

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с данными биофизических измерений</b>

УДК: 539.163:550.424:577.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ03	Романенко Екатерина Викторовна	<i>P. Romanenko</i>	

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	В.С. Яковлева	Д.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Т.Б.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная физика и технологии	О.Ю. Долматов	К.Т.Н.		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Универсальные компетенции</i></b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<b><i>Общепрофессиональные компетенции</i></b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач.
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы.
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ.
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
ПК(У)-1	Способность к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий.
ПК(У)-2	Готовность применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий.
ПК(У)-3	Готовность разрабатывать практические рекомендации по использованию результатов научных исследований.
ПК(У)-4	Способность оценивать риск и определять меры безопасности для новых установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения.
ПК(У)-5	Способность к анализу технических и расчетно-теоретических разработок, к учету их соответствия требованиям законов РФ в области ядерной и радиационной безопасности, атомной энергии.
ПК(У)-6	Способность объективно оценить предлагаемое решение или проект по отношению к современному мировому уровню, подготовить экспертное заключение.

ПК(У)-7	Способность формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании.
ПК(У)-8	Готовность применять методы оптимизации, анализа вариантов, поиска решения многокритериальных задач, учета неопределенностей при проектировании.
ПК(У)-9	Способность решать задачи в области развития науки, техники и технологии с учетом нормативного правового регулирования в сфере интеллектуальной собственности.
ПК(У)-10	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО).
ПК(У)-11	Способность к проектированию и экономическому обоснованию инновационного бизнеса, содержания, структуры и порядка разработки бизнес-плана.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Долматов О.Ю.  
 (Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM03	Романенко Екатерина Викторовна

Тема работы:

<b>Сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с данными биофизических измерений</b>	
Утверждена приказом директора	от 28.02.2020 №59-102/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	16.06.2022
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	– Литературные источники; – Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{239+240}\text{Pu}$ в почве; – Удельная активность образцов урины.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	– Обзор литературных источников по теме исследования; – выбор объекта исследования; – оценка концентраций основных дозообразующих радионуклидов в почве объекта; – выбор когорты исследуемого населения; – оценка поступления радионуклидов в организм человека с сельскохозяйственной продукцией;

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– расчет функций выведения радионуклидов при хроническом пероральном поступлении;</li> <li>– анализ данных по измерению образцов урины исследуемой когорты;</li> <li>– расчет и сравнение ожидаемого модельного и фактического содержания радионуклидов в образцах урины, а также их ожидаемого и фактического годового поступления.</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация доклада

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент ОСГН ШБИП, к.э.н. Якимова Т.Б.
Социальная ответственность	доцент ОЯТЦ ИЯТШ, к.т.н. Передерин Ю.В.
Иностранный язык	ст. преп. ОИЯ ШБИП Утятина Я.В.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

1 Литературный обзор по теме исследования
2 Объекты исследования
3 Оценка поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания
4 Описание биокинетической модели желудочно-кишечного тракта
5 Расчет функций выведения радионуклидов с уриной при пероральном пути поступления
6 Расчет содержания радионуклидов в суточных образцах урины членов исследуемой когорты при пероральном поступлении
7 Сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
9 Социальная ответственность
Приложение А
Приложение Б
Приложение В

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	В.С. Яковлева	Д.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ03	Романенко Екатерина Викторовна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM03	Романенко Екатерине Викторовне

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	При проведении исследований используется материально-техническая база ИРБЭ НЯЦ РК, в исследовании задействованы 2 человека: руководитель и исполнитель. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ и ИРБЭ НЯЦ РК.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды составляют 30 %, накладные расходы составляют 15 %.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Анализ потенциальных потребителей результатов исследования, конкурентных технических решений, проведение SWOT-анализа.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Определение целей и результатов проекта, организационной структуры проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Формирование плана и графика проекта: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ. Формирование бюджета затрат проекта.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

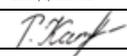
1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	24.02.22
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Т. Б. Якимова	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM03	Е.В. Романенко		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0АМ03	Романенко Екатерине Викторовне

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ЯТЦ</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

<b>СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА С РЕЗУЛЬТАТАМИ БИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Проведение моделирования перорального поступления радионуклидов в организм человека и сравнение полученных результатов с результатами спектрометрического анализа образцов урины с целью валидации существующих биокинетических моделей.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197; ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ.</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы</li> <li>– ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы.</li> <li>– СП 112.13330. Пожарная безопасность зданий и сооружений</li> <li>– ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</li> <li>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– превышение уровня шума;</li> <li>– вентиляция;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитного излучения;</li> <li>– психофизиологические нагрузки;</li> <li>– поражение электрическим током.</li> </ul>
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– падение с высоты собственного роста;</li> <li>– удар электрическим током;</li> <li>– пожар.</li> <li>– анализ типичной ЧС - пожар на рабочем месте;</li> </ul>

	– превентивные меры и порядок действий при возникновении ЧС.
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ03	Романенко Екатерина Викторовна		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла  
 Период выполнения (весенний семестр 2021 /2022 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	<i>Выдача задания.</i>	
	<i>Оценка концентраций основных дозообразующих радионуклидов в почве исследуемого объекта.</i>	
	<i>Расчет функций выведения радионуклидов при хроническом пероральном поступлении и анализ данных по измерению образцов урины исследуемой когорты.</i>	
	<i>Расчет и сравнение ожидаемого модельного и фактического содержания радионуклидов в образцах урины, а также их ожидаемого и фактического годового поступления.</i>	
08.06.2020	<i>Сдача работы.</i>	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	В.С. Яковлева	д.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	О.Ю. Долматов	к.ф.-м.н		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 125 с., 13 рис., 33 табл., 55 источников, 4 прил.

Ключевые слова: техногенные радионуклиды; СИП; испытание; поступление; коэффициенты перехода; биокинетическая модель; растениеводческая продукция; животноводческая продукция; выведение радионуклидов; финансовый менеджмент; социальная ответственность.

Цель работы – сравнить результаты моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений.

В процессе исследования проводились модельные расчеты ожидаемого поступления радионуклидов в организм с растительными и животными продуктами сельского хозяйства; получены значения функций выведения при длительном пероральном поступлении; обработаны результаты спектрометрических анализов образцов урины исследуемой когорты, проживающей на загрязненных территориях; проведено сравнение полученных модельных результатов с реальными данными.

В результате работы выявлено, что при применении методики расчета дозы внутреннего облучения населения, обусловленного приемом загрязненной пищи, необходимо учитывать вероятность занижения результатов определения дозы при использовании моделей  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . Моделирование поступления  $^{90}\text{Sr}$  показывает совпадение с экспериментальными результатами измерения образцов урины. Модель  $^{137}\text{Cs}$  позволяет получить только сравнимые порядки экспериментальных и расчетных значений.

Таким образом, данные исследований по улучшению оценки внутренней дозы и тестированию биокинетических моделей вносят неоценимый вклад в уточнение параметров моделей и в увеличение надежности оценки прогнозов дозовой нагрузки.

## **Перечень определений**

СИП – Семипалатинский испытательный полигон;

МКРЗ – Международная комиссия по радиологической защите;

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;

ИРБЭ НЯЦ РК – Институт радиационной безопасности и экологии  
Национального ядерного центра Республики Казахстан;

СИЧ – счетчик излучения человека;

КРС – крупный рогатый скот;

ЖКТ – желудочно-кишечный тракт.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	15
1 Литературный обзор по теме исследования.....	18
2 Объекты исследования .....	21
2.1 Выбор объекта .....	21
2.2 Радиоэкологическая обстановка в населенном пункте .....	23
2.2 Выбор когорты .....	28
3 Оценка поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания .....	30
3.1 Сценарий поступления.....	30
3.2 Оценка уровня загрязненности растениеводческой продукции .....	30
3.3 Оценка уровня загрязненности животноводческой продукции.....	33
4 Описание биокинетической модели желудочно-кишечного тракта.....	39
5 Расчет функций выведения радионуклидов с уриной при пероральном пути поступления .....	41
5.1 Расчет функции выведения $^{241}\text{Am}$ .....	41
5.2 Расчет функции выведения $^{239+240}\text{Pu}$ .....	43
5.3 Расчет функции выведения $^{90}\text{Sr}$ .....	45
5.4 Расчет функции выведения $^{137}\text{Cs}$ .....	47
6 Расчет содержания радионуклидов в суточных образцах урины членов исследуемой когорты при пероральном поступлении. ....	49
6.1 Отбор и анализ образцов урины .....	49
6.2 Обработка результатов измерений .....	50
6.3 Результаты анализа содержания радионуклидов.....	54
7 Сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений .....	55
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 57	
8.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ .....	57
8.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	57

8.1.2	SWOT-анализ .....	59
8.2	Разработка устава научно-технического проекта.....	62
8.3.	Планирование процесса управления научно-исследовательской работы	64
8.3.1	Структура работ в рамках научного исследования .....	64
8.3.2	Бюджет научного исследования .....	66
8.3.2.1	Расчёт материальных затрат .....	67
8.3.2.2	Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ) .....	68
8.3.2.3	Основная заработная плата исполнителей темы .....	68
8.3.2.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	70
8.3.2.5	Отчисления во внебюджетные фонды .....	71
8.3.2.6	Накладные расходы.....	71
8.3.2.7	Формирование бюджета затрат исследовательской работы.....	72
8.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	73
	Выводы по разделу.....	75
9.	Социальная ответственность .....	76
9.1.	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	77
9.1.1.	Правовые нормы трудового законодательства .....	77
9.1.2.	Организационно-технические мероприятия .....	78
9.2.	Производственная безопасность.....	79
9.2.1.	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	79
9.2.1.1	Микроклимат .....	80
9.2.1.2	Шум и вибрация .....	82
9.2.1.3	Освещение.....	82
9.2.1.4	Электромагнитное излучение .....	84
9.2.1.5	Поражение электрическим током.....	85
9.2.1.6	Психофизиологические нагрузки .....	87

9.2.2 Пожаровзрывобезопасность.....	88
9.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	89
9.3.1. Анализ вероятных ЧС и АС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	89
Выводы по разделу.....	93
Заключение .....	94
Список публикаций студента.....	96
Список использованных источников .....	97
Приложение А .....	103
Приложение Б .....	106
Приложение В.....	109
Приложение Г .....	110

## Введение

Население, живущее на территориях, загрязненных долгоживущими радионуклидами, обычно подвергается облучению через множество путей. Составляющие части доз внутреннего облучения (ингаляционное и пероральное поступление) зависят от изотопного состава, физической и химической формы радионуклидов, от условий окружающей среды и от привычек населения.

Дозы внутреннего облучения критической группы населения в условиях облучения, обусловленного приемом загрязненной пищи и/или питьевой воды, определяются на основе данных мониторинга почвы (или воды) с применением простой расчетной модели [5]. В модели учитывается происхождение и норма потребления конкретных пищевых продуктов, коэффициенты переноса радионуклидов из почвы или воды в растения или животных. Существует ряд методических указаний, в которых расчет поступления радионуклидов в организм человека осуществляется с использованием моделей перехода радионуклидов в почву и в воздух [6, 7, 8].

Как правило, вышеуказанные параметры в рекомендациях по оценке доз табулируются однозначно. Однако ясно, что фактически, данные величины могут существенно изменяться. Например, коэффициенты перехода в растениеводческую и животноводческую продукцию зависят от большого количества факторов: типа почв, форм нахождения радионуклидов, климатических условий, и минерального состава пресной воды. При расчете нормы потребления продуктов большое значение имеют территория проживания, пол, возраст и пищевые привычки человека. Зачастую данные параметры неизвестны, и при оценке дозовых нагрузок используют рекомендованные МКРЗ значения или используют консервативный подход. Как следствие, поступление радионуклидов в организм населения может либо недооцениваться, либо переоцениваться. Согласно публикации МАГАТЭ, «самым надежным методом валидации модели перорального поступления

является сравнение ее прогнозов с оценками дозы внутреннего облучения на основе данных индивидуальных измерений содержания радионуклидов в теле человека, выполняемых посредством счета радиоактивности всего тела или анализа концентраций радионуклидов в выделениях» [9].

Накоплено множество данных по оценке внутренней дозы облучения и поведения радионуклидов в теле человека. Но этот опыт базируется в основном на экспериментальных исследованиях животных и модельных данных. Количество же наблюдений над человеком, в сравнительном масштабе с общим объемом данных по этой теме, является незначительным в силу ограниченности опыта по значительным уровням воздействия излучения на организм.

С 2010 года Институтом радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК проводится комплекс радиоэкологических исследований территории Семипалатинского испытательного ядерного полигона (СИП) [10]. Эти исследования также включают в себя оценку дозовых нагрузок населения, проживающего и ведущего сельскохозяйственную деятельность на территории, подверженной влиянию СИП. Накоплен уже достаточно большой массив данных по содержанию основных дозообразующих радионуклидов в теле человека и в различных биосубстратах (в частности, в моче). Имеется множество результатов исследований почвенного покрова, воздушной среды, водной; содержания радионуклидов в растениях, сельскохозяйственной и животноводческой продукции, производимой на загрязненных территориях.

Таким образом, актуальность данной работы заключается в том, что представляется возможность проведения сравнительного анализа моделирования поступления техногенных радионуклидов в организм человека, с имеющимися реальными данными по наблюдению над человеком.

В соответствии с этим цель научно-исследовательской работы – сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений.

В работе предусмотрено моделирование процессов перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию, расчет годового поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания, а также поставлены следующие задачи:

- обзор литературы по теме исследования;
- выбор объекта исследования;
- оценка концентраций основных дозообразующих радионуклидов в почве объекта;
- выбор когорты исследуемого населения;
- оценка поступления радионуклидов в организм человека с сельскохозяйственной продукцией;
- расчет значений функций выведения радионуклидов с уриной при пероральном поступлении в течение года;
- анализ данных по измерению образцов урины исследуемой когорты;
- расчет и сравнение ожидаемого модельного и фактического содержания радионуклидов в образцах урины, а также их ожидаемого и фактического годового поступления.

Научная новизна работы заключается во впервые экспериментально исследованной цепочке «почва – продукты питания – человек» для  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ , а также сравнения прогноза годового поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с экспериментальными данными по содержанию данных радионуклидов в урине.

Практическая значимость полученных данных заключается в том, что при применении методики расчета дозы внутреннего облучения населения, обусловленного приемом загрязненной пищи, необходимо учитывать вероятность занижения результатов определения дозы при использовании моделей  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . Таким образом, данные исследования вносят вклад в уточнение параметров биокинетических моделей и в увеличение надежности оценки прогнозов дозовой нагрузки.

## 1 Литературный обзор по теме исследования

Мировое научное сообщество накопило уже множество данных по оценке внутренней дозы облучения и поведения радионуклидов в теле человека. Но, как уже было выше сказано, этот опыт базируется в основном на экспериментальных исследованиях животных и модельных данных. Количество же наблюдений над человеком, в сравнительном масштабе с общим объемом данных по этой теме, является незначительным в силу ограниченности опыта по значительным уровням воздействия излучения на организм.

Так, например, в работе «Валидация модели ICRP потребления цезия кормящими матерями по итальянским данным после чернобыльских выпадений» [11] проведена исследовательская программа по переходу  $^{137}\text{Cs}$  в материнское молоко. Оценивалось поступление цезия с пищей в организм матери и его переход в грудное молоко, также определялись концентрации его активности в моче и плаценте. Было получено хорошее согласование между измеренными данными и моделированием активности цезия в молоке.

Данные по переходу трансураниевых радионуклидов (Pu, Am) и  $^3\text{H}$  в животноводческую и птицеводческую продукцию для последующей оценки внутреннего облучения человека практически отсутствуют [9]. В работе [12] экспериментально изучены вышеназванные коэффициенты перехода в органы и ткани овец в условиях радиоактивного загрязнения СИП.

В статье Р.М. Алексахина «Чернобыльское распределение радионуклидов, миграция, защита окружающей среды и воздействие на сельское хозяйство» [13] говорится о потреблении сельскохозяйственных продуктов, содержащих радионуклиды, как об источнике облучения населения. В долгосрочном послеаварийном периоде рассматривается распределение радионуклидов между компонентами экосистем (включая людей) и дозами по сравнению с ситуацией технологически нормальной эксплуатации атомных электростанций.

В совместной работе германских и финских ученых «Сравнение между моделированием и *in vivo* измерениях естественных радионуклидов в теле человека для подтверждения биокинетической модели и для реконструкции радиационного облучения» [14] проведен эксперимент по определению концентрации природного урана в образцах мочи финской семьи из пяти человек, проживающей в Южной Финляндии, коренные породы которой содержат большое количество природного урана. Собрана информация об использовании колодезной воды, о ежедневном потреблении напитков и диетических привычках. Для определения урана в моче членов этой семьи применялся метод индуктивно связанной масс-спектрометрии (ICP-MS). Для оценки распределения, удержания и экскреции урана использовалась биокинетическая модель МКРЗ с учетом возраста исследуемого человека. Посредством сравнения измеренных и вычисленных данных биокинетическая модель может быть проверена и улучшена.

В исследовательской работе [15] для проверки и валидации биокинетической модели стронция было измерено его содержание в образцах костей жителей района, загрязненного в результате аварии Чернобыльской АЭС. Также были взяты ранее не опубликованные данные по измерениям на СИЧ и образцов костной ткани населения, проживающего в районе реки Теча, Уральского научно-практического центра радиационной медицины, и проведена реконструкция поступления стронция по цепочке «выпадения – почва – молоко (и другие продукты питания) – человек».

В работе индийских исследователей «Исследования фактора переноса из почвы в траву и коэффициента переноса из травы в молоко для цезия в регионе Кайга» [16] экспериментальным путем были определены коэффициенты перехода цезия и рассчитано его внутреннее поступление для взрослых и детей с учетом их диетических привычек.

В статье [17], рассчитаны значения коэффициентов перехода щелочных металлов и редкоземельных элементов из почвы через продукты питания в

критические органы и весь организм в целом. Основанием для поставленной задачи послужили результаты исследований потребления пищевых продуктов, измеренное содержание радионуклидов в органах и тканях взрослых мужчин и их концентрация в почве.

В статье «Исследование факторов переноса естественных радионуклидов: перенос радионуклидов из почвы в различные сорта риса в г. Горган, Иран» [18] изучены образцы риса, почвы и воды, отобранные из четырех деревень вокруг г. Горган. В образцах на гамма-спектрометре измерена удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  и определены коэффициенты переноса из почвы в рис. Результат расчетов показал, что вклад поступления радионуклидов с рисом в организм человека находится в пределах допустимой нормы.

Таким образом, мы видим, что в мировом сообществе ведутся экспериментальные работы по улучшению оценки внутренней дозы и тестированию биокинетических моделей, и данные этих исследований вносят неоценимый вклад в уточнение параметров моделей и в увеличение надежности оценки прогнозов дозовой нагрузки.

## **2 Объекты исследования**

### **2.1 Выбор объекта**

По результатам анализа литературных данных о проведении ядерных испытаний на Семипалатинском ядерном полигоне видно, что из всех испытаний лишь от 6 следы радиоактивных выпадений выходят далеко за пределы полигона и проходят непосредственно вблизи населенных пунктов.

Как видно из карты на рисунке 1, следы радиоактивных выпадений проходят через районы таких поселков как Бодене, Долонь и Саржал. Загрязнение территории с. Бодене и его прилегающей территории могло возникнуть в результате испытания прототипа термоядерного заряда, проведенного 22.11.1955 г. мощностью ~1,6 Мт. Также в непосредственной близости от села проходят следы от испытаний 29.07.1955 г. (мощность ~1,3 кт) и 07.08.1962 г. (мощность ~9,9 кт), которые могли как оказать, так и не оказать воздействие на данную территорию. На загрязнение села Долонь оказал влияние след от воздушного испытания 17.01.1958 г. (мощность ~0,5 кт). Вблизи территории села Саржал проходит след от самого мощного наземного ядерного взрыва на полигоне 12.08.1953 г. (мощность ~400 кт).

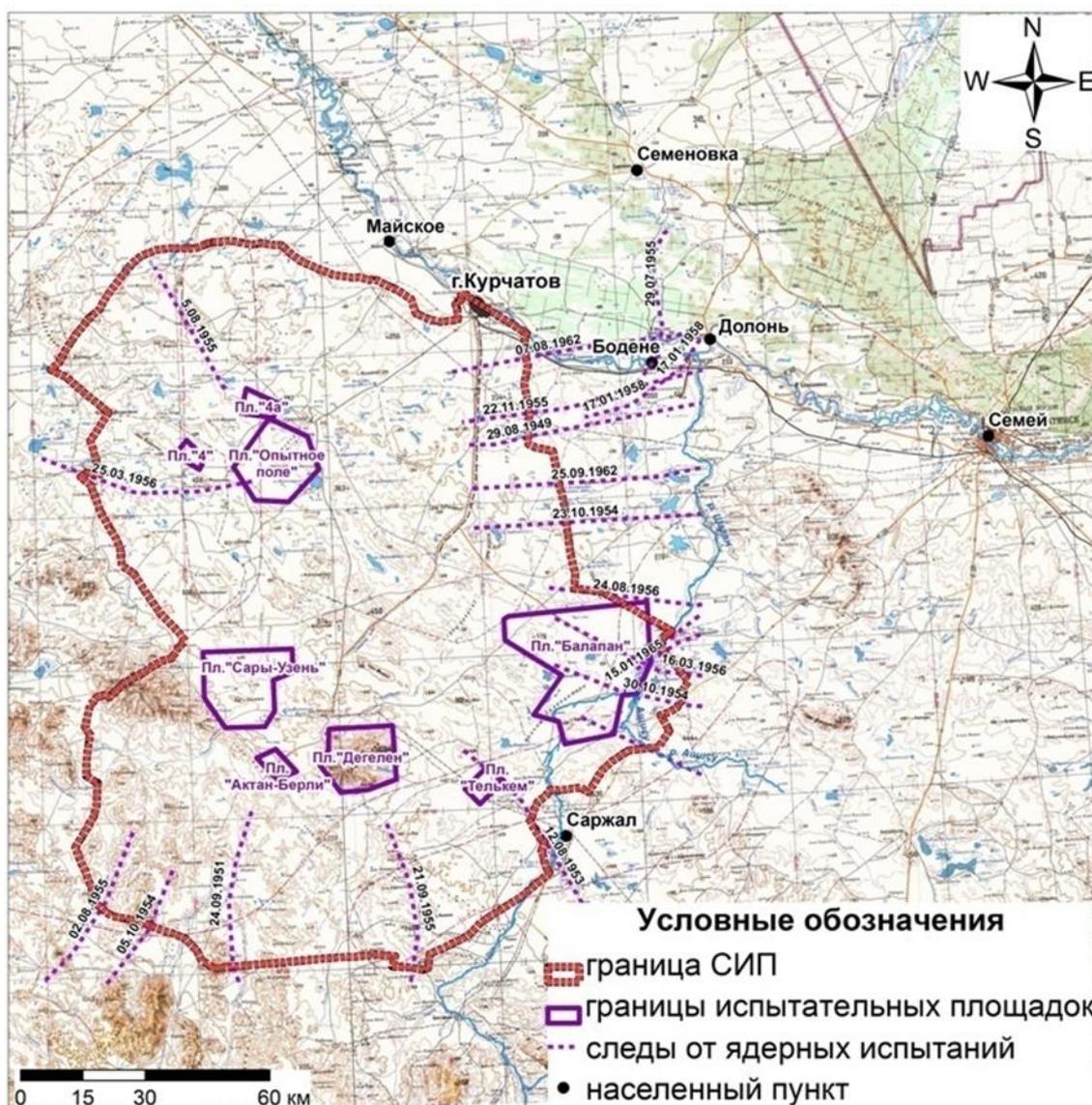


Рисунок 1 – Следы радиоактивных выпадений, выходящие за пределы СИП

На основании литературных данных в качестве объекта исследования выбрано село Бодене. Выбор в пользу данного населенного пункта обоснован относительной близостью его к площадке «Опытное поле» (по сравнению с с. Саржал), и достаточно большим накопленным массивом данных по радиозоологической обстановке в его районе (по сравнению с с. Долонь).

