



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ И ФИЗИКИ»  
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(бакалаврская работа)

на тему «Оценка влияния аварий на атомных станциях на  
окружающую среду»

Исполнитель студент группы Ф-Б19-1  
Нехаев Александр Сергеевич

Руководитель каф. высшей математики и физики, к.ф.-м.н., доцент  
Яковлева Татьяна Юрьевна

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

к.ф.-м.н., доцент  
Зайцева Ирина Владимировна

«7» июня 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## **Оглавление**

Список принятых сокращений3

Введение4

Глава 1. Основы атомной энергетики5

1.1 Определение атомной энергетики5

1.2. Устройство атомной электростанции6

1.3 История появления атомной энергетики7

1.4 Классификация атомных станций11

Глава 2. События, происходящие во время аварий на атомных станциях16

2.1 Авария на Чернобыльской атомной станции16

2.2 Авария на атомной станции «Фукусима-1»17

2.3 Сравнение аварий на атомных станциях - Чернобыльской и «Фукусима-1»18

Глава 3. Оценка влияния аварий на атомных станциях на окружающую среду.23

3.1 Распространение радионуклидов в атмосфере23

3.2 Влияние атомных выбросов на состояние почвы27

3.3 Влияние атомных выбросов на состояние воды33

3.4 Распространение радионуклидов в городской среде40

3.5 Влияние атомных выбросов на сельское хозяйство43

Глава 4. Экологические контрмеры и реабилитация окружающей среды48

4.1 Дезактивация городской среды48

4.2 Сельскохозяйственные контрмеры48

4.3 Реабилитация загрязненных территорий49

4.4 Контрмеры в отношении водной среды50

Заключение52

Список литературы53

## Список принятых сокращений

АЭС		Атомная электростанция
Бк		Беккерель
Зв		Зиверт
МВт		МегаВатт
СССР		Союз Советских Социалистических Республик
ЧАЭС		Чернобыльская атомная электростанция
ЧС		Чрезвычайная ситуация
Ки		Кюри
РФ		Российская Федерация
ЧЗО		Чернобыльская зона отчуждения

## **Введение**

Атомная электростанция – комплекс технических сооружений, предназначенных для выработки электрической энергии путем использования энергии, выделяемой при контролируемой ядерной реакции. На территории Российской Федерации действует 11 АЭС, а во всем мире их насчитывается около 190.

Для рассмотрения аварий были рассмотрены единственные случаи оцененные по международной шкале ядерных событий по наивысшему баллу, которыми являлись аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». Были проанализированы причины возникновения аварий на данных станциях, сделаны выводы, на основе изученной информации о выбросах в атмосферы, вызванных возникновением аварий на АЭС. Особое внимание уделено Чернобыльской АЭС поскольку влияние данной аварии затронуло территорию Российской Федерации.

Целью работы является изучение последствий аварий на АЭС на окружающую среду и оценка воздействия выбросов в атмосферу. Задачами данной работы являются: изучить причины возникновения аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», изучить и проанализировать условия влияющие на распространение атомных частиц, выделить и проанализировать последствия аварии на Чернобыльской АЭС, изучить контрмеры примененные после аварии на Чернобыльской АЭС.

Актуальность работы заключается в исследовании механизмов распространения радиоактивных веществ для разных слоев атмосферы и их влияния на биосферу, а также причин, послуживших первопричиной, и ставших слабым местом в первоначальном проекте, рассчитанном на пользу человечеству.

## **Глава 1. Основы атомной энергетики**

### **1.1 Определение атомной энергетики**

Атомная энергетика является отраслью энергетики, которая через преобразование ядерной энергии производит электрическую и тепловую энергию. Установка, использующая для производства электрической и тепловой энергии ядерный реактор, называется атомной электростанцией (АЭС). АЭС использует для нагрева воды энергию, которая образовывается при распаде ядер урана. Ядерный реактор, с протекающими ядерными реакциями в нем, служит источником тепловой энергии АЭС. Реакция протекает по принципу цепного механизма и заключается в делении одного из ядер, что вызывает деление соседних ядер и далее по цепочке. Скоростью цепной реакции можно управлять, регулируя ее мощность и приостанавливать процесс деления ядер по необходимости. АЭС работает на трансурановой группе, в которую входят плутоний и уран, активно используемые на АЭС. Данные вещества способны в начальном, определенном стимулировании расщеплять ядра элементов, совершая при этом цепную реакцию.

Нейтроны высвобождаются при делении ядра урана, воздействуя на другие ядра, деля их. Реакция осложняется по причине массового числа урана, которое составляет 235 единиц, данное количество находится в природной руде с содержанием 0,7%. В то время, как 99,3% приходится на изотоп с массовым числом 238, деление которого возможно при большем количестве энергии, которого у нейтронов недостаточно.

Возникновение и дальнейшее протекание цепной реакции возможно при критической массе урана, это и есть минимальная масса, необходимая для функционирования реактора. Таким образом, в качестве примера можно взять уран с массовым числом 235, для него критическая масса

будет составлять пару десятков килограмм, что достаточно много, относительно его процентного соотношения.

## **1.2. Устройство атомной электростанции**

На АЭС существует активная зона, в которой происходят процессы деления ядер урана и где находится топливо ядерного реактора. Начальная тепловая энергия, переходящая в электрическую, возникает в результате протекания ядерной реакции, во время которой и выделяется достаточное количество тепла. Для защиты работников и относительной безопасности их жизней, активная зона подвержена высокому уровню защиты. Скорость протекания реакции контролируется при помощи специальных стержней, состоящих из бора или кадмия, сильно поглощающих нейтроны, находящихся в активной зоне. При поглощении нейтронов деление ядер урана также уменьшается, тем самым уменьшая скорость протекания реакции. Глубина опускания стержней влияет на выделение тепла: чем глубже стержни опускаются, тем слабее становится реакция, чем выше, тем она сильнее протекает. Суть цепной реакции как раз заключается в возникновении тепловой энергии. Атомные реакторы необходимо остужать, в зависимости от типа АЭС выбирается вода, некоторые газы или металлический натрий. Само тепло выводится с помощью теплоносителей, которыми и выступают перечисленные вещества. Забирая из активной зоны тепло и перенося его в теплообменник, атомный реактор охлаждается. Данный тип АЭС называется одноконтурным. Следующим контуром может выступать пар, появляющийся при нагревании воды из теплообменника. Пар, попадая на лопасти турбины, запускает механизм выработки электричества, при помощи работы генераторов.

Аналогом атомных электростанций являются термоядерные электростанции, преимущество которых заключается в продолжительности работы без определенного времени окончания. Работа

термоядерных электростанций заключается в протекании реакций, основой которых является термоядерный синтез. При данном синтезе образуется гелий из изотопа водорода, посредством чего выделяется энергия. К преимуществам можно отнести их большую экологичность, в сравнении с АЭС, поскольку реактивные продукты не образуются посредством термоядерного синтеза, что непосредственно оказывает меньшее влияние на окружающую среду. Топливом для термоядерных электростанций может служить вода, которая является источником дейтерия-тяжелого изотопа водорода.

### **1.3 История появления атомной энергетики**

Считается, что самый большой вклад в фундаментальное изучение атомарной структуры и последующего открытия ядерного синтеза внес британский физик Эрнест Резерфорд. В 1911 году своим знаменитым опытом рассеяния альфа-частиц он доказал существование в атомах положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов вокруг него. На основе результатов опыта ученый создал первую планетарную модель атома. Нейтрон является ключевым понятием в атомной энергетике, его открыл Резерфорда Джеймс Чедвик, в 1932 году, благодаря чему появилось сегодняшнее понимание строения атома, а также соотношение субатомных частиц. Начались эксперименты по бомбардировке материалов нейтронами. Они привели Фредерика и Ирен Жолио-Кюри (дочь Марии Склодовской-Кюри) к открытию искусственной радиоактивности в 1934 году. В ходе экспериментов супруги Жолио-Кюри направленно облучали бор и алюминий альфа-частицами полония. Возникли радиоактивные изотопы, в следствие облучения частиц образцов, которые не соответствовали первоначальным условиям. Так, из алюминия появился радиоактивный фосфор и радиоактивный изотоп азота, появившийся при

облучении бора. Это и послужило началом истории развития атомной энергетики, супруги Жолио-Кюри получили за свое открытие нобелевскую премию, человечество же получило возможность создавать в будущем термоядерное топливо.

Следующими учеными, основоположниками атомной энергетики, стали химики Отто Ган, Фриц Штрассман и физик из Австрии – Лиза Мейтнер, со своим племянником Отто Робертом Фришем. Ученые провели эксперимент, в основе которого легли продукты урана, подвергшиеся нейтронной бомбардировке. Учеными было выяснено, что ядро достаточно массивного урана может поделить на две части крошечный нейтрон. Ученые сравнивают этот процесс «деления» с делением клеток в биологии, ведь при возможных других ядерных распадах, масса ядра подвергалась небольшим изменениям, когда в данном открытии ядро разделилось на две равные части.

Спустя более, чем четыре десятилетия, ученые открыли деление ядерных частиц в 1938 году, чему поспособствовала длительная работа в области науки о радиоактивности, а также в разработке новой ядерной физики, благодаря которой станет возможным описать компоненты атомов. Изучив детально процесс деления ядра, ученым стало очевидно, что при таком раскладе возникает цепная реакция, поддерживающая сама себя, об этом впервые объявил Фредерик Жолио-Кюри в 1939 году, после проведения ряда экспериментов. В тот момент, ученые со всего мира, включая СССР, создали обращения в свои правительства, прося о поддержки исследований в области ядерного деления, что происходило перед началом Второй мировой войны.

Впервые ядерную физику заметили в оборонной сфере США. Во время миграции, многие известные физики Старого Света перебрались в Соединенные Штаты, где и начали работу над созданием первого в мире исследовательского реактора, которые в дальнейшем получил название



«Чикагский реактор – 1», в 1942 году 2 декабря в нем впервые в произойшла цепная ядерная реакция.

В августе 1945 года был выпущен карманный справочник под названием «Атомный век», он стал первым широко используемым отчетом о ядерной энергии. В нем рассказывалось о неиспользовании в будущем ископаемого топлива, перейдя на АЭС. Глава Комиссии по атомной энергетике США, по совместительству лауреат Нобелевской премии Гленн Сиборг, говорил, что: «Будут шаттлы с ядерными двигателями для полета с Земли на Луну, искусственные сердца с ядерными двигателями, бассейны с плутониевым подогревом для аквалангистов и многое другое».

Одновременно с этим, в августе 1945 года многие ученые подали сотни первоначальных патентов высокой секретности на новый легководный реактор, занявший лидирующую позицию атомной энергетике, стал основным реактором в США, использовавшийся для морских силовых установок. В конце 1940-х годов исследование переняли СССР, Великобритания и Канада, начавшие самостоятельное изучение атомной энергетике.

Первый исследовательский реактор СССР запущен 25 декабря 1946 года в Москве, в Курчатовском институте. Он был назван, как F-1, от «Первый физический реактор», который стал первым в Европе, самоподдерживающим цепную ядерную реакцию.

На экспериментальной станции EBR-I недалеко от Арко, в штате Айдахо, 20 декабря 1951 года впервые было выработано электричество, станция производила примерно 100 кВт.

Обнинская АЭС, созданная в СССР, стала первой атомной электростанцией в мире 27 июня 1954 года, способная вырабатывать электроэнергию для энергосистемы, производя около 5 мегаватт электроэнергии.

АЭС начала свою работу как энергетическая станция для проведения опытов, на которой специалисты первых промышленных станций,

экипажи первых атомных подводных лодок, атомного ледокола «Ленин» проходили подготовку. На ней также стажировались специалисты из Китая, Чехословакии, Румынии и ГДР. Появившийся опыт от разработки, создания и эксплуатации АЭС, направил людей на определение конкретных целей и задач, где может быть использована атомная энергетика. Начиная с 1956 года начинались определяться цели использования АЭС в энергетике и других промышленных направлениях. Было решено для получения нейтронов использовать реактор, чтобы и далее проводить научно-исследовательские работы, в особенности, для создания АЭС с большей мощностью.

Мощность самой первой АЭС в СССР не достигала уровня классических источников электроснабжения, однако идеи ученых помогли снизить себестоимость и увеличить мощность данных электростанций, после чего они уже могли конкурировать с традиционными методами получения электроэнергии. Примером одной из таких идей стал метод частичных перегрузок реактора, благодаря чему среднее выгорание топлива увеличилось почти в два раза, благодаря чему себестоимость отпускаемой электроэнергии снизилась за счет снижения топливной составляющей.

Рост атомной энергетики в начале шел стремительно: с менее 1 гигаватт (ГВт) в 1960 году, общая глобальная установленная мощность достигла 100 ГВт в конце 1970-х годов, а затем и 300 ГВт в конце 1980-х годов. Следующий порог наблюдался в 2005 году, когда мировая мощность достигла 366 ГВт, что показывало замедленный рост, в сравнении с начальным ростом атомной энергетики.

