анализу радиоактивности фосфорсодержащих руд, поскольку именно они демонстрируют наиболее выраженные вариации по уровню содержания ЕРН. Минералы, содержащие фосфор, обладают способностью аккумулировать радионуклиды, и степень их радиоактивности может существенно различаться даже в пределах одного месторождения. Особенно это характерно для фосфоритов осадочного происхождения, сформированных в известково-песчаной среде. Такие породы, залегающие в виде пластов, как правило, содержат небольшие количества урана, что обуславливает их повышенную радиоактивность по сравнению с фосфатами, образовавшимися в результате вулканической активности.

Среди перспективных объектов для дальнейшей разработки в Республике Таджикистан выделяются два месторождения - Риват и Каратаг, совокупный минералогический потенциал которых оценивается приблизительно в 30 миллионов тонн. Наиболее крупным и детально изученным является фосфоритовое месторождение Риват, расположенное на правом берегу реки Зеравшан. Его характеризуют удобное географическое положение, богатство минерального состава и благоприятные условия для промышленной эксплуатации.

В таблице 3.2 представлены данные по удельной активности естественных радионуклидов (ЕРН), полученные при анализе образцов как исходной, так и обогащённой фосфорсодержащей руды, добытой на месторождениях Риват и Каратаг. Как следует из представленных результатов, уровень содержания ЕРН в концентрированной руде заметно возрастает. Это явление объясняется спецификой флотационно-химического метода обогащения: радионуклиды, в частности урановые и ториевые изотопы, не вступают в химическое взаимодействие с применяемыми реагентами и, соответственно, сохраняются в концентрате, оставаясь в составе обогащённого минерального материала.

При проведении флотации наблюдается перераспределение отдельных радионуклидов. Так, значительная доля калия-40 ( $K-40$ ), одного из природных радиоактивных изотопов, переходит в отходы - так называемые хвосты, что снижает его концентрацию в конечном продукте.

**Таблица 3.2.** – Радионуклидная активность в пробах фосфорных руд: месторождения Риват и Каратаг

Наименование проб	Величины удельной активности, Бк/кг					
	$^{40}K$	$^{210}Pb$	$^{226}Ra$	$^{232}Th$	$^{235}U$	$^{238}U$
Месторождение Риват						
Исходная руда	201.2	66.3	120.9	29.2	6.8	77.8
Концентрат	168.6	109.8	221.2	55.1	16.8	160.8
Месторождение Каратаг						
Исходная руда	262.8	245.0	435.3	18.9	25.2	319.6
Концентрат	80.8	567.0	1004,0	11.4	56.1	776.1

В целях комплексной оценки радиационной обстановки нами были проведены полевые исследования на территории вышеуказанных месторождений. Мониторинг радиационного фона осуществлялся на участках Риватского и Каратагского фосфоритовых месторождений с применением пешего метода обследования, организованного по шахматной схеме, что обеспечило равномерное покрытие исследуемой площади и высокую репрезентативность полученных данных. Для измерения радиационного фона использовался набор специализированного оборудования, включающий приборы "INSPECTOR-1000", "AT-6102" и "МКС-АТ1117М". Применение нескольких типов измерительной техники было обусловлено необходимостью повышения точности и достоверности результатов, поскольку каждый прибор обладает индивидуальными характеристиками: различными порогами чувствительности, степенью погрешности, диапазоном измерений и другими параметрами, влияющими на

итоговые показатели. Сопоставление данных, полученных с помощью разных устройств, позволило сформировать объективную картину радиационного фона на исследуемых участках.

В ходе проведённого мониторинга радиационного фона на территории Риватского фосфоритового месторождения были получены усреднённые значения мощности экспозиционной дозы (МЭД) для различных участков. Согласно результатам измерений:

- В северной зоне месторождения среднеарифметическая МЭД составила 0.252 мкЗв/ч.
- В южной части - 0.185 мкЗв/ч.

Эти показатели свидетельствуют о том, что уровень радиационного воздействия на обследованных участках находится в пределах установленных санитарно-гигиенических нормативов, что позволяет вести работы без необходимости введения дополнительных ограничений. Однако в процессе обследования были зафиксированы локальные участки с незначительными превышениями допустимых значений МЭД, преимущественно на открытых поверхностях месторождения.

Аналогичные исследования были проведены на Каратагском месторождении, где также определены средние значения МЭД:

- В северной части - 0.152 мкЗв/ч.
- В южной зоне - 0.142 мкЗв/ч.
- На поверхности месторождения - 0.186 мкЗв/ч.

Полученные данные демонстрируют, что радиационный фон на территории Каратага также соответствует допустимым санитарным нормам. Незначительное повышение уровня МЭД на поверхности связано, вероятно, с геохимическими особенностями пород и концентрацией радионуклидов в верхних слоях.

### **3.2. Радиоэкологический мониторинг на некоторых исторических и туристических объектах Таджикистана**

Каждый год Таджикистан привлекает множество путешественников, стремящихся познакомиться с его богатым культурным наследием и уникальными достопримечательностями. Среди них особое внимание уделяется историческим памятникам и туристическим локациям, разбросанным по всей территории страны. В эпоху древности при возведении оборонительных сооружений - таких как крепости и замки - активно применялись природные строительные материалы, включая камень и гранит. Однако некоторые из этих пород могут содержать в себе значительные количества природных радиоактивных элементов.

Туристические зоны, расположенные в горных районах, зачастую находятся в непосредственной близости от геологических образований и месторождений, богатых ураном и торием - элементами, относящимися к радиоактивному уран-ториевому ряду. Эти участки представляют интерес не только для туристов, но и для научного сообщества: специалисты по радиационной безопасности регулярно проводят исследования, чтобы оценить возможное влияние таких объектов на здоровье населения. Излучение, исходящее от природных источников, способно внести ощутимый вклад в совокупную годовую дозу радиационного воздействия на человека.

В рамках радиоэкологического анализа были обследованы два значимых объекта - древняя крепость Хулбук и живописный туристический объект Чилдухтарон. Целью мониторинга стало измерение уровня радиационного фона, выявление потенциальных аномалий и определение степени воздействия этих мест на окружающее население. Согласно данным, около 20% годовой дозы облучения приходится именно на природные источники радиации.

Среди наиболее распространённых природных радионуклидов, обнаруживаемых в горных породах, выделяются изотопы тория, радия и

калия. Их вклад в общий радиационный фон существенно превышает влияние космического излучения. Для минимизации риска и обеспечения безопасности населения применяются специальные меры - включая соблюдение норм радиационной защиты и внедрение принципов контроля над воздействием отдельных природных источников.

**Исторический объект - крепость Хулбук** - представляет собой значимый археологический и культурный ансамбль, расположенный неподалёку от кишлака Курбан-Шаид, в пределах Восейского района Хатлонской области Республики Таджикистан. Этот уникальный памятник истории включает в себя остатки древнего городища, датируемого IX–XII веками, а также архитектурные элементы, такие как цитадель и дворец местного правителя. В конце XX столетия Хулбук был официально включён в список кандидатов на присвоение статуса объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО, что подчёркивает его исключительную историческую и культурную ценность.

Современная территория комплекса охватывает около 70 гектаров, значительная часть которых занята новыми постройками. От древнего городища сохранились лишь отдельные элементы, однако они продолжают привлекать внимание как учёных, так и туристов.

После масштабных реставрационных работ, продолжавшихся несколько лет, в 2006 году Хулбук был открыт для широкой публики. Сегодня здесь функционирует музей-заповедник «Хулбук», занимающий площадь более 16 гектаров. Ежегодно тысячи путешественников из разных стран приезжают сюда, чтобы увидеть древнюю цитадель, прогуляться среди исторических руин, осмотреть дворец и познакомиться с богатой коллекцией из более чем пяти тысяч музейных экспонатов.

Цитадель Хулбука имеет чётко выраженную прямоугольную форму и состоит из двух основных частей. Южный сектор отличается мощными оборонительными стенами, достигающими высоты около 15 метров, при этом его площадь составляет приблизительно 50 на 50 метров. Северная

часть значительно превосходит южную по размерам - около 50 на 100 метров - однако её стены ниже, около 10 метров. Внутри крепостных стен расположен дворец правителя, который сохранился в почти первозданном виде, что делает его одним из наиболее ценных архитектурных объектов комплекса.

Для оценки радиационного состояния территории комплекса были проведены измерения с использованием откалиброванного дозиметрического оборудования - портативного прибора марки «Атомтех», оснащённого сцинтилляционным гамма-детектором. Исследование проводилось пешим маршрутом как внутри цитадели, так и на прилегающих участках. Прибор автоматически фиксировал значения мощности дозы гамма-излучения с привязкой к географическим координатам. На основе собранной информации была выполнена обработка результатов, в ходе которой были составлены карты радиационного фона. Эти карты позволяют визуализировать участки с естественным уровнем излучения, а также зоны с повышенной мощностью дозы.

В рамках комплексного радиоэкологического анализа, проведённого на территории исторического комплекса Хулбук и прилегающих сельскохозяйственных угодий, были изучены восемь образцов почвы. Отбор проб осуществлялся как внутри крепостных стен, так и на пашенных землях в непосредственной близости от объекта. Процедура отбора соответствовала требованиям государственного стандарта ГОСТ 17.4.3.01-2017, предусматривающего извлечение почвы с поверхности до глубины 25 см.

Из общей массы почвы, полученной на каждом участке, методом квартования были выделены репрезентативные образцы объёмом более одного литра. Далее материал подвергался сушке до состояния, соответствующего воздушно-сухому режиму, после чего измельчался с использованием лабораторной мельницы и просеивался через сито с диаметром ячеек 2 мм.

Измерения содержания радионуклидов в подготовленных пробах проводились с применением высокоточного гамма-спектрометра, оснащённого детектором из особо чистого германия (CANBERA). Обработка данных осуществлялась с использованием специализированного программного обеспечения Genie-2000. Погрешность измерений варьировалась в пределах от 5 до 12%, что соответствует допустимым нормам для подобных исследований. Для проведения спектрометрии использовались стандартные сосуды типа «Маринелли» объёмом 1 литр.

В дополнение к почвенным исследованиям были отобраны и проанализированы пробы воды из двух источников: водопроводной системы, расположенной рядом с музеем Хулбука, и артезианской скважины, находящейся неподалёку. Анализ водных образцов проводился в соответствии с утверждённой методикой.

На рисунке 3.1 представлены координаты точек, в которых проводились измерения мощности дозы гамма-излучения как внутри крепости, так и на прилегающей территории. Полученные результаты показали, что уровень гамма-фона в исследуемом районе варьируется от 0,09 до 0,12 микрозиверт в час, что ниже среднего значения радиационного фона, зарегистрированного по территории Таджикистана.



**Рисунок 3.1.** – Схема точек мониторинга радиационного фона на территории исторического объекта - крепости Хулбук.

В рамках радиоэкологического обследования, проведённого на территории древней крепости Хулбук и её окрестностях, были отобраны образцы почвы как с прилегающих участков, так и непосредственно с кирпичных элементов архитектурных сооружений. Целью анализа стало определение содержания природных радионуклидов и оценка потенциальной радиационной нагрузки на окружающую среду. Проведённый гамма-спектрометрический анализ показал, что все исследованные образцы содержат радионуклиды природного происхождения в пределах допустимых санитарных норм (таблица 3.3). Наиболее выраженными компонентами радиационного фона оказались изотопы калия-40 (К-40), радия-226 (Ra-226) и актиния-228 (Ac-228).

**Таблица 3.3.** – Сравнительный анализ содержания радионуклидов в почвах разных участков территории исторического объекта - крепости Хулбук

Нуклид	Средневзвешенная активность, Бк/кг	Погрешность, Бк/кг
Ka-40	540	22.00
Bi-212	12	1.10
Pb-212	11	1.10
B-214	22	0.74
Pb-214	18	1.20
Ra-226	48	5.10
Ac-228	25	0.71
U-238	2	2.53

В дополнение к почвенным исследованиям были проанализированы водные пробы, взятые из двух источников: водопроводной системы,

расположенной рядом с музеем Хулбука, и артезианской скважины, находящейся неподалёку. Исследование проводилось с целью определения суммарной альфа- и бета-активности. Результаты радионуклидного анализа показали, что уровень суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов составил 0,03 Бк/л, а бета-излучающих - 0,34 Бк/л. Эти значения находятся значительно ниже предельно допустимых уровней, установленных действующими нормативами, и не представляют угрозы для здоровья населения.

На основании полученных данных можно с уверенностью утверждать, что территория крепости Хулбук не демонстрирует признаков радиационной аномалии. Уровень радиационного фона здесь соответствует естественным значениям, характерным для региона, и не превышает нормативных показателей. Соответственно, объект является безопасным как для местных жителей, так и для многочисленных туристов, посещающих его ежегодно.

**Туристический комплекс Чилдухтарон: жемчужина природы и культурного наследия Муминабадского района.** Муминабадский район Таджикистана обладает значительным туристическим потенциалом, благодаря разнообразию природных ландшафтов, богатому культурному наследию и благоприятным условиям для развития различных форм туризма. Регион идеально подходит для организации горных походов, спортивных мероприятий, этнографических экспедиций и экологических туров.

Одним из наиболее ярких и живописных объектов района является туристическая достопримечательность Чилдухтарон. Эта местность, окружённая величественными горами, зелёными лугами, густыми лесами и кристально чистыми родниками, неизменно вызывает восхищение у путешественников. Природная красота Чилдухтарона, сочетающая в себе спокойствие и величие, покорила сердца тысяч туристов, как местных жителей, так и гостей из-за рубежа.

На территории исторического комплекса Чилдухтарон были проведены измерения радиационного фона с использованием портативного

дозиметрического оборудования марки «Атомтех», оснащённого сцинтилляционным гамма-детектором. Исследования охватывали преимущественно участки вокруг горы, которая является центральным элементом туристического маршрута и популярным местом для прогулок (рисунок 3.2).

Гора, возвышающаяся на 2000 метров над уровнем моря, расположена между двумя живописными речными потоками, что придаёт местности особую атмосферу уединения и гармонии. Измерения проводились вдоль троп и дорог, по которым передвигаются посетители, а также вблизи подножия горы.