Территория сельского округа занимает 15351 га, включая территорию села – 500 га. Территория сенокоса составляет 28 га, пастбищ – 36880 га.

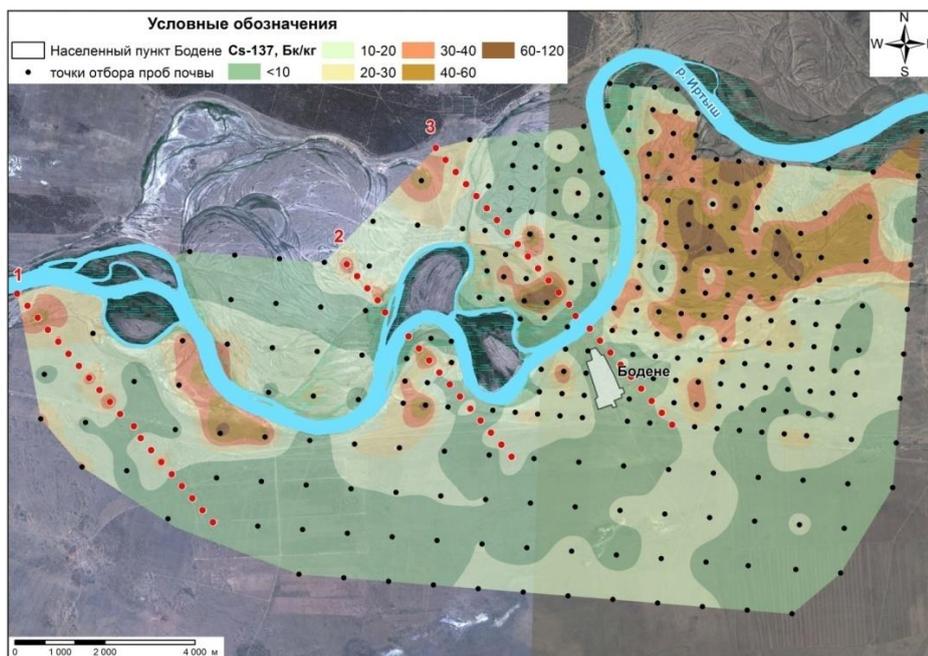
Основное загрязнение территории с. Бодене и прилегающей территории могло возникнуть в результате испытания, проведенного 29.08.1949 г. (мощность ~22 кт). Ось следа прошла на расстоянии 3 км от северной окраины с. Бодене.

## **2.2 Радиоэкологическая обстановка в населенном пункте**

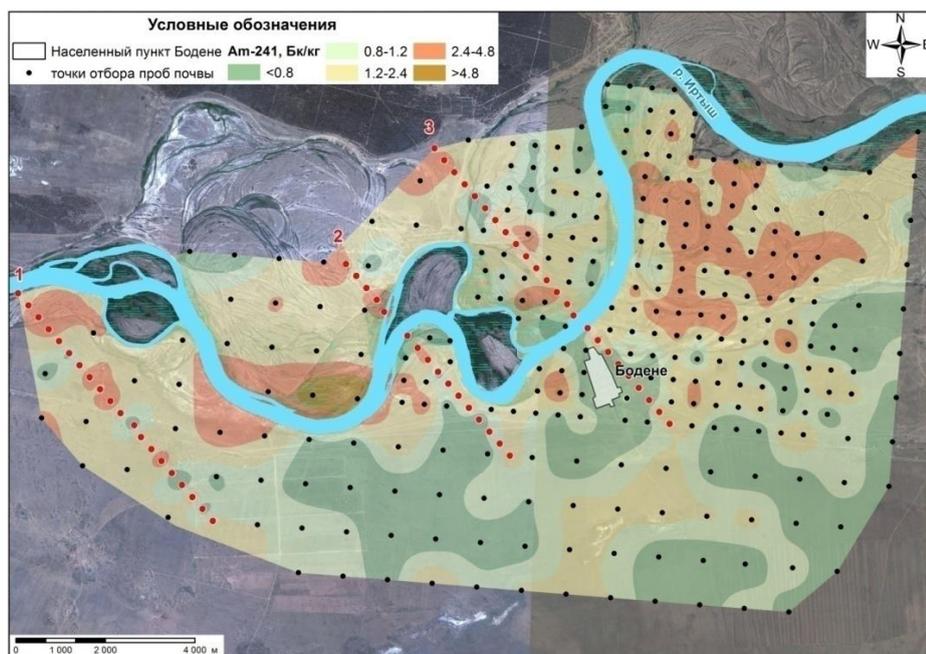
Отбор проб на территории с. Бодене производился точно, с площади от 200 до 500 см<sup>2</sup> на глубине 5 см, так как максимальная концентрация радионуклидов приходится на слой 0 – 5 см и убывает до минимальных значений уже на 20 см слое почвы [19]. В каждой точке пробоотбора проводилось определение географических координат и измерение МЭД и плотности потока бета-частиц. Всего было отобрано 396 поверхностных проб почвы.

Анализы по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений проводились в соответствии со стандартизованными методическими указаниями на поверенной лабораторной аппаратуре [20, 21, 22]. Определение удельной активности радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am в почве проводилось на гамма-спектрометрах с полупроводниковым детектором производства фирмы Canberra. Определение удельной активности <sup>90</sup>Sr и <sup>239+240</sup>Pu проводилось на жидкостном сцинтилляционном спектрометре Tri-Carb 2910TR (Perkin Elmer) и альфа-спектромере Alpha Analyst (Canberra) соответственно.

По результатам исследований построены карты площадного распределения <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am (Рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Содержание  $^{137}\text{Cs}$  (а) и  $^{241}\text{Am}$  (б) в почве территории села Бодене

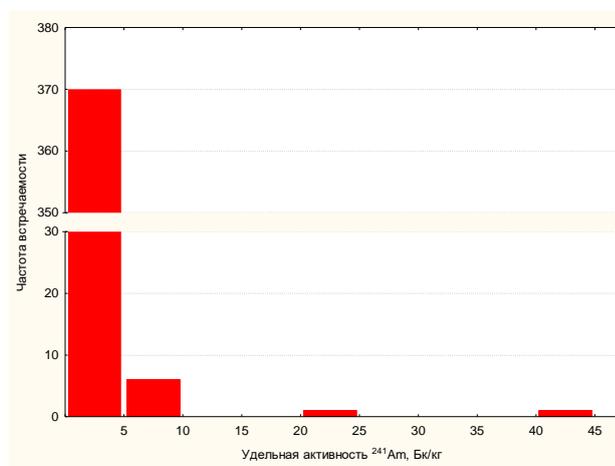
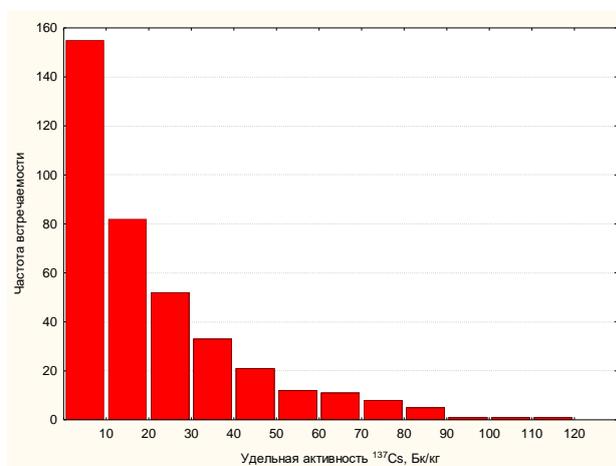
Оценка средней для исследуемой территории концентрации радионуклидов несколько проблематична, что обусловлено тем, что в большом количестве образцов концентрации радионуклидов (в частности  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,

$^{239+240}\text{Pu}$ ) находились на уровне предела обнаружения (минимально детектируемой активности) используемых методик и аппаратуры. Полное исключение этих результатов привело бы к завышенной оценке удельной активности. Поэтому при оценке средней концентрации значения концентрации радионуклидов в таких случаях принимались равными пределу обнаружения. Диапазоны значений удельной активности радионуклидов в почве на территории с. Бодене указаны в таблице 1.

Таблица 1 - Диапазоны значений удельной активности в почвах территории с. Бодене

Параметр	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Диапазон удельной активности, Бк/кг	от < 0,5 до 440	от < 0,7 до 6,7	от < 0,07 до 89	от < 0,2 до 44

На рисунке 3 показано распределение значений удельной активности данных радионуклидов в почве.



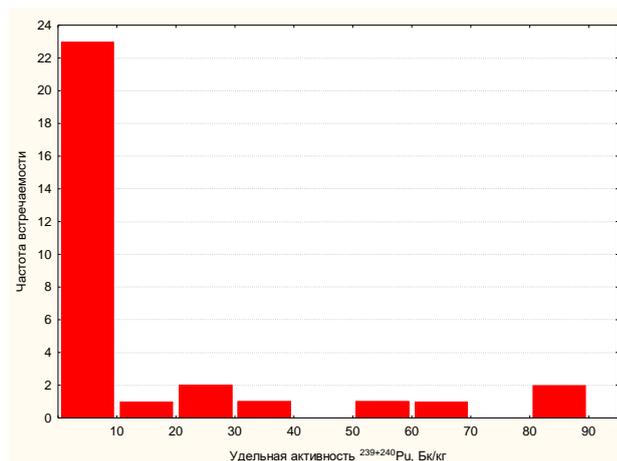
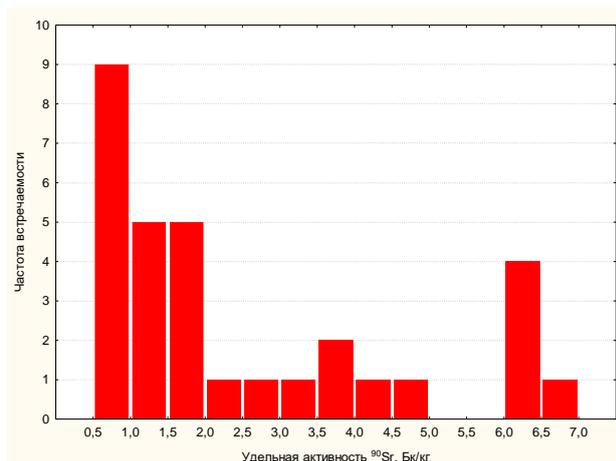
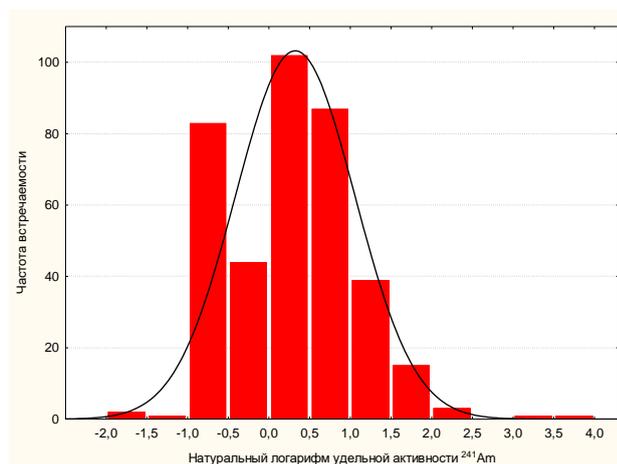
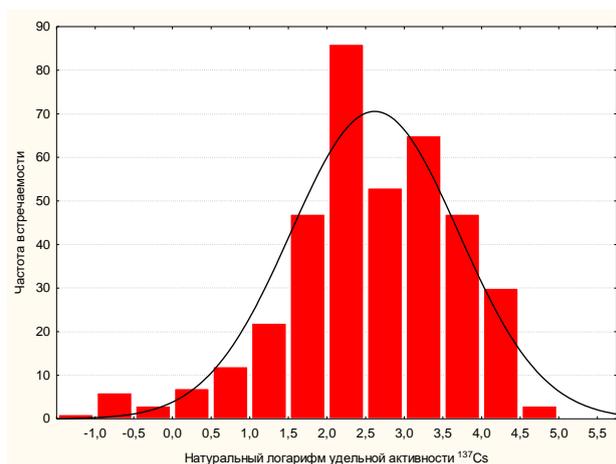


Рисунок 3 – Распределение удельной активности по частоте встречаемости для  $^{137}\text{Cs}$  (слева сверху),  $^{241}\text{Am}$  (справа сверху),  $^{90}\text{Sr}$  (слева снизу) и  $^{239+240}\text{Pu}$  (справа снизу)

На гистограммах распределения удельной активности цезия, америция и плутония по частоте встречаемости имеет характер распределения близкий к логнормальному распределению. Для доказательства логнормального распределения были взяты величины натурального логарифма от удельной активности радионуклидов и построены аналогичные распределения. Полученные распределения представлены на рисунке 4.



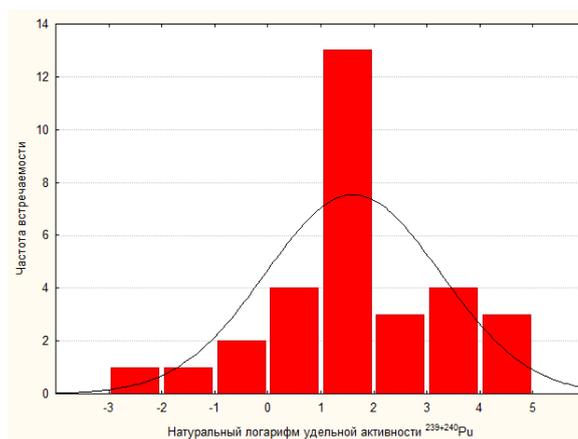


Рисунок 4 – Распределение натуральных логарифмов удельной активности по частоте встречаемости для  $^{137}\text{Cs}$  (слева),  $^{241}\text{Am}$  (справа) и  $^{239+240}\text{Pu}$  (снизу)

Все гистограммы распределения имеют куполообразный вид нормального распределения. Для доказательства нормальности распределения использован метод Колмогорова-Смирнова, основанный на сравнении эмпирического и теоретического распределений [23]. Согласно проведенным расчетам, данные распределения можно считать нормальными. Тогда, исходные распределения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  являются логнормальными.

В случае логнормального распределения в качестве среднего значения рекомендуется брать среднегеометрическое значение. Таким образом, для цезия, америция и плутония в дальнейшем целесообразно руководствоваться среднегеометрическими значениями удельной активности. В случае же стронция используется значение медианы, поскольку характер его распределения не попадал ни под нормальный, ни под логнормальный законы.

Предполагая, что радиоактивное загрязнение распределено по площади исследуемой территории равномерно, получим усредненные концентрации радионуклидов в поверхностном (0-5 см) слое почвы (Таблица 2).

Таблица 2 - Среднегеометрические и медианное значения радионуклидов в почве на территории села Бодене

Среднегеометрические и медианные значения удельной активности радионуклидов в почве на слой 0-5 см, Бк/кг			
$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
13	1,8	4,9	1,4

Данные значения удельных активностей будут являться исходными для расчета внутреннего поступления радионуклидов в организм человека.

## 2.2 Выбор когорты

Для выбора конкретных лиц для участия в исследованиях было проведено анкетирование. Анкетирование проводили сотрудники Института с выездом в населенный пункт, где проводился опрос. Определяющим критерием выбора участников исследования было постоянное проживание в выбранных населенных пунктах.

Всего в исследовании принял участие 71 человек.

На рисунке 5 представлено распределение числа участников исследования по возрасту (слева) и распределение участников исследования по полу (справа).

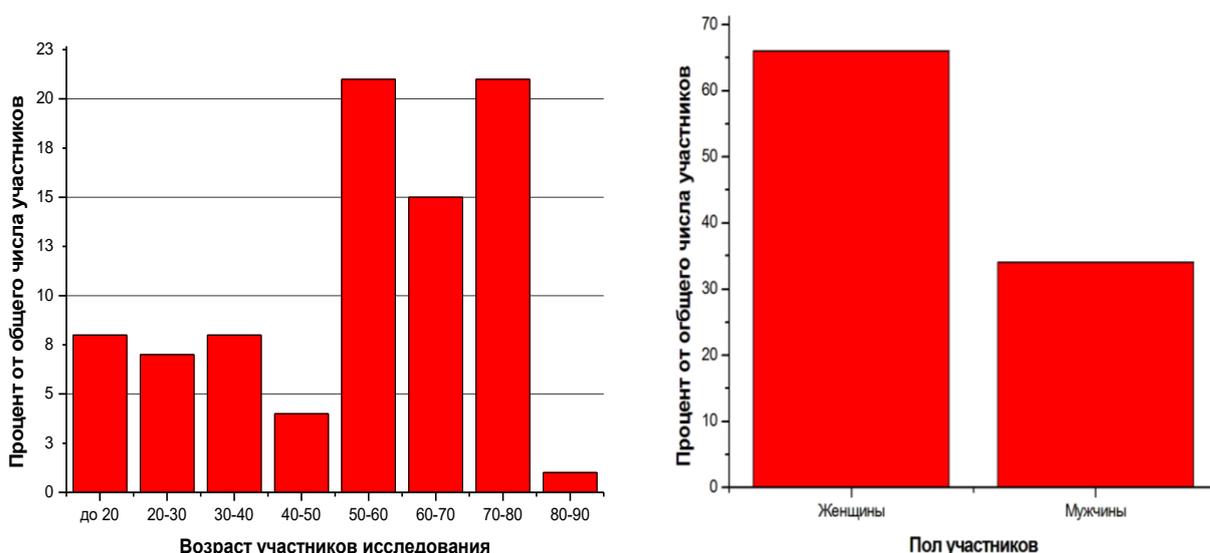


Рисунок 5 – Распределение участников исследования по возрасту(слева).

Распределение участников исследования по полу (справа)

Большая часть участников исследования является людьми пенсионного возраста, что обусловлено тем, что данная категория населения проживает наибольший период времени в выбранном населенном пункте. Минимальный возраст участников исследования – 15 лет. В дальнейшем оценка внутреннего поступления радионуклидов будет рассматриваться для взрослых мужчин и женщин старше 17 лет, что составляет 92% от общего количества участников исследования.

### **3 Оценка поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания**

#### **3.1 Сценарий поступления**

В качестве сценария внутреннего поступления радионуклидов предполагается, что человек живет и ведет хозяйственную деятельность на территории с. Бодене, потребляет сельскохозяйственные продукты, произведенные и выращенные там же. Такой сценарий условно назван "фермер, ведущий натуральное хозяйство" [24]. Поступление радионуклидов от привозных продуктов питания не учитывается. Также не учитывается поступление от потребления населением воды из местных источников, так как уровни удельной активности искусственных радионуклидов в воде находятся ниже пределов обнаружения используемой аппаратуры и составляют:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr} < 0,02$  Бк/кг,  $^{239+240}\text{Pu} < 0,001$  Бк/кг, что на 1 – 3 порядка ниже уровней вмешательства для питьевой воды, согласно ГН СЭТОРБ [25].

#### **3.2 Оценка уровня загрязненности растениеводческой продукции**

Для оценки уровней загрязненности сельскохозяйственной продукции растительного происхождения необходимо учитывать данные по концентрации радионуклидов в почве исследуемой территории и коэффициенты перехода ( $K_n$ ) радионуклидов в различные виды растениеводческой продукции:

$$K_n = \frac{C_{\text{раст.}}}{C_{\text{почва}}}, \quad (1)$$

где  $K_n$  – коэффициент перехода;

$C_{\text{раст.}}$  – концентрация радионуклидов в растении (Бк/кг);

$C_{\text{почва}}$  – концентрация радионуклидов в почве.

В 2009 г. МАГАТЭ опубликованы материалы "Количественные параметры переноса радионуклидов в наземной и пресноводной окружающей

среде для радиологической оценки", в которых приведены  $K_{\text{п}}$  радионуклидов в растениеводческую продукцию (Таблица 3).

Таблица 3 -  $K_{\text{п}}$   $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  в растениеводческую продукцию по данным МАГАТЭ

Вид продукции	$K_{\text{п}}$			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Кукуруза	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$
Листовые овощи	$1,8 \cdot 10^{-1}$	2,0	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Плоды (помидоры, огурцы)	$9,4 \cdot 10^{-2}$	1,5	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
Бобовые (семена)	$4,3 \cdot 10^{-2}$	1,5	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Картофель (клубни)	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$
Корнеплоды (корни)	$5,3 \cdot 10^{-2}$	1,3	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$

Институтом радиационной безопасности и экологии проводились экспериментальные исследования сел Саржал и Бодене, на основании результатов которых были получены и опубликованы коэффициенты накопления для некоторых видов растениеводческой продукции (таблица 4) [26].

Таблица 4 -  $K_{\text{п}}$   $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  в растениеводческую продукцию по данным ИРБЭ

Вид продукции	$K_{\text{п}}$			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Картофель (клубни)	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Морковь (корнеплод)	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$
Свекла (корнеплод)	$1,4 \cdot 10^{-1}$	1,4	$4,2 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$
Томат (плоды)	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$8,9 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Перец (плоды)	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	-	-
Огурец (плоды)	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Тыква (плоды)	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,08	-	$2,2 \cdot 10^{-1}$
Баклажан (плоды)	$4,2 \cdot 10^{-1}$	5,9	-	-
Лук (луковицы)	$7,1 \cdot 10^{-2}$	-	-	-
Капуста (листья, стебель)	$4,3 \cdot 10^{-1}$	-	-	-

В дальнейшем, для более точных результатов расчета накопления радионуклидов в продукции, производимой на территории села Бодене, будут использоваться экспериментальные данные, а при их отсутствии – данные МАГАТЭ.

Рассчитанные в итоге значения содержания цезия, стронция, америция и плутония в растениеводческой продукции были получены для сухой массы растительной продукции, поэтому для пересчета их на сырую массу использовались данные о процентном содержании сухой массы в растениях, приведенные в рекомендациях МАГАТЭ [27].

Прогнозируемая концентрация радионуклидов рассчитывалась по формуле:

$$C_{\text{прогноз}} = C_{\text{почва}} \times K_n \times \frac{K_{\%}}{100}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{прогноз}}$  – прогнозируемое содержание (Бк/кг);

$C_{\text{почва}}$  – средняя концентрация радионуклидов в почве (Бк/кг);

$K_n$  – коэффициент перехода;

$K_{\%}$  – процент содержания сухого вещества к общей массе растения.

В таблице 5 приведены результаты прогнозируемой концентрации радионуклидов в продукции растительного происхождения (на сырую массу) в случае ее получения на территории Бодене.

Таблица 5 - Прогнозируемое содержание радионуклидов в растениеводческой продукции (на сырую массу) в случае ее получения на территории села Бодене

Вид продукции	Прогнозируемая концентрация, Бк/кг			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Кормовая продукция				
Сено (степное разнотравье)	1,5	1,7	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Листовые овощи				
Капуста	$6,9 \cdot 10^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Шпинат, салаты	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Листовой сельдерей	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Бобовые				
Фасоль	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$

Горох	$4,8 \cdot 10^{-1}$	2,2	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
Плодовые овощи				
Помидоры	$9,6 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Перец	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Баклажаны	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$
Огурцы	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
Кабачок	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
Лук	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Тыква	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Кукуруза	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$6,1 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Корнеклубнеплоды				
Картофель	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
Свекла (корнеплоды)	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
Морковь (корнеплоды)	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Редис (корнеплоды)	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
	- расчеты по экспериментальным данным.			