## 1.4 Классификация атомных станций

Классификация по числу контуров, является одной из главных классификаций АЭС: одноконтурная, двухконтурная, трехконтурная. Основным двигателем на современных АЭС выступают паровые турбины.

Теплоноситель и рабочее тело являются частью системы АЭС. Среда, совершающая работу, называется рабочим телом, которая преобразует тепловую энергию в механическую. В качестве рабочего тела обычно выступает водяной пар. Чистота пара подвержена высоким требованиям. Пар, поступающий на турбину, должен конденсироваться полностью и возвращаться в виде конденсата в цикл, чтобы удовлетворять чистоте с экономически приемлемыми показателями. Поэтому, во всегда замкнутый контур рабочего тела АЭС и любой современной тепловой электростанции, вода поступает в малых количествах для восполнения потерь конденсата и утечек.

Для отвода выделяющейся теплоты в реакторе на АЭС используют теплоноситель. Необходима высокая чистота теплоносителя чтобы предотвратить отложения на тепловыделяющих элементах, для чего необходим замкнутый контур, благодаря чему теплоноситель реактора радиоактивен постоянно. Взаимодействие нейтронов на волновом уровне, это неупругое рассеивание, это потенциальное и резонансное рассеивание, далее будет рассмотрен стандартный процесс при столкновении двух шаров, служащие примером упругого рассеивания.

Одноконтурные АЭС – это атомные электростанции, где контуры теплоносителя не разделены с рабочим телом. Посредством преобразований в реакторе в направлении турбин движется пар, что вызывает работу, которая впоследствии превращается в электроэнергию.

Конденсат, вырабатываемый в конденсаторе, насосом переносится обратно в реактор. В реакторе устанавливается главный циркуляционный насос, благодаря чему происходит работа реакторов с принудительной циркуляцией энергоносителя.

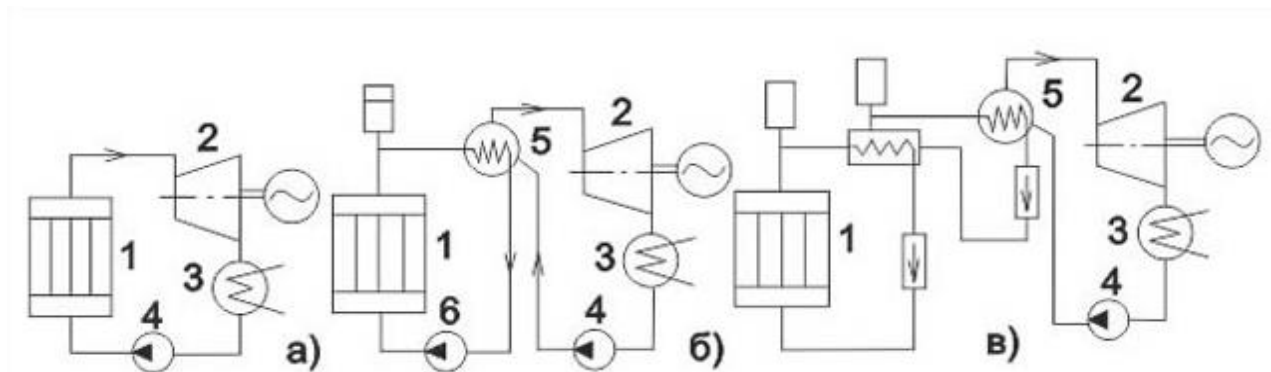


Рисунок 1 - Классификация АЭС в зависимости от числа контуров:

а — одноконтурная; б — двухконтурная; в — трехконтурная;

1 — реактор; 2 — турбогенератор; 3 — конденсатор; 4 — питательный насос; 5 — парогенератор; 6 — циркуляционный насос;

Эксплуатация оборудования в одноконтурных схемах усложняется из-за нахождения оборудования в условиях радиоактивности. Однако у таких схем есть преимущества, которые заключаются в экономичности и простоте в сравнение с другими схемами. Отличие параметров пара в реакторе и перед турбиной заключаются в значении потерь в паропроводах. Примерами АЭС, работающий по одноконтурной схеме, являются Ленинградская, Смоленская и Курская АЭС.

Двухконтурные АЭС – атомные электростанции, в которых контуры теплоносителя разделены с контурами рабочего тела. Первым контуром является контур теплоносителя, а вторым – контур рабочего тела. Теплоноситель, перемещающийся через реактор и парогенератор при помощи главного циркуляционного насоса, в данной схеме охлаждает реактор. При образовании таким образом контур теплоносителя становится радиоактивным. Радиоактивный контур теплоносителя включает в себя часть стационарного

оборудования. Компенсатор объема входит в систему первого контура, поскольку объем теплоносителя при изменении температуры также изменяется.

Конденсат, возникающий в конденсаторе, образующийся при помощи пара из парогенератора двухконтурной АЭС, который в свою очередь поступает в турбину насосом возвращается в парогенератор. Оборудование, функционирующее при отсутствии радиации, включается во второй контур, образованный таким образом, что делает эксплуатацию станции легче. Устройство, которое разделяет два контура, принадлежащее как первому, так и второму контуру является парогенератором двухконтурной АЭС, что является обязательным условием работы двухконтурной АЭС. Между теплоносителем и водой, кипящей в парогенераторе, требуется перепад температуры, чтобы происходила передача тепла через поверхность нагрева. Таким образом в первом контуре давление выше, чем паровое давление, подающееся на турбину, что поддерживается водным теплоносителем. В первом корпусе необходимо иметь давление гораздо выше, чем во втором контуре, что необходимо для избегания процессов закипания теплоносителя в активной зоне реактора. Примерами двухконтурной схемы, на которой работают АЭС являются: Калининская, Кольская, Балаковская и Норвежская АЭС.

В качестве теплоносителя могут быть использованы газы. Процесс заключается в прокачивании газодувкой через реактор и парогенератор газового теплоносителя. Данная схема является аналогом главного циркуляционного насоса, однако отличие заключается в том, что давление в первом корпусе может быть как выше, так и ниже, чем во втором контуре.

Обе схемы АЭС имеют ряд своих преимуществ и недостатков, поэтому страны развивают как одноконтурные, так и двухконтурные АЭС. Несмотря на их отличия схема работы на насыщенном паре средних давлений в работе турбин является общей чертой обеих схем АЭС. Наиболее часто встречаются АЭС, как одноконтурные, так и двухконтурные, использующие водный теплоноситель. Многие страны отдают предпочтение двухконтурным АЭС поскольку считают их более безопасными чем одноконтурные АЭС.

На отдельных участках парогенератора, чаще всего, где соединяются парогенераторные трубки с коллектором или при условии коррозионных повреждений трубок могут возникать неплотности в процессе эксплуатации. Необходимо учитывать возникновение перетечек в теплоносителе, которые могут возникать при более высоком давлении в первом контуре в отличие от второго, что может привести к загрязнению второго контура. Перетечка, в целом не влияют на нормальную эксплуатацию АЭС, однако на АЭС используются теплоносители, которые взаимодействуют с паром и водой весьма интенсивно, по этой причине обслуживаемые помещения могут быть подвержены выбросам радиоактивных веществ. В качестве теплоносителя может выступать жидкий натрий. Для избегания аварийных ситуаций при контактах радиоактивного натрия с водой и паром, создают дополнительный промежуточный контур. Схема такой АЭС называется трехконтурной.

Через реактор и промежуточный теплообменник теплоноситель (радиоактивный жидкометаллический) прокачивается, после чего тепло передается нерадиоактивному теплоносителю (жидкометаллическому). Теплоноситель прокачивается по системе через парогенератор, которая и образует промежуточный контур. Для стабильной работы поддерживается высокое давление в промежуточном контуре, которое должно быть выше, чем в первом, благодаря чему невозможна перетечка радиоактивного натрия в промежуточный контур из первого. Следовательно водяной пар и вода будут контактировать непосредственно с нерадиоактивным натрием, если возникнет неплотность между вторым и промежуточным контуром. В трехконтурной и двухконтурной схеме система второго контура схожа. Количество оборудования в трехконтурной схеме используется больше, чем в любой другой схеме, что делает ее более дорогостоящей. Примерами АЭС, работающих по трехконтурной схеме, являются Шевченковская АЭС, а также третий блок Белоярской АЭС.

К классификации атомных электростанций можно отнести их отдельные типы, которые отличаются по спектру нейтронов, по размещению топлива, по

его виду, по химическому составу, по виду теплоносителя, по роду замедлителя, по конструкции, а также по способу генерации пара.

- по спектру нейтронов: реактор на тепловых; реактор на быстрых нейтронах.

- по размещению топлива: гетерогенные реакторы, гомогенные реакторы.

- по виду топлива: изотопы урана-238, -235 и -233, изотоп плутония-239, изотоп тория-232.

- по степени обогащения: естественный уран, слабо обогащённый уран, чистый делящийся изотоп.

- по химическому составу: металлический U; UO<sub>2</sub> (диоксид урана); UC (карбид урана);

- по виду теплоносителя: водо-водяной реактор, графито-газовый реактор, тяжеловодный ядерный реактор, органический теплоноситель, реактор с жидкометаллическим теплоносителем, жидкосолевой реактор.

- по роду замедлителя: графит (C), вода (H<sub>2</sub>O), тяжелая вода (D<sub>2</sub>O), Be, BeO, гидриды металлов, без замедлителя.

- по конструкции: корпусные реакторы, каналные реакторы.

- по способу генерации пара: реактор с внешним парогенератором, кипящий реактор.

Наиболее популярными реакторами по всему миру являются водо-водяные, их порядка 62%, следом идут кипящие реакторы, которые составляют 20% от числа используемых на АЭС реакторов.

## **Глава 2. События, происходящие во время аварий на атомных станциях**

### **2.1 Авария на Чернобыльской атомной станции**

26 апреля 1986 года в 1 час 24 минуты по московскому времени на 4-ом энергоблоке Чернобыльской АЭС произошел взрыв, полностью разрушивший реактор и частично повредивший машинный зал в зоне 4-ого энергоблока. В различных помещениях и на крыше начался пожар. Частичное обрушение энергоблока, повлекло за собой смерти двух человек. В тот же день в 1:26 погиб оператор главных циркуляционных насосов Валерий Ходемчук, также в тот же день в 6:00 от полученных травм умер сотрудник пусконаладочного предприятия Владимир Шашенок. По подреакторным помещениям растеклась смесь их расплавленных бетона, металла, песка и фрагментов топлива, что было вызвано плавлением остатков активной зоны. Авария спровоцировала в окружающую среду выброс радиоактивных веществ, среди которых присутствуют изотопы урана, плутония, йода-131 (период полураспада — 8 дней), цезия-134 (период полураспада — 2 года), цезия-137 (период полураспада — 30 лет), стронция-90 (период полураспада — 28,8 лет).

В первые несколько месяцев после аварии погиб 31 человек. В период с 1987 по 2004 год еще 19 смертей предположительно можно отнести к ее прямым последствиям. Подверглись острой лучевой болезни в различной степени тяжести из числа ликвидаторов 134 человека. Люди, которые были подвержены высокой дозой облучения могут дополнительно стать причиной примерно 4000 смертей из-за отдаленных последствий облучения. Однако несмотря на эти выводы общественное мнение озвучивает количество жертв гораздо более высокое.



## 2.2 Авария на атомной станции «Фукусима-1»

11 марта 2011 года в 14 часов 46 минут по местному времени с магнитудой 9,0-9,2 баллов произошел главный толчок Великого восточно-японского землетрясения, эпицентр которого находился в точке с координатами 38,322° с. ш. 142,369° в. д. восточнее острова Хонсю, в 130 км к востоку от города Сендай, в 373 км к северо-востоку от Токио и в 180 км от АЭС «Фукусима-1», на глубине гипоцентра 32 км ниже уровня моря в Тихом океане. Такие землетрясения встречаются нечасто, в среднем для Японии землетрясения подобной силы приходятся не чаще одного раза примерно в 600 лет. Порядка 560 квадратных километров было накрыто цунами, вызванным данным землетрясением в Японии. Наибольшая высота цунами у побережья Японии была зафиксирована в городе Нияко и составила 40,5 метров. Далее по высоте максимумы приходились на деревню Нода, с зафиксированной высотой - 37,8 метров и город Онагава – 34,7 метров. В результате, из-за вызванного землетрясением цунами, 62 города и ближайшие деревни пострадали. Сводками было зафиксировано 15896 погибших, 6157 раненых и также пропавших без вести – 2536. Был нанесен серьезный ущерб экономике Японии, который по оценке финансовых специалистов составил порядка 250-300 млрд. долларов.