Полученные данные показали, что мощность дозы гамма-излучения на исследуемом участке варьируется от 0,08 до 0,18 микрозиверт в час. Эти значения соответствуют среднему радиационному фону, характерному для территории Таджикистана, и не превышают установленных нормативов. Примечательно, что уровень радиации на дорогах, окружающих гору, оказался значительно ниже, чем у её основания, что свидетельствует о стабильной и безопасной радиологической обстановке.



**Рисунок 3.2.** – Схема точек мониторинга радиационного фона на территории объекта - Чилдухтарон.

В рамках исследования были проведены отбор и анализ почвенных проб с территорий, прилегающих к горному массиву, включая как активно используемые сельскохозяйственные угодья, так и заброшенные участки. Пробы подверглись гамма-спектрометрическому анализу, результаты которого показали наличие природных радионуклидов в концентрациях, не превышающих допустимые санитарные нормы (таблица 3.4). Дополнительно, в образцах почвы, собранных у подножья горы, было зафиксировано незначительное присутствие радионуклида цезия-137. Его наличие интерпретируется как результат глобального атмосферного переноса, связанного с историческими ядерными испытаниями и авариями.

Также была проведена оценка качества воды, взятой из родникового источника, расположенного в непосредственной близости от исследуемой местности. Измеренная суммарная активность альфа- и бета-излучающих радионуклидов составила 0.02 Бк/л и 0.28 Бк/л соответственно, что находится в пределах установленных нормативов.

**Таблица 3.4.** – Радионуклидный состав почвенных проб в разных ландшафтных зонах Чилдухтарона (в Бк/кг)

Пробы почвы	Пашенные земли		Подножье горы	
	Средневзвешенная активность	Погрешность	Средневзвешенная активность	Погрешность
К-40	487	20	418	18
Cs-137	-	-	7.3	0.5
Pb-210	16	3.5	-	-
Bi-212	21	2.0	23.3	2.1
Pb-212	22	1.5	18.6	1.5

Продолжение таблицы 3.4.

Bi-214	27	0.8	18.0	1.0
Pb-214	25	1.5	23.7	1.5
Ra-226	57	5.8	58.0	6.9
Ac-228	34	0.9	29.0	1.1
U238+dau	11	2.4	-	-

Соответственно, в ходе обследования района Чилдухтарон не выявлено признаков радиационной аномалии. Уровни радиационного фона соответствуют естественным значениям, характерным для данной географической зоны.

В процессе проведения радиоэкологических измерений на территории исторического комплекса - крепости Хулбук, а также в районе туристической достопримечательности Чилдухтарон, не были зафиксированы участки с превышением естественного радиационного фона. Все зарегистрированные значения соответствуют нормативным показателям, характерным для данной местности.

Почвенные образцы, собранные в прилегающих к объектам зонах, продемонстрировали содержание природных радионуклидов в пределах фоновых значений, типичных для геологических условий региона.

Дополнительно были исследованы водные пробы, отобранные из родниковых источников, расположенных вблизи указанных объектов. Суммарная активность альфа- и бета-излучающих радионуклидов составила 0.02 Бк/л и 0.28 Бк/л соответственно, что не превышает установленные санитарные нормативы.

На основании полученных данных можно заключить, что крепость Хулбук и природный комплекс Чилдухтарон являются экологически благополучными территориями, не представляющими радиационной угрозы для здоровья людей.

### *3.2.1. Радиационное обследование древнего города Карон Дарвазского района Таджикистана*

Благодаря богатому историко-культурному наследию, Республика Таджикистан обладает значительным потенциалом для активного развития туристической отрасли. В последние годы наблюдается рост интереса к изучению природных особенностей страны, архитектурных памятников, культурных артефактов и этнографических традиций таджикского народа. Особое внимание уделяется вопросам безопасности туристических маршрутов, включая оценку радиационного состояния территорий, где расположены объекты исторического значения.

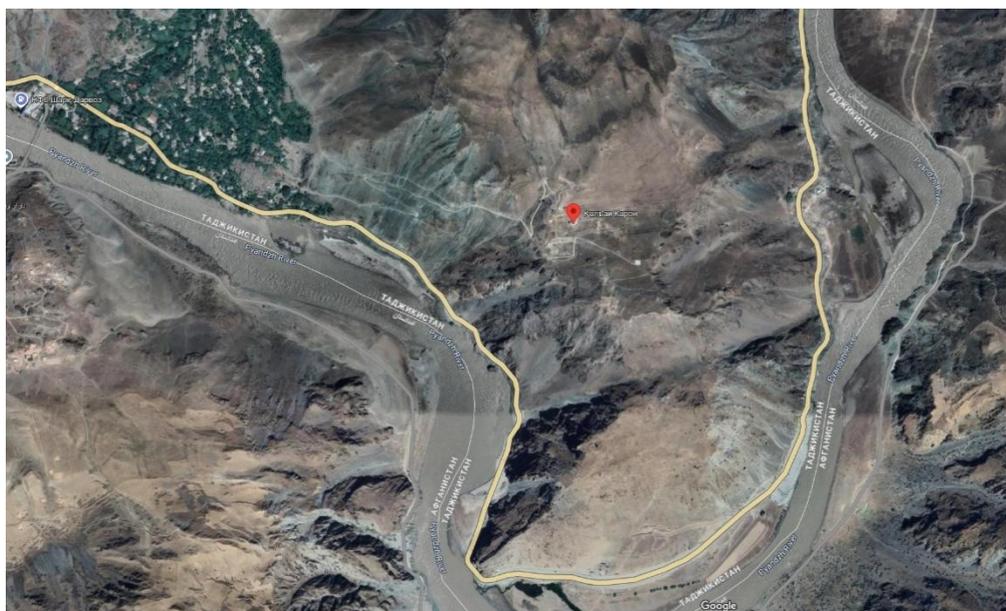
С учётом того, что при строительстве древних сооружений могли использоваться горные породы с повышенным содержанием природных радионуклидов, такие объекты представляют интерес не только с культурной, но и с радиозэкологической точки зрения. Проведение соответствующих исследований позволяет определить уровень потенциального радиационного воздействия на посетителей и обеспечить безопасные условия для туристической деятельности.

В этом контексте было осуществлено радиозэкологическое обследование территории древнего города Карон, расположенного в Дарвазском районе Таджикистана. Целью исследования являлось измерение естественного радиационного фона, выявление возможных источников радиационного риска, связанных с природными радионуклидами, содержащимися в строительных материалах, а также обнаружение радиационных аномалий, способных повлиять на уровень облучения туристов.

Радиация из естественных источников включает космическое излучение, внешнее излучение от радионуклидов в земной коре и внутреннее излучение от радионуклидов, вдыхаемых или проглатываемых и удерживаемых в организме. Величина этих естественных облучений зависит от географического положения и некоторых видов деятельности человека.

Высота над уровнем моря влияет на мощность дозы от космического излучения; излучение от земли зависит от местной геологии. Значительная часть общего вклада дозы в виде естественных источников исходит от земных гамма-радионуклидов. Нуклиды с периодами полураспада, сопоставимыми с возрастом Земли, или соответствующие им продукты распада, существующие в земных материалах, такие как радионуклиды  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , представляют большой интерес. Население мира получает среднюю годовую дозу облучения 2,4 мЗв/год, около 80% которой приходится на природные радионуклиды, в то время как оставшаяся часть в основном обусловлена искусственными источниками, из которых на долю выпадающих радионуклидов приходится всего 0,4%. Ограничение радиационного воздействия на население осуществляется посредством внедрения системы нормативных регламентов, направленных на снижение уровня облучения от отдельных природных источников ионизирующего излучения.

В рамках одной из научных экспедиций по Памирским горам, выдающийся таджикский археолог, академик Юсуфшох Якубов совершил значимое открытие - он обнаружил древнее поселение, получившее название «Карон». Этот уникальный археологический объект расположен в 8,5 километрах от районного центра, вблизи села Рузвай, на территории Дарвазского района Горно-Бадахшанской автономной области. Остатки исторического города Карон расположены на высоте 1500-1700 метров над уровнем моря на горе Зогик, в 1000 метрах от села Рузвай. Река Пяндж (река Оксус) течёт на восток, юг и запад от участка и защищена на севере непроходимыми высокими горами (рисунок 3.3). Таким образом, город Карон является естественно недоступной и охраняемой территорией. Из-за размеров и величия города учёные предполагают, что в прошлом это был королевский город и место дворянства, где жили король, его родственники, войска, слуги.



**Рисунок 3.3.** – Расположение древнего города Карон.

Исторические источники упоминают о существовании города Карон в средневековые времена. В 2012 году археологи обнаружили фрагменты пятиэтажного храма огня, храма воды и ветра, ветряную мельницу, фрагмент книги (Авесты) и несколько административных зданий в городе Карон. Таджикские археологи разделили город на четыре части и предположили существование детской площадки, пожарной вышки, водного храма и общественных зданий, а также царского дижа (дворца) в его плоской части. Площадь города составляет 1 квадратный километр (100 гектаров). Для постройки зданий использовались в основном камни вулканических пород, дерево и глина (рисунок 3.4). Камни вулканического происхождения, которые использовались для возведения зданий, были привезены из другой местности.



**Рисунок 3.4.** – Застройка древнего города Карон: сохранившиеся элементы городской архитектуры.

Учитывая, что архитектурные сооружения древнего поселения Карон преимущественно возведены из каменных материалов и расположены на высоте около 1700 метров над уровнем моря, особое внимание в рамках исследования было уделено оценке влияния космического излучения, которое усиливается с увеличением высоты. В связи с этим была проведена комплексная радиационная диагностика местности с целью выявления возможных источников радиационного воздействия и оценки их влияния на окружающую среду и здоровье потенциальных посетителей.

В ходе полевых работ было отобрано шесть образцов почвы с различных участков внутри территории поселения, а также пять образцов каменных фрагментов, взятых из стен зданий, для проведения радиологического анализа. Процедура отбора проб осуществлялась строго в соответствии с действующими нормативными актами и методическими рекомендациями.

Измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в собранных образцах проводились с использованием многоканального гамма-спектрометра марки CANBERRA (США), оснащённого

высококочувствительным германиевым детектором. Данный прибор предназначен для точного определения энергии квантов рентгеновского и гамма-излучения, испускаемых радионуклидами, а также для оценки их удельной и объёмной активности в исследуемых материалах. Все измерения выполнялись в соответствии с утверждённой методикой, с допустимой погрешностью, не превышающей 12%.

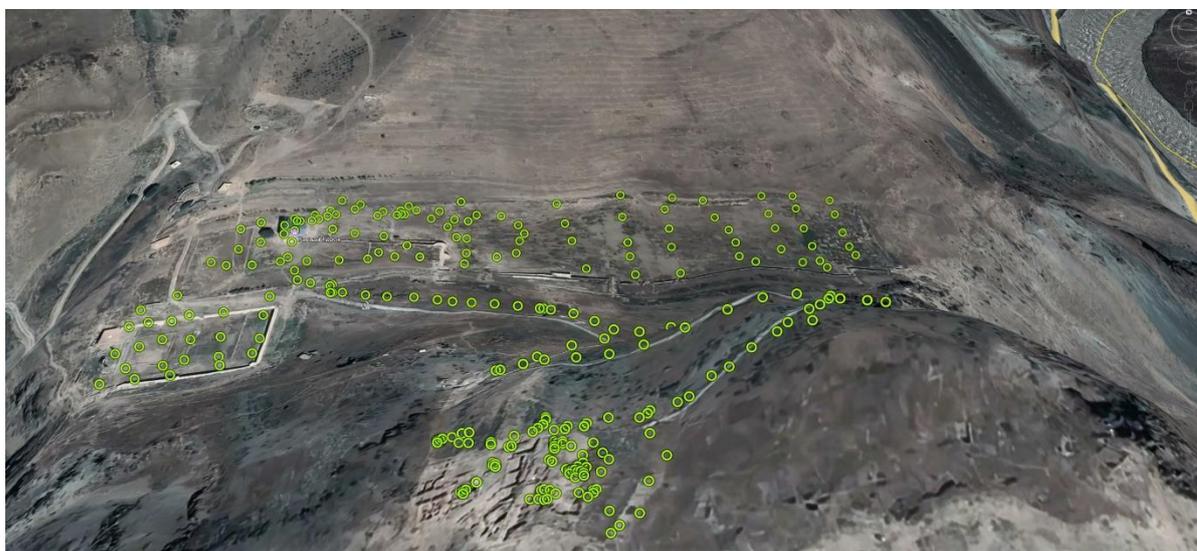
Для анализа использовалась стандартная геометрия сосуда Маринелли объёмом 1000 см<sup>3</sup>. Масса каждой пробы определялась с помощью электронных весов с точностью  $\pm 5.0$  г. После герметичного укупоривания образцы выдерживались в течение 30 суток, что необходимо для достижения радионуклидного равновесия между радоном-226 и его дочерними продуктами распада, обеспечивая тем самым корректность спектрометрических измерений.

Для определения уровня естественного радиационного фона на территории археологического объекта Карон были проведены полевые измерения с использованием современных дозиметрических средств. Измерения осуществлялись на высоте одного метра от поверхности земли. В качестве измерительных приборов использовались откалиброванные устройства: дозиметр МКС-АТ6102 производства компании «Атомтех» (Республика Беларусь) и портативный рюкзачный дозиметр Thermo FHT1377 Pack (США), оснащённый детекторами гамма- и нейтронного излучения. Оба прибора прошли метрологическую аттестацию и соответствуют требованиям, предъявляемым к полевым радиационным исследованиям.