### 3.3 Оценка уровня загрязненности животноводческой продукции

Для оценки содержания радионуклидов в животноводческой продукции, как и в растениеводческой, используются коэффициенты перехода (отношение концентрации радионуклидов в продукции животноводства к суточному поступлению с рационом). В материалах МАГАТЭ [27] приведены коэффициенты перехода радионуклидов в животноводческую продукцию (Таблица 6). Для мяса и молока лошади в литературных источниках  $K_{п}$  не найдены, поэтому в дальнейших расчетах для них будут использоваться  $K_{п}$ , принятые для КРС. Также в данном документе указаны доли активности для некоторых радионуклидов, в частности для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , в молочной продукции по отношению к исходному сырью. Таким образом, доля активности, переходящей в сметану, будет равна 0,1 (для обоих радионуклидов); и для творога эти доли будут составлять в среднем 0,03 и 0,105 соответственно.

Таблица 6 - Коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в животноводческую продукцию

Вид продукции	$K_n$			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Крупный рогатый скот				
молоко	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$
мясо (говядина)	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Овцы				
молоко	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-
мясо (баранина)	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Домашняя птица				
мясо	3,0	$2,3 \cdot 10^{-2}$	-	-
яйца	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$

Прогноз содержания радионуклидов в продуктах животноводства ( $C_{\text{прод}}$ ) рассчитывают по формуле:

$$C_{\text{прод}} = C_{\text{рац}} \times K_n, \quad (3)$$

где  $C_{\text{рац}}$  – активность радионуклидов суточного рациона, Бк;

$K_n$  – коэффициент перехода радионуклида из рациона в 1 л (кг) продукции.

Среднесуточное поступление с рационом складывается из следующих показателей – поступление радионуклидов с растительным кормом, поступление с частицами почвы на растениях и поступление с заглатываемой почвой с поверхности земли.

Для расчета поступления радионуклидов с частицами почвы на растительном корме (пылью) использованы экспериментальные данные по определению количества почвенных частиц на растениях. Для этого были взяты смывы с основных доминантных степных растений (19 смывов). Среднее значение количества почвенных частиц с килограмма сухой массы растений для разных видов растительности различны: для типчака – 10,1 г, полыни – 11,6 г, житняка – 6,2 г, ковыля – 5,1 г. В итоге для расчета поступления с пылью растений было принято среднее значение для степного разнотравья – 8,1 г/кг, рассчитанное по всем имеющимся значениям.

Показатели количества суточного потребления корма и почвы основаны на литературных данных [28]. Расчет суточного поступления радионуклидов с почвой, заглатываемой животными при выпасе, проведен исходя из того, что за

пастбищный период КРС может потреблять до 600 кг почвы, МРС – до 75 кг почвы [29]. Таким образом, суточное поступление почвы для лошадей и КРС составило 1,78 кг, для МРС – 0,22 кг.

Таблица 7 - Принятые для расчета физиологические показатели сельскохозяйственных животных

Показатель	Коровы	Лошади	Овцы	Куры
Суточное потребление корма, кг/сут	16	18	2,5	0,1*
Количество потребленной пыли с растений, кг/сут	0,13	0,14	0,02	-
Количество непреднамеренно заглатываемой почвы, кг/сут	1,78	1,78	0,22	0,01**

Примечания:  
 \*суточная норма для домашней птицы дана на сухой вес пшеницы (зерна)  
 \*\*суточная норма в рационе домашней птицы песка или гравия (размер частиц 0,3-2 мм)  
 [30]

На основании этих данных и на основании данных о максимальных прогнозируемых удельных активностях радионуклидов в степном разнотравье, а также на основании средних значений содержания радионуклидов в почве с использованием информации о суточной норме потребления пастбищного корма, рассчитаны данные суточного поступления радионуклидов в организм выпасаемых животных. Данные представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты расчета возможного поступления радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных при выпасе на территории села Бодене

С/х животные	Поступление радионуклидов в организм животного, Бк							
	<sup>137</sup> Cs				<sup>90</sup> Sr			
	суточное поступление с кормом (без учета пыли)	суточное поступление с пылью на пастбищах	суточное поступление с почвой	общее суточное поступление	суточное поступление с кормом (без учета пыли)	суточное поступление с пылью на пастбищах	суточное поступление с почвой	общее суточное поступление
Лошадь	26,97	1,95	23,85	<b>52,77</b>	30,65	0,26	3,20	<b>34,12</b>
Корова	23,97	1,74	23,85	<b>49,56</b>	27,24	0,23	3,20	<b>30,68</b>
Овца	3,75	0,27	2,95	<b>6,96</b>	4,26	0,04	0,40	<b>4,69</b>
Птица	-	-	0,13	<b>0,13</b>	-	-	0,02	<b>0,02</b>
	Поступление радионуклидов в организм животного, Бк							

С/х животные	<sup>239+240</sup> Pu				<sup>241</sup> Am			
	суточное поступление с кормом (без учета пыли)	суточное поступление с пылью на растениях	суточное поступление с почвой	общее суточное поступление	суточное поступление с кормом (без учета пыли)	суточное поступление с пылью на растениях	суточное поступление с почвой	общее суточное поступление
Лошадь	0,01	0,71	8,72	<b>9,45</b>	25,20	0,20	2,49	<b>27,90</b>
Корова	0,01	0,64	8,72	<b>9,37</b>	22,40	0,18	2,49	<b>25,07</b>
Овца	0,0017	0,0001	1,08	<b>1,08</b>	3,50	0,03	0,31	<b>3,84</b>
Птица	-	-	0,05	<b>0,05</b>	-	-	0,01	<b>0,01</b>

В таблице 9 приведены результаты прогнозируемой концентрации радионуклидов в животноводческой продукции, в случае ее производства на исследуемой территории.

Таблица 9 - Результаты расчета возможного содержания радионуклидов в животноводческой продукции, производимой на территории с. Бодене

Вид продукции	Прогнозируемая концентрация, Бк/кг			
	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am
<i>Лошадь</i>				
молоко (кумыс)	$3,22 \cdot 10^{-1}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$9,45 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
мясо (конина)	1,58	$7,16 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$
<i>Крупный рогатый скот</i>				
молоко	$3,02 \cdot 10^{-1}$	$4,60 \cdot 10^{-2}$	$9,37 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$
мясо (говядина)	1,49	$6,44 \cdot 10^{-2}$	$5,62 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
сметана	$3,02 \cdot 10^{-2}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	-	-
творог	$9,07 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$	-	-
<i>Овцы</i>				
молоко	$5,36 \cdot 10^{-1}$	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	-
мясо (баранина)	1,88	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$5,72 \cdot 10^{-5}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$
<i>Домашняя птица</i>				
мясо	$4,02 \cdot 10^{-1}$	$4,14 \cdot 10^{-4}$	-	-
яйца	$5,76 \cdot 10^{-2}$	$6,66 \cdot 10^{-3}$	$5,88 \cdot 10^{-5}$	$4,20 \cdot 10^{-6}$

Результаты расчета поступления радионуклидов с продуктами питания

Поступление радионуклидов с пищей определяется по формуле:

$$P_{mgi} = A_{mi} \cdot q, \quad (4)$$

где  $A_{mi}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в продуктах питания, Бк/кг;

$q$  – годовое потребление продукта питания кг/год.

Для оценки перорального поступления радионуклидов с пищей были проанализированы нормы потребления основных продуктов питания для населения и результаты анкетирования жителей села Бодене о том, какие продукты и в каком количестве они потребляют, а также какие продукты выращивают и производят самостоятельно. На основании этих данных была составлена сводная таблица продуктов питания, потребляемых жителями села Бодене, и рассчитано количество радионуклидов, поступающее с продуктами питания за год (Таблица 10). Данные о потреблении указаны для взрослого мужчины старше 18 лет, как максимально возможные. В виду того, что различие между объемами потребления продуктов питания в зависимости от пола небольшое и носит индивидуальный характер, им можно пренебречь.

Таблица 10 - Поступление радионуклидов с продуктами питания

Продукты питания	Потребление, кг/год	Потребляемое количество радионуклидов, Бк/год			
		<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am
Кукуруза	8	2,10	4,91	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,01
Капуста белокочанная	31,6	21,85	13,65	0,01	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Шпинат, салаты	0,2	0,04	0,06	$2,20 \cdot 10^{-5}$	$5,38 \cdot 10^{-6}$
Листовой сельдерей	0,2	0,03	0,04	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-6}$
Фасоль	2,6	0,41	1,94	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$
Горох	2,6	1,24	5,83	$7,08 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Помидоры	6,2	0,60	0,60	0,26	0,07
Перец	5	1,61	0,75	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$5,53 \cdot 10^{-4}$
Баклажаны	6,2	2,44	4,61	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$4,80 \cdot 10^{-4}$
Огурцы	6,2	0,66	0,15	0,33	0,06
Кабачок	6,2	0,39	0,84	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-4}$
Лук	26,0	2,72	7,72	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-2}$
Тыква	12,8	0,21	0,14	$4,00 \cdot 10^{-4}$	0,30
Картофель	117,9	14,60	20,95	1,46	5,89
Свекла	6,2	1,86	2,50	2,04	1,15
Морковь	23,0	12,51	3,36	0,77	0,32
Редис	1,3	0,08	0,27	$9,75 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$
Говядина	30*	44,60	1,93	0,02	0,38
Конина	40*	63,33	2,87	0,02	0,56
Баранина	40*	75,22	0,32	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,02

Мясо птицы	10*	4,02	0,004	-	-
Молоко, литр	200*	60,46	9,20	0,02	$2,11 \cdot 10^{-3}$
Сметана, 20% жирности	30*	0,91	0,14	-	-
Кумыс, литр	60*	19,31	3,07	0,01	$7,03 \cdot 10^{-4}$
Творог полужирный	30*	0,29	0,14	-	-
Яйца, шт	200**	0,69	0,08	$7,06 \cdot 10^{-4}$	$5,04 \cdot 10^{-5}$
Суммарное потребление:		332,19	86,07	4,94	8,76
* - внесены изменения, согласно проведенному опросу					
** - вес одного яйца около 60 г [31]					

#### 4 Описание биокинетической модели желудочно-кишечного тракта

Согласно публикации МКРЗ №78, модель желудочно-кишечного тракта разбивается на 4 секции: желудок, тонкий кишечник, верхний толстый кишечник, нижний толстый кишечник (Рисунок 6). Каждая секция рассматривается как отдельная камера, и предполагается, что перемещение вещества из одной камеры в другую описывается уравнениями первого порядка [32].

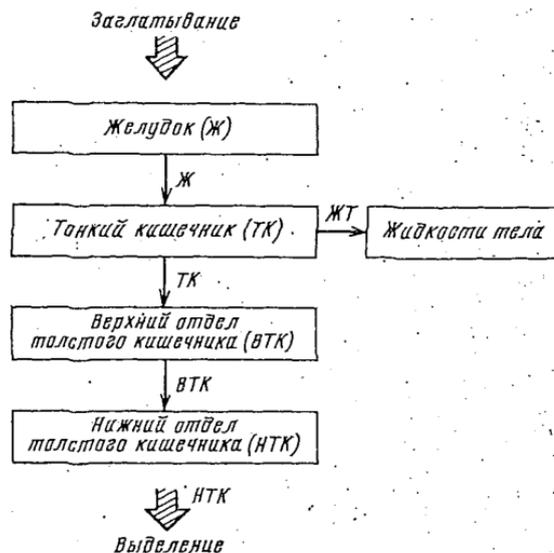


Рисунок 6– Модель, описывающая кинетику радионуклидов в ЖКТ

Так, если  $q(t)$  – активность поступившего через органы пищеварения радионуклида в какой-то камере на время  $t$ , то модель полностью описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} q_{\text{Ж}}(t) &= i(t) - \lambda_{\text{Ж}} q_{\text{Ж}}(t) - \lambda_{\text{Р}} q_{\text{Ж}}(t); \\
 \frac{d}{dt} q_{\text{ТК}}(t) &= \lambda_{\text{Ж}} q_{\text{Ж}}(t) - \lambda_{\text{ТК}} q_{\text{ТК}}(t) - \lambda_{\text{Р}} q_{\text{ТК}}(t) - \lambda_{\text{ЖТ}} q_{\text{ТК}}(t); \\
 \frac{d}{dt} q_{\text{ВТК}}(t) &= \lambda_{\text{ТК}} q_{\text{ТК}}(t) - \lambda_{\text{ВТК}} q_{\text{ВТК}}(t) - \lambda_{\text{Р}} q_{\text{ВТК}}(t); \\
 \frac{d}{dt} q_{\text{НТК}}(t) &= \lambda_{\text{ВТК}} q_{\text{ВТК}}(t) - \lambda_{\text{НТК}} q_{\text{НТК}}(t) - \lambda_{\text{Р}} q_{\text{НТК}}(t),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $\lambda_{\text{Р}}$  - постоянная радиоактивного распада рассматриваемого радионуклида;

$\lambda_{ЖТ} q_{ТК}(t)$  - скорость переноса активности в кровь из тонкого кишечника (принимается, что этот отдел – единственное место всасывания из ЖКТ в кровь);

$i(t)$  - скорость заглатывания данного радионуклида во время  $t$ .

Константы скорости для перемещения между камерами приведены в таблице 11. [32].

Таблица 11 – Скорости перехода между камерами модели ЖКТ

Камера	Скорость перехода $\lambda$ , сутки <sup>-1</sup>
Желудок	24
Тонкий кишечник	6
Верхний толстый кишечник	1,8
Нижний толстый кишечник	1

Скорость перехода активности в кровь зависит от коэффициента всасывания тонким кишечником, который зависит от конкретного радионуклида. Коэффициент всасывания представляет собой долю активности, которая переходит из ЖКТ в кровь. В общем случае скорость перехода активности в кровь из тонкого кишечника рассчитывается согласно выражению:

$$\lambda_{ЖТ} = \frac{f \cdot \lambda_{ТК}}{1 - f}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{ЖТ}$  - скорость перехода активности из тонкого кишечника в кровь,

$f$  - коэффициент всасывания тонкого кишечника,

$\lambda_{ТК}$  - скорость перехода активности из тонкого кишечника в верхний толстый кишечник.

Значения  $f$  даются в справочных данных по метаболизму для некоторых классов соединений каждого отдельного элемента.

## 5 Расчет функций выведения радионуклидов с уриной при пероральном пути поступления

### 5.1 Расчет функции выведения $^{241}\text{Am}$

Для определения поведения  $^{241}\text{Am}$  в организме человека при пероральном поступлении используется его биокинетическая модель, рекомендованная в публикации МКРЗ № 67. Предполагается, что америций, отложившийся в ткани гонад, сохраняется там навсегда, в то время как америций, депонированный в печени, сохраняется с периодом полувыведения 20 лет, а америций, отложенный в костной ткани, имеет период полувыведения равный 50.

На рисунке 7 представлена биокинетическая модель  $^{241}\text{Am}$ , используемая для дальнейших расчетов. Скорости перехода активности из камеры в камеру табулируются в источниках [32, 33].

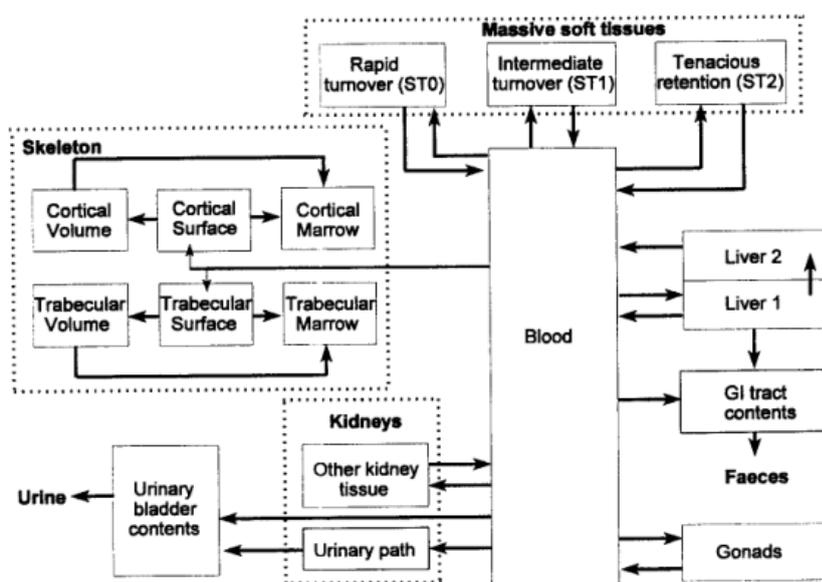


Рисунок 7 – Биокинетическая модель америция

Коэффициент всасывания для тонкого кишечника равен  $f = 0,0005$  для всех соединений этого элемента [32]. Таким образом, скорость перехода активности в кровь из тонкого кишечника рассчитывается согласно выражению:

$$\lambda_{\text{т.к.}-\text{кровь}} = \frac{f \times \lambda_{\text{т.к.}-\text{в.т.к.}}}{1 - f} = \frac{0,0005 \times 6}{1 - 0,0005} = 0,003 \text{ д}^{-1}. \quad (7)$$

Для того чтобы рассчитать динамику выведения америция из организма человека с уриной при его однократном пероральном поступлении составляется система дифференциальных уравнений, описывающая процессы перехода радионуклида из камеры в камеру (Приложение А.1).

Результатом решения данной системы уравнений являются функции, которые описывают изменения активности в определенных органах и тканях. Полученная функция выведения америция с уриной (обозначенная как  $u(t)$ ), описывает интегральное выведение активности из организма и имеет вид:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & 7,114 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-33,7t} - 0,0000275 \cdot e^{-24t} + 0,0000722 \cdot e^{-12t} - 0,0000715 \cdot e^{-6t} - \\
 & - 3,0 \cdot 10^{-16} \cdot e^{-1,8t} - 8,45 \cdot 10^{-15} \cdot e^{-1t} - 0,000014 \cdot e^{-0,96t} - 0,00001 \cdot e^{-0,1t} - 3,13 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,013t} + \\
 & + 5,41 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,0077t} - 7,57 \cdot 10^{-30} \cdot e^{-0,0076t} - 3,26 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,0014t} - 0,000027 \cdot e^{-0,0010t} - \\
 & - 8,34 \cdot 10^{-19} \cdot e^{-0,00074t} - 0,000053 \cdot e^{-0,0003t} - 2,54 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,00019t} - 9,37 \cdot 10^{-18} \cdot e^{-0,00012t} - \\
 & - 0,00014 \cdot e^{-0,000038t} - 0,00011 \cdot e^{-0,000015t} + 0,00039
 \end{aligned} \quad (8)$$

где  $t$  – время после поступления, сутки.

На практике используется величина активности в суточной моче на определенный момент времени, которая может быть рассчитана согласно выражению:

$$A_{Am}(t) = u(t) - u(t-1). \quad (9)$$

Функция  $u(t-1)$  представляет собой долю активности от начального поступления, которая содержится в суточной моче в различные моменты времени при однократном поступлении радионуклида.

При хроническом поступлении предполагается, что поступление происходит равномерно. В этом случае хроническое поступление можно представить как суперпозицию однократных поступлений. Функцию для хронического поступления можно представить в виде суммы:

$$u_{cron}(T) = \sum_{i=1}^T u(T+b-i), \quad (10)$$

где  $T$  – продолжительность хронического поступления,  $b$  – время, прошедшее после окончания хронического поступления до момента сдачи суточной пробы

мочи. Здесь под знаком суммы стоит функция  $m(t)$  для однократного поступления.

В таблицах к 37 публикации из серии по безопасности МАГАТЭ [34] приводятся некоторые табулированные значения доли выведения активности америция с уриной по дням при однократном поступлении. Сравнительный график расчетных и табличных значений представлен на рисунке 8.

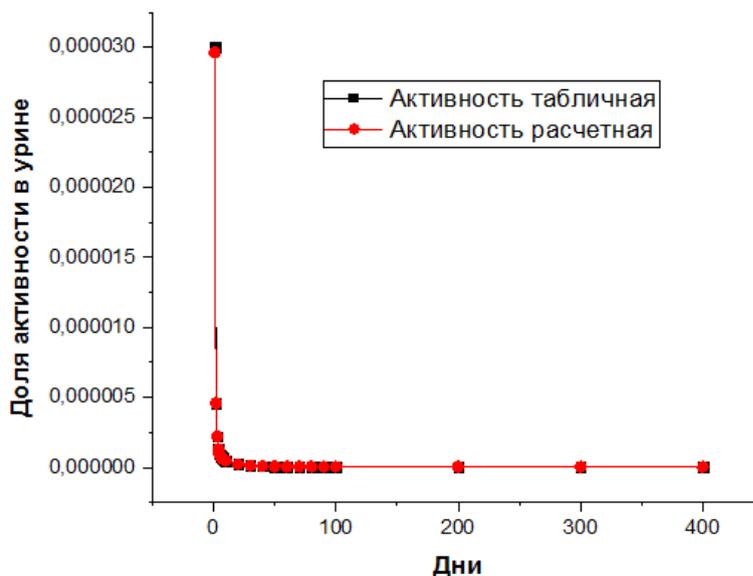


Рисунок 8 – Сравнение справочной и расчетной величины доли активности америция при выведении с уриной для перорального поступления

Как видно из графика, результаты расчета показывают отличную сходимость с табличными данными.

## 5.2 Расчет функции выведения $^{239+240}\text{Pu}$

Для определения поведения плутония- $^{239+240}\text{Pu}$  в организме человека при пероральном поступлении используется та же биокинетическая модель, что и для америция-241. Предполагается, что поведение в организме человека плутония и америция является схожим. При этом скорости перехода активности из камеры в камеру модели различны и также табулируются в источниках [32, 34]. Для

плутония, растворенного в крови, основными органами отложения являются печень и костная ткань.

Абсорбция плутония из ЖКТ низкая. Коэффициенты всасывания  $f$  для тонкого кишечника равны: для оксидов - 0,00001, для нитратов - 0,0001, для всех остальных соединений - 0,0005 [32]. Так как образующиеся при ядерных взрывах тугоплавкие оксиды плутония практически нерастворимы, то скорость перехода активности в кровь из тонкого кишечника принимается равной  $6 \cdot 10^{-5}$  дней<sup>-1</sup>.

Для расчета динамики выведения плутония из организма человека с уриной при его однократном пероральном поступлении также составлена система дифференциальных уравнений (Приложение А.2).

Полученная интегральная функция выведения для оксидов плутония с уриной имеет вид:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & 1.863 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-24t} - 2,33 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-12t} + 6,81 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-6t} - 1,23 \cdot 10^{-15} \cdot e^{-1,8t} - \\
 & - 9,50 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-1,3t} + 1,18 \cdot 10^{-16} \cdot e^{-1t} - 1,46 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,36t} - 1,05 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,014t} + 7,47 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-0,0078t} - \\
 & - 2,41 \cdot 10^{-31} \cdot e^{-0,0076t} - 5,93 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-0,0020t} + 2,23 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-0,0014t} - 4,12 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,0009t} - \quad (11) \\
 & - 5,49 \cdot 10^{-20} \cdot e^{-0,00074t} - 2,33 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,0004t} - 5,91 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-0,00019t} - 4,09 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,00013t} + \\
 & + 2,58 \cdot 10^{-19} \cdot e^{-0,00012t} - 2,61 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,00003t} - 2,97 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,000014t} + 8,47 \cdot 10^{-22}
 \end{aligned}$$

Далее находим функцию  $u(t-1)$  и проводим сравнение полученных результатов с табличными. Сравнительный график расчетных и табличных значений представлен на рисунке 9.