Станция АЭС «Фукусима-1» оказалась отрезана от внешнего энергоснабжения в результате разрушения высоковольтного оборудования и линий электропередач, из-за возникшего землетрясения. Чтобы возобновить работу АЭС, были запущены резервные дизельные электрогенераторы. АЭС ограждала защитная дамба высотой 5,5 метров, однако толчок, создавший цунами, покрывшее всю северо-восточную часть Японии, вызвал сначала волну высотой 4 метра, после которой пришла волна высотой 15 метров. Генераторы резервного питания, которые находились в подвале, были подвержены волне цунами, которая легко преодолела защитную дамбу. Первыми жертвами стали двое сотрудников АЭС, которые после землетрясения проверяли целостность оборудования в момент цунами. О состоянии ядерных реакторов узнать стало

невозможно, поскольку панели управления операторов после цунами перестали работать, а энергия перестала поступать. Для охлаждения атомных реакторов насосы качали воду, однако из-за отключения электроэнергии и затопления подвального помещения, они отключились. Первый энергоблок стал первой проблемой для ликвидаторов, поскольку начали происходить взрывы на энергоблоках №1, №3 и №4 с 12 по 15 марта 2011 года.

Общее радиоактивное загрязнение от аварии составило ~ (340–800) ПБк (1015 Бк = 1 ПБк (петабеккерель)). К основным радионуклидам, поступившим в окружающую среду, можно отнести: Kr-85 – 44 ПБк; Xe-133 – 14 ПБк ; Te-132 – 180 ПБк ; I-131 – (65,2–380) ПБк ; I-133 – 146 ПБк; Cs-134, Cs-136, Cs-137 – до 92,5 ПБк; Pu-239, Pu-240 –  $(1-2,4) \cdot 10^{-6}$  ПБк; Pu-241 –  $(1,1-2,6) \cdot 10^{-4}$  ПБк. В результате появилась «зона наблюдения» атомных станций – зона отчуждения радиусом в 30 км. На этой территории за радиактивностью внешней среды проводился постоянный контроль, исследования проводились для приземного слоя воздуха, атмосферных осадков, почвы, воды, растительности, а также продуктов питания.

Компания, которая отвечала за безопасность АЭС признала, что авария произошла не по причине внезапного цунами, а по причине неподготовленности самой станции к воздействию цунами. Желание сэкономить средства компании, ее медлительность, недоверие к переоценке риска как землетрясения, так и цунами помешали компании усилить защиту станции из-за чего катастрофа нанесла серьезный ущерб.

### **2.3 Сравнение аварий на атомных станциях - Чернобыльской и «Фукусима-1»**

Обобщая вышесказанное, можно сказать, что авария на ЧАЭС за всю историю атомной энергетики оценивается как крупнейшая в своем роде. Из-за грубых нарушений правил эксплуатации АЭС, произошло разрушение реактора в четвертом энергоблоке, что и стало причиной аварии на ЧАЭС. Главными

ошибками стали испытания, которые проводились «любой ценой». Руководство ЧАЭС замалчивало масштабы аварии в первые дни, до этого проводились испытания, игнорируя изменения состояния реактора, технологические защиты переставали исправно работать поэтому они не могли остановить реактор еще до того, как он попал в опасный режим.

Для ликвидации последствий аварий была создана специальная правительственная комиссия. На основе боросодержащих веществ, свинца и доломитов химиком-неоргаником, академиком В.А. Легасовым была разработана специальная смесь. Для предотвращения последующего разогрева остатков реактора, а также чтобы уменьшить выбросы в атмосферу радиоактивных аэрозолей с самого первого дня смесь с вертолетов сбрасывали в зону аварийного реактора. При помощи 240 тысяч человек, принимающих участие в работах на аварийном блоке в 1986-1987 годах на станции и вокруг нее проводились работы. С учетом последующих годов, около 600 тысяч человек принимали участие в ликвидации последствий ЧАЭС. Снижение радиоактивных выбросов, выходящих из разрушенного реактора, предотвращение ухудшения ситуации стали главными задачами куда были направлены все усилия в начальный момент аварии. Чтобы произвести дезактивацию территории, захоронив разрушенный реактор, был построен бетонный «саркофаг» («Укрытие») вокруг 4-го энергоблока.



Рисунок 2 - Конфайнмент над 4-ым энергоблоком ЧАЭС

Поскольку разбросанные по территории АЭС обломки были радиоактивны, их, находившихся на крыше машинного зала и вокруг территории АЭС, часть убрали во внутрь «саркофага», а часть забетонировали. Дезактивация производилась в помещении первых трех энергоблоков. Несмотря на все усилия, приложенные ликвидаторами, ликвидация последствий происходит до сих пор. В 2019 году разрушенный энергоблок накрыли изоляционным арочным сооружением высотой 108 метров – конфайнментом, для того чтобы уменьшить воздействие радиации. Поскольку радиация находится там до сих пор, необходимо еще больше времени и усилий чтобы полностью дезактивировать ЧАЭС полностью.

Бывший заместитель главного инженера по ядерной безопасности ЧАЭС и науке(1979г-1986г) – Николай Карпан считает, что окружающая среда будет все также подвержена радиоактивностью из-за выбросов из разрушенного энергоблока поскольку «саркофаг» не может остановить этот процесс по причине своих технических характеристик. Николай Карпан выдвигает теорию о том, что лишь термооболочка вокруг АЭС способна обезопасить окружающую среду от радиоактивных выбросов в атмосферу и лишь реализация этого проекта способна, разрушенную взрывом станцию, полностью изолировать ее от окружающей среды.

Для отработанных источников ионизирующего излучения было создано специальное хранилище на комплексе «Вектор», которые там же и захораниваются. Специальное хранилище рассчитано на 50 лет, планируется, что по истечению времени, будет создано в геологических формациях новое хранилище, где они будут захоронены окончательно. За десятилетия по разным оценкам на территории Украины было от 400 тысяч накопленных, отработанных источников, которые использовались как в промышленности, медицине так и в военных целях.

В 2019 году несмотря на захоронение радиоактивных отходов, заработала переработка ядерных отходов в жидком состоянии. ЗПЖРО – это завод по

переработке жидких радиоактивных отходов расположенный на ГСП «Чернобыльская АЭС», его промышленной площадке, за первую неделю эксплуатации переработал 2755 килограмм радиоактивных отходов в жидкой фазе. Процесс переработки достаточно сложен и до конца не разглашается, однако специалисты чернобыльской АЭС рассказывают о нескольких стадиях прохождения переработки жидкими отходами. Затем эти радиоактивные отходы преобразуются в твердые, путем цементирования. Спустя время выдержки и радиационного контроля, отходы направляются на захоронения.

Говоря о АЭС «Фукусима-1» авария была вызвана отключением резервных электрогенераторов, которые были затоплены волной цунами, вызванной землетрясением. Соответственно, подача электроэнергии на насосы системы, которая охлаждает реактор была прекращена. Ядерное топливо подверглось плавлению в реакторах энергоблоков № 1-3. В результате пароциркониевой реакции произошло накопление водорода, что повлекло за собой череду взрывных реакций гремучей смеси на энергоблоках № 1, № 3 и № 4. Радиоактивные изотопы I-131 и Cs-137 попали в окружающую среду. По данным НКДАР и МАГАТЭ, было выброшено до  $14 \cdot 10^{18}$  Бк в результате происшествия на АЭС.

900 тысяч террабеккерелей – объем выбросов радиоактивных изотопов йода и цезия. В отличие от аварии на чернобыльской АЭС в 1986 году, когда общий объем выбросов составил 5,2 миллиона террабеккерелей, общий объем выбросов на АЭС «Фукусима-1» не превышает 20% от той суммы.

Каки после аварии на ЧАЭС, радиоактивные отходы после аварии на «Фукусима-1», также подверглись комплексу мер по переработке: была собрана радиоактивная вода в специальные баки, находящиеся на территории АЭС, после чего происходила дезактивация территории при помощи сбора зараженного грунта, всех растений и мусора. Все собранные радиоактивные отходы собирались в специальные виниловые мешки, которые сначала хранились временно на одних площадках, а затем были перемещены на другие, после чего уже перевезены на территорию АЭС. Также производилась чистка

зданий и дорог на территории АЭС. APLS – система очистки радиоактивной воды. Другие виды радиоактивных отходов были уничтожены. Ожидается, что власти Японии собираются «очищенную» воду с тритием, сбросить в Тихий океан. Данное решение может оказать серьезные экологические последствия не только для Японии, но и для ряда других государств.

Изучив материалы отчетов по двум трагедиям, можно сделать вывод, что аварии на обеих АЭС произошли по причине некомпетентности людей, отвечающих за безопасность АЭС и ближайших населенных территорий. На Чернобыльской АЭС были нарушены условия эксплуатации, о чем начальство не сообщило вовремя. На станции «Фукусима-1» были нарушены первоначальные условия строительства и расположения АЭС. Не учитывая географические и климатические условия, станцию расположили вблизи побережья, сделав недостаточно высокую дамбу. Вероятно, это было связано с первоначально неверными чертежами, созданными в США, рассчитанных для местных климатических условий.

На сегодняшний день главной задачей является устранение последствий двух крупнейших аварий на АЭС, а также предотвращение будущих возможных аварий.

## **Глава 3. Оценка влияния аварий на атомных станциях на окружающую среду.**

### **3.1 Распространение радионуклидов в атмосфере**

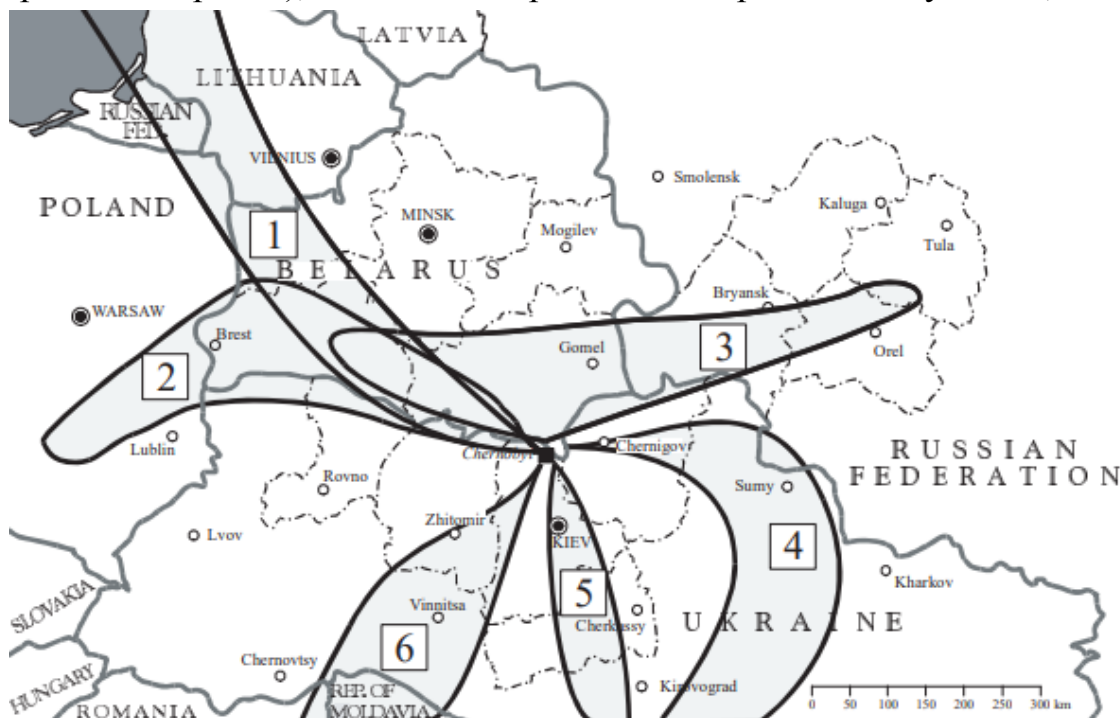
После аварии на ЧАЭС, радионуклиды в форме газов, топливных или конденсированных частиц, которые появились из выбросов поврежденного реактора. Главным механизмом, благодаря которому формировались топливные частицы, являлся процесс окисления ядерного топлива. Выбросы, которые накрыли западное направление, сформировались в результате первоначального взрыва, ими были слабо окисленные топливные частицы. В остаточных радиоактивных осадках по большей части преобладали сильно окисленные и диспергируемые частицы, выпавшие в большинстве других направлений. Часть радионуклидов приобрела летучесть в процессе окисления, а также рассеивания ядерного топлива. Слабо летучие радионуклиды, появившиеся в результате выброса, конденсировались на частицах материалов конструкций, пыли и золе, после охлаждения облака. В то время, как более летучие радионуклиды, которые также появились в результате выброса, остались в газовом состоянии. Обобщая, летучесть соединений радионуклидов, их химические и физические свойства, условия внутри реактора, определяли их форму. Перенесенные в атмосферу радиоактивные соединения, которые имели повышенное давление насыщенного пара, перенеслись в газовой форме. В атмосферу были выброшены топливные частицы, которыми являлись изотопы тугоплавких элементов. В форме конденсированных и топливных частиц обнаружены и другие радионуклиды. По коэффициентам активности, различных классов летучести, радионуклидов, можно оценить относительные доли компонентов (топливных и конденсированных) в выпадениях на исследуемую территорию. Вблизи источника выброса наиболее важную часть составили топливные частицы, которыми являлись радионуклиды, такие как:  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{242,244}\text{Cm}$ ,  $^{237,239}\text{Np}$ ,  $^{238-242}\text{Pu}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{141,144}\text{Ce}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ . В

топливных частицах, более 90% активности приходилось на  $^{89,90}\text{Sr}$  и  $^{103,106}\text{Ru}$ . Выпавшая, за пределами территории ЧАЭС, фракция веществ:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ , согласно современным исследованиям и оценкам составила  $1,5 \pm 0,5\%$  от всего объема выброса. Данный состав топливных частиц приближен к составу ядерного топлива под облучением, однако отличия заключаются в меньшей фракции радионуклидов (летучих), окисленным состоянием урана, а также в поверхностном слое – присутствием дополнительных смесей разного состава. Важно отметить, что состав радионуклидный и химический, конденсированных частиц, был разнообразен. Продолжительность процесса конденсации, характеристики частиц и температурный процесс, являлись определяющим фактором удельной активности радионуклидов в исследуемых частицах. В некоторых из данных частиц мог находиться один или два нуклида. Примером такого состояния являются:  $^{103,106}\text{Ru}$  или  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ .

Перенос радионуклидов в атмосфере, под действием выбросов, определял их форму. Частицы топлива, которые были наименьших размеров и состояли из одной гранулы кристаллического ядерного топлива достигали больших размеров, а также имели высокую плотность: до 10 микрон и  $8-10 \text{ г/см}^3$ . Размер повлиял на достаточно короткий перенос частиц – они прошли несколько десятков км. В нескольких километрах от АЭС были обнаружены крупные агрегатные частицы. Таким образом от поврежденного реактора уменьшилось выпадение тугоплавких радионуклидов, только следы тугоплавких радионуклидов были обнаружены за промышленной зоной ЧАЭС. Стоит отметить, что частицы, размером менее микрона – газообразные радионуклиды и конденсированные частицы, выброшенные из реактора, выпадали в тысячах километров от города Чернобыль. Примером может служить рутений, частицы которого были выброшены на большей территории Европы. На уровне  $1 \text{ Мбк/м}^2$  было выпадение изотопа цезия  $^{137}(^{137}\text{Cs})$ , который был обнаружен на расстоянии нескольких сотен километров от ЧАЭС.



В атмосферу произошел крупный региональный выброс веществ – радионуклидов из-за аварии на ЧАЭС. Загрязнение радиоактивными элементами затронуло как часть СССР (на сегодняшний день – Беларусь, Российская Федерация и Украина), так и часть европейских стран. Радионуклиды, выпавшие



на эти территории, посредством воды, почвы и атмосферной циркуляции переносились по территории.

Рисунок 3 - Расчет формирования радиоактивных следов в соответствии с метеорологическими условиями для мгновенных выбросов в следующие даты и время (Гринвичское время): 1) 26 апреля 1986 года, 00:00; 2) 27 апреля, 00:00; 3) 27 апреля, 12:00; 4) 29 апреля, 00:00; 5) 2 мая, 00:00; и 6) 4 мая, 12:00.

Над территорией Европы 26 апреля 1986 года находился обширный антициклон. Анализ высотных карт показал, что над ЧАЭС, на высоте 700 метров, находилась юго-западная периферия антициклона, воздушные массы которой, двигались к северо-западу, имея скорость от 5 до 10 м/с. С восходом солнца, влияние взаимодействия воздушных масс данных барических образований, привело к скорому перемешиванию радиоактивных частиц в



Рисунок 4 – Карта средней интенсивности выпадения осадков 29 апреля 1986 года в районе около Чернобыльской АЭС (мм ч<sup>-1</sup>)

Атмосферные осадки играют главную роль в загрязнении территории радионуклидами. Присутствие или отсутствие осадков, во время прохождения радиоактивного облака, обуславливают заражение территории радионуклидами. Эффективность различных радионуклидов, их химические формы, переносятся дождем или вымываются, относительно различий в поведении.

Высокий уровень выпадения осадков сказался на повышенном выпадении радионуклидов на землю, несмотря на дальние расстояния от реактора. Такая ситуация показана на рис.4. На данном рисунке изображена карта выпадения осадков 29 апреля средней дневной интенсивности, для районов Российской Федерации, Беларуси и Украины, которые наиболее сильно пострадали от аварии на ЧАЭС.

Наименьший уровень загрязнения наблюдался при сухом выпадении, однако радионуклидовая смесь, выпадающая на землю и ее растительность, подвергла их влиянию изотопов радиоактивного йода. Радиоактивное облако, при помощи осадков, перенесло аналогичную себе дозу содержания радионуклидов, таким образом соотношение и уровень радионуклидов отличалось на разных территориях.

### **3.2 Влияние атомных выбросов на состояние почвы**

Для измерения выпадений радионуклидов на верхние слои земли, в частности <sup>137</sup>Cs, применялось обследование большой территории с помощью самолетных спектрометров вскоре после аварии на ЧАЭС. Для исследований выпадений был выбран <sup>137</sup> Cs имеющий легкость измерения и высокое радиологическое значение. В качестве минимального уровня загрязнения радионуклидами <sup>137</sup> Cs почвы, выбрали значение равное 37кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>) по причине того, что данный уровень выше в 10 раз уровня выпадений <sup>137</sup>Cs в

Европе, подверженной глобальному выпадению радиоактивных осадков, а также по причине того, что дозы для человека, на данном уровне, составляла приблизительно 1мЗв, во время первого года после аварии, которая считалась радиологически важной. Пространственные вариации выпадения, а также знания степени важны для понимания и определения аварийных масштабов и будущего, соответствующего, прогноза дозы облучения как внешнего, так и внутреннего облучения, не без учета определения будущих мер защиты от радиации. Для данной цели было отобрано и проанализировано множество проб грунта в радиологических лабораториях.

Из рис. 5 следует, что Российская Федерация, Беларусь и Украина соответственно, имели наибольшие последствия. Суммарная активность  $^{137}\text{Cs}$  составила около 64 ТБк, из коотрых наибольшему влиянию подверглась Российская Федерация – 30%, Беларусь – 23%, Украина – 18%. Ряд европейских стран (Румыния, Норвегия, Финляндия, Швеция, Австрия, Германия) также подверглись радиоактивному загрязнению.

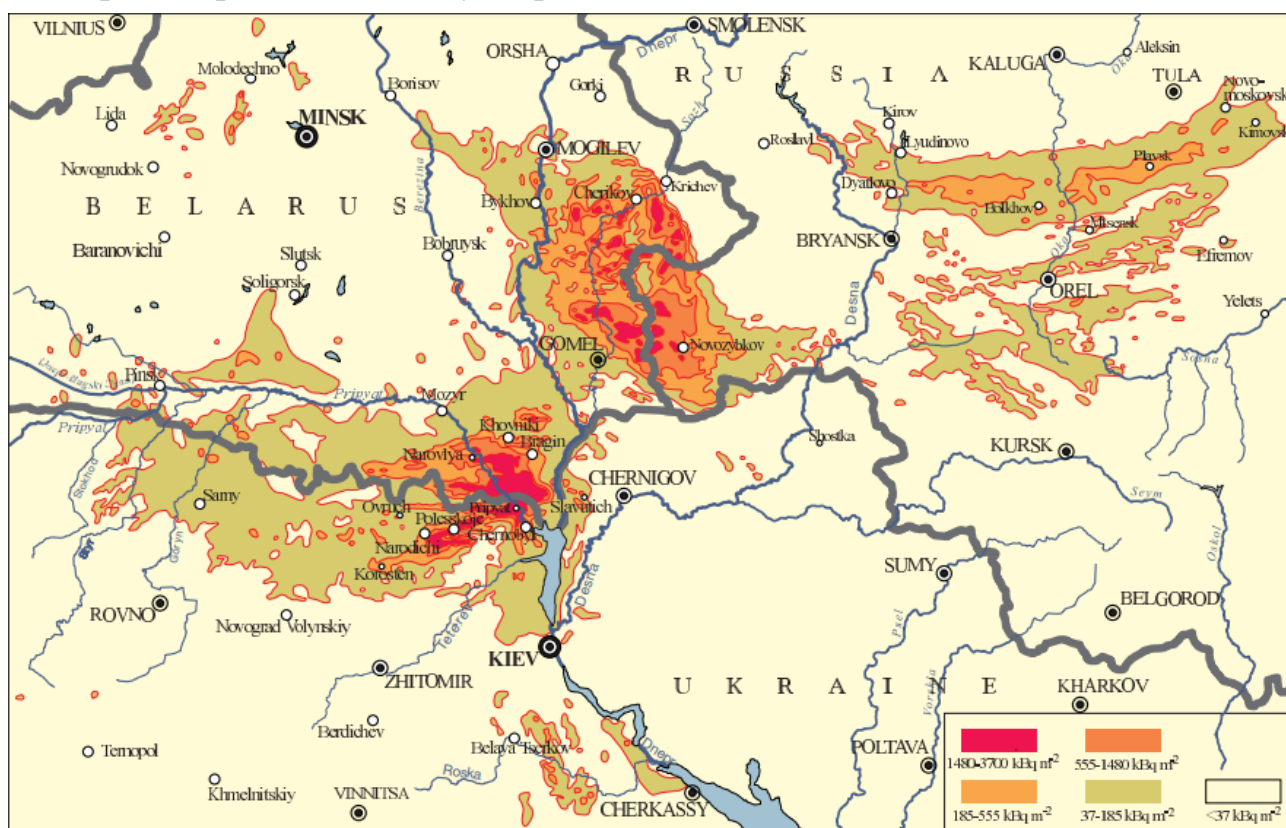


Рисунок 5 – Выпадения  $^{137}\text{Cs}$  на поверхность почвы вблизи от места аварии

Изменению направления и распределения  $^{137}\text{Cs}$ , в местных масштабах и на недалекие расстояния, способствовали водная и ветровая эрозии почвы. Рассматривая региональные масштабы перенос  $^{137}\text{Cs}$  в частицах почвы вызван ветровой эрозией. Вокруг реактора была установлена зона отчуждения(ЧЗО), которая составила 30 километров. В Российской Федерации, Белоруссии и Украине были приняты меры по переселению людей из подверженных заражением территорий. Было эвакуировано 116000 человек.

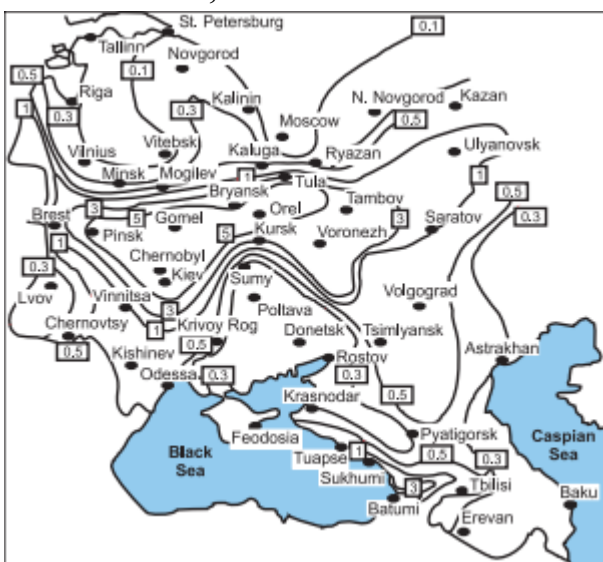
10300 км<sup>2</sup> в 1986 году было подвержено выпадению  $^{137}\text{Cs}$ , с поверхностной активностью 0,6 МБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>). Площадь подверженной территории в Беларуси составила 6400 км<sup>2</sup>, 2400 км<sup>2</sup> в РФ и 1500 км<sup>2</sup> в Украине.

Всего в 640 населенных пунктов, находящихся на зараженных территориях, находилось около 230000 человек. Территория, классифицируемые как радиоактивно-загрязненные, считаются территории, где выпал  $^{137}\text{Cs}$  с дозой более 1 Ки/км<sup>2</sup> (37 кБк/м<sup>2</sup>). В таблице 1 представлены данные 1995 года о численности жителей на загрязненных территориях.