Методика проведения измерений включала непрерывную пешеходную гамма-съёмку с географической привязкой каждой точки наблюдения, что позволило получить пространственно распределённую картину радиационного фона на исследуемой территории (рисунок 3.5). По результатам съёмки установлено, что мощность дозы гамма-излучения в пределах древнего поселения варьировалась от 0,08 до 0,13 микрозиверт в

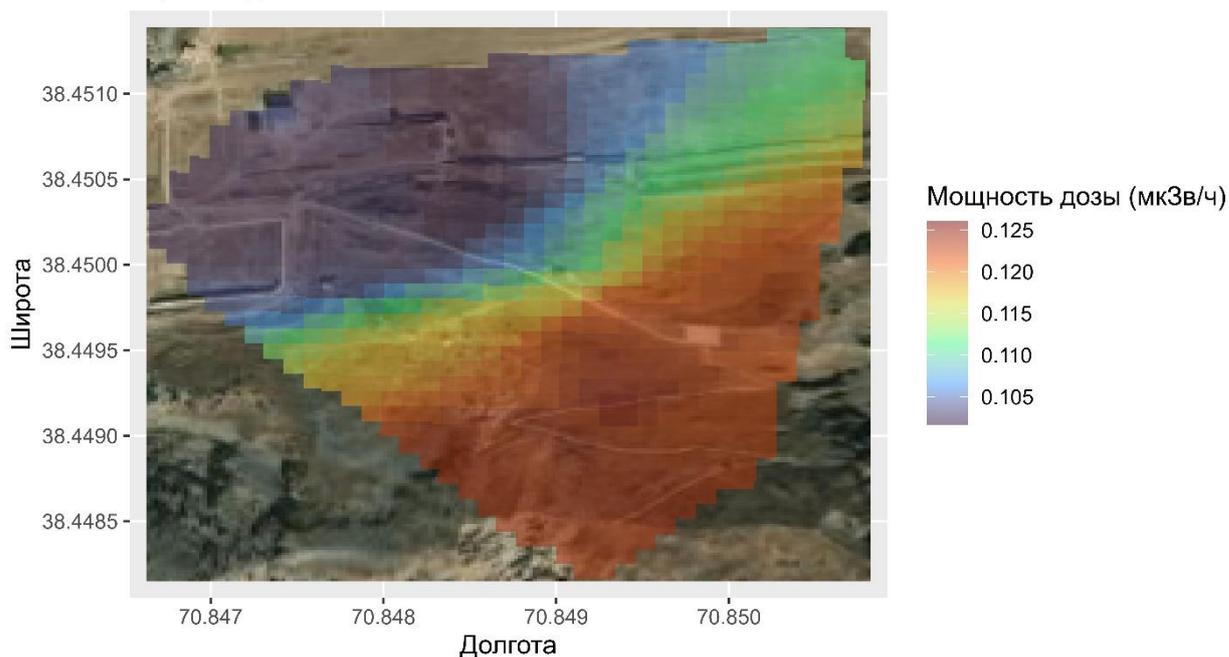
час (мкЗв/ч), что соответствует естественным значениям для региона (рисунок 3.6).

Анализ данных показал, что около 60% измеренных точек продемонстрировали уровни ниже 115 нанозиверт в час (нЗв/ч), что подтверждает стабильность радиационного фона и его соответствие средним показателям, характерным для территории Республики Таджикистан (рисунок 3.7). В ходе обследования не были выявлены участки с аномально повышенными значениями мощности дозы гамма-излучения, что позволяет сделать вывод о радиоэкологической благополучности объекта.

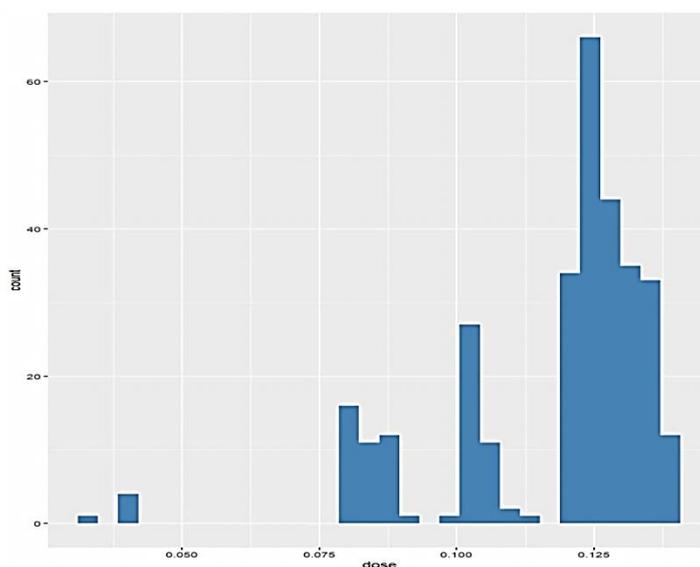


**Рисунок 3.5.** – Схема точек мониторинга радиационного фона на территории объекта - древнего города Карон.

Гамма-съёмка Карон  
Карон, Таджикистан, 2024 г.



**Рисунок 3.6.** – Результаты гамма-съёмки измерения радиационного фона на территории древнего города Карон.



**Рисунок 3.7.** – Распределение уровней естественного радиационного фона на территории древнего города Карон.

Проведённый гамма-спектрометрический анализ шести почвенных образцов, отобранных на исследуемой территории, продемонстрировал наличие природных радионуклидов в концентрациях, не превышающих

установленные нормативные пределы. Согласно данным, представленным в таблице 3.5, все исследованные образцы соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям.

**Таблица 3.5.** – Анализ радионуклидного фона почв в пределах территории древнего города Карон (Дарвазский район, Таджикистан)

Нуклиды	Достоверность идентификации	Средневзвешенная активность, Бк/г	Погрешность, Бк/г
K-40	0.989	9.524352E-001	1.024381E-003
Bi-212	0.876	3.251906E-002	2.745222E-003
Pb-212	0.986	4.526451E-002	1.325347E-003
Bi-214	0.988	3.541317E-002	1.763475E-003
Pb-214	0.942	1.846633E-002	1.469757E-003
Th -228	0.990	4.329621E-002	1.315714E-003
U-238	0.978	7.436533E-002	3.645236E-003

В рамках исследования была проведена гамма-спектрометрическая диагностика пяти образцов каменных материалов, использованных при строительстве архитектурных сооружений древнего поселения Карон. Эти образцы были отобраны с различных участков стен и конструкций, представляющих историческую ценность.

Результаты спектрометрических измерений показали, что все исследованные камни содержат природные радионуклиды - радий-226, торий-228 и калий-40 в концентрациях, соответствующих действующим санитарным и экологическим нормативам. Это свидетельствует о том, что используемые породы не представляют радиационной угрозы для здоровья населения и туристов, посещающих объект.

Из-за длительного периода их полураспада они сохраняются в горных породах на протяжении тысячелетий, оставаясь источниками ионизирующего излучения. Радионуклиды данного типа испускают как корпускулярное излучение (в виде  $\alpha$ -частиц), так и электромагнитное ( $\gamma$ -излучение), что

делает их важными объектами радиоэкологического контроля при оценке безопасности исторических и культурных памятников.

Измеренная концентрация активности радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в образцах камня варьировалась от  $58.53 \pm 1.44$  до  $98.56 \pm 3.87$ ,  $99.33 \pm 13.23$  до  $180.11 \pm 14.92$ ,  $512.30 \pm 11.48$  до  $739.63 \pm 24.41$  Бк/кг соответственно, как показано в таблице 3.6.

Содержание  $^{40}\text{K}$  не нормируется, но он вносит значительный вклад в формирование дозы внутреннего облучения, так как является активным  $\gamma$ -излучателем. Данный нуклид присутствует практически во всех объектах окружающей среды.

Пригодность материалов для строительных нужд оценивается по значению удельной эффективной активности природных радионуклидов в их составе. Статистическая обработка результатов измерений позволила установить, что среднее значение удельной эффективной активности природных радионуклидов в образцах камней равно 331,68 Бк/кг, это значение ниже, чем нормированное для строительных материалов (до 370 Бк/кг).

**Таблица 3.6.** – Содержание радионуклидов в каменных материалах стен зданий древнего города Карон

Пробы каменных материалов	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$
	Бк/кг		
Проба 1	$644.98 \pm 19.20$	$177.20 \pm 21.32$	$98.56 \pm 3.87$
Проба 2	$542.57 \pm 23.41$	$180.11 \pm 14.92$	$87.42 \pm 2.36$
Проба 3	$512.30 \pm 11.48$	$167.18 \pm 7.84$	$58.53 \pm 1.44$
Проба 4	$739.63 \pm 24.41$	$99.33 \pm 13.23$	$68.04 \pm 2.02$
Проба 5	$631.65 \pm 10.62$	$150.74 \pm 15.23$	$70.17 \pm 1.41$
Среднее	614,23	154,91	76,54

На основе проведённых исследований установлено, что древнее поселение Карон, расположенное в Дарвазском районе Таджикистана, не представляет радиационной угрозы и может безопасно посещаться как местными жителями, так и туристами.

Измерения мощности дозы гамма-излучения показали стабильные значения, соответствующие естественному фону региона. Радиоактивных аномалий на территории объекта не выявлено.

Анализ почвенных образцов, отобранных вблизи комплекса, подтвердил, что содержание природных радионуклидов находится в пределах допустимых значений, характерных для данной местности. Дополнительно проведён спектрометрический анализ каменных материалов, использованных при строительстве. Все образцы содержат природные радионуклиды -  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  - в концентрациях, соответствующих санитарным нормам, что подтверждает безопасность строительных пород.

Следует отметить, что в поселении Карон отсутствуют источники питьевой воды - как природные, так и скважинные.

Таким образом, археологический объект «Карон» соответствует критериям радиоэкологической безопасности.

### ***3.2.2. Радиационное обследование исторического объекта «Тохти Сангин», расположенного на территории Кабодиёнского района Таджикистана***

Разнообразие историко-культурных памятников Таджикистана представляет собой важнейший ресурс для развития туристической индустрии, которая играет заметную роль в укреплении национальной экономики. В рамках стратегии по расширению туристического потенциала страны предпринимаются активные шаги по изучению природных ландшафтов, архитектурных комплексов, этнографических особенностей и культурных традиций таджикского народа. Особый интерес вызывают

древние сооружения, рассматриваемые не только как объекты исторического значения, но и как потенциальные зоны радиоэкологического риска.

С этой целью на территории археологического комплекса «Тахти Сангин» были проведены радиационные исследования, направленные на определение уровня естественного радиационного фона, выявление возможных аномалий и оценку степени воздействия природных источников ионизирующего излучения на здоровье населения.

Природные радионуклиды - такие как радий-226, торий-232 и калий-40 являются основными компонентами, формирующими дозу внешнего облучения человека. По современным оценкам, они обеспечивают около двух третей от общей дозы, получаемой человеком от всех источников радиации. Уровень воздействия зависит от концентрации указанных изотопов в окружающей среде и их распределения в строительных материалах и почве.

Для минимизации радиационного риска применяется система нормативных ограничений, регулирующая допустимые уровни облучения от природных источников. Эти меры направлены на обеспечение санитарной безопасности и устойчивое развитие туристической инфраструктуры, особенно в районах с высоким культурным и историческим значением.

В 1976 году в ходе археологических исследований на юго-западе Таджикистана было обнаружено уникальное каменное поселение - Тахти Сангин, также известное как Храм Окса. Этот древний город, относящийся к зороастрийской цивилизации, расположен на правом берегу реки Амударья, ниже места слияния Пянджа и Вахша, в Кабодиёнском районе Хатлонской области, недалеко от государственной границы с Афганистаном. По данным исторических источников, храмовый комплекс был возведён в период V–III веков до нашей эры.

Архитектурная структура городища включает укреплённую цитадель размерами 235 на 165 метров, а также прилегающую территорию, простирающуюся на 500 метров. Центральным элементом цитадели является

культовое сооружение - «Храм Быков», отличающееся строгой геометрией: квадратный Белый зал (12×12 м) с высотой стен до 5 метров и симметрично расположенными башнями. Планировка храма демонстрирует влияние эллинистической архитектурной традиции, включая классические элементы храмового зодчества и скульптурное оформление.

Само городище, имеющее протяжённость около 3 километров при ширине от 100 до 450 метров, окружено земляными валами из необработанного кирпича, расположенными по северной и южной границам. Внутри укреплений располагались кварталы с нерегулярной планировкой, а во внутреннем дворе храма функционировала мастерская по производству бронзовых изделий. Благодаря своей исторической и культурной значимости, Тахти Сангин был номинирован Таджикистаном на включение в Список всемирного наследия ЮНЕСКО и официально внесён в него в 2015 году.

Учитывая древний характер объекта и возможное использование каменных пород с природной радиоактивностью при строительстве, особое внимание было уделено проведению радиационного мониторинга. В рамках исследования было отобрано восемь образцов почвы как с внутренней части комплекса, так и с прилегающих участков. Все процедуры отбора проводились в строгом соответствии с действующими нормативными актами и методическими рекомендациями.

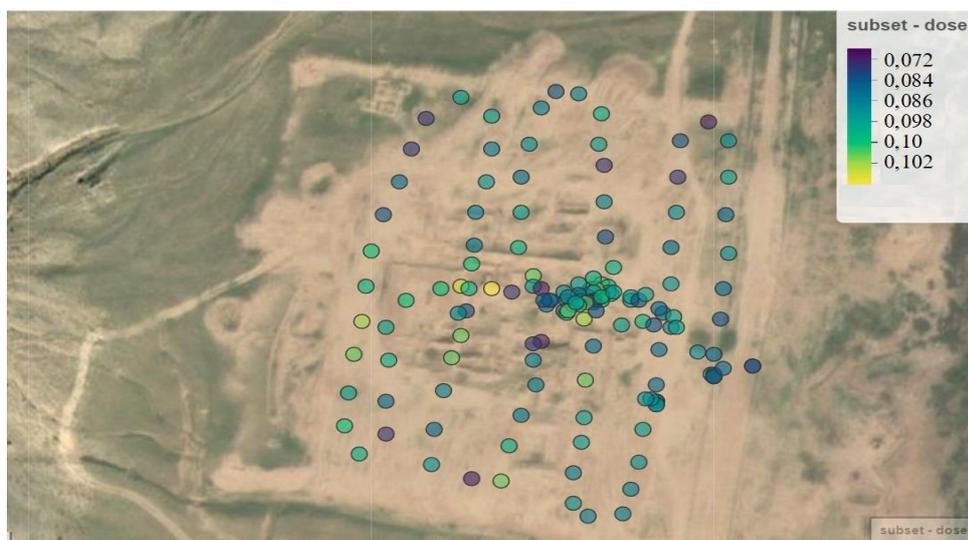
Анализ активности гамма-излучающих радионуклидов в почвенных пробах осуществлялся с применением спектрометрического метода на оборудовании фирмы CANBERRA (США), оснащённом германиевым детектором высокой чувствительности. Измерения проводились в соответствии с утверждённой методикой, с допустимой погрешностью до 12%. Для подготовки образцов использовались стандартные сосуды типа «Маринелли» объёмом 1 литр.