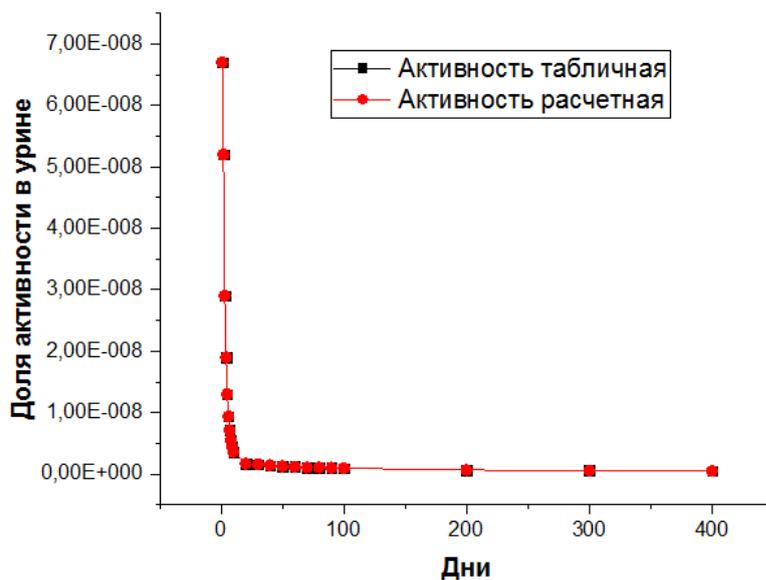


Рисунок 9 – Сравнение справочной и расчетной величины долей активности оксидов плутония при выведении с уриной для перорального поступления

Результаты проведенного расчета также показывают отличную сходимость с табличными данными.

### 5.3 Расчет функции выведения $^{90}\text{Sr}$

Поведение щелочноземельного стронция в организме человека при пероральном поступлении похоже на поведение кальция, но отличается скоростью передвижения. Стронций депонируется преимущественно в костной ткани, в объеме минеральной части кости.

На рисунке 10 представлена биокинетическая модель  $^{90}\text{Sr}$ , используемая для дальнейших расчетов. Скорости перехода активности из камеры в камеру также табулируются в источниках [32, 34].

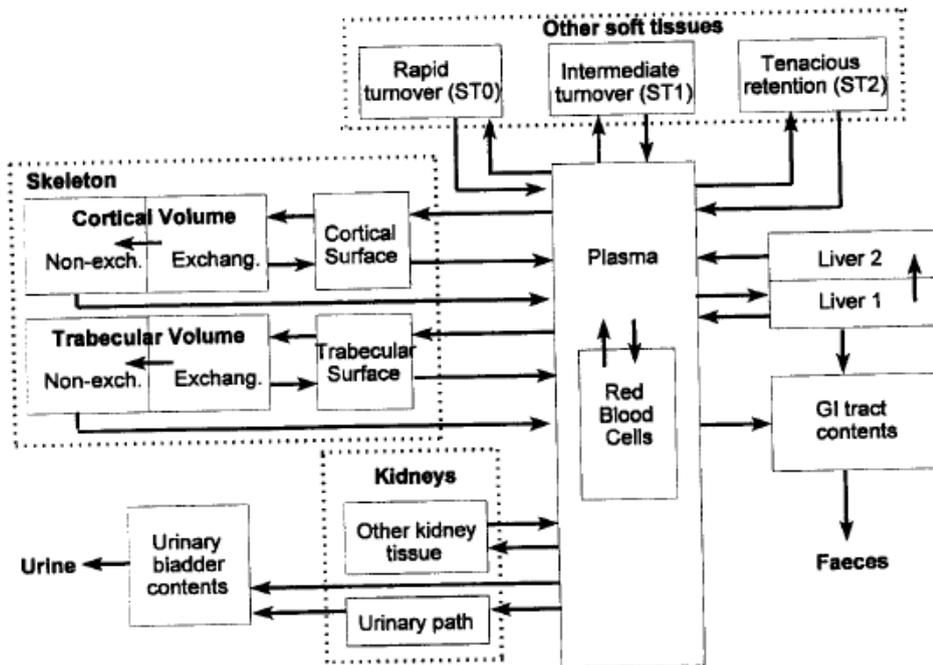


Рисунок 10 – Биокинетическая модель стронция

Коэффициенты всасывания стронция  $f$  для тонкого кишечника равны: для растворимых солей - 0,3, для  $\text{SrTiO}_3$  – 0,01 [32]. Таким образом, в расчетах

используем скорость перехода активности стронция в кровь из тонкого кишечника для солей, равной  $2,571 \text{ дней}^{-1}$ .

Для расчета динамики выведения стронция из организма человека с уриной при его однократном пероральном поступлении также была составлена и решена система дифференциальных уравнений (Приложение А.3).

Полученная функция выведения для солей стронция с уриной имеет вид:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & -7,461 \cdot 10^{-32} + 0,0074 \cdot e^{-24t} - 0,032 \cdot e^{-16t} + 0,075 \cdot e^{-8,6t} - 0,051 \cdot e^{-4,1t} + \\
 & + 0,000053 \cdot e^{-1,8t} - 0,034 \cdot e^{-1,4t} + 4,65 \cdot 10^{-16} \cdot e^{-1t} + 1,51 \cdot 10^{-32} \cdot e^{-0,69t} - 0,059 \cdot e^{-0,36t} - \\
 & - 0,082 \cdot e^{-0,07t} + 1,75 \cdot 10^{-30} \cdot e^{-0,0079t} - 0,021 \cdot e^{-0,0071t} - 0,017 \cdot e^{-0,0004t} - \\
 & - 6,79 \cdot 10^{-18} \cdot e^{-0,0004t} - 0,015 \cdot e^{-0,00008t} + 0,23
 \end{aligned} \quad (12)$$

Сравнительный график расчетных и табличных значений функции выведения  $u(t-1)$  для стронция представлен на рисунке 11.

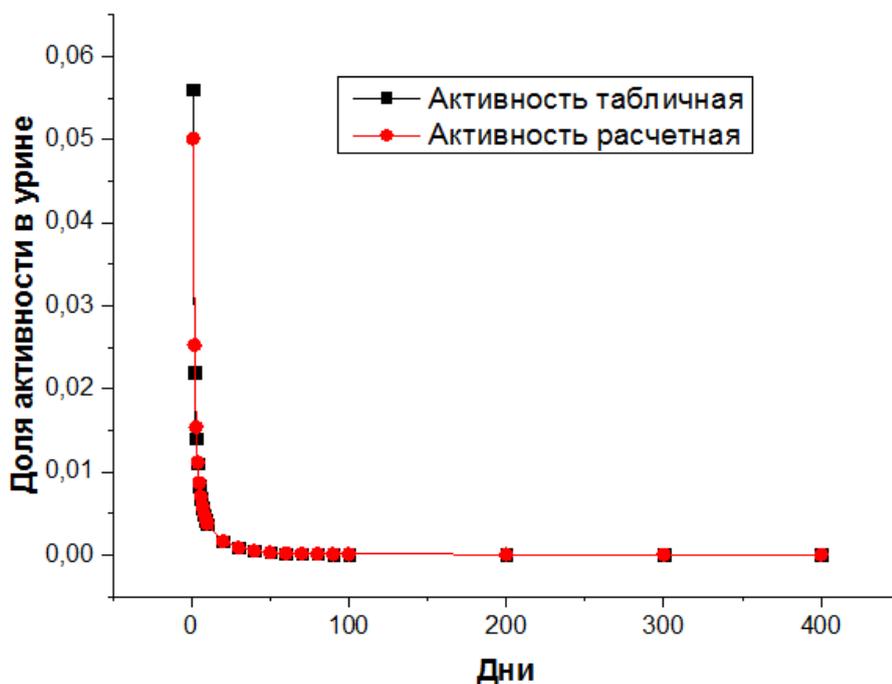


Рисунок 11 – Сравнение справочной и расчетной величины долей активности солей стронция при выведении с уриной для перорального пути поступления

Результаты расчета показывают отличную сходимость с табличными данными.

## 5.4 Расчет функции выведения $^{137}\text{Cs}$

Для определения поведения цезия-137 в организме человека при пероральном поступлении используется его биокинетическая модель и модель желудочно-кишечного тракта, рекомендованные в публикации МКРЗ №30.

На рисунке 12 представлена сочлененная биокинетическая модель  $^{137}\text{Cs}$ , взятая из публикации Р. Легетта «Физиологически обоснованная биокинетическая модель цезия в организме человека» [35]. Данная модель и была использована для дальнейших расчетов, так как в публикациях МКРЗ отсутствует описание скоростей перехода активности из камеры в камеру. Эта модель не учитывает перераспределение активности между органами, а лишь описывает выведение активности из организма с уриной и фекалиями.

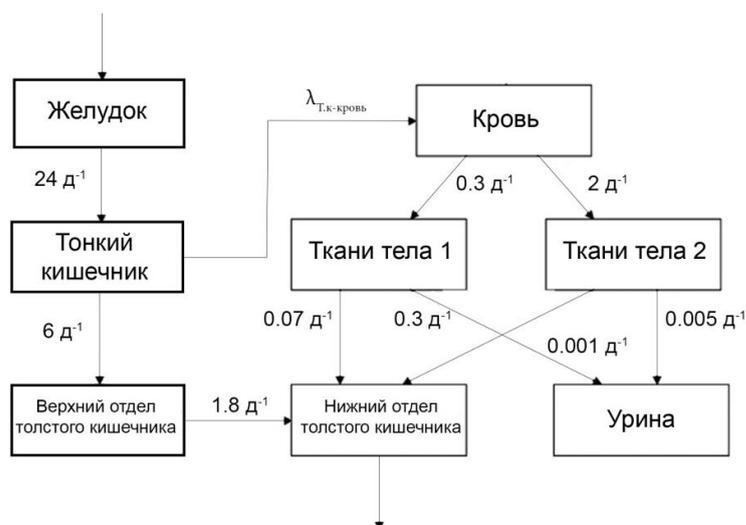


Рисунок 12 – Биокинетическая модель цезия, сочлененная с моделью ЖКТ

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что хлорид цезия и другие обычно встречающиеся соединения цезия быстро и почти полностью всасываются из ЖКТ. Коэффициент всасывания для тонкого кишечника принят равным  $f = 1$  для всех соединений этого элемента [36].

Для расчета скорости перехода активности  $^{137}\text{Cs}$  из тонкого кишечника в кровь его значение было взято равным 0,999. Таким образом, скорость перехода активности в кровь из тонкого кишечника рассчитывается согласно выражению:

$$\lambda_{T.K.-\text{кровь}} = \frac{f \times \lambda_{m.K.-\text{в.т.к.}}}{1-f} = \frac{0.999 \times 6}{1-0.999} = 5994 \text{ д}^{-1}. \quad (13)$$

Для расчета динамики выведения цезия из организма человека с уриной при его однократном пероральном поступлении была составлена и решена система дифференциальных уравнений (Приложение А.4).

Полученная функция выведения цезия с уриной, описывает интегральное выведение активности из организма и имеет вид:

$$u(t) = 1,115 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-6000t} - 0,00020 \cdot e^{-24t} + 0,025 \cdot e^{-2,3t} - 4,470 \cdot 10^{-19} \cdot e^{-1,8t} + \\ + 5,564 \cdot 10^{-19} \cdot e^{-1t} - 0,128 \cdot e^{-0,37t} - 0,726 \cdot e^{-0,006t} + 0,830 \quad (14)$$

Сравнительный график расчетных и табличных значений функции выведения  $u(t-1)$  для цезия-137 представлен на рисунке 13.

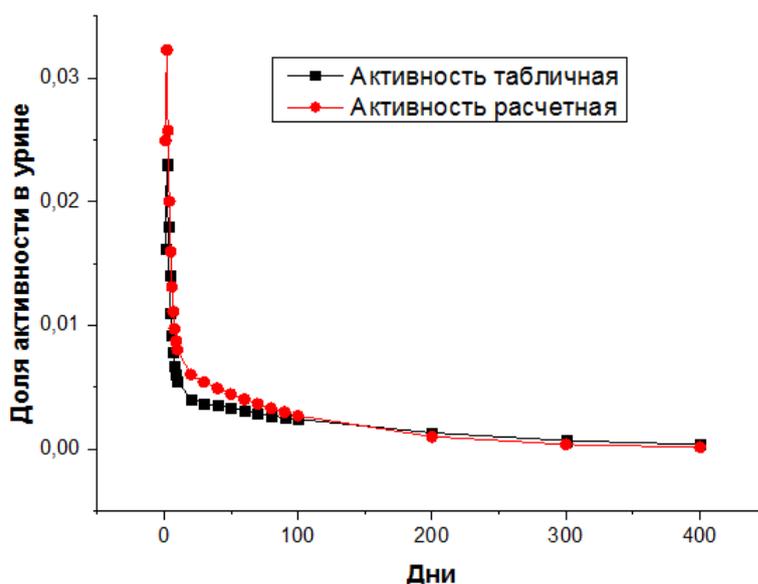


Рисунок 13 – Сравнение справочной и расчетной величины доли активности цезия при выведении с уриной для перорального поступления

Как видно из графика, результаты расчета показывают небольшое расхождение с табличными данными, особенно явными в промежутке до 100 суток. Это объясняется тем, что была использована биокинетическая модель, отличающаяся от рекомендованной МКРЗ.

## **6 Расчет содержания радионуклидов в суточных образцах урины членов исследуемой когорты при пероральном поступлении.**

### **6.1 Отбор и анализ образцов урины**

Отбор, подготовка и измерение образцов урины проводились согласно рабочим инструкциям [37, 38, 39, 40, 41, 42]. Всего был отобран 71 образец средним объемом 1,5 л. Все отобранные пробы проанализированы на содержание искусственных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ .

Анализы по измерению удельной активности радионуклидов в образцах урины проводились на поверенной лабораторной аппаратуре. Определение удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в образцах урины проводилось на гамма-спектрометрах с полупроводниковым детектором производства фирмы Canberra. Определение удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  проводилось на жидкостном сцинтилляционном спектрометре Tri-Carb 2910TR (Perkin Elmer) и альфа-спектрометре Alpha Analyst (Canberra) соответственно.

Для гамма-спектрометрического анализа образцы подвергаются концентрированию в виде выпаривания до объемов измерительного сосуда, после чего пробу взвешивают на лабораторных весах и передают на анализ.

Радиохимическое выделение  $^{239+240}\text{Pu}$  из биологических проб включает в себя следующие этапы:

- предварительное выпаривание образцов до сухого остатка;
- введение изотопной метки  $^{242}\text{Pu}$ . Количество вносимой изотопной метки  $^{242}\text{Pu}$  должно быть приблизительно равно ожидаемому содержанию  $^{239+240}\text{Pu}$  в пробах (в пределах 50 %). Предполагаемое содержание в анализируемом образце  $^{239+240}\text{Pu}$  ориентировочно можно определить, как 10:1 по отношению к активности  $^{241}\text{Am}$ .

- полное кислотное разложение пробы. Озоленную навеску пробы (от 2 г до 10 г) помещают во фторопластовый стакан, смачивают 7,5М  $\text{HNO}_3$ , приливают концентрированную  $\text{HF}$ . Затем выпаривают до получения сухих

солей. Далее снова приливают кислоты и упаривают. Данную операцию повторяют 2 раза.

– выделение и радиохимическая очистка изотопов плутония. Полученный раствор фильтруют и пропускают через ионообменную колонку. Собранный элюат упаривают, добавляют концентрированной  $\text{HNO}_3$ . Далее раствор упаривают досуха и остужают. К сухому остатку добавляют концентрированную  $\text{HCl}$  и упаривают досуха. Процесс повторяют трижды.

– получение альфа-источника путем электролитического осаждения. Остаток растворяют 10-12 каплями 3М  $\text{HCl}$  и добавляют 10 см<sup>3</sup> электролита. Подложку из нержавеющей стали помещают в электролитическую тefлоновую ячейку, туда же переносят полученный раствор. В ячейку по центру вводится платиновый анод (спираль). В созданную электрическую цепь, при напряжении 12 В, подаётся постоянный электрический ток силой 1,4 А. Время осаждения 60 минут. Сливают оставшийся раствор из электролитической ячейки, освобождают подложку, промывают дистиллированной водой. После чего прокалывают подложку на спиртовой горелке, протирают поверхность ватой смоченной спиртом. Полученный радиоактивный источник передается в лабораторию для проведения измерений на  $\alpha$ -спектрометре.

Радиохимическое выделение  $^{90}\text{Sr}$  включает в себя следующие этапы:

– введение в пробу носителя стронция или изотопной метки  $^{85}\text{Sr}$ . Вносится носитель стабильного стронция в количестве 250 мг/пробу.

– кислотное выщелачивание или полное кислотное разложение пробы при использовании 6М  $\text{HCl}$  и перекиси водорода. Проводят выделение и радиохимическую очистку изотопов стронция из образца.

– 2-х недельное накопление  $^{90}\text{Y}$ , его выделение и передача на бета-спектрометрическое измерение активности.

## 6.2 Обработка результатов измерений

Удельная активность  $\gamma$  – излучающих радионуклидов ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) в образцах урины рассчитывалась согласно выражению [38]:

$$A = S_n / (t \cdot P \cdot \varepsilon \cdot k_\gamma), \quad (15)$$

где  $A$  – активность радионуклида, Бк/л;  
 $S_n$  – площадь пика за вычетом пьедестала и фона;  
 $t$  – время измерения, с;  
 $P$  – вес пробы, л;  
 $\varepsilon$  – эффективность регистрации для данной энергии;  
 $k_\gamma$  – квантовый выход.

Минимально детектируемая активность определялась по фоновому спектру:

$$A_{min} = 2 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=m}^{m_2} N_i}}{\varepsilon(E_i) \cdot K_\gamma \cdot t_\phi \cdot P}, \quad (16)$$

где  $N_i$  – отсчет в  $i$ -м канале анализатора, имп/с;  
 $\varepsilon(E_i)$  – эффективность регистрации для энергии одной из наиболее интенсивных линий интересующего нуклида;  
 $K_\gamma$  – квантовый выход данной линии;  
 $t_\phi$  – время измерения фона, с.

Расчет погрешности измерения проводился согласно выражению:

$$\sigma = \frac{\sqrt{S_{\text{пика}} + 2(S_\phi + S_{\text{пьед}})}}{S_{\text{пика}}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

где  $\sigma$  – погрешность измерений;  
 $S_{\text{пика}}$  – площадь пика;  
 $S_\phi$  – площадь фона;  
 $S_{\text{пьед}}$  – площадь пьедестала.

Результат записывался в виде:

$$(A \pm A \times \sigma) \text{ Бк/л.}$$

Расчет удельной активности бета-излучающих радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ) проводился по формуле [39]:

$$A_{\gamma\delta} = \frac{(CPM_{обр} - CPM_{фон}) \times K_{оз} \times 1000 \times 100 \times 100 \times 100}{m \times W_Y \times W_{Sr} \times D \times 60 \times \varepsilon}, \text{ (Бк/л)} \quad (18)$$

где  $CPM_{обр}$  и  $CPM_{фон}$  - отсчет импульсов измеряемого образца и фонового образца, имп/мин;

$K_{оз}$  - коэффициент озоления образца;

$\varepsilon$  - эффективность регистрации  $^{90}\text{Y}$ ;

$m$  - аналитическая навеска рабочего образца, мл;

$W_Y$  - химический выход  $^{90}\text{Y}$ , %;

$W_{Sr}$  - химический выход  $^{90}\text{Sr}$ , %;

$D$  - фактор распада  $^{90}\text{Y}$ , который рассчитывается по формуле:

$$D = \exp\left(-\ln 2 \times \frac{\Delta t}{T_{1/2}}\right), \quad (19)$$

где  $T_{1/2}$  – период полураспада  $^{90}\text{Y}$  (3844,8 с);

$\Delta t$  - время, прошедшее от момента отделения  $^{90}\text{Y}$  от  $^{90}\text{Sr}$  до момента измерения бета-активности  $^{90}\text{Y}$ , с.

Минимально детектируемая удельная активность рассчитывалась по выражению:

$$MDA = \frac{3 \cdot \sqrt{CPM_{\phi} \cdot t \cdot 1000 \cdot 100 \cdot 100}}{m \cdot W_Y \cdot W_{Sr} \cdot t \cdot 60 \cdot \varepsilon}, \text{ (Бк/л)} \quad (20)$$

где  $t$  – время измерения образца, мин.

Расчет погрешности измерения проводился согласно выражению:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sqrt{(CPM_{обр} \cdot t)^2 + (CPM_{\phi} \cdot t)^2 \cdot 1000 \cdot 100 \cdot 100}}{m \cdot W_Y \cdot W_{Sr} \cdot t \cdot 60 \cdot \varepsilon}. \quad (21)$$

Результат записывался в виде:

$$(A \pm A \times \sigma) \text{ Бк/л.}$$

Удельная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  рассчитывалась по формуле [40]:

$$A_{(239+240)} = \frac{S_{(239+240)ч} \cdot 1000 \cdot A_{(242)}}{S_{(242)ч} \cdot m}, \text{ Бк/л}, \quad (22)$$

где  $S_{(239+240)ч}$  - «чистая» площадь пика плутония-239+240, имп;

$A_{242}$  - активность трассера плутония-242, Бк;

$S_{(242)ч}$  - «чистая» площадь пика трассера плутония-242, имп;

$m$  - масса навески для радиохимической подготовки, мл.

«Чистая» площадь определялась по формулам:

$$\begin{aligned} S_{(239+240)ч} &= S_{(239+240)} - S_{(239+240)ф} \cdot t - S_{(242)} \cdot \frac{A_{(239+240)}}{A_{(242)}}; \\ S_{(242)ч} &= S_{(242)} - S_{(242)ф} \cdot t \end{aligned} \quad (23 - 24)$$

где  $S_{(239+240)}$  - площадь пика плутония-239+240, имп;

$S_{(239+240)ф}$  - скорость счета фона в окне плутония-239+240, имп/с;

$t$  - время измерения образца, с;

$S_{(242)}$  - площадь пика плутония-242, имп;

$S_{(242)ф}$  - скорость счета фона в окне плутония-242, имп/с;

отношение  $A_{(239+240)} / A_{(242)} = 0,0013$ .

Минимально детектируемая удельная активность рассчитывалась по выражению:

$$МДА = 3 \cdot \frac{\sqrt{(A_{(239+240)} / A_{(242)}) \cdot t + (S_{(239+240)} \cdot (A_{(239+240)} / A_{(242)})) \cdot A_{(242)} \cdot 1000}}{S_{(242)} \cdot m}, \text{ (Бк/л)}. \quad (25)$$

Расчет погрешности измерения проводился согласно выражению:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sqrt{S_{(239+240)} \cdot A_{(242)} \cdot 1000}}{S_{(242)} \cdot m}. \quad (26)$$

Результат записывался в виде:

$$(A \pm A \times \sigma) \text{ Бк/л.}$$

### 6.3 Результаты анализа содержания радионуклидов

По результатам лабораторных исследований, с помощью программного обеспечения «AnalGamma», «Genie-2000» были получены результаты определения удельной активности основных дозообразующих радионуклидов, содержащихся в отобранных образцах урины (Приложение Б). Значения полученных результатов представлены в таблице 12.

Таблица 12 –Значения полученной удельной активности в образцах урины

	Анализ биосубстратов, Бк/л			
	$^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$
Минимальное	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< $1,0 \cdot 10^{-6}$
Максимальное	< 0,07	0,18	1,09	0,40
Среднее	< 0,02	< 0,03	< 0,12	< 0,02

Как видно из полученных данных, большинство результатов находятся ниже аппаратных пределов обнаружения. В дальнейших расчетах применен консервативный подход – пределы обнаружения приняты за численные значения.

## 7 Сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений

Проведен расчет функции выведения для хронического поступления радионуклидов. Для хронического поступления не существует отдельных биокинетических моделей. Предполагается, что поступление происходит равномерно. В этом случае хроническое поступление можно представить как суперпозицию однократных поступлений. Образец урины сдан на следующий день после окончания периода поступления в 365 дней. Результаты расчета представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Функции выведения радионуклидов с уриной при хроническом пероральном поступлении

Значение функции выведения			
<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu
0,020	0,810	0,200	5,03·10 <sup>-7</sup>

Рассчитано годовое поступление исследуемых радионуклидов в организм человека согласно выражению [43]:

$$I = \frac{A_{\text{урины}}}{\sum_{i=1}^T u(T+b-i)} \times 365, \quad (27)$$

где  $A_{\text{урины}}$  - активность радионуклида в образце урины, Бк;

$I$  – годовое поступление радионуклида, Бк.