Плотность выпадения $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м <sup>2</sup>	Численность жителей, тыс.			
	Беларусь	Россия	Украина	Всего
37-185	1543	1654	1189	4386
185-555	239	234	107	580
555-1480	98	95	0,3	193
Всего	1880	1983	1296	5159

Таблица 1 – Распределение людей, проживающих на считающихся загрязненными территориях Беларуси, Российской Федерации и Украине в 1995 году

После аварии пищевые продукты оказались подвержены заражению  $^{131}\text{I}$ , что являлось наибольшей проблемой после аварии. Рис. 6 показывает общую схему выпадения  $^{131}\text{I}$ . Небольшое время нахождения  $^{131}\text{I}$ , до его распада помешало собрать достаточное количество проб для детального анализа. По исследованиям предполагалось, что существует большая корреляция между  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Исследования показали не совсем такой результат. После отобранных проб грунта, анализ на  $^{129}\text{I}$  показал, что полураспад вещества составляет более 1500 лет, которое возможно измерить при помощи ускорительной масс-спектрометрии на низких уровнях. Был представлен доклад ученым Страуме и др., где говорилось об успешном анализе проб из Беларуси, результаты исследований которых показали, что  $15 \pm 3$  атома  $^{129}\text{I}$  во время аварии,



приходилось на каждый атом  $^{131}\text{I}$ . Полученные людьми дозы облучения могут быть реконструированы при помощи расчетного соотношения между  $^{131}\text{I}$  и  $^{129}\text{I}$ .

Рисунок 6 – Карта выпадения  $^{131}\text{I}$  на поверхность почвы ( $\text{Ки}/\text{км}^2$ )

Выбросы из реактора  $^{90}\text{Sr}$  были гораздо ниже, чем выбросы  $^{137}\text{Cs}$  и летучесть  $^{90}\text{Sr}$  также ниже. Как итог выбросы  $^{90}\text{Sr}$  ограничились прилегающими территориями к ЧАЭС в отличие от  $^{137}\text{Cs}$ . Проведенные измерения почв по выбросам плутония в пределах ЧЗО, показали его активность в значении выше  $3,7 \text{ кБк}/\text{м}^2$  ( $0,1 \text{ Ки}/\text{км}^2$ ).



Наибольшему исследованию концентрации радионуклидов на поверхности почвы подвергся  $^{137}\text{Cs}$ , с которым сравнивалась как с эталоном концентрация других радионуклидов таких как:  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ ,  $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{125}\text{Sb}$  и  $^{144}\text{Ce}$ . В зависимости от поведения топливных частиц, аэрозолей и газообразных радионуклидов при выпадении и изменения их состава во время выброса меняются отношения активности  $^{137}\text{Cs}$  с другими радионуклидами. Изменения состава выбросов на ЧАЭС менялись в зависимости от таких характеристик как температура активной зоны и времени выброса.

Во время взрыва на ЧАЭС температура активной зоны, которая стала открытой не поднялась настолько сильно как при последующих стадиях. В это время радиоактивный след нес частицы выброса на запад образуя след радиоактивного облака. Перемещающийся на север и северо-восток второй радиоактивный след, переносил из активной зоны, в которой поднималась температура все выше, второй радиоактивный след. Уже третий след нес выбросы в сторону юга из активной зоны, нагретой до температуры  $2000^\circ\text{C}$ , в которой при достижении такой температуры начинают выделяться радионуклиды, характеризующиеся слабой летучестью, например: стронций, молибден, рутений и цирконий, а также увеличиваются выбросы изотопов йода.

Высоко концентрированные загрязнением цезием участки, называемые горячими пятнами, обнаружили далеко от очага ЧАЭС в Тульской, Орловской, Калужской областях РФ и в Беларуси. Аналогичный состав радионуклидов был обнаружен на каждом из исследованных участках. В таблице 2 представлены соотношения выпадения радионуклидов по отношению к  $^{137}\text{Cs}$ , измеренных по выпадениям в почве в различных векторах выброса.

Радионуклиды	Полураспад	Активность на единицу площади относительно $^{137}\text{Cs}$			
		Западный след	Северный след	Южный след	В горячих пятнах цезия

90Sr	28,5 лет	0,5	0,13	1,5	0,014
95Zr	64,0 дня	5	3	10	0,06
99Mo	66,0 часов	8	3	25	0,11
103Ru	39,35 дня	4	1,7	12	1,9
132Te	78,0 часов	15	17	13	13
131I	8,02 дней	18	17	30	10
137Cs	30,0 лет	1,0	1,0	1,0	1,0
140Ba	12,79 дней	7	3	20	0,7
144Ce	284,8 дней	3	2,3	6	0,07
239Np	2,355 дней	25	7	140	0,6
239Pu	24400 лет	0,0015	0,0015	-	-

Таблица 2 - Расчетная относительная поверхностная активность различных радионуклидов после выброса из Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 года)

Аналогичные и даже идентичные, на западном и северных следах, отношения активности радионуклидов, которые не схожи с их южным следом. Если не включать  $^{132}\text{Te}/^{137}\text{Cs}$ , то исследование отношения активности говорит о том, что с увеличением расстояния от АЭС, уменьшается активность радионуклидов. Такое уменьшение менее значимо для  $^{95}\text{Zr}$  и  $^{144}\text{Ce}$  (примерно в три раза), чем для  $^{99}\text{Mo}$  и  $^{140}\text{Ba}$  (на два порядка) или  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{103}\text{Ru}$  (на один порядок). На расстоянии более 1000 км, обнаружено уменьшение в 4 раза в отношении  $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ . Значимых изменений отношений не было обнаружено в радиусе первых 200 км.

Недалеко от реактора связанная с топливными частицами выпала большая часть радиоизотопов стронция. Данные радионуклиды имели низкую экологическую мобильность, в отличие от той которая была в выпадениях, в которых радионуклиды с конденсированными частицами имели связь и которые также имели подавляющее количество и в других районах. Из-за растворения



топливных частиц со временем увеличилось бионакопление  $^{90}\text{Sr}$ . Результатом радиоактивного распада стал процесс исчезновения основной части радионуклидов, которые были первоначально выброшены.  $^{137}\text{Cs}$  представляет большую проблему и в настоящее время. Через 100 лет и чуть более на территориях, затронутых последствиями аварии на ЧАЭС, останутся только  $^{241}\text{Am}$  и изотопы плутония.

### 3.3 Влияние атомных выбросов на состояние воды

Поверхностные вод на части Европы оказались подвержены радиоактивными материалами из-за аварии на ЧАЭС. Водосбор реки Припять, который непосредственно связан с Днепром и его водохранилищами, был подвержен в большей степени, чем другие водные объекты влиянию радиоактивных осадков. По этой причине особую опасность таили в себе водные ресурсы, которые непосредственно влияют на жизнь людей, ведь радиоактивные загрязнения водохранилищ Днепровского каскада, спускающегося к Черному морю на расстояние около одной тысячи км, было также подвержено. Меньшие дозы радиоактивности, которые не были с радиологической точки зрения значимыми, были также замечены в некоторых реках Европы, таких как Дунай и Рейн.

В некоторых районах РФ, Украины и Беларуси, в речных объектах, были высоки первоначальные концентрации радионуклидов при сравнении с реками в Европе, оценивая по нормам питьевой воды и содержания в ней радионуклидов, в первое время после аварии. Данные условия содержания радионуклидов в питьевой воде, было вызвано непосредственным выпадением радиоактивных осадков в реки и загрязненным стоком, выходящим из водосборных областей.

Радионуклид	Макс. Концентрация в реке Припять Бк/л	Радионуклид	Макс. Концентрация в реке Припять Бк/л
$^{137}\text{Cs}$	1591	$^{106}\text{Ru}$	271
$^{134}\text{Cs}$	827	$^{144}\text{Ce}$	380

131I	4440	141Ce	400
90Sr	30	95Zr	1554
140Ba	1400	95Nb	420
99Mo	670	241Pu	33
103Ru	814	239+240Pu	0,4

Таблица 3 – Максимальные концентрации радионуклидов, измеренные в реке Припять в Чернобыле.

Территории рек Припять, Ирпень, Днепр и Тетерев, находящихся вокруг Чернобыля, характеризовались загрязнениями радионуклидов, при прямом осаждении на речные поверхности. Река Припять имела результаты наибольшей концентрации радионуклидов, которая доходила до 4440 Бк/л для 131I, что указано в таблице 3. Уровни радиоактивности быстро уменьшились в течение двух первых недель во всех водоемах, чему способствовали абсорбции нуклидов грунтами областей водосборов и донными речными отложениями, под действием распада мало живущих изотопов.

Наиболее долгоживущими являются 90Sr и 137Cs, которые остались в грунте площадей водосборов, в течение долгого времени после выпадения радиоактивных осадков, которые в результате эрозии грунтовых частиц и процесса десорбции из грунта, медленно переходящие в речную воду. Влияние степени эрозии почвы, силы грунтовой фиксации радионуклидов площадей водосборов и их последующей миграции по профилю почвы вниз, определяют темп перехода.

Для определения концентраций и суммарных потоков радионуклидов в пределах ЧЗО и на прилегающих реках появились станции мониторинга воды для измерений радиоактивности: потоков радионуклидов 90Sr и 137Cs для территории ЧЗО и вытекающих из нее рек. Вокруг ЧЗО заметно уменьшилась миграция 137Cs спустя время, во всех направлениях показывает небольшое изменение значение, что показано на рисунке 7 а. при затоплении берегов

Припяти, которые происходили каждый год, миграция  $^{90}\text{Sr}$  колебалась в течение всех лет, что показано на рисунке 7 б. Концентрации, которые двигаются вниз по течению из зоны ЧЗО гораздо выше, чем если рассматривать их по течению вверх. Необходимо отметить, что доля вымывания речной системой радионуклидов от их общего объема составляет небольшую долю, которая содержится в площадях водосборов. В реках на территории ЧАЭС и Западной Европы наблюдались схожие темпы понижения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Перенос радионуклидов из ближайших площадей водосбора и подверженные выпадениям радиоактивных осадков на водную поверхность, стали главными факторами загрязнения водохранилищ и озер. Уменьшилась концентрация радионуклидов, находящихся в озерах, где существуют сильные водные оттоки и притоки, и водохранилищах. Концентрации радиоактивного цезия поддерживались, в определенных случаях, по причине сточных вод,двигающихся с грунтов площадей водосборов, на весьма высоком уровне. В открытых озерах и реках более низкие концентрации радиоактивного цезия, чем в водной биоте закрытых озер, в которых небольшой отток и приток воды.

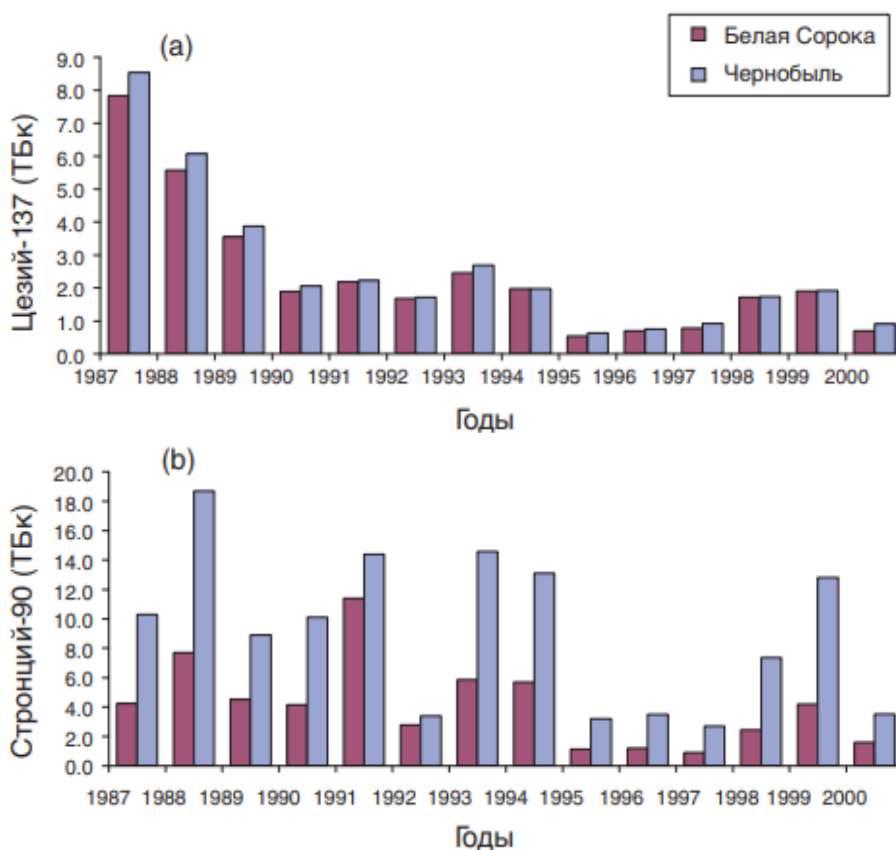


Рисунок 7 – Годовые потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в реке Припять у Белой Сороки около белорусско-украинской границы и вниз по течению от Чернобыля

В переносе в водных системах ключевую роль имеет, удерживание выпавших радионуклидов грунтом областей водосборов и озерными и речными отложениями со дна. Абсорбируемые взвешенными частицами, изменчивыми в поверхностных водах, доли радионуклидов главным образом воздействует на бионакопление, а также на их перенос. В значительной степени выпавший в пределах ближней зоны радиоактивный стронций был представлен в топливных частицах, в то время как его основная масса находилась в растворенной фазе. Затопление низин смывает часть  $^{90}\text{Sr}$  с высоко загрязненных им почв ЧЗО.