Для определения уровня естественного радиационного фона на участке древнего городища Тахти Сангин были проведены полевые измерения на высоте одного метра от поверхности земли. В работе использовались

откалиброванные дозиметрические устройства: прибор МКС-АТ6102 производства «Атомтех» (Республика Беларусь) и портативный дозиметр Thermo FHT1377 Pack (США), оснащённый сенсорами для регистрации гамма- и нейтронного излучения. Оба прибора прошли метрологическую аттестацию и соответствуют требованиям, предъявляемым к радиационному мониторингу.

Измерения проводились методом непрерывной пешеходной гамма-съёмки с обязательной географической привязкой каждой точки наблюдения, в соответствии с утверждёнными методическими рекомендациями. Применение различных типов оборудования было обусловлено различиями в чувствительности, энергетическом разрешении и допустимых погрешностях, что позволило повысить точность и надёжность полученных данных.

Результаты обследования, выполненного как внутри комплекса, так и на прилегающих территориях (рисунок 3.8), показали, что мощность дозы гамма-излучения варьируется в пределах от 0.07 до 0.10 микрозиверт в час, что ниже среднего уровня радиационного фона, характерного для территории Республики Таджикистан. В процессе измерений не было зафиксировано ни одной точки с аномально повышенными значениями, что свидетельствует о радиозэкологической стабильности исследуемого объекта.



**Рисунок 3.8.** – Схема точек мониторинга радиационного фона на территории исторического объекта «Тахти Сангин».

По итогам гамма-спектрометрического исследования всех отобранных образцов было установлено, что они содержат природные радионуклиды в концентрациях, не превышающих допустимые санитарные нормы (таблица 3.7). На основании полученных данных можно сделать вывод, что археологический комплекс Тахти Сангин является радиоэкологически стабильным и безопасным для посещения.

**Таблица 3.7.** – Анализ радионуклидного фона почв в пределах территории исторического объекта «Тахти Сангин»

Радионуклид	Достоверность идентификации	Средневзвешенная активность, Бк/г	Погрешность, Бк/г
K-40	0.929	4.734342E-001	2.053381E-002
Bi-212	0.998	3.109496E-002	3.835805E-003
Pb-212	0.997	2.806333E-002	2.425348E-003
Bi-214	0.751	2.795557E-002	1.520475E-003
Pb-214	0.999	2.809853E-002	1.405468E-003
Ac-228	0.873	2.861687E-002	1.239933E-003
Th-234	0.996	2.250373E-002	5.365136E-003

В пределах исследуемой территории археологического комплекса «Тахти Сангин» не зафиксировано наличие природных или скважинных источников водоснабжения, в связи с чем отбор водных проб для радиологического анализа не проводился.

В ходе измерений естественного радиационного фона, выполненных на территории памятника, не были обнаружены участки с превышением допустимых значений мощности дозы гамма-излучения. Все зарегистрированные показатели соответствуют природному уровню, характерному для данной географической зоны.

Анализ почвенных образцов, собранных вблизи объекта, подтвердил, что концентрации природных радионуклидов находятся в пределах фоновых значений. На основании полученных данных можно заключить, что археологический памятник «Тахти Сангин» является радиоэкологически стабильным и безопасным для посещения как туристами, так и местным населением.

### ***3.2.3. Радиоэкологический мониторинг исторического объекта «Аджинатеппа» в районе Кушониён Таджикистана***

Активное развитие туристического сектора в Республике Таджикистан сопровождается модернизацией инфраструктуры, реставрацией памятников архитектуры и созданием комфортных и безопасных условий для отдыха. Особое внимание уделяется историческим объектам, которые, помимо культурной ценности, представляют интерес с точки зрения радиоэкологической безопасности. Это связано с тем, что при строительстве древних сооружений могли применяться горные породы, содержащие повышенные уровни природных радионуклидов.

В рамках оценки радиационного состояния был проведён радиоэкологический мониторинг на территории крепости Аджинатеппа - одного из значимых исторических памятников региона. Целью обследования являлось измерение мощности дозы гамма-излучения, выявление возможных радиационных аномалий и определение степени воздействия природных источников ионизирующего излучения на население.

По данным радиационной гигиены, природные источники излучения формируют около 20% годовой индивидуальной дозы облучения человека, включая техногенные компоненты. В абсолютных значениях это составляет приблизительно 0,77 мЗв/год из общей дозы 4,06 мЗв/год. Наибольший вклад в дозу внешнего облучения вносят естественные радионуклиды, такие как торий-232, радий-226 и калий-40, которые распространены в составе горных пород. Их влияние на организм человека в два раза превышает воздействие космического излучения.

Для минимизации радиационного риска и обеспечения санитарной безопасности населения применяется система нормативных ограничений, регулирующая допустимые уровни облучения от природных источников.

Археологический памятник Аджинатеппа, расположенный на равнинной территории Кушониёнского района Хатлонской области, находится примерно в 15 километрах южнее города Бохтар. Объект представляет собой прямоугольное сооружение размерами 100×50 метров и высотой около 6 метров. В непосредственной близости - на расстоянии около 200 метров - проживает местное население, а прилегающая территория используется как сельскохозяйственные угодья.

Аджинатеппа известна благодаря уникальным находкам, среди которых монументальная 14-метровая статуя Будды, изображённого в положении нирваны, а также несколько скульптур сидящего Будды. Буддийский монастырский комплекс, построенный из кирпича, был окружён стеной высотой 5.5–6.0 метров. Архитектурная структура включала два квадратных двора, соединённых анфиладой, внутри которых располагались культовые помещения, жилые кельи, хозяйственные хранилища, коридоры и другие элементы. В одном из дворов находилась крестообразная ступа, украшенная настенной росписью, а по углам размещались дополнительные ступы меньшего размера.

Первое археологическое обследование Аджинатеппы состоялось в 1959 году. В 1999 году памятник был официально выдвинут Министерством культуры Таджикистана на включение в Список всемирного наследия ЮНЕСКО.

Для оценки радиационного фона на территории памятника были проведены измерения с использованием откалиброванного дозиметрического оборудования Thermo (США) рюкзачного типа, оснащённого сцинтилляционным гамма-детектором. Методика измерений соответствовала действующим нормативным требованиям.

В рамках анализа было отобрано шесть образцов почвы - как с внутренней части крепости, так и с прилегающих пахотных земель. Отбор проводился согласно стандарту ГОСТ 17.4.3.01-2017, с глубины до 25 см от поверхности. Из общей массы методом квартования формировались представительные образцы объёмом более 1 литра. Далее почвы подвергались сушке до воздушно-сухого состояния, измельчались на лабораторной мельнице и просеивались через сито с диаметром ячеек 2 мм, обеспечивая однородность материала для радионуклидного анализа.

Для проведения спектрометрического анализа почвенных образцов использовалась стандартная измерительная ёмкость типа «Маринелли» объёмом 1 литр. Измерения активности гамма-излучающих радионуклидов осуществлялись с применением высокоточного гамма-спектрометра производства CANBERRA (США), оснащённого детектором из особо чистого германия. Обработка данных выполнялась с использованием программного комплекса Genie-2000. Погрешность измерений варьировалась в пределах от 5 до 12%, что соответствует требованиям к точности радиационного анализа.

Дополнительно были отобраны и исследованы водные пробы, полученные из реки, расположенной вблизи археологического объекта, а также из источников питьевого водоснабжения, обслуживающих население района. Все процедуры проводились в соответствии с утверждённой методикой.

Полевые измерения мощности дозы гамма-излучения на территории крепости Аджинатеппа и прилегающих участках (рисунок 3.9) показали, что значения радиационного фона находятся в диапазоне от 0.07 до 0.13 микрозиверт в час (мкЗв/ч). Эти показатели ниже среднестатистического уровня радиационного фона, характерного для территории Республики Таджикистан. В ходе обследования не были выявлены участки с аномально повышенными значениями мощности дозы, что свидетельствует о радиоэкологической стабильности объекта.



**Рисунок 3.9.** – Схема точек мониторинга радиационного фона на территории исторического объекта Аджинатеппа.

Проведённый гамма-спектрометрический анализ отобранных образцов показал, что содержание природных радионуклидов - таких как  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  - находится в пределах допустимых санитарных норм (таблицы 3.8 и 3.9). Концентрации радионуклидов не превышают фоновые значения, характерные для региона. На основании полученных данных можно заключить, что археологический памятник Аджинатеппа является радиоэкологически благополучным. Территория объекта не представляет угрозы с точки зрения ионизирующего излучения, и может свободно посещаться туристами и местными жителями без риска для здоровья.

**Таблица 3.8.** – Анализ радионуклидного фона почв в пределах территории исторического объекта Аджинатеппа

Нуклид	Достоверность идентификации	Средневзвешенная активность, Бк/г	Погрешность, Бк/г
K-40	0.999	5.411784E-001	2.286949E-002
Bi-212	0.996	1.221822E-002	1.180652E-003
Pb-212	0.769	1.088159E-002	1.111212E-003
Bi-214	0.847	2.191188E-002	7.483757E-004
Pb-214	0.692	1.840752E-002	1.285536E-003
Ra-226	0.998	4.864839E-002	5.090766E-003
Ac-228	0.782	2.528404E-002	7.195415E-004
U-238	0.966	2.167062E-003	2.587189E-003

**Таблица 3.9.** – Среднее содержание радионуклидов в почве обрабатываемых сельскохозяйственных полей в местности Аджинатеппа

Нуклид	Достоверность идентификации	Средневзвешенная активность, Бк/г	Погрешность, Бк/г
K-40	1.000	4.397781E-001	1.925732E-002
Pb-210	0.988	5.905176E-003	2.795277E-003
Bi-212	1.000	1.574277E-002	1.841412E-003
Pb-212	0.622	2.085719E-002	1.605345E-003
Bi-214	0.716	2.276844E-002	9.519118E-004
Pb-214	0.636	2.166412E-002	1.286054E-003
Ra-226	1.000	4.570043E-002	5.774357E-003
Ac-228	0.857	2.356292E-002	9.844182E-004
U-238	0.888	1.954578E-003	3.027389E-003

Анализ водных проб, отобранных из реки, расположенной вблизи археологического комплекса Аджинатеппа, а также из источников питьевого водоснабжения, показал, что суммарная активность альфа- и бета-

излучающих радионуклидов составляет 0.04 Бк/л и 0.38 Бк/л соответственно. Эти значения находятся в пределах допустимых санитарных норм. Проведённые измерения мощности дозы гамма-излучения на территории самого памятника не выявили участков с аномально повышенным радиационным фоном. Все зарегистрированные значения соответствуют естественному уровню, характерному для данной местности.

Дополнительно был выполнен анализ почвенных образцов, собранных на прилегающих участках. Концентрации природных радионуклидов в почве - таких как  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  - находятся в пределах фоновых значений, что подтверждает отсутствие техногенного загрязнения. На основании полученных данных можно заключить, что исторический объект Аджинатеппа является радиоэкологически стабильным и безопасным для посещения туристами и проживания местного населения.

## ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 4.1. Оценка радиационной ситуации в Таджикистане

В настоящей работе дана оценка радиационной опасности районов Таджикистана.

Как известно, Земля имеет собственный радиационный фон, который состоит из ряда факторов. Это космические лучи, минеральные ископаемые, содержащие радиоактивные вещества, и радиоактивный газ радон. При рассмотрении экологической ситуации необходимо учесть эти факторы. В работе рассматривалась радиационная ситуация в Таджикистане, анализировались радионуклиды в почвах, водах и воздушном бассейне Таджикистана.

Важнейшим фактором в оценке радиационной обстановки является содержание радона в помещениях и изотопа цезия-137 в почвах. Известно, что радон входит в состав радиоактивных рядов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Кроме того, радон выделяется при распаде радия. Радон относительно быстро покидает кристаллическую решётку минерала, попадает в воздух и растворяется в воде.

Концентрация радона в атмосферном воздухе определяется прежде всего геологическими условиями местности. Так, гранитные породы, богатые ураном, служат активными источниками радона, тогда как над морскими акваториями его содержание минимально. Существенное влияние оказывает и погодный фактор: во время осадков микроскопические трещины в почве, через которые радон мигрирует в атмосферу, заполняются водой, а снежный покров дополнительно ограничивает его выход на поверхность.

Особую значимость для здоровья человека представляет радиационный фон внутри помещений (РФП), который формируется под воздействием как природных, так и техногенных источников ионизирующего излучения. РФП включает компоненты земного происхождения (естественные радионуклиды) и космическое излучение, а также может быть усилен за счёт строительных материалов и инженерных решений.

К основным долгоживущим природным радионуклидам, влияющим на уровень радиационного фона в зданиях, относятся радий-226, торий-232 и калий-40. Кроме того, в строительных конструкциях может присутствовать техногенный цезий-137, а в воздухе - короткоживущие изотопы радия и, реже, тория (с периодом полураспада менее 10 суток), которые также вносят вклад в облучение.

Формирование радиационного фона помещений во многом обусловлено антропогенными факторами: выбором участка под строительство, радиационными характеристиками используемых материалов, архитектурными особенностями зданий и эффективностью вентиляционных систем. Несмотря на распространённое мнение о повышенной концентрации радона в подвальных и нижних этажах, измерения не всегда подтверждают эту закономерность - распределение радона может быть неоднородным и зависеть от множества условий.

Согласно санитарным нормам, безопасной считается средняя плотность потока радона с поверхности грунта, не превышающая  $80 \text{ мБк/м}^2 \cdot \text{с}$  для многоквартирных жилых домов и  $40 \text{ мБк/м}^2 \cdot \text{с}$  для малоэтажных коттеджей. В связи с этим, при выборе участка под строительство необходимо проводить предварительное радиационное обследование территории, чтобы исключить потенциальные риски и обеспечить безопасность будущих жильцов.

Важное значение для администраций городов и районов имеют радиоэкологические карты местностей, которые позволяют выбирать места для строительства различных объектов.

Для проведения строительных работ и переработки минерального сырья необходимы предварительные измерения радионуклидов в этих материалах.

Разработка радиационного нормирования, мер радиационной безопасности, выявление путей проникновения радионуклидов, также являются актуальной задачей. Особое значение имеет воздействие на окружающую среду отходов уранодобывающих производств. В настоящей

работе обсуждена история формирования поля радиоактивного загрязнения на территории Таджикистана.