Сравнительные результаты ожидаемого и фактического поступления радионуклидов, а также их содержание в урине приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Фактические и ожидаемые результаты

Годовое поступление радионуклидов в организм человека, Бк				
	<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu
Расчетное	9	332	86	5
Экспериментальное	270 - 1890	7 - 122	27 - 2991	1,1·10 <sup>3</sup> - 4,3·10 <sup>8</sup>
Содержание радионуклидов в образцах урины, Бк				

Расчетное	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0,74	0,05	$6,8 \cdot 10^{-9}$
Экспериментальное	0,02 – 0,10	0,05 – 0,40	0,02 – 0,20	$1,5 \cdot 10^{-6}$ – 0,6

Расчетное содержание  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  в урине ниже минимального экспериментального содержания. Это объясняется следующими факторами:

- отсутствием в рекомендациях МАГАТЭ коэффициентов перехода данных радионуклидов для некоторой продукции животноводства (мяса птицы, молока овец, сметаны, творога), что привело к занижению расчетного содержания;

- недостаточным временем измерения образцов на  $^{239+240}\text{Pu}$  (каждый образец измерялся по 7 дней).

Полученное расчетное содержание  $^{90}\text{Sr}$  в урине в 0,05 Бк сравнимо с экспериментальным, так как 53 образца из 71 соответствуют данному значению. Максимальное значение измеренного содержания цезия в урине составило 0,4 Бк, что сопоставимо с порядком расчетного значения в 0,7 Бк. Небольшое расхождение можно объяснить следующими факторами:

- неточностью расчетной биокинетической модели цезия. Так как не были найдены данные МКРЗ о скоростях перехода между камерами биокинетической модели, для расчетов была выбрана модель, взятая из публикации Р. Легетта «Физиологически обоснованная биокинетическая модель цезия в организме человека». Результаты расчета показали небольшое расхождение с табличными данными значений функции выведения МКРЗ, в промежутке до 100 суток.

- вариативностью количественного потребления исследуемой когортой продуктов питания, содержащих цезий.

## **8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В настоящей выпускной квалификационной работе был проведен сравнительный анализ результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений.

Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- разработка устава научно-технического проекта;
- планирование процесса управления научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, экономической эффективности исследования.

### **8.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ**

#### **8.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

Данный анализ позволяет провести оценку эффективности рассматриваемой в настоящей работе модели поступления радионуклидов в сравнении с используемыми аналогами.

Для анализа конкурентных технических решений были выбраны 3 основные используемые методики расчета внутреннего поступления радионуклидов:

Вариант 1 – метод расчета внутреннего облучения с использованием данных по измерению радионуклидов на рабочем месте.

Вариант 2 – метод расчета внутреннего облучения с использованием данных по измерению персонала и населения на счетчике излучения человека.

Вариант 3 – метод расчета внутреннего облучения с использованием данных по измерению биологических образцов урины.

Детальный анализ вариантов необходим, т.к. каждый из рассмотренных методов имеет свои достоинства и недостатки. Данный анализ производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 15. Экспертная оценка производится по техническим и экономическим критериям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (28)$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл показателя.

Таблица 15 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (методов)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$B_{к3}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$	$K_{к3}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Технические критерии оценки ресурсоэффективности									
1. Производительность труда при использовании (скорость выполнения расчета)	0,05	3	5	3	3	0,15	0,25	0,15	0,15
2. Простота расчета	0,1	3	5	4	4	0,3	0,5	0,4	0,4

3. Потребность в оснащении химических лабораторий	0,15	3	5	5	3	0,45	0,75	0,75	0,45
4. Потребность в спектрометрическом оборудовании	0,1	4	3	3	4	0,4	0,3	0,3	0,4
5. Полнота и достоверность полученных данных	0,2	5	2	3	4	1	0,4	0,6	0,8
6. Время наработки данных	0,05	3	5	3	3	0,15	0,25	0,15	0,15
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>									
1. Конкурентоспособность метода	0,05	4	3	3	3	0,2	0,15	0,15	0,15
2. Стоимость расходных материалов на анализ	0,1	3	4	4	3	0,3	0,4	0,4	0,3
3. Стоимость используемого оборудования	0,15	3	4	3	3	0,45	0,6	0,45	0,45
4. Финансирование научной разработки	0,05	4	1	3	3	0,2	0,05	0,15	0,15
Итого	1	35	37	34	33	3,6	3,65	3,5	3,4

Проведенный анализ конкурентных методов показал, что разработанная модель поведения радионуклидов в организме человека может быть использована (результат 3,6). Ее ближайшим конкурентом (результат 3,65) является метод расчета внутреннего облучения с использованием данных по измерению радионуклидов на рабочем месте, который прост и быстр в использовании, но не дает достоверных и полных результатов.

### 8.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательской работы. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды работы.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательской работы. Сильные

стороны свидетельствуют о том, что у работы есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского работы, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках работы или где она располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды работы, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты работы и позволяет руководству работы улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 16 представлен SWOT-анализ НИР, где показаны результаты пересечений сильных и слабых сторон с возможностями и угрозами.

Таблица 16 – SWOT-анализ НИР

	<p>Сильные стороны работы:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>С2. Достоверность получаемых данных.</p> <p>С3. Расширение границ применимости.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал.</p> <p>С5. Наличие бюджетного финансирования.</p>	<p>Слабые стороны работы:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с методикой.</p> <p>Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения лабораторных анализов.</p> <p>Сл3. Большой срок обработки результатов.</p> <p>Сл4. Отсутствие осведомленности об исследованиях данного типа.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ИРБЭ.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p>

<p>В2. Новизна исследования приведет к появлению заинтересованных сторон.</p> <p>В3. Широкая область применения.</p> <p>В4. Планирование постройки АЭС в Казахстане.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заключение контрактов на договорные работы для ИРБЭ.</li> <li>2. Изучение данной тематики можно продолжить более углубленно, что даёт возможность написания публикаций.</li> <li>3. Планирование АЭС дает возможность сотрудничества и повышения квалификации персонала по работе с моделированием и расчетом дозовых нагрузок.</li> <li>4. Рост спроса на исследования данного типа за счет распространения среди различных организаций и научно-исследовательских институтов.</li> <li>5. Приоритет к данному исследованию по сравнению с конкурентами за счет осуществления должной надежности, полноты и достоверности получаемых результатов.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отсутствие у потребителей необходимого оборудования для проведения лабораторных анализов.</li> <li>2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с методикой дает возможность проведения обучения для персонала.</li> <li>3. Отсутствие большого числа заказов на проведение исследований.</li> </ol>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на более времязатратную методику расчета.</p> <p>У2. Отсутствие средств на проведение лабораторных анализов.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая достоверность и полнота получаемых данных значительно повышает конкурентоспособность.</li> <li>2. Затраты проведение лабораторных анализов окупятся подтвержденной безопасностью персонала и населения.</li> </ol>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Дороговизна сопутствующих материалов и оборудования может стать главной причиной отсутствия спроса.</li> <li>2. Достаточное большое время на получение результатов анализа может не удовлетворять требованиям потребителя, что понижает спрос методики.</li> </ol>

В таблице 17 представлена интерактивная матрица работы, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки. Здесь пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение, «0» – сомнения в соответствии.

Таблица 17 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	0	+	+
	B2	+	-	+	0	+
	B3	+	+	+	+	+
	B4	+	+	+	+	+

Исходя из данных интерактивной матрицы, можно сделать вывод, что сильные стороны проекта связаны с возможностями внешней среды, и, благодаря им, проект может быть востребован на рынке.

## 8.2 Разработка устава научно-технического проекта

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Цель проектной работы — сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений. Результатом данной исследовательской работы является достоверно подтвержденная модель поступления радионуклидов в организм человека. С помощью данной модели возможно прогнозировать динамику выведения (накопления) активности из организма, депонирование радионуклидов в различных органах и тканях на различные временные промежутки (от дней до лет) при однократном, а также хроническом поступлении. На практике чаще всего используются простые расчетные модели внутреннего облучения человека, входные параметры которых жестко закреплены и табулированы. С помощью рассмотрения полной цепочки поступления радионуклидов в организм, подтвержденных измерениями биологических образцов, возможно отойти от табулированных значений для расчета доз и дать более полную оценку дозовой нагрузки на персонал и население.

Заинтересованность в проекте могут проявить различные предприятия ЯТЦ (в основном добывающая и перерабатывающая отрасли); научно-исследовательские институты; медицинские учреждения, выполняющие радионуклидную диагностику; оперативные радиологические службы. Данные представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Заинтересованные стороны проекта и их ожидания

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Предприятия ЯТЦ	Более полная и достоверная оценка дозовой нагрузки на персонал с учетом особенностей всего производственного процесса и население. Выявление мест повышенного облучения в технологическом процессе. Расчет прогнозов облучения при аварийных ситуациях и дальнейшего выведения активности из организма.
Научно-исследовательские институты	Возможность продолжения исследовательской работы для более глубокого изучения поведения радионуклидов в организме человека и путей их поступления.
Медицинские учреждения	Расчет дозовой нагрузки при радионуклидной диагностике и дальнейшее выведение активности из организма.
Радиологические службы	Оценка дозы внутреннего облучения на персонал и население при аварийном реагировании, текущем мониторинге, ремедиации загрязненных территорий.

В таблице 19 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 19– Цель и результаты проекта

Цели проекта:	Сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений.
Ожидаемые результаты проекта:	Подтверждение достоверности и точности модели поступления радионуклидов в организм человека в сравнении с результатами содержания удельной активности радионуклидов в образцах урины исследуемой когорты. Метод моделирования поступления радионуклидов в организм человека, позволяющий рассчитать выведение радионуклидов, их предполагаемую концентрацию в биообразцах в долгосрочном или краткосрочном прогнозах и удержание в органах и тканях.
Критерии приемки результата проекта:	Правильность обработки массива данных. Наличие пошаговой отработки метода с описанием и анализом.

Требования к результату проекта:	Проект должен быть завершен до 31 мая 2022 года. Полученные результаты должны удовлетворять критериям приемки результата проекта. Наличие выводов по сравнению смоделированного ожидаемого и расчетного поступления и выведения радионуклидов.
----------------------------------	--

Организационная структура проекта представлена в таблице 20.

Таблица 20 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час.
1	Яковлева В.С., ТПУ, профессор ОЯТЦ	Руководитель	Координация работы над проектом	25
2	Романенко Е.В., ИРБЭ, инженер 2 к. лаборатории ЯФМА	Исполнитель	Моделирование, расчетная часть, обработка результатов, составление отчета	960
ИТОГО:				985

Ограничения и допущения проекта:

1. Источник финансирования: государственное финансирование.
2. Дата завершения проекта: до 31.05.2022.
3. Ограничение по времени работы участников проекта.

### 8.3. Планирование процесса управления научно-исследовательской работы

#### 8.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

В рамках планирования исследовательской работы построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта.

В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ. График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научной работы. При этом работы на графике выделяют различной штриховкой или цветом в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу [44].

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 21.

Таблица 21 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

№ работы	Вид работ	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	2	1.02.2022	3.02.2022	руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	3	3.02.2022	6.02.2022	руководитель
3	Выбор направления исследования	9	6.02.2022	15.02.2022	руководитель, инженер
4	Подбор и изучение материалов по теме	2	15.02.2022	17.02.2022	инженер
5	Календарное планирование работ	1	17.02.2022	18.02.2022	руководитель инженер
6	Изучение существующих расчетных методов	2	18.02.2022	20.02.2022	инженер
7	Освоение методики расчета на практике	2	20.02.2022	22.02.2022	инженер
8	Проведение расчетов	62	22.02.2022	24.04.2022	инженер
9	Анализ полученных данных	3	24.04.2022	27.04.2022	инженер
10	Обобщение и оценка результатов	10	27.04.2022	07.05.2022	руководитель, инженер
11	Составление пояснительной записки	29	07.05.2022	05.06.2020	инженер

В таблице 22 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 22 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Название	Состав участников	Т <sub>к</sub> , кал. Дни	Продолжительность работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Разработка технического задания	руководитель	2														
2	Составление и утверждение технического задания	руководитель,	3														

3	Выбор направления исследования	руководитель, инженер	9																	
4	Подбор и изучение материалов по теме	инженер	2																	
5	Календарное планирование работ	руководитель, инженер	1																	
6	Изучение существующих расчетных методов	инженер	2																	
7	Освоение методики расчета на практике	инженер	2																	
8	Проведение расчетов	инженер	62																	
9	Анализ полученных данных	инженер	3																	
10	Обобщение и оценка результатов	руководитель, инженер	10																	
11	Составление пояснительной записки	инженер	29																	
					– руководитель					– инженер										

### 8.3.2 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;

- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

### 8.3.2.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}, \quad (29)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага	SvetoCopy	1 пачка	1150	1150
Печать на листе А4	–	460	2	920
Ручка	Cello	1	55	55
Всего за материалы				2125
Транспортно-заготовительные расходы				500
Итого по статье С <sub>м</sub>				2625

### 8.3.2.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме.

В данной исследовательской работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относится ПЭВМ.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}} / T, \quad (30)$$

где  $C_{\text{об}}$  – стоимость оборудования (руб);

$T$  – срок службы (дней).

$$C_{\text{аморт}} = (63200 / 1000) = 63,2 \text{ руб/дн.} \quad (31)$$

Оборудование использовалось в течение 120 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{\text{аморт(общ)}} = 63,2 \cdot 120 = 7584 \text{ руб.} \quad (32)$$

### 8.3.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Раздел включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением работы, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (33)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (34)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}, \quad (35)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней (таблица 24).

Таблица 24 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	60	49
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	239	250

Инженер, являющийся сотрудником лаборатории, имеет ежемесячный оклад, равный 13900 руб. Среднедневная оплата составляет:

$$Z_{\text{дн}} = (13900 \cdot 11,2) / 250 = 622,72 \text{ руб/день}. \quad (36)$$

Основной заработок инженера за время составляет:

$$Z_{\text{осн}} = 622,72 \cdot 120 = 74726,4 \text{ руб}. \quad (37)$$

Должностной оклад инженера за месяц:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{п}} = 13900 \cdot 1,3 = 18070 \text{ руб.}, \quad (38)$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Месячная заработная плата научного руководителя:

$$Z_M = Z_{mc} \cdot k_p = 52700 \cdot 1,3 = 68510 \text{ руб/месяц.} \quad (39)$$

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{дн} = (68510 \cdot 11,2) / 239 = 3210,51 \text{ руб/день.} \quad (40)$$

Основная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{осн} = 3210,51 \cdot 25 = 80262,8 \text{ руб.} \quad (41)$$

Результаты расчета основной заработной платы научного руководителя и инженера представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИР	$Z_{mc}, \text{руб}$	$k_p$	$Z_M, \text{руб}$	$Z_{дн}, \text{руб}$	$T_p, \text{раб.дн.}$	$Z_{осн}, \text{руб}$
Руководитель	52700	1,3	68510	3210,5	25	80262,8
Инженер (студент)	13900	1,3	18070	622,7	120	74726,4
Итого:						154989

#### 8.3.2.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (42)$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (12%);

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 26.

Таблица 26 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата, руб.	Руководитель	Инженер (студент)
Основная зарплата	80262,8	74726,4
Дополнительная зарплата	9631,5	8967,2
Зарплата исполнителя	89894,3	83693,6
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	173587,9	

### 8.3.2.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (43)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 173587,9 = 52076,4 \text{ руб.} \quad (44)$$

### 8.3.2.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + C_{\text{внеб}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{м}}), \quad (45)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 15-25 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем  $k_{\text{накл}} = 15 \%$ .

$$C_{\text{накл}} = 0,15 \cdot (173587,9 + 52076,4 + 7584 + 2625) = 35381 \text{ руб.} \quad (46)$$

### 8.3.2.7 Формирование бюджета затрат исследовательской работы

Расчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат работы, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Далее в таблице 27 приведено определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения.

Таблица 27 – Расчёт бюджета затрат научно-исследовательской работы

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	2625
2. Затраты на спецоборудование	7584
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	154989,2
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	18598,7
5. Отчисления во внебюджетные фонды	52076,4
6. Накладные расходы	35381
Бюджет затрат исследования	271254,3

#### 8.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Настоящая научно-исследовательская работы имеет одно исполнение, следовательно, определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением величины ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (47)$$

где  $I_{\text{фин}}^{\text{исп}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп}} = 1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (48)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы.

Таблица 28 – Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка
1. Производительность труда при использовании (скорость выполнения расчета)	0,05	3
2. Простота расчета	0,1	3
3. Потребность в оснащении химических лабораторий	0,15	3
4. Потребность в спектрометрическом оборудовании	0,1	4
5. Полнота и достоверность полученных данных	0,2	5
6. Время наработки данных	0,05	3
Итого	1	35

$$I_{pi} = 3 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,05 = 2,45 \quad (49)$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{испi}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = \frac{I_{р-испi}}{I_{финр}^{испi}}, \quad (50)$$

Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}}, \quad (51)$$

Таблица 29 – Эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Оценка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	2,45
3	Интегральный показатель эффективности	0,41

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет выбрать более эффективный вариант решения поставленной задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. В данном случае имеет место лишь один вариант решения задачи. Следовательно, он и предполагается лучшим.

## Выводы по разделу

1. Проведенный анализ конкурентных методов показал, что разработанная модель поведения радионуклидов в организме человека может успешно применяться. Ее ближайшим конкурентом является метод расчета внутреннего облучения с использованием данных по измерению радионуклидов на рабочем месте, который прост и быстр в использовании, но не дает достоверных и полных результатов.

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Определены общее количество календарных дней для выполнения работы – 124 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 119 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 19;

3. Определен бюджет затрат данной научно-исследовательской работы, который составил 271254 руб.;

4. В выполненной выпускной квалификационной работе были достигнуты экономические и технические критерии эффективности за счет функциональных возможностей разработки, а также социальные за счет востребованности исследования на рынке.

## 9. Социальная ответственность

Целью исследования является сравнение результатов моделирования поступления радионуклидов в организм человека с результатами биофизических измерений.

Для выполнения задания, требуется рассчитать ожидаемое поступление радионуклидов в организм с растительными и животными продуктами сельского хозяйства, провести спектрометрические анализы образцов урины исследуемой когорты, проживающей на загрязненных территориях, и сравнить полученные результаты с использованием биокинетических моделей радионуклидов. В результате будут получены данные по ожидаемому и фактическому годовому поступлению радионуклидов, а также их ожидаемое и фактическое содержание в образцах урины.

Решение поставленной задачи позволит провести валидацию модели перорального поступления радионуклидов, используемой МАГАТЭ. Так как мировым научным сообществом накоплено множество данных по оценке внутренней дозы облучения и поведения радионуклидов в теле человека, но этот опыт базируется в основном на экспериментальных исследованиях животных и модельных данных, а количество наблюдений над человеком является незначительным.

Всё выше перечисленное требует использования в качестве рабочего места – компьютерного стола с ЭВМ, соответствующего периферийного оборудования (компьютерная клавиатура, мышь и т.д.) и программного обеспечения (MS Word, Excel, Wolfram Mathematica). Выполнение настоящей ВКР производится в помещении № 49 корпуса 27 Института радиационной безопасности и экологии.

Вследствие чего, в данном разделе будут рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на процесс выполнения поставленного задания, рассмотрены правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

## **9.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **9.1.1. Правовые нормы трудового законодательства**

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [45]. В документе указывается, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником. При работе с вредными или опасными условиями труда длительность рабочего дня составляет 8 часов (при 36-часовой рабочей неделе) и 6 часов (при 30-часовой рабочей неделе). В ночное время продолжительность смены сокращается на 1 час. Каждому работнику должен быть предоставлен перерыв во время рабочего дня не менее 30 минут, но не более 2 часов, который не включается в рабочее время.

### **9.1.2. Организационно-технические мероприятия**

Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому присваивается квалификационная группа по технике безопасности, соответствующая его знаниям и опыту работы и выдается специальное удостоверение.

Рабочее место при работе с ПК должно составлять не менее чем 6 м<sup>2</sup> [46]. Помещение № 49 корпуса 27 Института радиационной безопасности и экологии

имеет площадь 30 м<sup>2</sup>, по 4,5 м<sup>2</sup> на одного оператора ЭВМ, что допустимо при использовании плоских дискретных экранов ПК.

Пространство для ног должно соответствовать следующим параметрам: высота пространства для ног не менее 600 мм, расстояние сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150 мм, а высота сиденья 420 мм [47].

Так же предусмотрены следующие требования к организации рабочего места пользователя ПЭВМ: конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления.

Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию [46].

## **9.2. Производственная безопасность**

### **9.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические [46]. Перечень опасных и вредных факторов в помещении № 49, влияющих на персонал, представлен в таблице 30.

Таблица 30 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
---------------------------------	-----------------------

1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
2. Неправильная организация систем вентиляции и кондиционирования воздуха	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.
3. Превышение уровня шума	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». СН 2.2.4/2.1.8.562-96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31.10.1996 г
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
5. Повышенный уровень электромагнитного излучения	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». СанПиН: 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к ВДТ и ПЭВМ. Организация работы»
6. Психофизиологические нагрузки	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
7. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

### 9.2.1.1 Микроклимат

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха [48]. При работе за ПЭВМ категория работ является легкой (Ia), поскольку не возникает систематических физических нагрузок [47]. Допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 31.

Таблица 31 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
-------------	--	-------------------------	------------------------------	------------------------------------	--------------------------------

		диапазон ниже оптималь- ных величин	диапазон выше оптималь- ных величин			диапазон ниже оптималь- ных величин	диапазон выше оптималь- ных величин
Холодный	Ia (до 139)	20,0-21,9	24,1-25,0	19-26	15-75	не более 0,1	
Теплый	Ia (до 139)	21,0-22,9	25,1-28,0	20-29	15-75	не более 0,1	не более 0,2

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Воздухообменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Площадь помещения № 49 корпуса 27 ИРБЭ, где проводилась работа, равна 30 м<sup>2</sup>, объем 90 м<sup>3</sup>, кратность воздухообмена 3 ч<sup>-1</sup> [48]. Следовательно, воздухообмен помещения равен 270 м<sup>3</sup>/ч. Для данного значения воздухообмена подойдет вихревая воздуходувка FPZ SCL K06 TD 7.5 мощностью 7,5 кВт и максимальной производительностью 312 м<sup>3</sup>/ч [54].

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в помещении № 49 корпуса 27 ИРБЭ регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с зимой и не более 0,2 м/с летом, температура летом – 21-28 °С, зимой – 20-25 °С [48].

Периодически должен вестись контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [48].

Показатели микроклимата в помещении 49 корпуса 27 ИРБЭ полностью соответствуют установленным нормативам [47, 48].

### **9.2.1.2 Шум и вибрация**

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Гигиеническими нормативами, используемыми для оценки уровней воздействия шума на рабочих местах, являются эквивалентный уровень звука ( $L_{pAeqT}$ , дБА); уровень, воздействующий на работающего за рабочую смену (измеренный или рассчитанный относительно 8 ч рабочей смены). Нормативным эквивалентным уровнем звука ( $L_{pAeqT}$ , дБА), на рабочих местах, является 80 дБА [47].

В помещениях для исследовательских работ имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов. В помещении 49 корпуса № 27 ИРБЭ внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование, персональный компьютер, принтер, вентиляционная система.

При возможном превышении ПДУ достаточно использовать в помещении звукопоглощающие материалы (звукопоглощающая облицовка стен и потолка, оконные шторы) [49].

Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон.

В помещении 49 корпуса № 27 ИРБЭ отсутствуют источники звука, способные превысить нормируемые показатели [47, 50].

### **9.2.1.3 Освещение**

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли. Утомляемость же органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

По нормативу [47] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [47].