Первые десять лет после аварии река Припять содержала примерно 50% радиоактивного цезия в форме частиц, в то время как в других системах содержание зависит от концентрации и состава взвешенных частиц и водно-химического режима и находится в пределах от 4% до 80%. Частицы песка более крупные и менее реактивные и поэтому хуже поглощают цезий, чем тонкодисперсная глина и частицы ила. Значительному загрязнению не оказались подвержены песчаные русла рек, которые находятся недалеко от реактора, но несмотря на это на большие расстояния переносился в мелких частицах цезий. Донные отложения подверглись высокому уровню радиоактивного загрязнения по причине мелких частиц, которые осели глубоко в местах водохранилища в Киеве.

Увеличивается сила адсорбции взвешенными частицами в данном порядке:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , трансурановые элементы ( $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), что было выяснено при проведении измерений, в растворенной фазе и форме частиц (в воде реки Припять), распределения радионуклидов. Определение стабильности трансурановых элементов, которые находятся на поверхности воды, а также при переносе из почвы, которая загрязнена радиоактивными элементами, стало возможным благодаря естественным коллоидным органическим растворам, которые и могут определять их стабильность. Однако такие растворы не особо эффективны для  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

На территориях, которые были подвержены заражению (РФ, Белорусия, Украина), радионуклидовое загрязнение было значительно во многих озерах. После выпадения радиоактивных осадков, радионуклиды, попавшие в воды озер посредством радиоактивных осадков в первые дни аварии, оказались перемешаны в водах озер. Необходимо несколько месяцев, чтобы произошло полное вертикальное перемешивание в глубоких озерах, примером которых является Цюрихское, глубина которого составляет 143 метра. Озера, которые были покрыты льдом, как, например, в Северной Европе, сразу после выпадения осадков оказались не подвержены заражению, концентрация радионуклидов увеличилась при таянии льда.

При помощи водооттока и переноса в водные отложения, выпавших радионуклидов на поверхности озер и водохранилищ, удаляются. Озера аналогичные реками, в которых после выпадения радиоактивных осадков, достаточно быстро снижалась концентрация радиоактивного цезия. В течение определенного времени происходило замедление снижения темпа, по причинам, связанных с грунтами площадей водосбора, которые фиксировали радиоактивный цезий, озерными донными отложениями и последующего перемещения глубоко в грунт и его отложения.

В закрытых озерах в 1991 году концентрации  $^{137}\text{Cs}$  наблюдались до 74 Бк/л, а также из 17 исследованных водоемов, в 6 из них наблюдались концентрации  $^{90}\text{Sr}$  - от 100 до 370 Бк/л. ЧЗО, спустя 17 лет после аварии на ЧАЭС, характеризовалась повышенной концентрацией радионуклидов в закрытых озерах, которые были на достаточно дальнем расстоянии от реактора. В 200 км от Чернобыля находятся озера Святое и Кожановское в Брянской области РФ, в которых в 1996 году содержалось 0,6–1,5 Бк/л  $^{90}\text{Sr}$  и 10–20 Бк/л  $^{137}\text{Cs}$ . В этих закрытых озерах, в результате перемещения из отложений была выше концентрация радионуклидов, чем в ближайших к Чернобылю озерах.

Радиоактивный цезий и другие радионуклидные бионакопления находящиеся в рыбе, привели к концентрации, превышающие для потребления допустимые уровни. В настоящее время для некоторых озер РФ, Беларуси,

Украины уровень зараженности остается высоким. Рыболовство является неотъемлемой частью жителей зараженных регионов, так порядка 20000 тонн рыбы в год добывают в Украине в Днепровском каскаде. Концентрация в рыбе радиоактивного цезия до сих пор высоки в районах Западной Европы, в частности у берегов Скандинавского полуострова.

Радионуклиды часто попадают к человеку через пресноводную рыбу, которую он потребляет. В водохранилище Киева  $^{131}\text{I}$  быстро поглощался рыбой по причине, которой его концентрация была максимальной в мае 1986 года. С 1 мая 1986 года, когда концентрация составляла 6000 Бк/кг, до 20 июня 1986 года, когда концентрация составляла 50 Бк/кг, концентрация снизилась со скоростью распада  $^{131}\text{I}$ , а уже через несколько месяцев после аварии его концентрации стали незначительными.

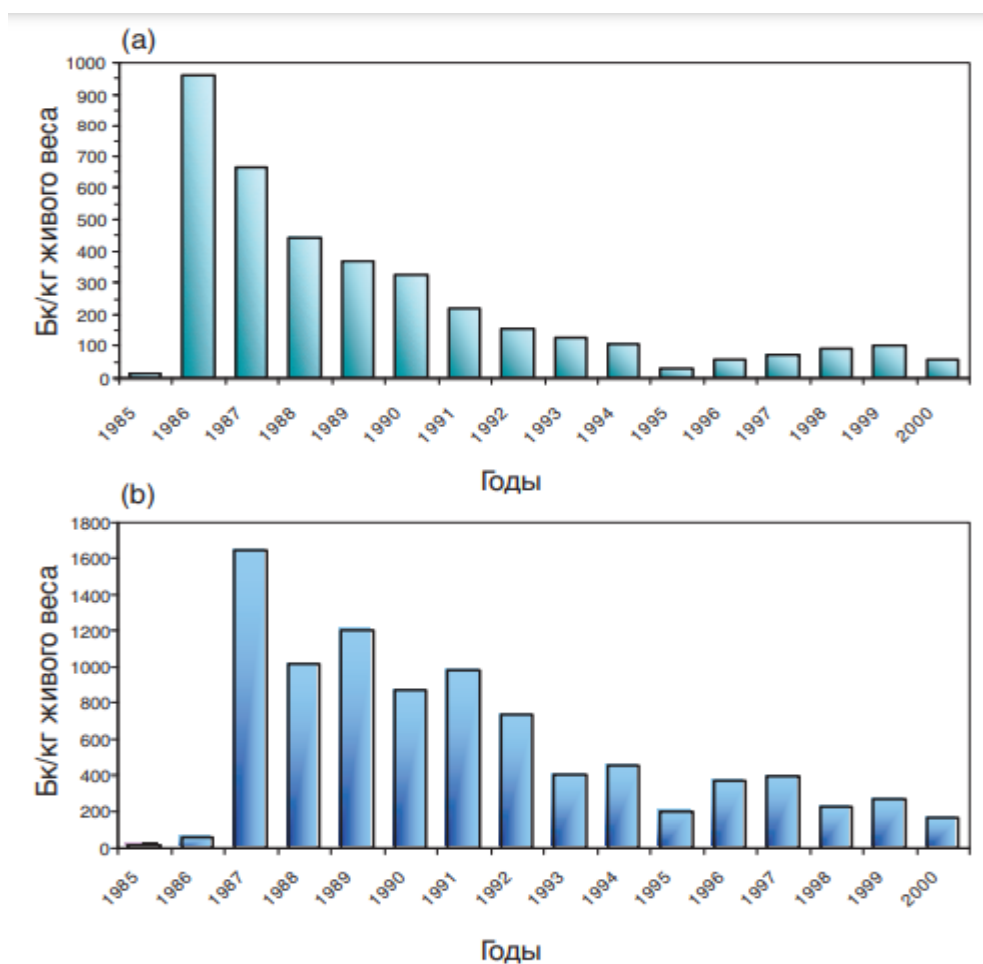


Рисунок 8 – Средние концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в нехищной (a) и хищной (b) рыбе из Киевского водохранилища

Множество исследований уровня радиоактивности пресноводной рыбы радиоактивным цезием было проведено после аварии на ЧАЭС. Несмотря на низкое содержание в воде радиоактивного цезия, рыба в некоторых районах была загрязнена еще долго время, по причине бионакопления радиоактивного цезия с высокими коэффициентами. Мелкая рыба быстро поглощала радиоактивный цезий и в течение начального времени, после аварии на ЧАЭС, наблюдалась максимальная концентрация. В отличие от мелкой рыбы, крупные и хищные рыбы медленно поглощали радиоактивный цезий, из-за чего максимум концентрации произошел после выпадения радиоактивных осадков лишь спустя 6-12 месяцев.

Существует множество факторов бионакопления в рыбе радиоактивного цезия. Калий имеет химическую схожесть с цезием, что осложняет накопление последнего в рыбе. В озерных водах наблюдались обратные зависимости между концентрацией калия и  $^{137}\text{Cs}$ , находящихся в рыбе, после аварии на ЧАЭС и ядерных испытаний оружия. Рассматривая долгосрочные процессы, радионуклиды высокой концентрации находились больше в крупной и хищной рыбе, чем в мелкой. Данное явление назвали «эффект размера», который заключается в режиме питания и метаболизме исследуемых рыб. Также было выявлено, что молодая мелкая рыба подвергалась более низким уровням воздействия  $^{137}\text{Cs}$ , чем крупная.

Исследования показали, что у крупной щуки и окуня, которые являются хищными рыбами, обитающие в озере Святое, бионакопление радиоактивного цезия было в 5-10 раз выше, чем у мелкой, нехищной рыбы, например, плотвы. Наиболее высокие коэффициенты бионакопления наблюдаются в озерах, где концентрация калия низкая и наоборот. Таким образом на территориях сельского хозяйства Беларуси со стоком удобрений с повышенным содержанием калия, озерная рыба имела низкие коэффициенты бионакопления, чем другие.

В настоящее время концентрация радионуклидов в питьевой воде стали низкими после аварии.

### 3.4 Распространение радионуклидов в городской среде

В СССР и некоторых европейских странах авария на ЧАЭС послужила причиной радиоактивного заражения нескольких тысяч населенных пунктов, а также облучения жителей из-за воздействия гамма-лучей и потребления облученных пищевых продуктов. Как было сказано ранее ближайшие населенные пункты были подвержены сухому выпадению радионуклидов из радиоактивного облака, в следствие чего стали подвержены существенному радиационному загрязнению, а более отдаленные подверглись выпадению радиоактивных осадков во время прохождения облака. Выпавшие в населенных пунктах радиоактивные осадки, попали на открытые поверхности, такие, как парки, улицы, крыши и стены, из-за чего они подверглись загрязнению радионуклидами. На загрязнение повлияли условия их выпадения, так, например, деревья, кустарники и крыши сильнее подвержены загрязнению в сухих условиях, чем во время осадков. Горизонтальные поверхности и почва, наоборот, подвергаются наибольшему загрязнению при влажных выпадениях. Наибольшая концентрация  $^{137}\text{Cs}$  была обнаружена в области вокруг зданий, так как дождь переносил частицы с крыш на землю. Сравнение сухих и влажных радиоактивных выпадений приведено на рис. 9.

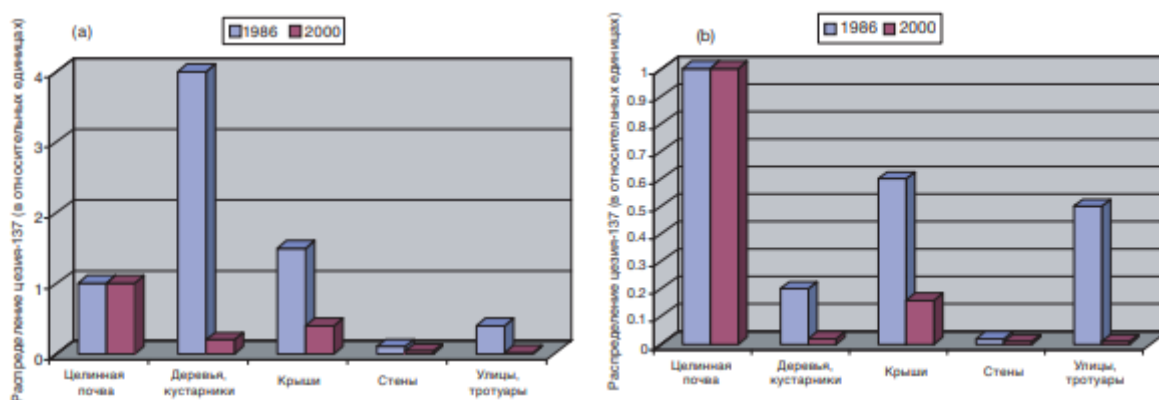


Рисунок 9 – Типичное распределение  $^{137}\text{Cs}$  на различных поверхностях в населенных пунктах в 1986 году и через 14 лет после выпадения чернобыльских осадков



Дожди, снег и другие природные процессы, наряду с деятельностью человека, такой, как очистка улиц, дорожное движение повлияли на отделение радионуклидов от поверхностей, на которые они изначально выпали, и послужило причиной их движения в населенных пунктах. С приходом осени зараженные листья с деревьев и кустарников осыпались, а с поверхности дорог были удалены радиоактивные частицы, которые подверглись смыву в канализационные системы. В 1986 и последующих годах все вышеописанные события послужили причиной снижения мощности радиоактивной дозы в населенных пунктах.