В представленной работе систематизированы данные, полученные в ходе комплексных мониторинговых исследований, проведённых специалистами Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАНТ. Исследования охватывают широкий спектр территорий - от городских зон до сельских районов - и направлены на оценку радиозэкологического состояния окружающей среды. На их основе составлены радиозэкологические карты обследованных местностей, что представляет практический интерес в народно-хозяйственном плане.

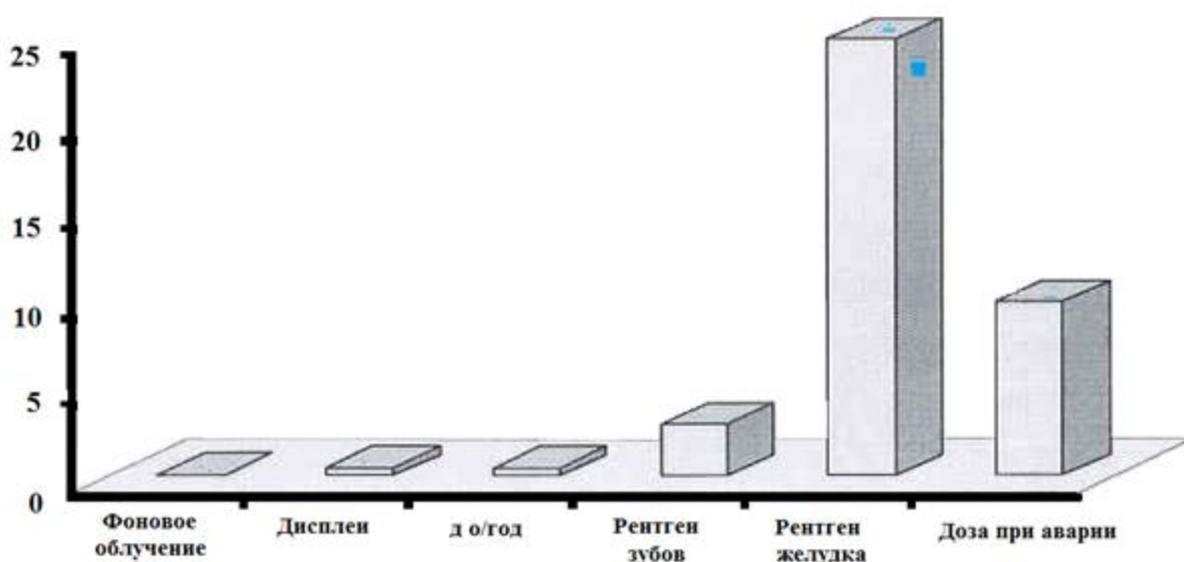
В работе отражена методика проведения работ по оценке радиационно-гигиенической обстановки хвостохранилищ, методика определения содержания радона в атмосфере. Даны оценки радоноопасности территорий хвостохранилищ. Оценена потенциальная опасность хвостохранилищ для населения, проживающего вблизи хвостохранилищ.

Проведён анализ строительных материалов и минерального сырья, используемых для строительных объектов и в промышленности.

Уровень радиационного воздействия на человека от природных источников может существенно различаться в зависимости от условий проживания и рода занятий. Географические особенности местности играют ключевую роль: жители горных регионов, где повышен естественный радиационный фон, могут получать годовые дозы, значительно превышающие те, что характерны для равнинных территорий.

Дополнительное облучение также характерно для представителей определённых профессий. Например, пилоты гражданской авиации и альпинисты, находящиеся на больших высотах, подвергаются усиленному воздействию космического излучения, что приводит к увеличению их индивидуальной дозовой нагрузки. На рисунке 4.1 представлены сравнительные данные по величинам доз, получаемым человеком от различных естественных и техногенных источников.

На диаграмме, представленной на рисунке 4.1, отображены различные уровни радиационного воздействия на человека от естественных и техногенных источников. В частности, показаны значения фонового природного облучения, средние дозы, получаемые при использовании экранов телевизоров и компьютеров, допустимые уровни облучения, а также дозы, характерные для медицинских процедур - таких как рентгенография зубов и желудка. Кроме того, приведены ориентировочные значения доз, планируемые при аварийных ситуациях, связанных с радиационным воздействием.

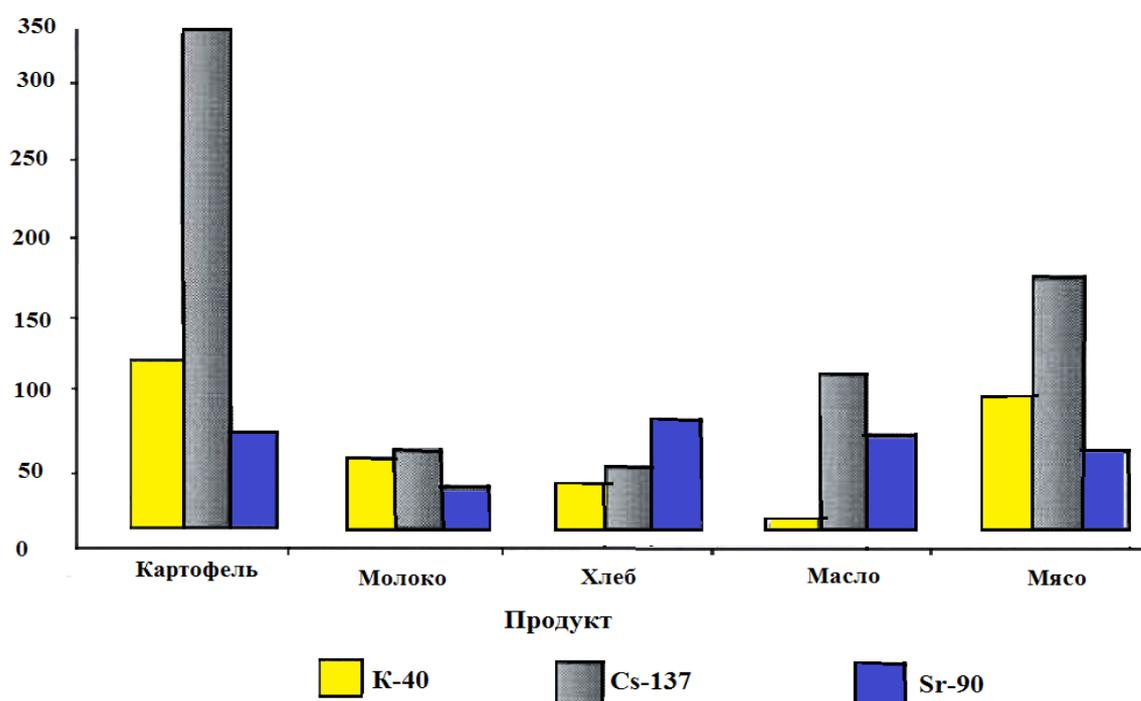


Дисплей – величины доз, получаемых от экранов телевизоров и компьютеров,  
 до/год – величина допустимого облучения

**Рисунок 4.1.** – Источники ионизирующего излучения и их вклад в облучение человека [33, 59].

Особое внимание в радиозэкологической оценке уделяется содержанию техногенных радионуклидов в продуктах питания, прежде всего цезия-137 и стронция-90, которые могут накапливаться в биологических цепях. На рисунке 4.2 представлено сравнение содержания естественного радионуклида калия-40 в различных пищевых продуктах с допустимыми уровнями  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Как видно из рисунка 4.2, в большинстве продуктов питания концентрация  $^{40}\text{K}$  значительно превышает уровни техногенных радионуклидов. Это объясняется тем, что калий-40 является естественным компонентом биосферы и активно участвует в обменных процессах организма. Даже в почвах, подвергшихся антропогенному загрязнению цезием и стронцием, содержание  $^{40}\text{K}$ , как правило, в несколько раз выше суммарных концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .



**Рисунок 4.2.** – Концентрации  $^{40}\text{K}$  в продуктах питания сравнительно допустимых уровней  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Согласно оценкам [33, 59], вклад радиоактивного калия составляет около 12,3% от общего уровня фонового облучения костного мозга человека, обеспечивая основную долю внутреннего радиационного воздействия.

В работе изучено содержание радионуклидов в минеральных рудах Таджикистана. Работа включала комплексный радиоэкологический мониторинг, охватывающий различные геологические и промышленные объекты страны. В месторождениях естественные радионуклиды в основном

находятся в пределах допустимых норм. Приведены значения удельной активности (УА) радионуклидов в соответствии с нормами НРБ-2006.

Как правило, в фосфоритных месторождениях многих стран мира присутствует уран. Однако в фосфоритных месторождениях Таджикистана (Риват, Каратаг) радионуклиды практически не обнаружены. Мощность экспозиционной дозы (МЭД) на обследованных фосфоритных месторождениях находится в пределах санитарно допустимых норм.

В работе приведены данные по радиоэкологическому мониторингу исторических и туристических объектов Таджикистана. Обследована радиационная обстановка в древнем городе Карон (Дарвазский район) и археологическом памятнике «Тахти Сангин».

#### **4.2. Проблемы радиационной экологии в Республике Таджикистан**

В рамках проведённого исследования была выполнена оценка концентраций природных радионуклидов в почвенном покрове юго-западных и восточных районов Республики Таджикистан. Особое внимание уделено изучению изотопа цезия-137. Работа включает анализ пространственного распределения  $^{137}\text{Cs}$  в почвах страны, выявляя его особенности, обусловленные атмосферными осадками, в том числе последствиями глобальных ядерных испытаний и аварийных выбросов. Дана радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения цезия-137 в различных районах Республики Таджикистан. Приведены результаты исследования природных радионуклидов в некоторых родниковых водах Таджикистана. Установлено, что наибольшие значения суммарной удельной альфа-активности радионуклидов отмечены в пробах воды из источников «Хоки Али» и «Навруз».

Изучена эквивалентная равновесная объёмная активность (ЭРОА) радона в зданиях дошкольных и школьных учреждений южных районов страны. Для определения радона в воздухе помещений использован интегральный метод с установкой и последующей обработкой трековых

детекторов. В рамках исследования были проведены измерения экспозиционной эквивалентной концентрации активности радона (ЭРОА) в течение трёх месяцев, охватывающих как тёплый, так и холодный сезоны. Анализ полученных данных показал, что среднегодовые значения ЭРОА радона на первых этажах зданий составляют около 70 Бк/м<sup>3</sup>, тогда как на вторых этажах - порядка 60 Бк/м<sup>3</sup>. Эти показатели находятся в пределах допустимых уровней, установленных нормативами радиационной безопасности, в частности, соответствуют требованиям НРБ-2006.

Проведено радиационное обследование некоторых исторических и туристических объектов Таджикистана, в частности, древнего города Карон Дарвазского района, исторического объекта «Тахти Сангин» Кабодиёнского района, исторического объекта Аджинатеппа Кушониёнского района.

Данное исследование проводилось в Таджикистане впервые и реализовано в рамках проекта: «Физико-химические основы радиационной экологии, разработка радиоэкологических карт регионов и радиационный мониторинг биосреды Таджикистана». Тематика проекта отражает одну из приоритетных задач современной экологической науки и имеет высокую практическую значимость.

В результате выполненных исследований и анализа полученных данных удалось сформировать объективное представление о текущем радиоэкологическом состоянии различных территорий страны. Это позволяет не только оценить уровень радиационной нагрузки на окружающую среду и население, но и выстроить научно обоснованные прогнозы по дальнейшему развитию радиоэкологической обстановки в регионе.

Для совершенствования систем радиоэкологического контроля на этих объектах необходимо восстановить систематические наблюдения за влиянием на окружающую среду и начинать систематически накапливать данные о состоянии объектов, которые должны быть положены в основу обоснования проектов реабилитационных мероприятий на объектах.

Основными из таких мероприятий рекомендованы сооружение грунтового покрытия на поверхности Дигмайского хвостохранилища, для того чтобы уменьшить эксхалацию радона и пыление загрязнённых частиц остатков пульпы от уранового производства, а также предотвратить доступ населения на эту территорию, пока не будет завершена его реабилитация.

Проведённый анализ показал, что изучение зависимости скорости проникновения радона в замкнутые пространства от температурного градиента ( $\Delta T$ ) между внутренним объёмом помещения и наружной атмосферой позволяет количественно оценить соотношение между диффузионными и конвективными потоками радона. Этот подход даёт возможность более точно определить преобладающий механизм его миграции в конкретных условиях эксплуатации зданий.

Результаты исследования свидетельствуют, что в современных строительных конструкциях основными причинами накопления радона являются: диффузионное проникновение радона из строительных материалов, содержащих природные радионуклиды; недостаточная кратность воздухообмена, способствующая удержанию радона в замкнутом объёме помещения.

## **ВЫВОДЫ**

### **Основные результаты исследования**

1. На основе анализа научных и технических источников проведена оценка потенциальной радиационной угрозы, связанной с хвостохранилищами. Рассмотрено влияние накопленных радиоактивных отходов на компоненты биосферы, включая почву, воду и растительность, с учётом миграционных свойств радионуклидов.

2. Исследовано содержание радионуклидов в почвенном покрове различных регионов Таджикистана, с акцентом на техногенный изотоп цезий-137. Выявлены характерные закономерности его пространственного распределения, обусловленные атмосферными осадками.

3. Проведена оценка эффективной радиационной активности радона в зданиях дошкольных и школьных учреждений, расположенных в южных районах Республики Таджикистан. Анализ показал, что среднегодовые эффективные дозы облучения, обусловленные присутствием радона, находятся в пределах допустимых значений, установленных санитарными нормами.

4. Изучено содержание радионуклидов в минеральных рудах Таджикистана. В исследованных месторождениях естественные радионуклиды находятся в пределах допустимых санитарных норм.

5. Проведён мониторинг радионуклидов на исторических и туристических объектах Таджикистана. Обследованы радиационные ситуации древнего города Карон, исторического объекта «Тахти Сангин», исторического объекта Аджинатеппа.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов:**

– При использовании природных источников водоснабжения, особенно родников, в целях питьевого потребления рекомендуется проводить анализ воды на содержание радона, учитывая его потенциальную миграцию из геологических структур.

– Полученные сведения о концентрациях природных радионуклидов в почвах могут быть использованы специалистами в области почвоведения для оценки процессов эрозии, диагностики состояния почвенного покрова и других агроэкологических параметров.

– Результаты радиоэкологических измерений целесообразно учитывать при планировании и обосновании строительства жилых, социальных и инфраструктурных объектов. Это позволит минимизировать радиационные риски и обеспечить санитарную безопасность населения.