Основным способом защиты от недостаточного освещения является соблюдение норм освещенности [47]. В помещении с III разрядом зрительных работ с высокой точностью освещенность должна составлять 300 лк, а коэффициент пульсации 15 %. Пульсации освещенности обусловлены малой инерционностью излучения газоразрядных ламп, световой поток от которых пульсирует при переменном токе промышленной частоты.

Число светильников для помещения рассчитывается:

$$n = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot K}{F \cdot U \cdot m}, \quad (52)$$

где  $E$  – нормированная освещенность,  $E = 300$  лк;

$S$  – площадь помещения,  $S = 30$  м<sup>2</sup>;

$Z$  – поправочный коэффициент светильника,  $Z = 1,2$ ;

$K$  – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности при эксплуатации,  $K = 1,2$ ;

$F$  – световой поток одной лампы, ЛД 40,  $F = 760$  лм;

$U$  – коэффициент использования,  $U = 0,55$ ;

$m$  – число ламп в светильнике,  $m = 4$ ,

$$n = \frac{300 \cdot 30 \cdot 1,2 \cdot 1,2}{760 \cdot 0,55 \cdot 4} = 7,75 \text{ шт.}$$

Округляя в большую сторону, получаем 8 светильников.

Организация рабочего места может защитить от недостаточного освещения. Освещенность рабочего места должна быть равномерной. Рабочий стол должен располагаться в хорошо освещенном месте, желательно у окна. Человек за столом должен располагаться лицом или левым боком к окну (правша). Светильники искусственного света должны располагаться относительно тела человека аналогичным образом [47].

#### 9.2.1.4 Электромагнитное излучение

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более [50]:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 2,5В/м.
- плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 25нТл.

Для защиты от электромагнитного излучения при возможном превышении ПДУ принимают следующие меры защиты:

- увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной;
- установка отражающих или поглощающих экранов;
- размещение в специальных оболочках токоведущих элементов аппаратов и устройств.

Расстановка ЭВМ и рабочее место пользователя в помещении 49 корпуса 27 ИРБЭ обеспечивают не превышение установленных нормативов по электромагнитному излучению [50].

### 9.2.1.5 Поражение электрическим током

Опасным фактором при работе с ЭВМ является поражение электрическим током. Удар током характеризуется тем, что резко возбуждает нервные окончания клеток тканей в месте прохождения импульса. Возникают спонтанные хаотичные сокращения мышечной ткани.

Степени поражения электрическим ударом в зависимости от состояний организма человека:

1. Мышечные судороги, полное сознание;
2. Мышечные судороги, отсутствие сознания;
3. Замирание диафрагмы, сердце работает;
4. Прекращение дыхания, паралич сердца – клиническая смерть.

Наиболее опасные последствия поражения электрическим током:

– Остановка сердца – жизненно-важный орган перестаёт функционировать от поражения током сердечной мышцы. Такое происходит, когда электроток стремится пройти напрямую через грудину

– Фибрилляция – сердце нормально работает, когда все желудочки ритмично прокачивают кровь. Ток может вызвать трепетание сердца. В результате живой насос перестаёт выполнять свою функцию. Кровь перестаёт циркулировать в сосудах, резко падает давление, и через 5-8 минут может наступить смерть. Вовремя оказанная первая помощь (совместное применение непрямого массажа сердца с искусственным дыханием) может пострадавшего спасти.

– Электрический шок – от удара током наступает тяжёлое нервно-рефлекторное состояние организма. Падает кровяное давление, замирают органы дыхания, возникают проблемы с обменом веществ. Человек оказывается в полном ступоре от десяти-пятнадцати минут, может оставаться в таком состоянии в течение суток. В случае неоказания экстренной помощи

травмированный человек может погибнуть. Вовремя оказанная помощь приведёт к тому, что пострадавший полностью выздоровеет.

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током. ГОСТ [51] устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека (таблица 32). Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек.

Таблица 32 – Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значение	
	$U_{пр}$ , В	$I_h$ , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в три раза [51].

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения [52];
- использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж

проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год. Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

Помещение 49 корпуса № 27 ИРБЭ соответствует установленным нормам по электробезопасности и относится к 1 группе «помещение без повышенной опасности» [51].

#### **9.2.1.6 Психофизиологические нагрузки**

Не менее важным для сохранения трудоспособности персонала является поддержание его психофизиологического здоровья.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки) [46].

Отрицательно на состояние здоровья отражается гиподинамия – нарушение функций организма (опорно-двигательного аппарата, кровообращения, дыхания, пищеварения и др.) при ограниченной двигательной активности, снижении сил сопротивления мышц. Профилактика гиподинамии предусматривает исключение статической работы, изменение рабочей позы в процессе работы, проведение производственной гимнастики с рациональным комплексом физических упражнений и т.п.

Напряженность внимания характеризуется длительностью сосредоточения наблюдения, числом объектов одновременного наблюдения, плотностью сигналов (световых, звуковых) и сообщений. Степень

напряженности анализаторских функций для зрительного анализатора зависит от размера объекта различения и расстояния объекта от глаз, различия в контрастности объекта различения и фона, для слухового анализатора – от соотношения между уровнями речи и шума. Эмоциональные напряжения вызывают изменения функционального состояния центральной нервной системы [47].

При работе в помещении 49 корпуса № 27 ИРБЭ основным психофизиологическим фактором является умственное перенапряжение и, как следствие, утомляемость. Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на рабочем месте – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания рабочих процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [45].

Помещение 49 корпуса № 27 ИРБЭ соответствует уставленным нормам по психофизиологическим нагрузкам [47].

### **9.2.2 Пожаровзрывобезопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории АН, БН, ВН, ГН и ДН [55].

Категории помещений и зданий определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов.

Категории наружных установок определяются, исходя из пожароопасных свойств находящихся в установках горючих веществ и материалов, их количества и особенностей технологических процессов.

Помещение 49 корпуса № 27 ИРБЭ относится по пожаровзрывобезопасности (ПВБ) к категории В4, согласно [55].

### **9.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **9.3.1. Анализ вероятных ЧС и АС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Есть два вида чрезвычайных ситуаций:

- техногенная;
- природная.

К техногенным ЧС можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ. К природным ЧС относятся природные катаклизмы. Наиболее вероятной техногенной ЧС являются пожары.

К опасностям несчастного случая относится внезапный и неуправляемый источник энергии:двигающийся предмет, неуправляемое движение или энергия [53].

Рассмотрим возможные аварийные ситуации (АС) в помещении № 49 корпуса 27 ИРБЭ, а именно:

- падение с высоты собственного роста;
- удар электрическим током;
- возникновение пожара.

Мероприятия по предотвращению и ликвидации вышеуказанных АС и ЧС представлены в таблице 33.

Таблица 33 – Возможные АС и ЧС, меры по их предотвращению и по ликвидации их последствий

№	АС и ЧС	Мероприятия по предотвращению	Мероприятия по ликвидации последствий АС и ЧС
1	Травмирование в результате падения с высоты собственного роста	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Содержание помещения в надлежащем порядке.</li> <li>2. Ограничение рабочего пространства.</li> <li>3. Своевременное проведение инструктажа.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Осмотреть или опросить пострадавшего.</li> <li>2. Если необходимо – вызвать скорую помощь (т. 112,103).</li> <li>3. Остановить кровотечение, если оно имеется.</li> <li>4. Если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.</li> </ol>
3	Удар электрическим током	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заземление всех электроустановок.</li> <li>2. Ограничение рабочего пространства</li> <li>3. Обеспечение недоступности токоведущих частей аппаратуры.</li> <li>4. Своевременное проведение инструктажа.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока.</li> <li>2. Вызвать скорую помощь (т.112).</li> <li>3. Если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, его следует удобно уложить, расстегнуть стесняющую одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой.</li> <li>4. Пострадавшему надо дать понюхать нашатырный спирт, сбрызнуть лицо водой, растереть и согреть тело.</li> </ol>
	Пожар	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Своевременное проведение инструктажа.</li> <li>2. Установление средств автоматического пожаротушения в помещениях.</li> <li>3. Установка датчиков дыма и огня.</li> <li>4. Обеспечение путей эвакуации и поддержание их в надлежащем состоянии.</li> <li>4. Контроль работы электроприборов.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обесточить помещение, прекратить поступление воздуха.</li> <li>2. Немедленно сообщить о пожаре руководителю подразделения и/или ответственному по пожарной безопасности в отделе, вызвать пожарную службу (т. 112,101).</li> <li>3. По возможности принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и спасению материальных ценностей.</li> </ol>

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении чрезвычайной ситуации необходимо:

- 1 сообщить руководству (дежурному);
- 2 позвонить в пожарно-спасательную службу или МЧС – тел. 112;
- 3 принять меры по ликвидации пожара в соответствии с инструкцией.

## Выводы по разделу

В данном разделе ВКР были рассмотрены вопросы социальной ответственности в рамках процесса исследования моделирования поступления радионуклидов в организм человека. Проведен анализ вредных и опасных факторов, возникающих в ходе исследовательского процесса;

- микроклимат [47, 48];
- шум [47, 49];
- освещение [47];
- электромагнитное излучение [50];
- поражение электрическим током [51];
- психофизиологические нагрузки [45, 47];

Помещение 49 корпуса №27 ИРБЭ отнесено:

- по электробезопасности к 1 группе «помещение без повышенной опасности» [51];
- по ПВБ к В4 [55].

Также в разделе рассмотрены возможные АС и ЧС, которые могут возникнуть в помещении 49 корпуса 27 ИРБЭ, и меры по их предотвращению и ликвидации их последствий.

В заключении можно отметить, что соблюдение всех норм и условий работы персонала, и правил эксплуатации каких-либо устройств сводит к минимуму всевозможные ЧС и травмы.

## Заключение

В результате выполнения научно-исследовательской работы рассчитано годовое поступление основных дозообразующих техногенных радионуклидов в организм человека с животноводческой и растениеводческой сельскохозяйственной продукцией, а также их предполагаемое содержание в образцах урины исследуемой когорты. В ходе литературного обзора по теме исследования выявлено, что мировое научное сообщество накопило уже множество данных по оценке внутренней дозы облучения и поведения радионуклидов в теле человека, но этот опыт базируется в основном на экспериментальных исследованиях животных и модельных данных. Количество же наблюдений над человеком, в сравнительном масштабе с общим объемом данных по этой теме, является незначительным в силу ограниченности опыта по значительным уровням воздействия излучения на организм. Таким образом, данные исследований по улучшению оценки внутренней дозы и тестированию биокинетических моделей вносят неоценимый вклад в уточнение параметров моделей и в увеличение надежности оценки прогнозов дозовой нагрузки.

По результатам сравнительного анализа моделирования поступления техногенных радионуклидов в организм человека, с имеющимися экспериментальными данными по биофизическим измерениям были получены следующие результаты:

1) Расчетное содержание  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  в урине ниже минимального экспериментального содержания в 0,02 и  $1,5 \cdot 10^{-6}$  Бк соответственно. Это можно объяснить следующими факторами:

- отсутствием в рекомендациях МАГАТЭ коэффициентов перехода данных радионуклидов для продукции животноводства (мяса птицы, молока овец, сметаны, творога), что привело к занижению расчетного содержания;
- недостаточным временем измерения образцов на  $^{239+240}\text{Pu}$  (измерение одного образца – 7 дней).

2) Полученное расчетное содержание  $^{90}\text{Sr}$  в моче в 0,05 Бк сравнимо с экспериментальным, так как 53 образца из 71 соответствуют данному значению. Максимальное значение измеренного содержания цезия в моче составило 0,4 Бк, что сопоставимо с порядком расчетного значения в 0,7 Бк. Небольшое расхождение объясняется следующими факторами:

- неточностью расчетной биокинетической модели цезия. Так как не были найдены данные МКРЗ о скоростях перехода между камерами биокинетической модели, для расчетов была выбрана модель, взятая из публикации Р. Легетта «Физиологически обоснованная биокинетическая модель цезия в организме человека». Результаты расчета показали небольшое расхождение с табличными данными значений функции выведения МКРЗ, особенно явными в промежутке до 100 суток.

- вариативностью количественного потребления исследуемой когортой продуктов питания, содержащих цезий.

Таким образом, применяя методику расчета дозы внутреннего облучения населения, обусловленного приемом загрязненной пищи, необходимо учитывать вероятность занижения результатов определения дозы при использовании моделей  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . Моделирование поступления  $^{90}\text{Sr}$  показало совпадение с экспериментальными результатами измерения образцов мочи в 74% случаев. Модель  $^{137}\text{Cs}$  позволяет получить только сравнимые порядки экспериментальных и расчетных значений.

## Список публикаций студента

1. Каширский В. В., Романенко Е.В. и др. О некоторых характерных параметрах радионуклидного загрязнения бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Ядерная и радиационная безопасность. – 2019. – №. 3. – С. 14-25.

2. A.B. Addo, E.V. Romanenko, G.A. Yakovlev, V.S. Yakovleva. Numerical Investigation of Radon Flux From Soil Into Atmosphere Through Snow Cover // Тезисы докладов XXVII конференции "Аэрозоли Сибири", 24-27 ноября 2020 года, г.Томск. – 124 с.

3. Шатров А.Н., Топорова А.В., Берикхан К.А., Романенко Е.В. Биофизические методы внутренней дозиметрии и расчет доз внутреннего облучения // Тезисы докладов IX Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы урановой промышленности», 7-9 ноября 2019 года, г. Алматы, Казахстан.

4. Романенко Е. В., Умаров М. А., Яковлев Г. А. Моделирование поступления радионуклидов в организм человека, проживающего на территории, подверженной влиянию Семипалатинского испытательного полигона // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 38. № 1. С. 147-165. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-38-1-147-165

## Список использованных источников

5. Топорова А.В., Бакланова Ю.В., Стрильчук Ю.Г., Шатров А.Н. Обзор методических указаний и рекомендаций по оценке годовой эффективной дозы человека при проживании на радиоактивно загрязненной территории. Вестник НЯЦ РК. 2021;(2):57-69.
6. Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду: методические рекомендации 2.6.1.2222-07/под.ред. В.Ю. Голиков, Г.Я. Брук, М.И. Балонов, В.Н. Шутов, М.В. Кадука, А.Н. Барковский, М.Н. Савкин. СПб, 2007, 18 с.
7. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: методические рекомендации МР 2.6.1.0063-12 // под.ред. Г.Г. Онищенко, 2012, 48 с.
8. Брук Г. Я. и др. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС //Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12. – №. 2 (св). – С. 66-74.
9. СЕРИЯ НОРМ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ, № RS-G-1.8. Мониторинг окружающей среды и источников для целей радиационной защиты. Вена. 2016С – 100.
10. Радиозэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk-1-izdanie-2.pdf/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Язык русский. Дата обращения: 05.05.21 г.
11. Giussani A., Risica S. Validation of the ICRP model for caesium intake by lactating mothers with Italian data after the Chernobyl fallout //Environment international. – 2012. – Т. 39. – №. 1. – С. 122-127.
12. Байгазинов, Ж.А. Экспериментальное исследование особенностей перехода искусственных радионуклидов в органы и ткани овец в условиях СИП

/ Ж.А. Байгазинов, А.В. Паницкий, С.Н. Лукашенко, С.А. Келлер // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана [Сборник трудов Института 378 радиационной безопасности и экологии за 2007 – 2009гг.]. – Вып. 2. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С.355 - 380.

13. Alexakhin R. M. et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts //Health physics. – 2007. – Т. 93. – №. 5. – С. 418-426.

14. Wahl W. et al. Comparison between Modelling and in vivo Measurements of Natural Radionuclides in Man for Proof of the Biokinetic Model and for Reconstruction of the Radiation Exposure //11th International Congress of the International Radiation Protection Association, 23-28 May 2004, Madrid. Spain: Full paper. – 2004.

15. Tolstykh E. I. et al. Validation of biokinetic models for strontium: Analysis of the Techa River and Chernobyl data //measurements. – 1998. – Т. 70. – С. 3.8.

16. Karunakara N. et al. Studies on soil to grass transfer factor ( $F_v$ ) and grass to milk transfer coefficient ( $F_m$ ) for cesium in Kaiga region //Journal of environmental radioactivity. – 2013. – Т. 124. – С. 101-112.

17. Wu Q. et al. Elemental transfer from Chinese soil via the diet to the whole human body //Journal of Radiological Protection. – 2008. – Т. 28. – №. 4. – С. 573.

18. Pourimani R., Anoosheh F. A study on transfer factors of environmental radionuclides: radionuclide transfer from soil to different varieties of rice in Gorgan, Iran //Iranian Journal of Medical Physics. – 2015. – Т. 12. – №. 3. – С. 189-199.

19. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние (Том 2) / Н. А. Назарбаев [и др.]. - Курчатов. - 2016. - 595 с.

20. «Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectraLine»» ФГУП ВНИИФТРИ, г. Москва

21. «Определение содержания искусственных радионуклидов плутония – (239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях)», Алматы, 2010, 25 с.

22. Методика выполнения измерений «Определение удельной активности искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90», РГП ИЯФ, 2016 г.

23. Шестаков Ю. Г. Математические методы в геологии: Учебное пособие. – Красноярского ун-та, 1988.

24. К вопросу о вариативности поступления искусственных радионуклидов в растениеводческую продукцию при её производстве на пл. «Опытное поле» территории СИП [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 гг.] / под рук. С.Н. Лукашенко. –Вып. 4. – Т.2. – Павлодар: Дом печати, 2013 – С. 113-135.

25. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности»: утв. Постановлением Правительства РК № 155 от 27.02.2015 г.

26. Оценка качества сельскохозяйственной растениеводческой продукции при ее производстве на условно «фоновых» территориях СИП // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана. Выпуск 5. Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот / под рук. Лукашенко С.Н.– Павлодар: Домпечати, 2015. – с. 249-268

27. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments, IAEA -TECDOC-1616. – Vienna: IAEA, 2009

28. Корнеев Н. А., Сироткин А. Н. Основы радиозологии сельскохозяйственных животных //М.: Энергоатомиздат. – 1987. – С. 30-56.

29. Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г. и др. Сельскохозяйственная радиозология /Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.

30. Полезные камешки для домашней птицы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://forum.rmnt.ru/threads/poleznye-kameshki-dlja-domashnej-pticy.102290/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Язык русский. Дата обращения: 05.05.21 г.
31. Сколько весит куриное яйцо. Вес по маркировке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vesit-skolko.ru/yajco-jajco/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Язык русский. Дата обращения: 05.05.21 г
32. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 78// Annals of the ICRP. 1994. V. 24. N 1-3.
33. МКРЗ 30 Публикация 30 МКРЗ «Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением», М.: Энергоиздат, 1982, 135 с.
34. SRS-37 Companion CD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1190/tables.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Язык русский. Дата обращения: 25.07.21 г.
35. Leggett R. W. et al. A physiologically based biokinetic model for cesium in the human body //Science of the total environment. – 2003. – Т. 317. – №. 1-3. – С. 235-255.
36. Miller G. et al. An empirical multivariate log-normal distribution representing uncertainty of biokinetic parameters for <sup>137</sup>Cs //Radiation protection dosimetry. – 2008. – Т. 131. – №. 2. – С. 198-211.
37. Рабочая инструкция «Подготовка проб к лабораторным анализам в отделе аналитических исследований Филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК». Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК». – г. Курчатов, 2018.
38. Рабочая инструкция «Выполнение измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах на гамма-спектрометрах с полупроводниковым блоком детектирования». Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК». – г. Курчатов, 2018.

39. Рабочая инструкция «Выполнение измерений счетных образцов  $^{90}\text{Y}$  ( $^{90}\text{Sr}$ ) на жидко-сцинтилляционном спектрометре «TRI-CARB 2910TR». Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК». – г. Курчатов, 2018.

40. Рабочая инструкция «Выполнение измерений изотопов плутония в счетных образцах на альфа-спектрометре с полупроводниковым блоком детектирования». Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК». – г. Курчатов, 2018.

41. Рабочая инструкция «Порядок выполнения радиохимического выделения плутония – ( $^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$ ) из проб окружающей среды». Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК». – г. Курчатов, 2018.

42. Рабочая инструкция «Порядок выполнения радиохимического выделения стронция-90 из проб окружающей среды». Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК». – г. Курчатов, 2018.

43. Рабочая инструкция «Оценка доз внутреннего облучения человека с использованием биокинетических моделей», Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК», г. Курчатов, 2019 г., 31 с.

44. Видяев И. Г., Серикова Г. Н., Гаврикова Н. А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие //ИГ Видяев, ГН Серикова, НА Гаврикова, НВ Шаповалова, ЛР Тухватулина ЗВ Криницына. – 2014.

45. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197.

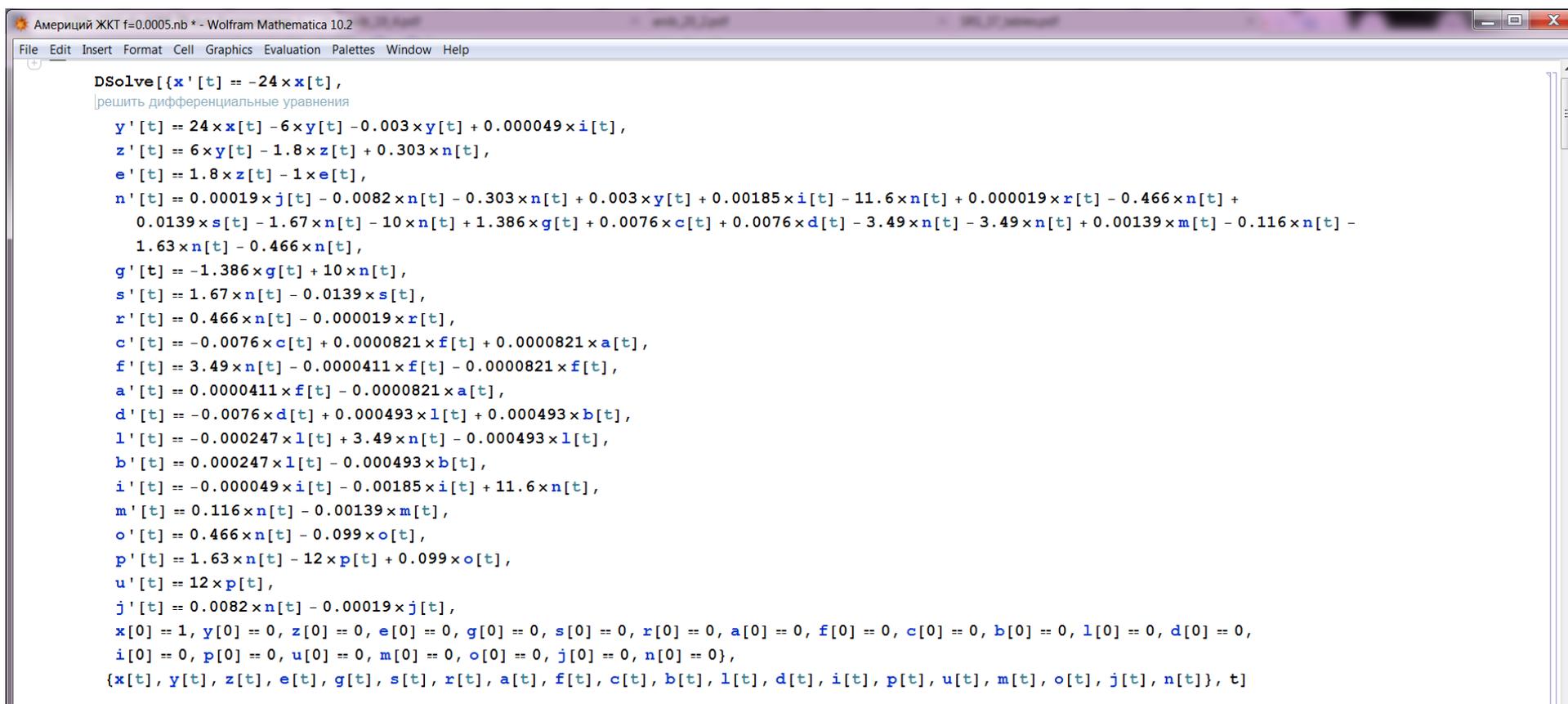
46. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.М.: Стандартинформ, 2016.

47. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Текст]. – введ. 2021-01-28

48. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2021

49. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31.10.1996 г.
50. СанПиН: 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к ВДТ и ПЭВМ. Организация работы» – введ. 1996-04-14
51. ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов»
52. ГОСТ Р 12.1.019-2017 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» – введ. 2019-01-01
53. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования [Текст]. – введ. 1991-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999 – С.6.
54. Воздуходувки.про. – URL: <https://vozduhoduvki.pro/> (дата обращения 14.04.2022). – Текст: электронный.
55. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»

## Приложение А



```
Америций ЖКТ f=0.0005.nb * - Wolfram Mathematica 10.2
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
DSolve[{x'[t] == -24 x[t],
|решить дифференциальные уравнения
y'[t] == 24 x[t] - 6 y[t] - 0.003 y[t] + 0.000049 i[t],
z'[t] == 6 y[t] - 1.8 z[t] + 0.303 n[t],
e'[t] == 1.8 z[t] - 1 e[t],
n'[t] == 0.00019 j[t] - 0.0082 n[t] - 0.303 n[t] + 0.003 y[t] + 0.00185 i[t] - 11.6 n[t] + 0.000019 r[t] - 0.466 n[t] +
0.0139 s[t] - 1.67 n[t] - 10 n[t] + 1.386 g[t] + 0.0076 c[t] + 0.0076 d[t] - 3.49 n[t] - 3.49 n[t] + 0.00139 m[t] - 0.116 n[t] -
1.63 n[t] - 0.466 n[t],
g'[t] == -1.386 g[t] + 10 n[t],
s'[t] == 1.67 n[t] - 0.0139 s[t],
r'[t] == 0.466 n[t] - 0.000019 r[t],
c'[t] == -0.0076 c[t] + 0.0000821 f[t] + 0.0000821 a[t],
f'[t] == 3.49 n[t] - 0.0000411 f[t] - 0.0000821 f[t],
a'[t] == 0.0000411 f[t] - 0.0000821 a[t],
d'[t] == -0.0076 d[t] + 0.000493 l[t] + 0.000493 b[t],
l'[t] == -0.000247 l[t] + 3.49 n[t] - 0.000493 l[t],
b'[t] == 0.000247 l[t] - 0.000493 b[t],
i'[t] == -0.000049 i[t] - 0.00185 i[t] + 11.6 n[t],
m'[t] == 0.116 n[t] - 0.00139 m[t],
o'[t] == 0.466 n[t] - 0.099 o[t],
p'[t] == 1.63 n[t] - 12 p[t] + 0.099 o[t],
u'[t] == 12 p[t],
j'[t] == 0.0082 n[t] - 0.00019 j[t],
x[0] == 1, y[0] == 0, z[0] == 0, e[0] == 0, g[0] == 0, s[0] == 0, r[0] == 0, a[0] == 0, f[0] == 0, c[0] == 0, b[0] == 0, l[0] == 0, d[0] == 0,
i[0] == 0, p[0] == 0, u[0] == 0, m[0] == 0, o[0] == 0, j[0] == 0, n[0] == 0},
{x[t], y[t], z[t], e[t], g[t], s[t], r[t], a[t], f[t], c[t], b[t], l[t], d[t], i[t], p[t], u[t], m[t], o[t], j[t], n[t]}, t]
```

Рисунок А.1 – Система дифференциальных уравнений, описывающая биокинетическую модель перорального поступления америция-241

```

Плутоний-238+239+240+241 ЖКТ f=0.00001.nb * - Wolfram Mathematica 10.2
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
DSolve[{x'[t] == -24 x[t],
|решить дифференциальные уравнения
y'[t] == 24 x[t] - 6 y[t] - 0.00006 y[t] + 0.000133 i[t],
z'[t] == 6 y[t] - 1.8 z[t] + 0.0129 n[t],
e'[t] == 1.8 z[t] - 1 e[t],
n'[t] == 0.00019 j[t] - 0.00023 n[t] - 0.0129 n[t] + 0.00006 y[t] - 0.1941 n[t] + 0.000211 v[t] + 0.000019 r[t] - 0.0129 n[t] +
0.000475 s[t] - 0.0806 n[t] - 0.2773 n[t] + 0.693 g[t] + 0.0076 c[t] + 0.0076 d[t] + 0.00139 m[t] - 0.00323 n[t] - 0.0129 n[t] -
0.00647 n[t] - 0.1941 n[t] - 0.1294 n[t],
g'[t] == -0.693 g[t] + 0.2773 n[t],
s'[t] == 0.0806 n[t] - 0.000475 s[t] - 0.000475 s[t],
r'[t] == 0.0129 n[t] - 0.000019 r[t],
c'[t] == -0.0076 c[t] + 0.0000821 f[t] + 0.0000821 a[t],
f'[t] == 0.1294 n[t] - 0.0000821 f[t] - 0.0000411 f[t],
a'[t] == 0.0000411 f[t] - 0.0000821 a[t],
d'[t] == -0.0076 d[t] + 0.000493 l[t] + 0.000493 b[t],
l'[t] == -0.000247 l[t] + 0.1941 n[t] - 0.000493 l[t],
b'[t] == 0.000247 l[t] - 0.000493 b[t],
v'[t] == 0.00177 i[t] - 0.000211 v[t],
i'[t] == -0.000133 i[t] - 0.00177 i[t] + 0.1941 n[t],
m'[t] == 0.00323 n[t] - 0.00139 m[t],
o'[t] == 0.00647 n[t] - 0.01386 o[t],
p'[t] == 0.0129 n[t] - 12 p[t] + 0.000475 s[t] + 0.01386 o[t],
u'[t] == 12 p[t],
j'[t] == 0.00023 n[t] - 0.00019 j[t],
x[0] == 1, y[0] == 0, z[0] == 0, e[0] == 0, g[0] == 0, s[0] == 0, r[0] == 0, a[0] == 0, f[0] == 0, c[0] == 0, b[0] == 0, l[0] == 0, d[0] == 0,
v[0] == 0, i[0] == 0, p[0] == 0, u[0] == 0, m[0] == 0, o[0] == 0, j[0] == 0, n[0] == 0},
{x[t], y[t], z[t], e[t], g[t], s[t], r[t], a[t], f[t], c[t], b[t], l[t], d[t], v[t], i[t], p[t], u[t], m[t], o[t], j[t], n[t]}, t]

```

Рисунок А.2 – Система дифференциальных уравнений, описывающая биокинетическую модель перорального поступления оксидов плутония-239+240

```

DSolve[{x'[t] == -24 x[t],
|решить дифференциальные уравнения
y'[t] == 24 x[t] - 6 y[t] - 2.57 y[t],
z'[t] == 6 y[t] - 1.8 z[t] + 0.525 n[t],
e'[t] == 1.8 z[t] - 1 e[t],
n'[t] == 2.50 g[t] - 7.50 n[t] - 1.50 n[t] + 0.116 s[t] - 0.003 n[t] + 0.000380 x[t] - 0.525 n[t] -
1.67 n[t] + 0.578 c[t] + 0.0000821 a[t] - 2.08 n[t] + 0.578 d[t] + 0.000493 b[t] - 1.73 n[t] + 2.57 y[t],
g'[t] == -2.50 g[t] + 7.50 n[t],
s'[t] == 1.50 n[t] - 0.116 s[t],
r'[t] == 0.003 n[t] - 0.000380 r[t],
a'[t] == 0.00430 f[t] - 0.0000821 a[t],
f'[t] == 0.116 c[t] - 0.00430 f[t] - 0.00430 f[t],
c'[t] == -0.116 c[t] + 0.00430 f[t] + 1.67 n[t] - 0.578 c[t],
b'[t] == 0.00430 l[t] - 0.000493 b[t],
l'[t] == -0.00430 l[t] + 0.116 d[t] - 0.00430 l[t],
d'[t] == -0.116 d[t] + 0.00430 l[t] + 2.08 n[t] - 0.578 d[t],
p'[t] == 1.73 n[t] - 4.08 p[t],
u'[t] == 4.08 p[t],
x[0] == 1, y[0] == 0, z[0] == 0, e[0] == 0, g[0] == 0, s[0] == 0, r[0] == 0, a[0] == 0, f[0] == 0, c[0] == 0, b[0] == 0,
l[0] == 0, d[0] == 0, p[0] == 0, u[0] == 0, n[0] == 0},
{x[t], y[t], z[t], e[t], g[t], s[t], r[t], a[t], f[t], c[t], b[t], l[t], d[t], p[t], u[t], n[t]}, t]

```

Рисунок А.3 – Система дифференциальных уравнений, описывающая биокинетическую модель перорального поступления растворимых солей стронция-90

```

DSolve[{x'[t] == -24 x[t], y'[t] == 24 x[t] - 6 y[t] - 5994 y[t], n'[t] == 5994 y[t] - 0.3 n[t] - 2 n[t], z'[t] == 6 y[t] - 1.8 z[t],
|решить дифференциальные уравнения
e'[t] == 1.8 z[t] - 1 e[t], a'[t] == 0.3 n[t] - 0.07 a[t] - 0.3 a[t], b'[t] == 2 n[t] - 0.001 b[t] - 0.005 b[t],
f'[t] == 0.07 a[t] + 0.001 b[t], u'[t] == 0.005 b[t] + 0.3 a[t], x[0] == 1, y[0] == 0, z[0] == 0, e[0] == 0, n[0] == 0, a[0] == 0, b[0] == 0, f[0] == 0, u[0] == 0},
{x[t], y[t], z[t], e[t], n[t], a[t], b[t], f[t], u[t]}, t]

```

Рисунок А.4 – Система дифференциальных уравнений, описывающая биокинетическую модель перорального поступления цезия-137

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Результаты анализа определения удельной активности радионуклидов в урине исследуемой когорты

№ п/п	Пол	Возраст, лет	Анализ биосубстратов, Бк/л			
			<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu
1	М	75	< 0,02	< 0,02	< 0,06	< 0,02
2	М	70	< 0,02	< 0,02	0,74 ± 0,05	< 2,0·10 <sup>-3</sup>
3	Ж	73	< 0,02	< 0,03	< 0,07	< 2,0·10 <sup>-3</sup>
4	М	79	< 0,02	< 0,02	1,02 ± 0,12	< 8,0·10 <sup>-3</sup>
5	Ж	72	< 0,01	< 0,02	0,34 ± 0,06	< 8,0·10 <sup>-4</sup>
6	Ж	51	< 0,02	< 0,03	< 0,03	0,40 ± 0,18
7	Ж	33	< 0,01	< 0,01	0,11 ± 0,03	< 0,01
8	Ж	67	< 0,02	0,02 ± 0,01	0,06 ± 0,01	< 0,01
9	Ж	61	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 2,0·10 <sup>-3</sup>
10	Ж	56	< 0,01	< 0,02	< 0,11	< 4,0·10 <sup>-3</sup>
11	М	67	< 0,02	< 0,03	< 0,04	< 2,0·10 <sup>-3</sup>
12	М	76	< 0,04	< 0,05	0,46 ± 0,15	< 0,19
13	Ж	71	< 0,02	< 0,02	< 0,04	Нет данных
14	Ж	75	< 0,06	0,16 ± 0,05	< 0,21	< 0,02
15	Ж	33	< 0,07	0,18 ± 0,06	< 0,04	< 8,0·10 <sup>-4</sup>
16	М	33	< 0,03	< 0,05	0,21 ± 0,04	Нет данных
17	Ж	65	< 0,02	< 0,03	0,09 ± 0,03	< 0,01
18	Ж	76	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 9,0·10 <sup>-3</sup>
19	Ж	66	< 0,02	< 0,06	0,77 ± 0,08	< 0,01
20	М	70	Нет данных	Нет данных	0,13 ± 0,02	< 0,01
21	Ж	66	< 0,01	0,05 ± 0,01	0,16 ± 0,03	< 4,0·10 <sup>-3</sup>
22	Ж	66	< 0,03	< 0,03	< 0,06	< 1,3·10 <sup>-3</sup>

№ п/п	Пол	Возраст, лет	Анализ биосубстратов, Бк/л			
			<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu
23	Ж	75	< 0,02	0,07 ± 0,01	Нет данных	< 1,6·10 <sup>-3</sup>
24	М	77	< 0,02	< 0,03	< 0,06	< 1,2·10 <sup>-3</sup>
25	М	73	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 5,0·10 <sup>-3</sup>
26	М	74	< 0,01	< 0,01	< 0,03	< 1,2·10 <sup>-3</sup>
27	М	74	< 0,01	< 0,01	< 0,03	< 4,1·10 <sup>-3</sup>
28	М	61	< 0,01	< 0,03	0,04 ± 0,01	< 7,0·10 <sup>-4</sup>
29	М	36	< 0,01	0,02 ± 0,01	< 0,02	< 7,0·10 <sup>-4</sup>
30	Ж	76	< 0,04	< 0,05	< 0,03	< 0,01
31	Ж	75	< 0,04	< 0,08	1,09 ± 0,08	Нет данных
32	М	61	< 0,03	< 0,06	< 0,04	Нет данных
33	М	54	< 0,01	< 0,02	< 0,03	Нет данных
34	Ж	30	< 0,02	< 0,05	< 0,04	< 8,0·10 <sup>-3</sup>
35	М	54	< 0,01	< 0,08	Нет данных	Нет данных
36	Ж	51	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 6,0·10 <sup>-4</sup>
37	Ж	60	< 0,01	< 0,03	< 0,03	< 5,8·10 <sup>-3</sup>
38	М	71	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 3,6·10 <sup>-4</sup>
39	Ж	56	< 0,06	< 0,03	< 0,05	< 2,0·10 <sup>-3</sup>
40	Ж	73	< 0,02	< 0,04	0,22 ± 0,11	< 0,19
41	Ж	64	< 0,01	< 0,01	0,60 ± 0,02	< 7,0·10 <sup>-4</sup>
42	Ж	29	< 0,02	< 0,04	0,07 ± 0,03	< 9,0·10 <sup>-4</sup>
43	Ж	41	< 0,05	< 0,05	< 0,03	7,0·10 <sup>-4</sup> ± 3,0·10 <sup>-4</sup>
44	Ж	33	< 0,01	< 0,02	< 0,04	< 2,0·10 <sup>-3</sup>
45	Ж	29	< 0,05	< 0,07	< 0,05	< 1,0·10 <sup>-3</sup>
46	Ж	25	< 0,01	0,03 ± 0,01	< 0,03	9,2·10 <sup>-3</sup> ± 1,7·10 <sup>-3</sup>
47	Ж	28	< 0,01	0,03 ± 0,01	< 0,05	0,010 ± 0,002
48	М	78	< 0,01	< 0,01	< 0,03	4,4·10 <sup>-3</sup> ± 2,7·10 <sup>-3</sup>

№ п/п	Пол	Возраст, лет	Анализ биосубстратов, Бк/л			
			<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu
49	Ж	57	< 0,01	< 0,02	< 0,01	$6,6 \cdot 10^{-4} \pm 1,1 \cdot 10^{-4}$
50	Ж	72	< 0,01	< 0,03	< 0,02	$1,1 \cdot 10^{-3} \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$
51	Ж	43	< 0,02	< 0,05	< 0,04	$1,0 \cdot 10^{-3} \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$
52	Ж	64	< 0,01	< 0,01	< 0,02	$4,1 \cdot 10^{-3} \pm 1,6 \cdot 10^{-3}$
53	Ж	52	< 0,01	< 0,01	Нет данных	$5,4 \cdot 10^{-4} \pm 2,5 \cdot 10^{-4}$
54	М	56	< 0,01	< 0,03	Нет данных	$< 6,0 \cdot 10^{-4}$
55	Ж	56	< 0,01	< 0,04	< 0,03	$2,5 \cdot 10^{-3} \pm 0,6 \cdot 10^{-3}$
56	Ж	17	< 0,01	< 0,03	< 0,06	$1,8 \cdot 10^{-3} \pm 0,6 \cdot 10^{-3}$
57	Ж	17	< 0,03	< 0,07	< 0,02	$< 4,0 \cdot 10^{-4}$
58	Ж	84	< 0,01	< 0,01	< 0,05	Нет данных
59	Ж	36	< 0,01	< 0,02	< 0,04	$6,8 \cdot 10^{-4} \pm 1,8 \cdot 10^{-4}$
60	М	58	< 0,01	< 0,03	< 0,02	$2,6 \cdot 10^{-3} \pm 0,4 \cdot 10^{-3}$
61	Ж	52	< 0,02	< 0,02	< 0,03	$7,3 \cdot 10^{-4} \pm 1,5 \cdot 10^{-4}$
62	М	29	< 0,01	< 0,02	$0,05 \pm 0,02$	Нет данных
63	М	15	< 0,01	< 0,04	< 0,04	$< 1,0 \cdot 10^{-4}$
64	М	17	< 0,01	< 0,02	< 0,03	$< 1,0 \cdot 10^{-4}$
65	М	18	< 0,02	< 0,04	< 0,03	$< 2,0 \cdot 10^{-4}$
66	М	59	< 0,01	< 0,01	< 0,02	$< 3,0 \cdot 10^{-5}$
67	Ж	16	< 0,01	< 0,01	< 0,01	$< 1,0 \cdot 10^{-4}$
68	Ж	59	< 0,01	< 0,01	< 0,01	$0,011 \pm 0,003$
69	Ж	50	< 0,01	< 0,01	< 0,01	Нет данных
70	Ж	53	< 0,01	< 0,01	< 0,01	$< 1,0 \cdot 10^{-6}$
71	Ж	49	< 0,02	< 0,01	< 0,02	Нет данных



## Приложение Г

(справочное)

Introduction  
Objects of Research  
Assessment of Radionuclide Intake into the Human Body with Food

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM03	Романенко Е.В.		

Консультант школы отделения (НОЦ) ИЯТШ, ОЯТЦ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	В.С. Яковлева	д.т.н.		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Утятина Я.В.			

## Introduction

The population living in areas contaminated with long-lived radionuclides is usually exposed through multiple pathways. The components of internal exposure doses (inhalation and ingestion) depend on the isotopic composition, physical and chemical form of the radionuclides, on environmental conditions, and on the habits of the population.

Internal doses to a critical population group under conditions of exposure due to ingestion of contaminated food and/or drinking water are determined on the basis of soil (or water) monitoring data using a simple calculation model. The model takes into account the origin and consumption rate of specific foodstuffs and the transfer coefficients of radionuclides from soil or water to the plant or animals.

There are a number of methodological guidelines in which the calculation of radionuclide intake into the human body is carried out using models of radionuclide transfer into the soil and into the air [1, 2, 3]. As a rule, the above parameters are tabulated unambiguously in the recommendations on dose assessment. However, it is clear that, in fact, these values can vary significantly. Transfer coefficients to crop and livestock products depend on a large number of factors: soil type, radionuclide residence forms, climatic conditions, and the mineral composition of fresh water. Similarly, in the case of inhalation intake, aerodynamic particle sizes, solubility class, respiration rate, and human physical activity have a great influence. Often these parameters are unknown, and the ICRP recommended values or a conservative approach are used in estimating doses. As a consequence, the intake of radionuclides into the population can be either underestimated or overestimated. According to an IAEA publication, "the most reliable method of validating an oral intake model is to compare its predictions with estimates of internal dose based on individual measurements of body radionuclide content, performed by counting whole body radioactivity or analyzing radionuclide concentrations in excreta." [4].

Since 2010, the Institute of Radiation Safety and Ecology of NNC RK has conducted a set of radioecological studies of the territory of the Semipalatinsk nuclear

test site (STS). These studies also include an assessment of dose loads of the population living and conducting agricultural activities in the territory affected by the STS. A sufficiently large body of data has already been accumulated on the content of major dose-forming radionuclides in the human body and in various biosubstrates (particularly, in urine). There are many results of studies of soil cover, air environment, water; radionuclide content in plants, agricultural and livestock products produced in the contaminated territories.

Thus, the relevance of this work lies in the fact that it provides an opportunity to conduct a comparative analysis of the simulation of man-made radionuclides in the human body, with the available experimental data on biophysical measurements.

In accordance with this, the purpose of the research work is to compare the results of modeling of radionuclide intake into the human body with the results of biophysical measurements.

The work includes modeling of radionuclide transfer processes in agricultural products, calculation of annual radionuclide intake into the human body with food, as well as the following tasks:

- review of the literature on the topic of research;
- the choice of the object of research;
- assessment of the concentrations of the main dose-forming radionuclides in the soil of the object;
- the choice of the cohort of the study population;
- assessment of radionuclide intake into the human body with agricultural products;
- calculation of radionuclide excretion functions in chronic oral intake;
- analysis of data on measurement of urine samples of the study cohort;
- calculation and comparison of the expected model and actual content of radionuclides in urine samples, as well as their expected and actual annual intake.

## **1 Literary Review of the Topic of Research**

The world scientific community has already accumulated a lot of data on the assessment of internal radiation dose and the behavior of radionuclides in the human body. But, as mentioned above, this experience is based mainly on experimental studies of animals and model data. The number of observations on humans, in comparison with the total amount of data on this topic, is insignificant because of the limited experience with significant levels of exposure to radiation on the body.

For example, in the work "Validation of the ICRP model for caesium intake by lactating mothers with Italian data after the Chernobyl fallout" [5] a research program on transfer of  $^{137}\text{Cs}$  into mother's milk was carried out. Maternal dietary cesium intake and transfer to breast milk were assessed, and activity concentrations in urine and placenta were also determined. A good agreement was obtained between the measured data and modeling of caesium activity in milk.

R.M. Aleksakhin's article "Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts" [6] talks about the consumption of agricultural products containing radionuclides as a source of population exposure. In the long-term post-accident period, the distribution of radionuclides between ecosystem components (including people) and doses is considered in comparison with the situation of technologically normal operation of nuclear power plants.

In a joint paper by German and Finnish scientists, "Comparison between Modelling and in vivo Measurements of Natural Radionuclides in Man for Proof of the Biokinetic Model and for Reconstruction of the Radiation Exposure" [7] an experiment was conducted to determine natural uranium concentration in urine samples of a Finnish family of five living in southern Finland, whose indigenous rocks contain large amounts of natural uranium. Information was collected on the use of well water, daily drink consumption and dietary habits. Inductively coupled mass spectrometry (ICP-MS) was used to determine uranium in the urine of members of this family. The ICP-MS biokinetic model was used to estimate the distribution, retention, and excretion of

uranium, taking into account the age of the subject. By comparing measured and calculated data, the biokinetic model can be validated and improved.

In the research work [8], to verify and validate the strontium biokinetic model, its content was measured in bone samples of residents of the area contaminated as a result of the Chernobyl accident. We also took previously unpublished data on WBC measurements and bone tissue samples of the population living in the Techa River area of the Urals Research Center for Radiation Medicine and reconstructed strontium intake along the chain "deposition - soil - milk (and other foods) - man".

In the work of Indian researchers, "Studies on soil to grass transfer factor ( $F_v$ ) and grass to milk transfer coefficient ( $F_m$ ) for cesium in Kaiga region" [9], cesium transfer factors were determined experimentally and its internal intake for adults and children was calculated taking into account their dietary habits.

In the article [10], the values of transition coefficients of alkali metals and rare-earth elements from soil through food to critical organs and the whole organism were calculated. The basis for the task was the results of studies of food consumption, measured radionuclide content in the organs and tissues of adult men and their concentration in the soil.

In the article "A study on transfer factors of environmental radionuclides: radionuclide transfer from soil to different varieties of rice in Gorgan" [11], samples of rice, soil, and water collected from four villages around Gorgan were studied. The specific activities of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  were measured on a gamma spectrometer in the samples and transfer coefficients from soil to rice were determined. The result of the calculations showed that the contribution of radionuclides from rice to the human body was within the permissible norm.