Первоначальные выпадения на стены через 14 лет составляло 50-70% от первоначального, в связи с тем, что вертикальные поверхности не подверглись высокой степени воздействия из-за дождей, в отличие от горизонтальных поверхностей. Загрязнения радиоактивным цезием на асфальтовых покрытиях уменьшилось до уровня в 10% от изначального уровня активности. Наибольший уровень загрязнения связан со слоем уличной пыли, находящейся на асфальте, а не с наличием в асфальте фракции битума, но она подвергнется смыванию в конечном счете.

В 1993 году проведенные измерения в городе Припять недалеко от ЧАЭС показали наличие остаточного радиоактивного цезия на дорогах в высоких количествах. В связи с эвакуацией жителей города было ограниченное дорожное движение. Первоначальными около 5-10% выпавшего цезия связаны с бетонными поверхностями, и существенного уменьшения его концентрации в течение последних лет не было обнаружено. Горизонтальные поверхности, подверженные интенсивному движению, более быстро подвергались выветриванию.

Вторичное загрязнение систем канализации, а также резервуаров сточных вод стало одним из последствий ЧАЭС, которое потребовало специальные меры для устранения загрязнения. Радионуклиды перемещались вниз по колонке

грунта, а не в другие районы, в результате естественных природных процессов или во время сельскохозяйственных работ.

По причине выпадения осадков, городские агломерации были подвержены гамма-излучению радионуклидов, из-за чего были облучены люди. Абсорбция фотонов, находящихся в конструкции зданий, повлияла на уменьшена мощность дозы в домах, особенно если здания построены из кирпича и бетона. Многоэтажные здания, особенно верхние этажи защитили от повышенной дозы излучения.

Существует временная зависимость отношений между мощностью дозы излучения воздуха в городской среде и мощностью дозы на открытых пространствах, которая возможна по причине миграции радионуклидов. Результаты измерений показали зависимость между временем после аварии на ЧАЭС и городских пространствах, показана на рисунке 10. Парки и участки с растительностью являются относительно постоянным фактором места, мощность дозы для твердых покрытий, таких как асфальт, уменьшается в течение времени, что было выявлено и в других странах.

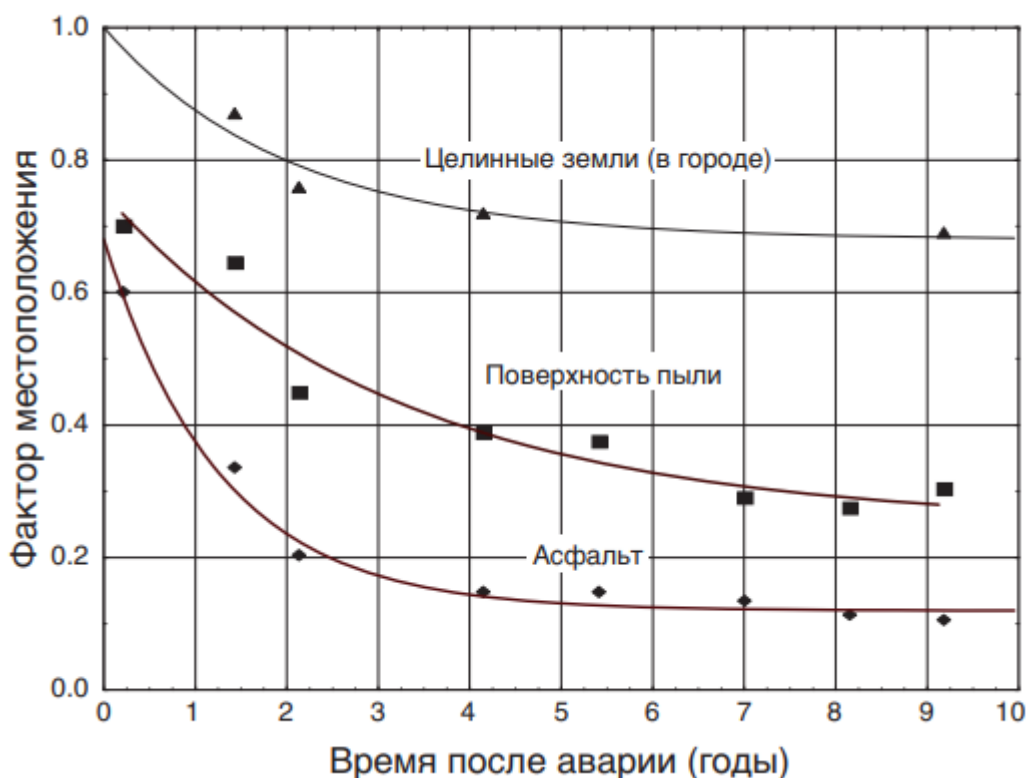


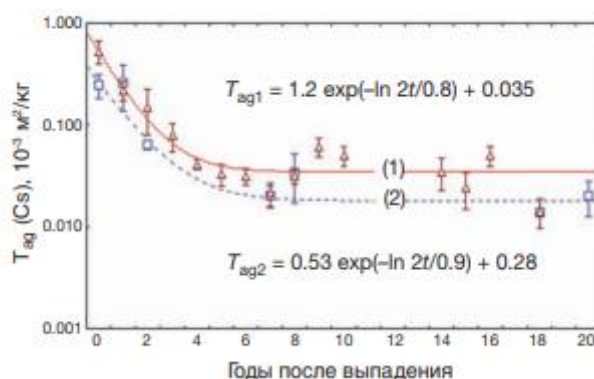
Рисунок 10 – Соотношение мощности доз излучения над различными поверхностями и мощности доз на открытых пространствах после аварии

На сегодняшний день исследования показывают, что после аварии на ЧАЭС, подвергшиеся радиоактивному загрязнению населенные пункты показывали уровень естественного фона воздуха над твердыми покрытиями. Очевидно, что показатели в городе Припять показывали наивысший уровень радиоактивного загрязнения. Город находится от ЧАЭС в 3 км, в течение полутора дней была организована всеобщая эвакуация всех жителей.

### 3.5 Влияние атомных выбросов на сельское хозяйство

Последствия радиоактивных выбросов после аварии на ЧАЭС затронули своим загрязнением экосистемы не только естественные, но и сельскохозяйственные на территории СССР и в некоторых странах Европы. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в растениях, в 1986 году, было максимальным. После аварии спустя год содержание  $^{137}\text{Cs}$  изменилось от 3 до 100 раз в растениях, действующим фактором чего являлся тип почвы, благодаря которым корни поглощали радиоактивное загрязнение.

Поведение  $^{137}\text{Cs}$ , в первые годы после аварии на ЧАЭС, для луговых растений оказывало влияние радионуклидового распределения между почвой и дерниной. Поглощение  $^{137}\text{Cs}$  превышало до 8 раз почвенное поглощение. Происходил процесс перехода радионуклидов в почву в результате гниения



дернины, из-за чего ее вклад стал уменьшаться и спустя 4 года он не превышал для автоморфных почв – 6% и для гидроморфных почв – 11%.

Рисунок 11 – Динамика совокупных коэффициентов переноса  $^{137}\text{Cs}$  в злаковые растения (1 – песчаные и суглинистые почвы, 2 – черноземные почвы)

Начиная с 1987 года содержание  $^{137}\text{Cs}$  в растениях для большинства почв продолжали уменьшаться, однако темпы замедлились. Исследования показывают, что различные сельскохозяйственные культуры, поглощающие своими корнями, показали уменьшение по времени как показано на рисунке 11. В 1980-1985 годах, когда было выпадение  $^{137}\text{Cs}$ , но перед аварией на ЧАЭС, на рисунке 10 показаны для чернозема 2 экспериментальные точки 18 и 20 лет. Для зерновых злаков, по  $^{137}\text{Cs}$ , значения ТФ спустя 20 лет после выпадения радиоактивных осадков, для картофеля и коровьего молока, показало, что его изменения не было существенным от наблюдаемых через 8-9 лет и позднее. Там доминировали чернозем, песчаные и суглинистые почвы. На удобренной почве для зерновых злаков, между значениями  $T_{\text{ag}}$  разница гораздо ниже, чем у естественного травостоя.

Причинами уменьшения по времени перехода радиоактивного цезия в растения из почвы являются: распад радионуклидов (физический), из корнеобитаемого слоя нисходящее движение радионуклидов, уменьшение биодоступности, в следствие физических и химических взаимодействий с матрицей почвы. Очищение, то есть полувыведение, при поглощении корнями растений радиоактивного цезия, для многих почв экологические периоды будут характеризоваться: быстрым уменьшением, при поглощении корнями радиоактивного элемента, с периодом полувыведения от 0,7 до 1,8 года, затем в течение 4-6 лет, уменьшая концентрацию на порядок в растениях, относительно к концентрации в 1987 года, а также с периодом полувыведения, его более медленным уменьшением от 7 до 60 лет. Свойства почвы непосредственно влияют на динамику снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$ , по причине которой растения могут поглощать  $^{137}\text{Cs}$  в разных темпах и объемах.

Снижение по времени  $^{90}\text{Sr}$ , поглощённый растениями, не был так заметен. Топливные частицы постепенно растворялись на территориях вокруг ЧАЭС, что увеличило биодоступность  $^{90}\text{Sr}$ , который был поглощён растениями, увеличив время.

Конденсированная форма радионуклидов стронция, которые выпадали в виде мелких диспергированных топливных частиц, в небольших количествах, тогда  $^{90}\text{Sr}$  в растениях, его долгосрочная динамика перехода была аналогична динамике радиоактивного цезия, однако их отличие заключается в снижении экологических периодах, когда корни растений поглощают радиоактивные элементы, что связано с отличающимися механизмами переноса исследуемых элементов в почве. Фиксация цезия компонентами почвы зависит от содержания в почве глины больше, чем фиксация стронция (Приложение 1). Таким образом от свойств почвы, переход  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в растения, значения параметров зависят больше, чем параметры перехода  $^{90}\text{Sr}$ .

Заражения корма радионуклидами и путь прямого перорального почвенного поступления оказывает влияние на зараженность организмов животных. Происходило внутреннее облучение людей из-за облученного молока и мяса, по причине воздействия  $^{131}\text{I}$ , который влиял в самом начале после аварии на ЧАЭС, а также радиоактивного цезия, но уже в долгосрочном плане. Высокий уровень радиоактивного загрязнения животной продукции могут наблюдаться не более нескольких месяцев после выпадения радиоактивных осадков, если говорить об интенсивных аграрных экосистемах. Продолжительность и уровень загрязнения животной продукции радионуклидами, влияет их захват и удержание, их степень, на поверхности растений. Стоит отметить, что данное правило не распространяется на некоторые районы, которые подверглись радиационному излучению после аварии на ЧАЭС, где наблюдались высокие уровни выпадения осадков или поглощения растениями.

Несмотря на невысокие уровни первоначального выпадения радиоактивного цезия, излучение может сохраняться на протяжении длительного времени в продукции животноводства. Главными причинами

являются тип почвы, благодаря которому в растения поступает радиоактивный цезий, виды растений, которые могут сохранять радиоактивный цезий на высоких уровнях, а также мелкие жвачные животные, пасущиеся на зараженной территории, которые накапливают цезий в более высоких концентрациях, чем крупные.

Поведение радионуклидов в системе почва-растение, метаболические пути распространения в организмах скота, скорость абсорбции, ухудшение их активности влияет на загрязнение животной продукции. Чаще всего радионуклиды поступают в организм скота посредством перорального поступления радионуклидов через корма, а затем через желудочно-кишечный тракт абсорбции, хотя абсорбция и происходит через кожу и легкие. Степень абсорбции питательных веществ варьирует от незаметной (если рассматривать актиниды) до максимальной (если рассматривать радиоактивный йод), рассматривая радиоактивный цезий, из-за его форм, его абсорбция происходит от 60 до 100 %, которые происходят в тонкой кишке или рубце.

Радионуклиды, поступившие в организм после абсорбции, циркулируют по кровеносной системе, накапливаясь в конкретных органах: щитовидная железа подвержена накоплению радиоактивного йода, а печень металлическими ионами. В костях могут осаждаться актиниды, а именно радиоактивный стронций. По мягким тканям может перемещаться радиоактивный цезий. Попадания в продукцию животноводства радионуклидов описывают переносными коэффициентами, которые определяются как равновесное соотношение между радионуклидовой концентрацией в продукции, которую делят на поступление радионуклида в ежедневном рационе питания. Для крупных животных эти коэффициенты переноса низкие, если брать в пример радиоактивный йод и цезий в молоке и мясе, чем для мелких животных. Также стоит отметить, что в молоке меньше коэффициент переноса радиоактивного цезия, чем в мясе.