– В зданиях дошкольных и школьных организаций рекомендуется внедрение радонозащитных мероприятий, включая оптимизацию вентиляционных систем, что способствует снижению концентрации радона в воздухе и улучшению условий пребывания детей и персонала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Круглов, А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. - 2-е изд., испр. / А. К. Круглов. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. - 380 с.
2. Ветров, В. И. Создание предприятий по добыче и переработке урановых руд / В книге: Создание первой советской ядерной бомбы / В. И. Ветров, В. В. Кротков, В. В. Куниченко. - М.: Энергоиздат, 1995. - С. 170-198.
3. Пионеры секретного атома (50 лет первенцу атомной промышленности СССР по добыче и переработке урана в Таджикистане, 1945-1995 гг.) / Ю. Фильцер, В. Ларин, З. Разыков [и др.]. – Чкаловск, ГП «Востокредмет», 1995. – 68 с.
4. Эйталиев, А. Наследие уранового производства: проблемы и решения / А. Эйталиев // Международный семинар «Урановое наследие Советского Союза в Центральной Азии: проблемы и решения». - Душанбе, 2012. - С. 65-68.
5. Нестеров, Ю. В. Сырьевая база атомной промышленности. События, люди, достижения / Ю. В. Нестеров, Н. П. Петрухин / Под ред. Н. П. Петрухина. - М.: Атомредметзолото, 2015. - 288 с.
6. Мирсаидов, У. М. Ядерное наследие Советского Союза в Таджикистане: проблемы и решения / Радиоэкологический мониторинг биосреды и радиационная безопасность Таджикистана / У. М. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров. – Душанбе, АЯРБ АН РТ, 2010. - С. 58-64.
7. Мирсаидов, И. Радиоактивные хвостохранилища Таджикистана: проблемы и решения / И. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Дж. А. Саломов / Под ред. У. М. Мирсаидова. - Душанбе: ООО «Аршан», 2022. - 206 с.
8. Естественные радионуклиды в почвах на территории ареала хвостохранилища "Адрасман" / М. З. Ахмедов, Х. М. Назаров, Ш. А. Рахимбердиев, У. Мирсаидов // Доклады НАН Таджикистана. - 2023. - Т. 66. - № 5-6. - С. 331-336.

9. История возникновения и нынешнее состояние Гафуровского хвостохранилищ отходов уранового производства / Х. М. Назаров, Д. И. Мирзоев, М. М. Юнусов, Т. Б. Абдуллоева // Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки и производства как механизм развития горно-металлургической отрасли Республики Таджикистан». – Бустон, ГМИТ, 2016. - С. 70-73.

10. Хакимов, Н. Физико-химические и технологические основы переработки отходов урановой промышленности / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов / Под ред. У. Мирсаидова. - Душанбе: Дониш, 2011. - 125 с.

11. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, С. М. Бахронов [др.] // Радиационная гигиена. - 2019. - Т. 12. - № 1. - С. 115-121. DOI:10.21514/1998-426X-2019-12-1-115-121.

12. Радиационно-гигиенический мониторинг на объектах уранового наследия северного Таджикистана / У. М. Мирсаидов, М. З. Ахмедов, М. М. Махмудова, Ш. Г. Шосафарова // Международная конференция «Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века». - Минск: ИВЦ Минфина, 2019. - Ч. 2. - С. 276-279.

13. Khakimov, N. Physico-chemical and manufacturing basis for uranium concentrates production from wastes of hydrometallurgical plants and technical waters / N. Khakimov, Kh. M. Nazarov, I. U. Mirsaidov / Ed. academician ASRT U. Mirsaidov. - Dushanbe: Mavlavi, 2012. - 120 p.

14. Хакимова, Н. У. Урановые хвостохранилища г. Истиклола: история, проблемы, решения / Н. У. Хакимова, М. А. Зоитова // Радиационная гигиена. - 2023. № 16 (2). - С. 102-113. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-102-113>.

15. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол республики Таджикистан / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, Дж. А. Саломов [и др.] // Радиационная гигиена. -

2018. - № 11 (2). - С. 83-90. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90>.

16. Экологические аспекты реабилитации урановых хвостохранилищ г. Истиклола Республики Таджикистан / Х. М. Назаров, Дж. А. Саломов, Н. Хакимов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. - 2015. - № 2 (159). - С. 87-92.

17. Отчет МАГАТЭ (Рабочие материалы). Региональный проект технического сотрудничества RER/9/086 «Безопасное управление отходами добычи и переработки урановых руд в странах Центральной Азии (2005-2008)». – Вена, МАГАТЭ, 2008. - С. 28-54.

18. Рахматов, Н. Н. Физико-химические основы получения урановых концентратов из супесчаных почв и шахтных вод: автореф. дис. ... канд. хим. наук / Н. Н. Рахматов. - Душанбе, 2016. - 22 с.

19. Урановые хвостохранилища в Центральной Азии: национальные проблемы, региональные последствия, глобальные решения. - Рамочный документ к Международному форуму. - Женева, 29 июня 2009. - 44 с.

20. Радиоактивный Мангистау [Электронный ресурс] – URL: [www.caravan.kz](http://www.caravan.kz) (дата обращения: 6 декабря 2020).

21. Урановый Карьер № 4 [Электронный ресурс] – URL: [esocitizens.kz](http://esocitizens.kz) (дата обращения: 6 декабря 2020). Архивировано 24 ноября 2020 года.

22. Стегнар, П. Материалы электронной дискуссии «Урановые хвостохранилища: местные проблемы, региональные последствия, глобальные решения». 30.04.2009 г.

23. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Адрасман (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев [и др.] // Journal of Health and Environmental Research. - 2022. - V. 8. - № 2. - С. 151-158. DOI: 10.11648/j.jher.20220802.20.

24. Переработка рентабельных отвалов для добычи урана / У. М. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров, Д. Д. Камалов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2005. - Т. 68. - № 7. - С. 55-61.

25. Радиационный мониторинг хвостохранилища «Дигмай» / Х. М. Назаров, Дж. А. Саломов, Н. Хакимов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. - 2015. - № 2 (159). - С. 78-82.

26. Радиоэкологическая ситуация в Республике Таджикистан / И. Мирсаидзода, М. З. Ахмедов, Б. Б. Баротов [и др.] / Под ред. У. М. Мирсаидова. - Душанбе: Дониш, 2021. - 114 с.

27. Радиоэкологический мониторинг хвостохранилищ города Истиклол до и после рекультивационных работ / Х. М. Назаров, М. З. Ахмедов, Ш. Рахимбердиев, У. М. Мирсаидов // Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы радиационной гигиены». - Санкт-Петербург, 2023. - С. 210-214.

28. Саломов, Дж. А. О необходимости реабилитации Табошарского хвостохранилища и рекультивации хвостохранилищ региона / Дж. А. Саломов, И. У. Мирсаидов, А. М. Баротов // Международный семинар «Урановое наследие Советского Союза в Центральной Азии: проблемы и решения». – Душанбе, 2012. - С. 30-35.

29. Сравнительная оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилищ Согдийской области Таджикистана / У. М. Мирсаидов, Х. М. Назаров, М. М. Махмудова [и др.] // Радиация и риск - 2022. - Т. 31. - № 2. - С. 118-127. DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31- 2-118-127.

30. Мирсаидов, И. У. Очистка шахтных и дренажных вод от урана / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, М. З. Ахмедов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2009. - № 2. - С. 238-239.

31. Мирсаидов, У. М. Ядерное наследие Советского Союза в Таджикистане: проблемы и решения / В кн.: Радиоэкологический мониторинг

биосреды и радиационная безопасность Таджикистана / У. М. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров. – Душанбе, АЯРБ АН РТ, 2010. - С. 58-64.

32. Хусаинов, А. Т. Влияние урановых хвостохранилищ Степногорского гидрометаллургического завода на загрязнение поверхностных и подземных вод / А. Т. Хусаинов, Л. И. Софронова // Вестник науки КазАТУ им. С. Сейфуллина. - 2011. - № 4 (71).

33. Радиоэкологическая ситуация в Республике Таджикистан / И. Мирсаидова, М. З. Ахмедов, Б. Б. Баротов [и др.] / Под ред. У. М. Мирсаидова. - Душанбе: Дониш, 2021. - 114 с. Повтор с 26

34. Хакимов, Н. Физико-химические и технологические основы переработки отходов урановой промышленности / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов / Под ред. У. Мирсаидова. - Душанбе: Дониш, 2011. - 125 с.

35. Reddy, R. G. Pyro- and Hydrometallurgical Processing of Uranium-Containing Waste / R. G. Reddy // JOM. - 2001. - V. 53. - № 12. - P. 28-30. - DOI: 10.1007/s11837-001-0157-x.

36. Национальная Концепция Республики Таджикистан по реабилитации хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на 2014-2024 годы. – Утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 августа 2014 года, № 505.

37. Башкин, В. Н. Экологические риски: определения и расчёты / В. Н. Башкин // Проблемы анализа риска. - 2014. – Т. 11. - № 5. - С. 4-5.

38. Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов / Г. В. Лаврентьева, О. А. Мирзеабасов, Б. И. Сынзыныс, И. В. Гешель // Радиация и риск. - 2018. – Т. 27. - № 4. - С. 65-75. 001: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-65-75.

39. Проведение комплексной оценки воздействия на окружающую среду и разработка технико-экономического обоснования управления и рекультивации для объектов наследия уранового производства на участках Дигмай, Таджикистан. – INSC Project TJ 4.01-02/11, 2017.

40. Оценка воздействия рекультивационных работ на окружающую среду на участке Дигмай / Отчет по заданию 8.1 INSC Проект ТЈ 4.01-02/11 Проведение комплексной оценки воздействия на окружающую среду и технико-экономическое производства в Дигмай и Табошар, Таджикистан. - EuropeAid/135674/DH/SER/TJ. 2018. - С. 15-16.

41. Назаров, Х. М. Оценка радоноопасности территории Дигмайского хвостохранилища / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, К. А. Эрматов // XXI век. Техносферная безопасность. - 2017. - Т. 2. - № 3. - С. 44-48.

42. Оценка воздействия Дигмайского хвостохранилища на окружающую среду / Н. И. Беззубов, М. М. Юнусов, З. А. Разыков, Б. Г. Файзуллаев / II Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности»: Сборник докладов. – Алматы, Казатомпром, 2002. - С. 181-183.

43. Обращение с отходами, образующимися при добыче и обработке урановых руд / Бюллетень МАГАТЭ. – Т. 23. - № 2.

44. Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана / У. М. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Ш. Г. Шосафарова, М. М. Махмудова // Радиационная гигиена. - 2020. - Т. 13. - № 1. - С. 68-73. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73>.

45. Нормы радиационной безопасности (НРБ-06) СП 2.6.1.001-06. - Душанбе: Агентство по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан, 2006. - С. 139.

46. Уткин, В. И. Газовое дыхание Земли / В. И. Уткин // Соросовский образовательный журнал. - 1997. - Т. 1. - № 1. - С. 57-64.

47. Цапалов, А. А. Зависимость объёмной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А. А. Цапалов, С. И. Кувшинников // Аппаратура и новости радиационных измерений. - 2008. - № 2. - С. 37-43.

48. Радиация: дозы, эффекты, риск / Пер. с англ. - М.: Мир, 1998.

49. Радиометр радона РРА-01М-03: Руководство по эксплуатации. - М.: ВНИИФТРИ, 2004. - 34 с.
50. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. - 2-е издание / Ю. А. Израэль. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 560 с.
51. Лазановский, И. Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / И. Н. Лазановский. - М.: Высшая школа, 1998. - 380 с.
52. Комплексные оценки качества поверхностных вод / Под ред. А. М. Никанорова. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 138 с.
53. Войткевич, Г. В. Радиоактивность в истории Земли / Г. В. Войткевич. - М.: Наука, 1970. - 168 с.
54. Ильин, Л. А. Радиационная гигиена / Л. А. Ильин, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков. - М.: Медицина, 1999. - 364 с.
55. Кузин, А. М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли / А. М. Кузин. - М.: Наука, 1991. - 376 с.
56. Максимов, М. Т. Радиоактивные загрязнения и их измерение / М. Т. Максимов, Г. О. Оджагов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 304 с.
57. Моисеев, А. А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене / А. А. Моисеев, В. И. Иванов. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 252 с.
58. Экология / Н. И. Николайкин [и др.]. - М.: Дрофа, 2003. - 624 с.
59. Платонов, А. П. Основы общей и инженерной экологии / А. П. Платонов, В. А. Платонов. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. - 350 с.
60. Сивинцев, Ю. В. Насколько опасно облучение / Ю. В. Сивинцев. - М.: ИздАТ, 1991. - 89 с.
61. Общий анализ результатов проведения радонового мониторинга в северном Таджикистане / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, С. М. Бахронов [и др.] // XIV Международная научно-техническая конференция «Наука, образование, производство в решении экологических проблем» (Экология - 2018). - Уфа, 2018. - Т. 1. - С. 264-268.
62. Мониторинг водной миграции урана и радона / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, И. У. Мирсаидов [и др.] / Под ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка //

XVIII Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века». - В 3-х ч. - Минск, 2018. - С. 246.

63. Содержание радона в воздухе Спитаменского района Республики Таджикистан / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, К. А. Эрматов [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2018. - Т. 61. - № 3. - С. 293.

64. Исследование загрязнений атмосферного воздуха в городах Согдийской области / Х. Тиллобоев, Ф. А. Очилова, Б. Рахимов, С. Алиев // Учёные записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: естественные и экономические науки. - 2016. - № 1 (36). - С. 22-27.

65. Муртазаев, Х. Радон в жилых зданиях Шахристанского района / Х. Муртазаев, А. Разоков, Ш. Рахимбердиев // Учёные записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: естественные и экономические науки. –

66. Результаты мониторинга радона в воздухе жилых зданий некоторых территорий юга России / Е. А. Бураева, Ю. В. Попов, Е. В. Дергачева [и др.] / Успехи современного естествознания. – 2016. - № 12 (ч. 2). – С. 356-360.

67. Муртазаев, Х. Мощность экспозиционной дозы на территории Шахристанского района / Х. Муртазаев, А. Разоков, Ш. Рахимбердиев // Учёные записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: естественные и экономические науки. - 2016. - № 1 (36). - С. 44-48.