Thus, we see that experimental work is underway in the global community to improve estimates of internal dose and to test biokinetic models, and the data from these studies make an invaluable contribution to refining model parameters and increasing the reliability of estimates of dose predictions.

## **2 Objects of Research**

### **2.1 Site Selection**

A review of the literature on nuclear tests at the Semipalatinsk nuclear test site shows that of all tests, only six of them leave traces of radioactive fallout far beyond the test site and pass directly near populated areas.

As can be seen from the map in Figure 1, traces of radioactive fallout pass through the areas of such villages as Bodene, Dolon and Sarzhal. The contamination of the territory of the Bodene village and its surrounding area could have been caused by the test. Bodene and its adjoining territory may have been the result of testing a prototype thermonuclear charge conducted on November 22, 1955, with a power of ~1.6 Mt. Also, in the immediate vicinity of the village are traces of the test on 29.07.1955. (power ~1.3 kt) and 07.08.1962. (power ~9.9 kt), which may or may not have had an impact on this area. The contamination of the Dolon village was influenced by the air-test trace of 17.01.1958. (power ~0,5 kt). Near the territory of the Sarzhal village there is a trace of the most powerful ground nuclear explosion at the test site on 12.08.1953. (power ~400 kt).

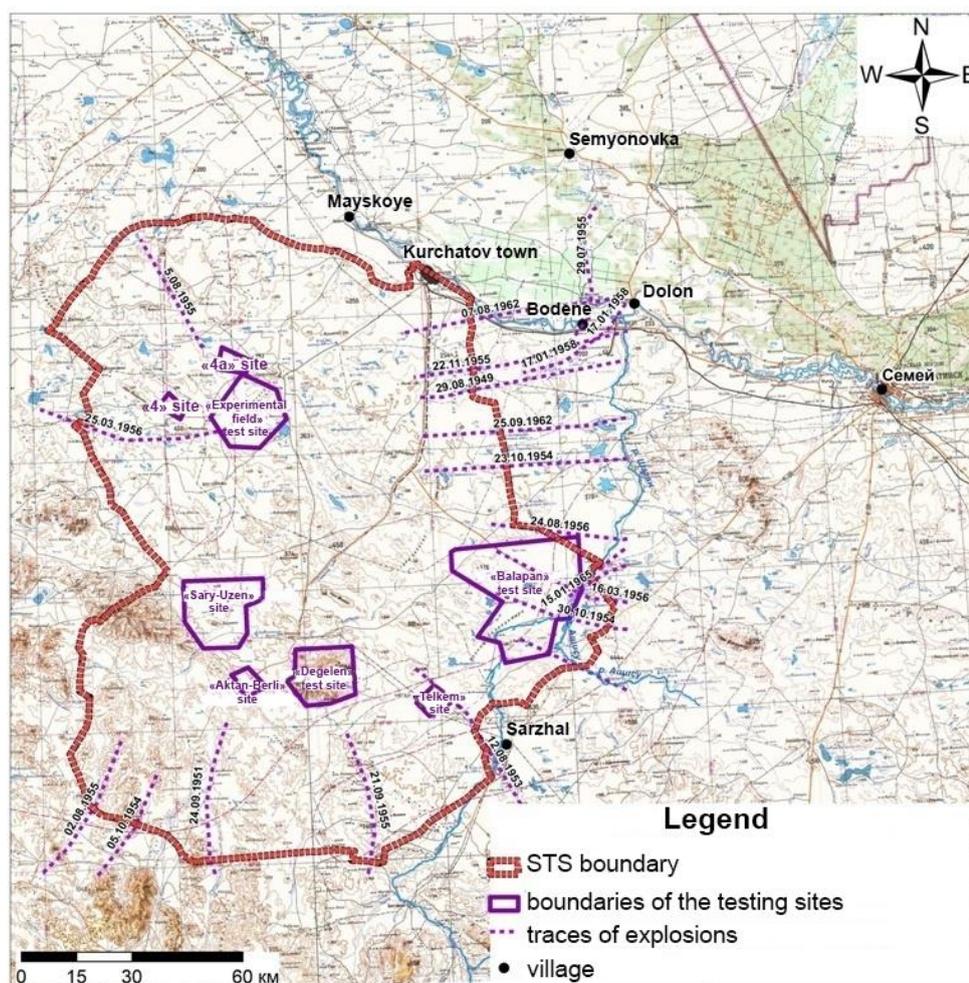


Figure 1 - Traces of radioactive fallout outside the STS

On the basis of literature data, the Bodene village was chosen as the object of the study. The choice in favor of this settlement is justified by its relative proximity to the site "Experimental field" (in comparison with Sarzhal village), and a fairly large accumulated array of data on the radioecological situation in its area (in comparison with Dolon village).

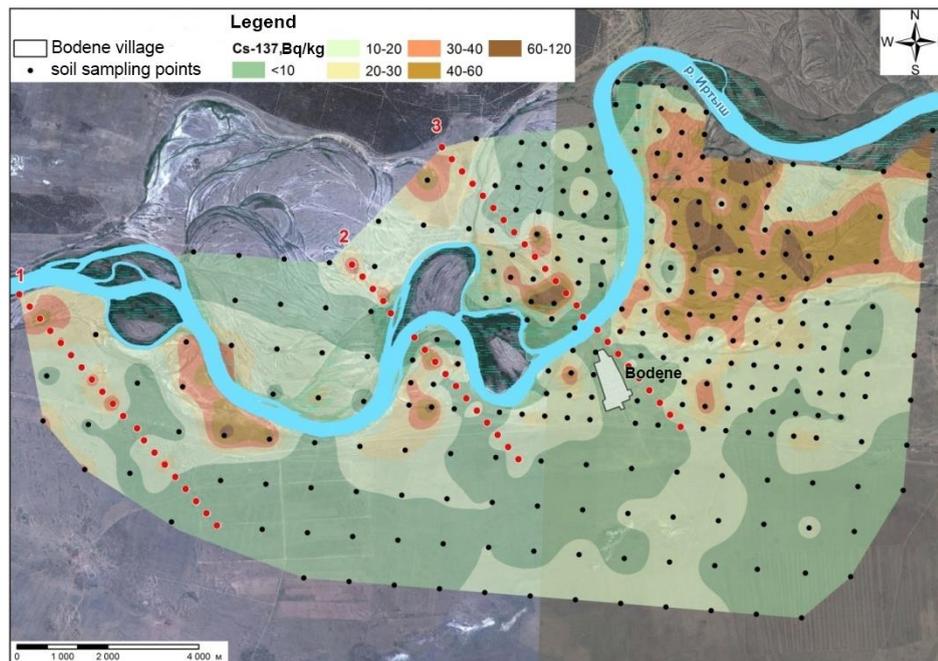
The main contamination of the territory of the Bodene village and the adjoining territory could have resulted from the test conducted on 29.08.1949 (power ~22 kt). The axis of the trace passed at a distance of 3 km from the northern outskirts of the Bodene village.

## 2.2 Radioecological Situation in the Settlement

Sampling on the territory of the Bodene village was sampled point by point, from an area of 200 to 500 cm<sup>2</sup> at a depth of 5 cm. At each sampling point, geographic coordinates were determined and EDR and beta-particle flux density were measured. A total of 396 surface soil samples were taken.

The analyses to measure the specific activity of radionuclides in soil and plant samples were carried out in accordance with standardized methodological instructions using certified laboratory equipment [12, 13, 14]. Determination of specific activity of radionuclides <sup>137</sup>Cs and <sup>241</sup>Am in soil was performed on gamma-spectrometers with semiconductor detectors produced by Canberra. Determination of specific activity <sup>90</sup>Sr and <sup>239+240</sup>Pu was carried out on liquid scintillation spectrometer Tri-Carb 2910TR (Perkin Elmer) and alpha-spectrometer Alpha Analyst (Canberra) respectively.

Based on the results of the studies, area distribution maps <sup>137</sup>Cs and <sup>241</sup>Am were constructed (Figure 2).



a)



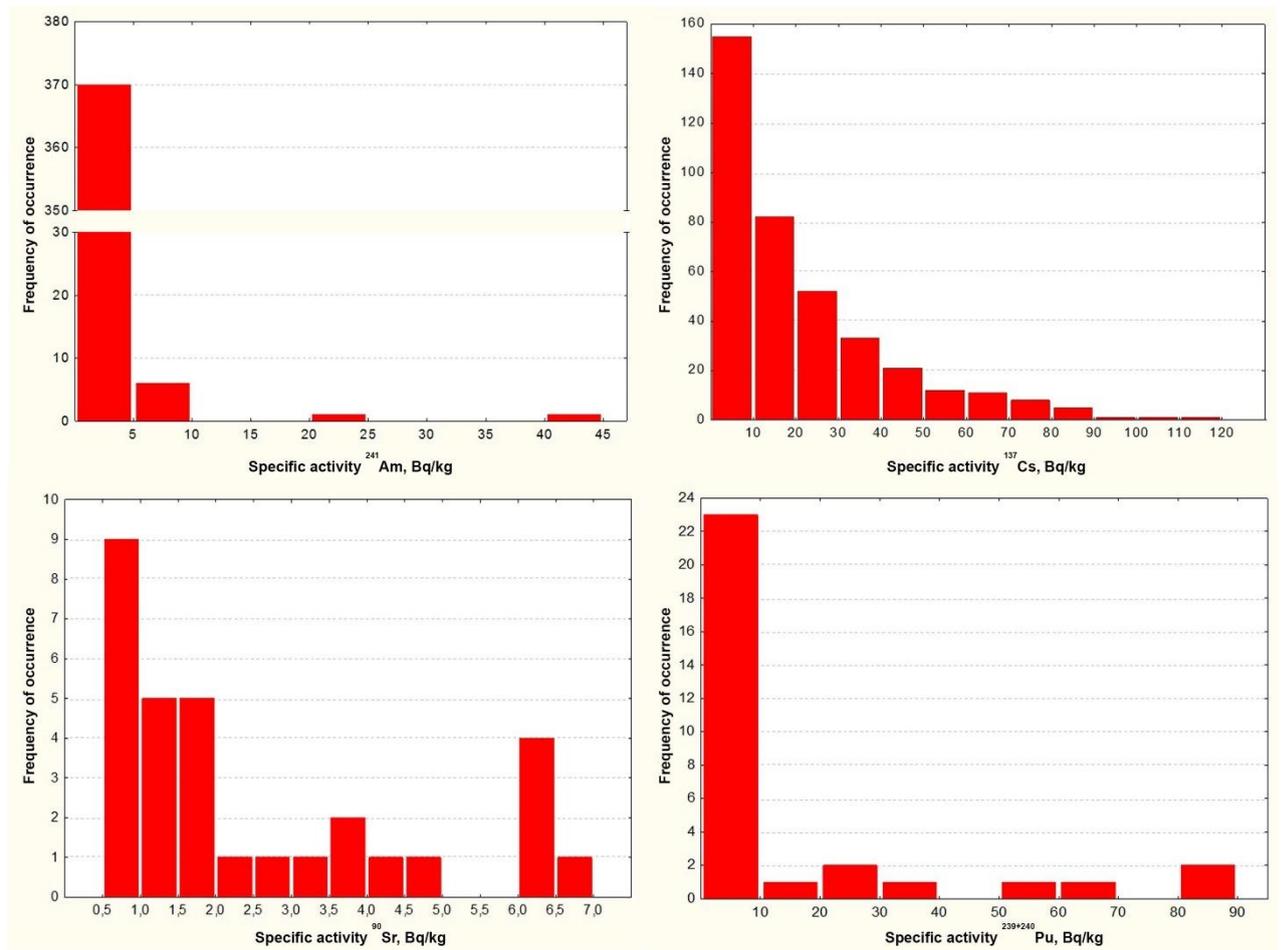


Figure 3 - Frequency distribution of specific activity for  $^{137}\text{Cs}$  (top left),  $^{241}\text{Am}$  (top right),  $^{90}\text{Sr}$  (bottom left), and  $^{239+240}\text{Pu}$  (bottom right)

The histograms of the distribution of specific activity of cesium, americium and plutonium by frequency of occurrence have a distribution character close to the lognormal distribution. To prove the log-normal distribution, the values of natural logarithm of specific activity of radionuclides were taken and similar distributions were built. The obtained distributions are shown in Figure 4.

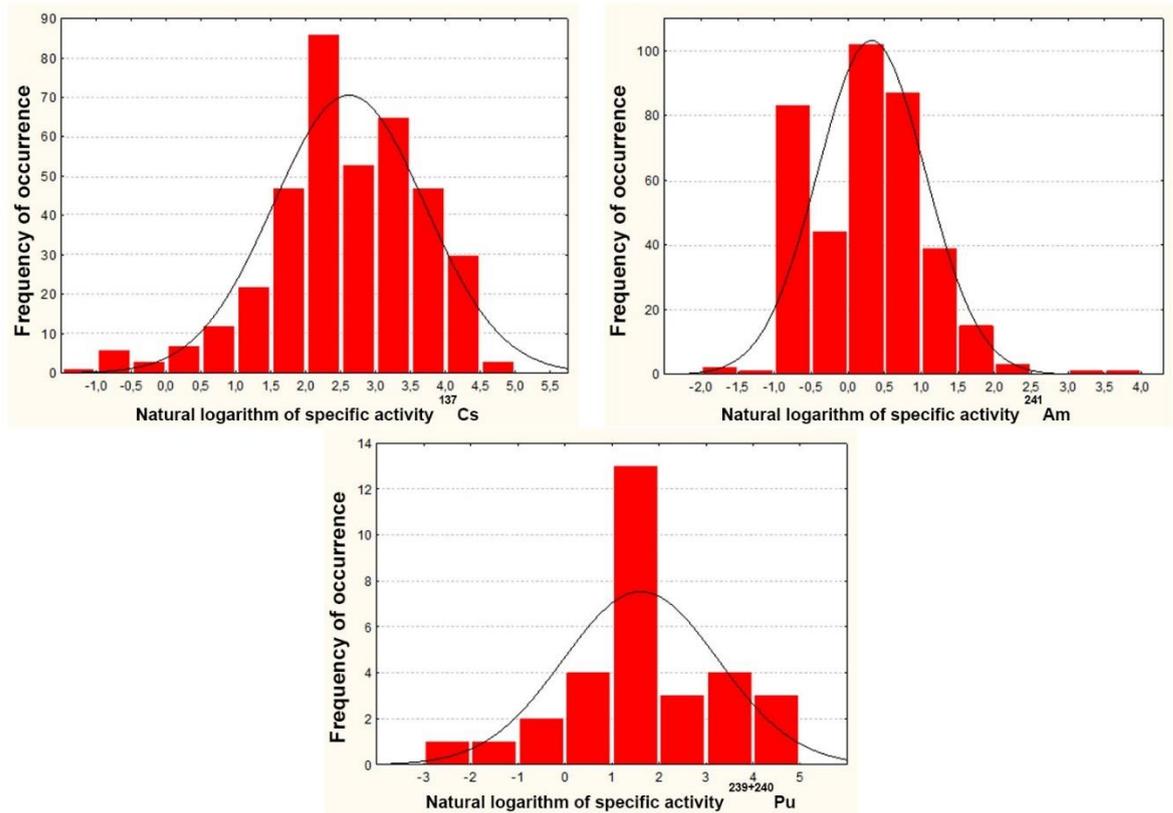


Figure 4 - Distribution of natural logarithms of specific activity by frequency of occurrence for  $^{137}\text{Cs}$  (left),  $^{241}\text{Am}$  (right) and  $^{239+240}\text{Pu}$  (bottom)

All histograms have a dome-shaped normal distribution. The Kolmogorov-Smirnov method based on the comparison of empirical and theoretical distributions was used to prove the normality of the distribution [15]. According to the calculations, these distributions can be considered normal. Then, the initial distributions of specific activities  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  are lognormal.

In the case of lognormal distribution, it is recommended to take the geometric mean value as the average value. Thus, for cesium, americium and plutonium in the future it is advisable to take the geometric mean values of specific activity. In the case of strontium, the median value is used, since the nature of its distribution does not fall under either normal or lognormal laws.

Assuming that radioactive contamination is uniformly distributed over the area of the studied territory, we obtain average concentrations of radionuclides in the surface (0-5 cm) soil layer (Table 2).

Table 2 - Geometric mean and median values of radionuclides in the soil in the territory of the Bodene village.

Geometric and median values of specific activity of radionuclides in the soil on the 0-5 cm layer, Bq/kg			
<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am
13	1,8	4,9	1,4

These values of specific activities will be the initial values for calculating the internal intake of radionuclides into the human body.

### 2.3 Choosing a Cohort

In order to select specific individuals to participate in the research, a questionnaire survey was conducted. The questionnaires were administered by the Institute's staff with a field trip to the settlement where the survey was conducted. The determining criterion for selecting research participants was permanent residence in the selected settlements.

A total of 71 people took part in the study.

Figure 5 shows the distribution of the number of study participants by age (left) and the distribution of study participants by gender (right).

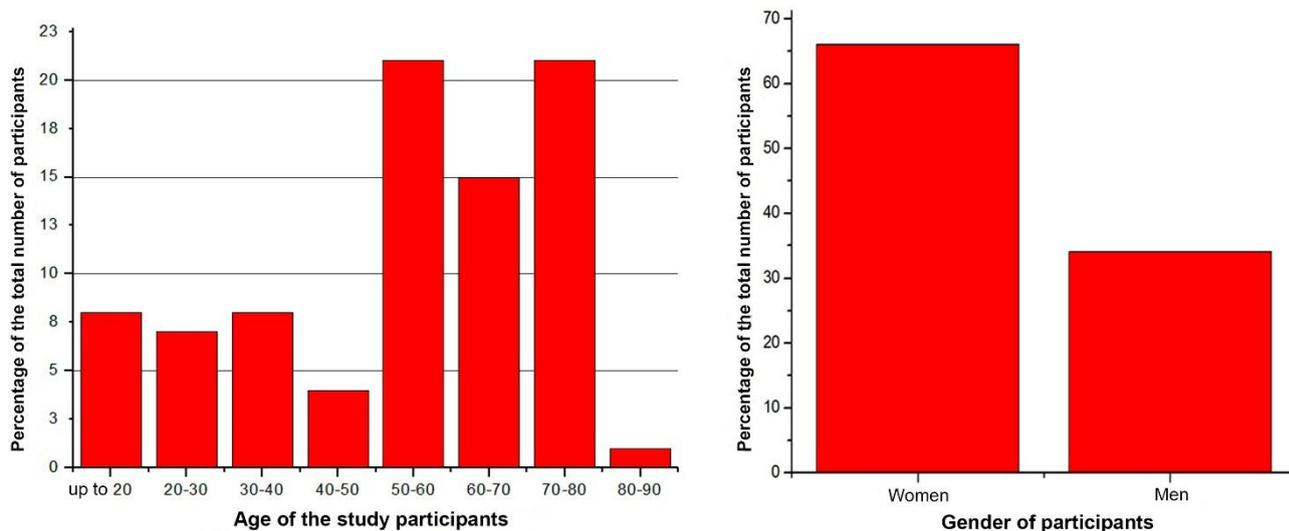


Figure 5 - Distribution of study participants by age (left). Distribution of study participants by gender (right)

Most of the study participants are people of retirement age, which is due to the fact that this category of the population lives for the longest period of time in the selected locality. The minimum age of research participants is 15 years old. In the future, the assessment of internal intake of radionuclides will be considered for adult men and women over 17 years old, which is 92% of the total number of study participants.

### 3 Assessment of Radionuclide Intake into the Human Body with Food

#### 3.1 Admission Scenario

As a scenario of internal inflow of radionuclides it is assumed that a person lives and conducts economic activities on the territory of the Bodene village, consumes agricultural products produced and grown there. This scenario is conventionally called “subsistence farmer”. Receipt of radionuclides from imported food products is not taken into account. Also intake from consumption of water from local sources by the population is not considered as the levels of specific activity of artificial radionuclides in water are below the detection limits of the used equipment and make up:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$   $< 0.02$  Bq/kg,  $^{239+240}\text{Pu}$   $< 0.001$  Bq/kg, which is 1 - 3 orders of magnitude lower than the intervention levels for drinking water, according to GR SERRS [16].

#### 3.2 Assessment of the Level of Contamination of Crop Products

To estimate the levels of contamination of agricultural products of plant origin, it is necessary to take into account the data on the concentration of radionuclides in the soil of the study area and the transfer coefficients ( $C_t$ ) of radionuclides into various types of plant products:

$$C_t = \frac{C_{plant}}{C_{soil}}, \quad (1)$$

where  $C_t$  – transfer coefficient;

$C_{plant}$  – radionuclide concentration in the plant (Bq/kg);

$C_{soil}$  – concentration of radionuclides in the soil.

In 2009 the IAEA published "Quantitative Parameters of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environment for Radiological Assessment," which lists  $K_{\text{tr}}$  radionuclides in crop products (Table 3).

Table 3 -  $C_t$  of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  in crop products according to IAEA data

Type of product	$C_t$			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$

Corn	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$
Leafy vegetables	$1,8 \cdot 10^{-1}$	2,0	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Fruits (tomatoes, cucumbers)	$9,4 \cdot 10^{-2}$	1,5	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
Legumes (seeds)	$4,3 \cdot 10^{-2}$	1,5	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Potatoes (tubers)	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$
Root vegetables (roots)	$5,3 \cdot 10^{-2}$	1,3	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$

The Institute of Radiation Safety and Ecology conducted experimental studies of the Sarzhal and Bodene villages, based on the results of which accumulation coefficients for some types of crop products were obtained and published (Table 4) [17].

Table 4 -  $C_i$  of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  in crop products according to IRSE

Type of product	$C_i$			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Potatoes (tubers)	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Carrots (root vegetable)	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$
Beets (root vegetable)	$1,4 \cdot 10^{-1}$	1,4	$4,2 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$
Tomato (fruit)	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$8,9 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Pepper (fruit)	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	-	-
Cucumber (fruit)	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Pumpkin (fruit)	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,08	-	$2,2 \cdot 10^{-1}$
Eggplant (fruit)	$4,2 \cdot 10^{-1}$	5,9	-	-
Onions (bulbs)	$7,1 \cdot 10^{-2}$	-	-	-
Cabbage (leaves, stem)	$4,3 \cdot 10^{-1}$	-	-	-

In the future, for more accurate results of calculating the accumulation of radionuclides in the products produced in the Bodene village, experimental data will be used, and in their absence - the IAEA data.

The finally calculated values of cesium, strontium, americium and plutonium content in plant products were obtained for dry weight of plant products, therefore, to convert them to crude weight we used the data on percentage dry weight content in plants given in the IAEA recommendations [18].

The predicted radionuclide concentration was calculated using the formula:

$$C_{pred} = C_{soil} \times C_t \times \frac{C_{\%}}{100}, \quad (2)$$

where  $C_{pred}$  – predicted content (Bq/kg);

$C_{soil}$  – average radionuclide concentration in soil (Bq/kg);

$C_t$  – transfer coefficient;

$C_{\%}$  – percentage of dry matter content to the total mass of the plant.

Table 5 shows the results of the predicted radionuclide concentrations in plant products (per crude weight) in the case of their production in the Bodene territory.

Table 5 - Predicted radionuclide content in crop products (per crude weight) in the case of its production in the territory of the Bodene village

Type of product	Predicted concentration, Bq/kg			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Feed products				
Hay (steppe grasses)	1,5	1,7	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Leafy vegetables				
Cabbage	$6,9 \cdot 10^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Spinach, salads	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Leaf celery	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Legumes				
Beans	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Peas	$4,8 \cdot 10^{-1}$	2,2	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
Fruit vegetables				
Tomatoes	$9,6 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Pepper	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Eggplant	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$
Cucumbers	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
Zucchini	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
The Onion	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Pumpkin	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Corn	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$6,1 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Root tubers				
Potatoes	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
Beets (root vegetables)	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
Carrots (root vegetables)	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Radish (root vegetables)	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
 - calculations based on experimental data.				