68. Муртазаев, Х. Измерение микроколичества Rn в жилых зданиях разного типа Спитаменского района / Х. Муртазаев, Х. Джурабоев, Ш. Рахимбердиев // Учёные записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: естественные и экономические науки. - 2016. - № 2 (37). - С. 37-41.

69. Результаты гидрохимических исследований в районе Бободжона Гафурова / Х. Тиллобоев, Н. Джабборова, М. Нурмадов, Д. Темирзода // Учёные записки Худжандского государственного университета им.

академика Б. Гафурова. Серия: естественные и экономические науки. - 2016. - № 4 (39). - С. 143-146.

70. Муртазаев, Х. Общий радиационный фон северной части Туркестанского хребта (в пределах Деваштичского района) / Х. Муртазаев, Р. Рахмонова, А. Х. Муртазаев // Учёные записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: естественные науки. - 2017. - № 2 (41). - С. 83-90.

71. Бондаренко, А. П. Основы радиационной экологии / А. П. Бондаренко. – Павлодар, 2007. – 100 с.

72. Левин, М. Н. Природный радиационный фон / М. Н. Левин, О. П. Негрбов, В. Р. Гитлин. – Воронеж, 2000. – 52 с.

73. Старков, В. Д. Радиационная экология / В. Д. Старков, В. И. Мигунов. –Тюмень: ФГУ ИПП “Тюмень”, 2003. – 304 с.

74. Белоусов, И. М. Естественная радиоактивность / И. М. Белоусов. – М.: Медгиз, 1961.

75. Муминов, С. В. Изучение содержание природных радионуклидов в почвах некоторых районов Таджикистана / С. В. Муминов // Доклады НАН Таджикистана. – 2022. - Т. 61. - № 3. – С. 293-295.

76. Накопление изотопа цезия-137 в почве за счёт атмосферных выпадений на юго-западе Таджикистана / С. В. Муминов, И. У. Мирсаидов, Б. Б. Баротов [и др.] // II Международный научный форум «Ядерная наука и технологии». – Алматы, 2019. – С. 177-178.

77. Муминов, С.В. Радионуклиды в строительных материалах Таджикистана / С.В. Муминов, Б.Б. Баротов, Ф.А. Хамидов, М.Д. Бобоёров, И.У. Мирсаидов // Сборник материалов XV Нумановских чтений «Современное состояние химической науки и использование ее достижений в народном хозяйстве РТ». – Душанбе, 2019. - С.167-169.

78. Радиационный мониторинг территории Пункта хранения радиоактивных отходов / С. В. Муминов, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // XV Нумановские чтения «Современное состояние химической науки и

использование ее достижений в народном хозяйстве РТ». – Душанбе, 2019. - С. 171-173.

79. Радиологическая карта населённых пунктов Республики Таджикистан / И. У. Мирсаидов, Ф. А. Хамидов, Б. Б. Баротов [и др.] // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированное состояние и ядерная физика», посвященная 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования». – Душанбе, 2020. – С. 278.

80. Радионуклидный мониторинг ущелья Канаск Вахдатского района Республики Таджикистан / Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов, С. В. Муминов [и др.] // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированное состояние и ядерная физика», посвященная 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования». – Душанбе, 2020. – С. 320.

81. Радионуклидный мониторинг местности Сари Хосор Балджувонского района Республики Таджикистан / Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов, С. В. Муминов [и др.] // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированное состояние и ядерная физика», посвященная 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования». – Душанбе, 2020. – С. 326.

82. Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения цезия-137 в различных районах Таджикистана / У. М. Мирсаидов, С. В. Муминов, Б. Б. Баротов, Ш. Р. Муродов // 21 Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века». - Минск, Республика Беларусь, ИВЦ Минфина, 2021. – Ч. 2. - С. 283-286.

83. Малый патент № ТЈ 1277 Республики Таджикистан. Способ радиационного мониторинга урановых хвостохранилищ / С. В. Муминов, С. М. Бахронов, Х. М. Назаров, Е. Ю. Малышева, М. З. Ахмедов, Б. Б. Баротов, У. Мирсаидов. - № 2201627. - Заяв. 21.01.2022 г.

84. Национальная программа по борьбе с опустыниванием в Таджикистане. – Душанбе, 2000. – 184 с.

85. Мирсаидов, У. М. Оценка распределения цезия-137 в почвах Таджикистана / У. М. Мирсаидов, С. В. Муминов, И. Мирсаидзода // 24 Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века». - Минск, Республика Беларусь, ИВЦ Минфина, 2024. – Ч. 2. - С. 137.

86. Сравнительная оценка распределения Cs-137 в почвенном покрове на территории Таджикистана / У. М. Мирсаидов, М. З. Ахмедов, Х. М. Назаров [и др.] // Радиация и риск. - 2023. – Т. 32. - № 4. - С. 24-34.

87. Пачачанов, Д. Н. Гидрохимия поверхностных вод Таджикистана / Пачаджанов, Д. Л. Патица. – Душанбе, НПИ Центр, 1999. - С. 35-39.

88. Салимов, Т. О. Таджикистан – страна истоков вод / Т. О. Салимов. - Душанбе, 2013. - С. 62.

89. Содержание изотопов  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в воде искусственного озера г. Истиклола Республики Таджикистан / Х. М. Назаров, Х. И. Тиллобоев, М. М. Махмудова, У. М. Мирсаидов // Радиационная гигиена. - 2019. - Т. 12. - № 2. - С. 50-53.

90. Назаров, Х. М. Миграция урана в системе «Дренажные воды - почва» на территории хвостохранилища №1-2 г. Табошар / Х. М. Назаров, Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2009. - Т. 52. - № 3. - С. 224-227.

91. Мирсаидов, И. У. Физико-химическое состояние урана в шахтных ураносодержащих водах и в супесчаных почвах / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Ф. Дж. Саломов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2013. - Т. 56. - № 9. - С. 726-729.

92. Назаров, Х. М. Экологические проблемы извлечения урана из шахтных вод месторождения Киик-Тал Таджикистана / Х. М. Назаров // VII Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века». - Минск, Республика Беларусь, 2007. - С. 169.

93. Беззубов, Н. И. Об изотопных соотношениях  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в водах бассейна Сырдарьи / Н. И. Беззубов, З. А. Раззыков, Б. Г. Файзуллоев, // Республиканская научно-практическая конференция. – Чкаловск, 2009. - С. 83-87.

94. Ахмедов, М. З. Физико-химические основы накопления радионуклидов в бассейне реки Сырдарьи Республики Таджикистан: автореф. дис. ... канд. хим. наук / М. З. Ахмедов. – Душанбе, 2012.

95. Разработка технологических основ очистки ураносодержащих шахтных и дренажных вод от урана / Н. Хакимов, У. М. Мирсаидов, М. З. Ахмедов, М. С. Пулатов // VI Нумановские чтения. – Душанбе, 2009. - С. 226-228.

96. Хакимов, Н. Очистка шахтных и дренажных вод от урана / Н. Хакимов, У. М. Мирсаидов, М. З. Ахмедов // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». – Душанбе, 2009. – С. 238-239.

97. Технология очистки ураносодержащих шахтных и дренажных вод / Н. Хакимов, М. З. Ахмедов, Х. М. Назаров [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. - 2009. - № (135). - С. 63-71.

98. Бободжонова, З. Х. Особенности распределения тяжелых металлов в водных системах Северного Таджикистана и их очистка: Монография / З. Х. Бободжонова, Х. М. Назаров, Х. И. Тиллобоев. – Худжанд: Нури маърифат, 2021. - 120 с.

99. Ёкубова, Д. М. Комплексное изучение физико-химических методов контроля массопереноса тяжелых металлов окружающей среды в пределах

северного Таджикистана: Монография / Д. М. Ёкубова, Д. А. Муротова, Х. И. Тиллобоев. – Худжанд: Нури маърифат, 2023. - 160 с.

100. Тиллобоев, Х. И. Изотопный состав  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в водах реки Сырдарья / Х. И. Тиллобоев, Ф. Х. Очилова, Н. Н. Боисов / V Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы природных и урбанизированных территорий». – Астрахань, Россия, 2012. - С. 160-163.

101. Тиллобоев, Х. И. Химический состав природных вод и экологическое состояние очистных сооружений города Худжанда / Х. И. Тиллобоев // Ученые записки Худжандского государственного университета (ХГУ) им. академика Б. Гафурова. Серия естественные и экономические науки. - 2015. - № 2 (33). - С. 69-72.

102. Назаров, Х. М. Содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях реки Сырдарья (в пределах Северного Таджикистана) / Х. М. Назаров, Х. И. Тиллобоев, В. М. Миряхъев // Ученые записки ХГУ. Серия естественные и экономические науки. - 2019. - № 3 (50). - С. 94-97.

103. Тиллобоев, Х. И. Динамика изменений гидрохимических характеристик Адрасманской водной системы в условиях антропогенной нагрузки / Х. И. Тиллобоев, Р. О. Азизов, Д. А. Муротова // Водные ресурсы энергетика и экология. - Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. - 2021. - Т. 1. - № 4. - С. 89-93.

104. Тиллобоев, Х. И. Исследование физико-химических показателей загрязнения природных вод тяжёлыми металлами в пос. Адрасман / Х. И. Тиллобоев, Р. О. Азизов, Д. А. Муротова // Водные ресурсы энергетика и экология. - Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. - 2022. - Т. 2. - № 1. - С. 111-117.

105. Исследование химического состава и динамики содержания тяжелых металлов в реке Сырдарья / Х. И. Тиллобоев, Н. Бобоназарова, М. Косимова, С. Лакимова // Водные ресурсы энергетика и экология. - Институт

водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. - 2022. - Т. 2. - № 2. - С. 87-94.

106. Тяжелые металлы как фактор загрязнения водной среды в поселке Адрасман северного Таджикистана / Х. И. Тиллобоев, Д. А. Муротова, Р. О. Азизов, С. Қ. Шарифов // Ученые записки ХГУ. Естественные и экономические науки. - 2022. - Т. 62. - № 3. - С. 94-99.

107. Тиллобоев, Х. И. Физико-химические и гидрологические исследования загрязнений природных вод на примере реки Сырдарья / Х. И. Тиллобоев, Д. М. Ёкубова, М. М. Мухидинова // Ученые записки ХГУ. Естественные и экономические науки. - 2022. - Т. 61. - № 2. - С. 68-72.

108. Тиллобоев, Х. И. Радионуклиды и тяжёлые металлы в воде / Х. И. Тиллобоев, Э. А. Эргашева / Международная научно-практическая конференция «Тенденция развития естественных и математических наук». – Новосибирск, Россия, - 2013. - С. 116-121.

109. Тиллобоев, Х. И. Гидрогеологическое обследование загрязнения бассейна реки Сырдарья / Х. И. Тиллобоев, М. И. Сабуров / Республиканская научная конференция «Химия технология и экология воды». – Душанбе, Таджикистан, 2013. - С. 123-124.

110. Тиллобоев, Х. И. Распространение радионуклидов в водной среде / Х. И. Тиллобоев, Ф. Очилова, Н. Боисов / Республиканская научно-практическая конференция «Вода для жизни». – Душанбе, Таджикистан, 2015. - С. 47-49.

111. Тиллобоев, Х. И. Бионакопление изотопов урана в водных объектах северного Таджикистана / Х. И. Тиллобоев, М. Юнусов / XIII Международная научно-практическая конференция «Экология. Радиация. Здоровье». – Семей, 2017. - С. 174-175.

112. Тиллобоев, Х. И. Аспекты изучения и оценка качества вод водохранилища г. Гулистон / Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов / Международный семинар «Управление водными ресурсами и современные технологии очистки воды». – Бустон, Таджикистан, 2018. - С. 123-125.

113. Бободжонова, З. Х. Изучение распространения и миграции радионуклидов в водной среде / З. Х. Бободжонова, Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов // Маводи конференсияи ҷумхурияви илми-назарияви таҳти унвони «Масъалаҳои рушди илм дар мактабҳои оли». – Бустон, Тоҷикистон, 2019. - С. 45-49.

114. Тиллобоев, Х. И. Методика измерения радона в водной среде и рекомендации по уменьшению его концентрации в воде / Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов, З. Х. Бободжонова // Маводи конференсияи байналмилалӣ илми-назариявӣ «Омилҳои гидроиклимӣ истифодаи захираҳои оби Осиёи Марказӣ» бахшида ба 30-солагии Истиқлолияти давлатии ҚТ ва Даҳсолаи байналмилалӣ амал «Об барои рушди устувор, солҳои 2018-2028». – Хучанд, Тоҷикистон, 2019. - С. 371-373.

115. Тиллобоев, Х. И. Подземные воды как индикатор загрязнения водных объектов / Х. И. Тиллобоев / Маводи конференсияи байналмилалӣ илмӣ-назариявӣ таҳти унвони “Омилҳои гидроиклимӣ истифодаи захираҳои оби Осиёи Марказӣ” бахшида ба 30-солагии Истиқлолияти давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Даҳсолаи байналмилалӣ амал “Об барои рушди устувор, солҳои 2018-2028”. – Хучанд, Тоҷикистон, 2019. - С. 375-378.

116. Назаров, Х. М. Использование метода измерения радона в водах Б. Гафуровского района / Х. М. Назаров, Х. И. Тиллобоев, В. М. Миряхъяев // XV Нумановские чтения «Академик И. У. Нуманов и развитие химической науки в Таджикистане». – Душанбе, Тоҷикистон, 2019. - С. 180-181.

117. Исследование содержания радиоактивного радона в природных водах Согдийской области / Х. И. Тиллобоев, В. М. Миряхъяев, З. Х. Бободжонова, Х. М. Назаров // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики». – Душанбе, Тоҷикистон, 2020. – С. 271-274.

118. Исследования загрязнения подземных вод тяжёлыми и радиоактивными элементами в пределах севера Таджикистана / Х. И. Тиллобоев, В. М. Миряхъяев, З. Х. Бободжонова [и др.] // Республиканская

научно-теоретическая конференция «Основы развития и перспективы химической науки в Республике Таджикистан», посвященная 60-летию химического факультета и памяти д.х.н., профессора, академика АН РТ И. У. Нуманова. – Душанбе, Таджикистан, 2020. - С. 80-84.

119. Тиллобоев, Х. И. Эффективность многостадийной очистки воды от некоторых тяжелых металлов / Х. И. Тиллобоев / XVI Нумановские чтения «Академик И. У. Нуманов и развитие химической науки в Таджикистане». – Душанбе, Таджикистан, 2021. - С. 18.

120. Исследование сорбционного процесса очистки урансодержащих шахтных вод от ионов тяжелых металлов с применением АУ<sup>800</sup> / Х. М. Назаров, У. М. Мирсаидов, З. Х. Бободжонова, Х. И. Тиллобоев // I Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений и аспекты их применения». – Душанбе, Таджикистан, 2022. - С. 6-8.

121. Тиллобоев, Х. И. Гидрохимическое исследование р. Сырдарьи в пределах Согдийской области / Х. И. Тиллобоев, Д. М. Ёкубова / Республиканская научно-практическая конференция «Фундаментальная наука – основа совершенствования технологий и материалов». – Душанбе, Таджикистан, 2022. - С. 36-38.

122. Назаров, Х. М. Кинетика сорбционного процесса очистки урансодержащих дренажных вод от ионов тяжелых металлов с применением АУ<sup>400</sup> / Х. М. Назаров, З. Х. Бободжонова, Х. И. Тиллобоев // I Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений и аспекты их применения». – Душанбе, Таджикистан, 2022. - С. 274-278.

123. Тиллобоев, Х. И. Оценка гидрохимического состояния и загрязнения реки Сырдарьи / Х. И. Тиллобоев, Д. М. Ёкубова // Международная научная экологическая конференция, посвященная 100-летию КУБГАУ. – Краснодар, Кубань, 2022. - С. 475-478.

124. Двухстадийная сорбционная очистки урансодержащих шахтных вод месторождения Киик-Тал от некоторых ионов тяжёлых металлов / Х. И. Тиллобоев, У. М. Мирсаидов, З. Х. Бободжонова, Х. М. Назаров / Международная научно-практическая конференция «XII Ломоносовские чтения», посвящённая Дню таджикской науки и 30-летию установления дипломатических отношений между Республикой Таджикистан и Российской Федерацией. Часть естественные науки. – Душанбе, Таджикистан, 2022. - С. 295-299.

125. Опыт исследования качества трансграничных водных ресурсов в Согдийской области / Х. И. Тиллобоев, Х. М. Назаров, Д. М. Ёкубова, Р. А. Джураева / Международная научно-практическая конференция «Химическая, биологическая, радиационная и ядерная безопасность: достижения, проблемы и будущие перспективы». – Душанбе, Таджикистан, 2023. - С. 206-211.

126. Сапожников, Ю. А. Радиоактивность окружающей среды / Ю. А. Сапожников. - М: БИНОМ Лаборатория знаний, 2006.

127. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126 МКРЗ / Под ред. М. В. Жуковского, И. В. Ярмошенко, С. М. Киселева. - М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. – 92 с.

128. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М. Ф. Киселёва и Н. К. Шандалы. - М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

129. Анализ подходов к радиационно-экологическому мониторингу в районах размещения ядерно и радиационно опасных объектов / А. В. Панов, Н. И. Санжарова, В. К. Кузнецов [и др.] // Радиация и риск. – 2019. - Т. 28. - № 3. - С. 75-95.

130. Эрматов, К. А. Водная миграция урана и радона на территории северного Таджикистана: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. А. Эрматов. – Душанбе, 2020.

131. Муминов, С. В. Состояние радиационной безопасности и радоновый мониторинг территории Таджикистана: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Муминов. – Душанбе, 2022.

132. Источники и действие ионизирующего излучения. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Отчёт НКДАР ООН Генеральной Ассамблеи, VI: Источники. - ООН, Нью-Йорк, 2000. – 654 с.

133. Источники и действие ионизирующего излучения. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Отчёт НКДАР ООН 2006 Генеральной Ассамблеи, I: Sources. - UN, NY, 2008. – 392 с.

134. Концентрация радона в воздухе некоторых жилых и рабочих помещений г. Чкаловска и Кайраккума / Б. Д. Бобоев, Н. Хакимов, К. А. Эрматов, Х. М. Назаров // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2013. - Т. 56. - № 8. - С. 639-642.

135. Оценка радоноопасности территории Б. Гафуровского района Республики Таджикистан / К. А. Эрматов, Х. М. Назаров, С. В. Муминов [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2017. - Т. 60. - № 9. - С. 452-455.

136. Радоновый мониторинг на территории Дж. Расуловского района Республики Таджикистан / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. - 2017. - № 1 (166). - С. 88-93.

137. Содержание радона в воздух Спитаменского района Республики Таджикистан / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, К. А. Эрматов [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2018. - Т. 61. - № 3. - С. 293-295.

138. Назаров, Х. М. Оценка радоноопасности территории Дигмайского хвостохранилища / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, К. А. Эрматов // XXI век. Техносферная безопасность. - 2017. - Т. 2. - № 3. - С. 44-48.

139. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Х. М.

Назаров, К. А. Эрматов, С. М. Бахронов [и др.] // Радиационная гигиена. - 2019. - Т. 12. - № 1. - С. 115-121.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных  
ВАК при Президенте Республики Таджикистан*

[1-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Содержание цезия-137 в почвенном покрове Центрального и Южного Таджикистана / С. В. Муминов, Б. Б. Баротов, У. М. Мирсаидов, Ш. Р. Муродов, Дж. А. Саломов, И. Мирсаидзода // Радиационная гигиена. - 2021. – № 2. – С. 66-71.

[2-А]. **Murodov, Sh. R.** [Sh. Murodzoda] Radon EEC in the Southern Region's Preschool and School Institution's Buildings of the Republic of Tajikistan / U. M. Mirsaidov, S. V. Muminov, B. B. Barotov, I. U. Mirsaidov, Sh. R. Murodov // Modern Environmental Science and Engineering (ISSN 2333-2581). – 2021. – V. 7. - № 10. – P.1010-1016.

[3-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Разработка методики радиационного контроля исторических памятников Таджикистана / Ш. Р. Муродов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. — 2021. - № 2 (215). - С. 178-185. - ISSN 2413-4568.

[4-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Проведение радиоэкологического мониторинга на историческом объекте Аджинатеппа в районе Кушониён Таджикистана / Ш. Р. Муродов, Ф. С. Мухидинова, С. С. Рахматшоев, Б. Б. Баротов, И. Мирсаидзода // Доклады НАН Таджикистана. – 2023. – Т. 66. - № 11-12. – С. 685-689.

[5-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Проведение радиационного обследования на историческом объекте «Тахти Сангин» в Кабодиёнском районе Таджикистана / Ш. Р. Муродов, Ф. А. Хамидов, Ф. С. Мухиддинова, С. С. Рахматшоев, М. М. Шокиров, У. М. Мирсаидов, М. А. Гафуров // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава

(научный журнал). Серия естественных наук. - 2023. - № 1(10). - С. 32-35. - ISSN 2412-8270.

[6-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Радиоэкологический мониторинг на некоторых исторических и туристических объектах Таджикистана / И. Мирсаидзода (И. Мирсаидов), Б. Б.Баротов, Ш. Р. Муродов, Ф. С. Мухидинова, У. М. Мирсаидов // Известия НАН Таджикистана. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. - 2024. - № 1 (194). – С. 93-96.

[7-А]. **Муродзода, Ш.** Радионуклиды в почвах Таджикистана / Ш. Муродзода (Ш. Р. Муродов), С. В. Муминов, И. Мирсаидзода (И. У. Мирсаидов), И. Ф.Рахимов // Доклады НАН Таджикистана. – 2025. – Т. 68. - №8. – С. 827-832.

[8-А]. **Муродов, Ш.Р.** Радионуклиды в воздушном бассейне Таджикистана / Ш.Муродзода (Ш.Р. Муродов), С.В.Муминов, И.Мирсаидзода (И.У. Мирсаидов), член-корреспондент НАН Таджикистана И.Ф.Рахимов // Доклады НАН Таджикистана. – 2025. – Т. 68. - № 9-10 – С.956-960

*Публикации в материалах научных конференций:*

[9-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Удельная суммарная активность радионуклидов в воде источников питьевого водоснабжения южных районов Республики Таджикистан / С. В. Муминов, Ш. Р. Муродов, Ф. С. Мухидинова, Б. Б. Баротов, И. У. Мирсаидов // XV Нумановские чтения «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве РТ». – Душанбе, 2019. – С. 153-155.

[10-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Радиологический мониторинг минеральных руд Таджикистана / Ф А. Хамидов, Б. Б. Баротов, Ш. Р. Муродов, И. У. Мирсаидов, Ш. Г. Шосафарова // XV Нумановские чтения. – Душанбе, Институт химии АН РТ, 2019. – С. 169-171.

[11-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Изучение содержания природных радионуклидов в почвах Юго-Западных и Восточных районов

Республики Таджикистан / С. В. Муминов, Б. Б. Баротов, Ш. Р. Муродов, У. М. Мирсаидов // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерная физика», посвящённая 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования. – Душанбе, 2020. – С. 303-306.

[12-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения цезия-137 в различных районах Таджикистана / У. М. Мирсаидов, С. В. Муминов, Б. Б. Баротов, Ш. Р. Муродов // Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века». - Минск, Республика Беларусь, 2021. – Ч. 2. – С. 283-286.

[13-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Особенности распределения цезия-137 в почвах Республики Таджикистан за счёт атмосферных выпадений / У. М. Мирсаидов, С. В. Муминов, С. М. Бахронов, Ш. Р. Муродов, З. Н. Сайфиева // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы радиационной гигиены». - Санкт-Петербург, 2023. – С. 206-210.

[14-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Исследования в области радиоэкологии в Таджикистане / С. В. Муминов, М. М. Хаклодов, С. М. Бахронов, Ш. Р. Муродов, И. Мирсаидзода // XVIII Нумановские чтения «Развитие современной химии и её теоретические и практические аспекты». - Душанбе, 2023. – С. 243-244.

[15-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Распределение цезия-137 в почвенном покрове Таджикистана / М. З. Ахмедов, С. В. Муминов, Х. М. Назаров, Ш. А. Рахимбердиев, Ш. Р. Муродов // XVIII Нумановские чтения «Развитие современной химии и её теоретические и практические аспекты». - Душанбе, 2023. – С. 244-247.

[16-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Содержание радионуклидов в почвах Таджикистана / С. В. Муминов, Ш. Р. Муродов, Ф. З. Шафиев, Ш. Б.

Каримова // Республиканская научно-практическая конференция молодых учёных «Наука глазами молодых учёных», посвящённая объявлению 2024 года «Годом правового образования». – Душанбе, 2024. – С. 396-399.

[17-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Экологическое воздействие изотопа цезия-137 на окружающую среду Таджикистана / С. В. Муминов, М. А. Зоитова, С. М. Бахронов, Ш. Р. Муродов, И. Мирсаидзода // Международная научно-практическая конференция: «Цифровая индустрия и энергетическое развитие глазами учёных и исследователей». – Бохтар, Таджикистан, 2024. – С. 138-142.

[18-А]. **Муродов, Ш. Р.** [Муродзода Ш.] Радиационная ситуация в культурно-историческом комплексе «Крепость Худжанд» г. Худжанда согдийской области Республики Таджикистан / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, Ф. Х. Гаффорова, Ш. Р. Муродов // Международная научно-практическая конференция «Перспективы использования ядерной технологии и проблемы радиационной безопасности в государствах Центральной Азии». – Душанбе, 2025. – С. 117-120.

[19-А]. **Муродзода, Ш. Р.** Радионуклидный мониторинг биосреды Таджикистана / Ш. Муродзода, С. В. Муминов, И. Мирсаидзода, И. Ф. Рахимов // XX Нумановские чтения «Современные этапы развития химических наук: Актуальные вопросы теории и практики». – Душанбе, 2025. – С.22-25.

[20-А]. **Муродзода, Ш. Р.** Оценка распределение цезия-137 в почвах северного, центрального и южного Таджикистана / С.В. Муминов, М.З Ахмедов, Ш. Р. Муродзода, И. Ф. Рахимов // Сборник материалов научно-практической конференции «Оценка воздействия урановых хвостохранилищ на окружающую среду», посвящённой 80-летию памяти Нумонджона Хакимова 18-19 сентября 2025г. – С. 51-55.

[21-А]. **Муродзода, Ш. Р.** Химический состав воды реки сырдарьи в зонах разного функционального использования (в пределах северного Таджикистана) / Ф.Х. Гаффорова, , Ш. Р. Муродзода, И. Ф. Рахимов, Ф.З.

Шафиев // сборник материалов научно-практической конференции «Оценка воздействия урановых хвостохранилищ на окружающую среду», посвящённой 80-летию памяти Нумонджона Хакимова 18-19 сентября 2025г. – С. 65-70.

***Патенты и изобретения:***

[22-А].Малый патент Республики Таджикистан № ТТ 1222. Сухая отделочная строительная смесь / И. Мирсаидзода, Д. И. Мирзоев, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов, **Ш. Р. Муродов**, Ф. А. Хамидов, У. Мирсаидов. - 21.10.2020.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

ҶУМҲУРИИ  
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ  
ПАТЕНТӢ

## ШАҲОДАТНОМА

Шахрванд Муродов Ш.Р.

муаллифи иختирои *Смектан сохтмони пардозни хушк (вариантҳо)*

Ба иختироъ  
нахустпатенти № Т.1 1222 дода шудааст.

Дорандаи  
нахустпатент Агентии амнияти ядрои ва радиационии Академияи  
миллии илмҳои Тоҷикистон

Сарзамини Ҷумҳурии Тоҷикистон

Ҳаммуаллиф(он) Мирсаидзода И., Мирзоев Д.И., Назаров Х.М.,  
Баротов Б.Б., Ҳамидов Ф.А., Мирсаидов У.

Давалияти иختироъ 21.10.2020

Таърихи рузи пешниҳоди ариза 21.10.2020

Аризаи № 2001474

Дар Феҳристи давлатии иختироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

20 декабри с. 2021 ба ҳайди тирифта шуд

Нахустпатент  
этибор дорад аз 21 октябри с. 2020 то 21 октябри с.2030

Ин шаҳодатнома хангоми амали гардонидани ҳукуку  
имтнбӯҳое, ки барои муаллифони иختироот бо конуногузории  
ҷори муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад

ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.