По времени уровневая долгосрочная тенденция загрязнения в мясе и молоке радиоактивного цезия, схожа с тенденцией в растительности. Отмечают

2 фазы: в первые 4-6 лет после выпадения радиоактивного цезия, в самом начале происходило стремительное уменьшение от 0,8 до 1,2 года экологического периода.

В целом, современные результаты природных процессов и контрмер в сельском хозяйстве концентрация радиоактивного цезия в пищевых продуктах сельского хозяйства, которые были произведены в районах, где произошла авария на ЧАЭС, показывают результаты ниже международных уровней действий. Несмотря на это остались участки, где до сих пор высокий уровень загрязнения, как и в продуктах животноводства. Рассматривая молочную продукцию уровень радиации равен 100 Бк/кг в районах Гомельской и Могилевской областях Беларуси, а также в Брянской области РФ, что говорит о проведении мероприятий для реабилитации зараженных территорий.

Обобщая информацию, можно сказать, что концентрация радиоактивного цезия в животной продукции медленно сокращалась в течение прошлых десятилетий. Таким образом радионуклиды должны быть близки к равновесному состоянию в аграрных экосистемах, однако в зависимости от времени ожидается уменьшение перемещения радионуклидов вниз по почве. Анализируя современные данные о медленном темпе уменьшения, можно сказать, что определение эффективных периодов полураспада на долгое время, затрудняется получением новой информации о дальнейшем уменьшении в течение последующих годов, если не учитывать радиоактивный распад  $^{137}\text{Cs}$   $^{90}\text{Sr}$ , полураспад которых осуществляется в течение 30 лет. При изменении в обращении с землями, которые сейчас пусты, сокращение и полное остановленные применяемых контрмер, изменений в одном режиме, растворение частиц топлива могут увеличить концентрацию в пищевых продуктах радионуклидов.

## **Глава 4. Экологические контрмеры и реабилитация окружающей среды**

### **4.1 Дезактивация городской среды**

Главной контрмерой являлась дезактивация жилых территорий, поскольку главной целью являлось внешнее облучение населения, которое было необходимо снизить в короткие сроки при помощи удаления источников излучения, появившихся в городской жилой среде.

Почва, асфальт и бетон стали важнейшими источниками получения радиационной дозы самыми разными группами населения, стены и крыши зданий несли наименьший ущерб. По этой причине, для сокращения уровня радионуклидов, было решено устранить почвенного верхнего слоя.

Чтобы оценить эффективность дезактивации, оценивают снижение мощности дозы, фактор которого равен снижению мощности дозы над исследуемой поверхностью после контрмер, и снижением дозы фактор которой рассматривает уменьшение дозы внешнего облучения людей от расположенных в окружающей среде радионуклидов.

### **4.2 Сельскохозяйственные контрмеры**

После аварии на ЧАЭС появилась потребность обработать почву, чтобы сократить поглощение радиоактивного цезия. Процедура включает непосредственно влияние на почву: ее пересев, вспахивание, внесение удобрений с кальцием, фосфором и азотом. В сельском хозяйстве растения потерпели преобразования на основании того, что некоторые из них адсорбируют больше радиоактивного цезия, чем другие, по выделенной причине они были ликвидированы с зараженных территорий. Чтобы уменьшить зараженность радионуклидами молока и мяса, домашний скот перешел на чистое кормление, что стало главной контрмерой для снижения заражения в результате аварии на ЧАЭС. Комбинирование гексаферроцианидов калия были добавлены



в питание животных, которые используются для получения мяса, что стало эффективным сорбентом, который поглощает радиоактивный цезий.

Чтобы торговля мясом не приостанавливалась, в трех наиболее подверженных радиоактивным цезием странах, до сих пор используется чистое кормление.

В Беларуси, если в молоке превышает уровень загрязнения, то его преобразуют в масло, тем самым снижая радиационную активность, а земли обрабатываются фосфорно-калийными удобрениями. Существует ограничение производства семян рапса по причине наличия мощностей обработки.

Действующей контрмерой на территории Украины для ликвидации последствий радиоактивного заражения используется чистое кормление перед забоем мясных животных. Для кормления свиней в пределах территорий, на которых они осуществляют свою жизнедеятельность, могут использовать молоко, если его степень загрязнения превышает уровень действия. Применяются и другие контрмеры, однако они направлены на частные подсобные хозяйства. Глинистые минеральные сорбенты цезия используются для улучшения корней лугов в частных молочных хозяйствах.

Крупные фермы Российской Федерации пользуются калийными удобрениями.

### **4.3 Реабилитация загрязненных территорий**

Первоочередной задачей по реабилитации стали зараженные территории, на которых находились люди или территории, на которые они когда-то населяли. Сложность процедуры заключается в экономической и социальной важности и необходимости выполнения контрмеры по реабилитации. Чтобы территория стала пригодной для проживания, дополнительная годовая эффективная доза не может превышать 1 мЗв.

Для оценки эффективности контрмер определяется сокращение радионуклидового содержания в местные продукции, а также коллективной и

индивидуально дозы, увеличение рыночной стоимости продукции, а также общественным мнением о применяемых контрмерах для деактивации зараженных территорий.

$^{90}\text{Sr}$  выступает в качестве радионуклидом, который в настоящее время ограничивает ЧЗО. Исследование радиоактивности указывает, что без ограничений может использоваться юго-западная часть ЧЗО. Это не может быть воплощено в данный момент по причине недостаточных экономических условий, действующих правовых ограничений, дефицит инфраструктуры, а также факторов социально-психологических. Есть и другие территории, которые можно было бы восстановить после аварии, однако учитывая вышеперечисленные факторы, никто не спешит их восстанавливать, ведь есть более плодородные земли в каждой из пострадавших стран. Несмотря на это часть жителей вернулась в свои дома, некоторые же используют эти земли лишь как сельскохозяйственные угодья. Контрмеры все же применяются на брошенных землях, чтобы осуществлять контроль над загрязнениями, санитарии и происходящей там деятельности.

#### **4.4 Контрмеры в отношении водной среды**

Для того чтобы снизить дозу в водной среде контрмеры рассматривались прямые, ограничивающие контрмеры и меры вмешательства не прямые: использование воды было ограничено, были подсоединены другие источники водоснабжения, которые стали заменять, потребление рыбы было ограничено, дамбы и дренажные системы выполняли управление потоков воды, снижение радионуклидов в загрязненной воде, которую потребляла рыба и ее обработка перед употреблением в пищу.

Вода может быть очищена от радионуклидов посредством исключения взвешенных частиц, а исключение, непосредственно, растворенных радионуклидов происходит при помощи фильтрации. Образцом очистки питьевой воды является ее фильтрация посредством цеолита и активированного

древесного угля на днепровской водопроводной станции. В ходе исследований было выяснено, что цеолит удаляет  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , а древесный активированный уголь  $^{131}\text{I}$  и  $^{106}\text{Ru}$ . Фильтры на этих веществах действуют не более трех месяцев, далее происходит их насыщение. Исследование показало, что число радионуклидов в воде снизилось на 50% при помощи использования таких фильтров.

В зонах, которые были затронуты последствиями аварий на Чернобыле было запрещено пресноводной рыбы, в некоторых районах даже хищной. Такие ограничения часто не исполнялись рыбаками из-за чего пришлось внести запрет на ее продажу в некоторых районах Норвегии.

Количество радионуклидов в пище меняется в зависимости от способов ее приготовления. Было предложено наложить запрет приготовления копченной и сушеной рыбы, поскольку это повышает концентрацию радионуклидов, в отличие от других способов приготовления, которые могут снизить их концентрацию приблизительно в 2 раза. Если устранить кости рыбы до ее приготовления, тогда количество радиоактивного стронция уменьшится.

Контрмеры не были приняты в отношении оросительной воды, но было определено, что возможно снизить трансформацию в сельскохозяйственные культуры в несколько раз количества радионуклидов, при помощи замены разбрызгивания сельскохозяйственных растений дренажным орошением. Применяя этот подход вместе с удобрениями, орошаемые сельскохозяйственные территории могут снизить уровни радионуклидов в почве.

## **Заключение**

В данной научно-исследовательской работе были рассмотрены основы атомной энергетики, история ее образования и подробное изучение принципа действия атомных электростанций. По оценке влияния радиоактивных выбросов в атмосферу, было выяснено, что влияние радиоактивных веществ, выброшенных во время аварий из атомных реакторов, оказывают влияние и в настоящее время. Изучены процессы, происходящие во время аварий на АЭС. В качестве примеров были рассмотрены аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», проведен их сравнительный анализ. Оценено влияние аварии на Чернобыльской АЭС, включающее в себя распространение радионуклидов в атмосфере, почве, воде, сельском хозяйстве. Было определено, что каждая составляющая оказалась подвержена сильному радиационному влиянию, по причине которого территории, пригодные когда-то для жизни, оказались заброшенными. Для каждой из перечисленных исследуемых областей были определены действенные контрмеры, главными из которых являются вспахивание радиоактивных земель, использование кальциевых удобрений, установка очистных фильтров на водных сооружениях, использование «чистого кормления» для домашнего скота.

Выводом из этой работы служат современные данные, основываясь на которые, можно сделать вывод, что происходит постепенный распад радионуклидов, в результате чего зараженные территории, после использования контрмер, могут стать вновь используемыми.

## Список литературы

1. Автушенко Н. А., Леневский Г. С. Атомные электростанции // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2017. — № 4(57). — С. 128–136.
2. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. — СПб : Гидрометеоздат. Прогресс-погода, 1996. — 355 с.
3. Ядерные энергетические установки : [Учеб. пособие] / Б. Г. Ганчев, Л. Л. Калишевский, Р. С. Демешев и др.; Под общ. ред. Н. А. Доллежала. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 504 с. : ил. — Библиогр.: с. 496—498. — Предм. указ.: с. 499—501.
4. Гордон Б. Г. Безопасность ядерных объектов: [учебное пособие] / М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ». — М. : НИЯУ МИФИ, 2014. — 383 с. : ил., табл. — Библиогр.: с. 374—383.
5. Гурачевский В. Л. Введение в атомную энергетику. Чернобыльская авария и ее последствия. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Минск : Институт радиологии, 2014. — 176 с.: ил. — Библиогр.: с. 168—174
6. Аркадов Г. В., Павелко В. И., Финкель Б. М. Системы диагностирования ВВЭР. — 2-е изд., доп. — М. : Наука, 2019. — 391 с
7. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой, Е. П. Велихов ; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : 2018. — 408 с
8. Аварии и инциденты на атомных электростанциях : Учеб. пособие / Обнин. ин-т атом. энергетики. Спец. фак. по переподготовке кадров по новым, перспектив. направлениям науки, техники и технологии. Физ.-энерг. фак. ; [Сост. Авдеев Е.Ф. и др.] Под общ. ред. С.П. Соловьева. — Обнинск : ИАТЭ, 1992. — 298 с

9. Абалкина И. Л., Марченко Т. А., Панченко С. В. Чернобыльская радиация в вопросах и ответах / [ИБРАЭ РАН]. — М. : Комтехпринт, 2006. — 40 с.
10. Четыре года после взрыва : [об аварии на Чернобыльской АЭС] // Природа. — 1990. — № 11. — С. 64—90. Содерж.: Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы: слухи и факты (интервью с С. Т. Беляевым). — С. 65—70; Калугин А. К. Сегодняшнее понимание аварии. — С. 70—77; Арутюнян Р. В. «Китайский синдром». — С. 77—83; Боровой А. А. Внутри и вне саркофага. — С. 83—90.
11. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 183, [1] с. : ил. — Библиогр.: с. 178—182 (96 назв.).
12. Исследовательские ядерные установки России : [сборник статей] / под ред. Н. В. Архангельского [и др.]. — М. : ОАО «НИКИЭТ», 2012. — 326 с
13. Негин Е. А. и др. Советский атомный проект: Конец атомной монополии. Как это было... / [акад. Рос. акад. наук Негин Е. А. (рук.), канд. ист. наук Голеусова Л. П., Куличков Г. Д., Максименко П. П., Окутина Г. С.]; ФГУП «Рос. федер. ядер. центр — Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики»; [под ред. Г. Д. Куличкова]. — 2-е изд., испр. и доп. — Саров: [РФЯЦ-ВНИИЭФ], 2003. — 214 с

## Приложение 1

Чувствительность	Характеристики	Механизмы	Пример
Радиоактивный цезий			
Высокая	Низкое содержание питательных веществ	Малая конкуренция с калием и аммонием в поглощении корнями	Торфяные почвы
Средняя	Нехватка питательных веществ, состоящих из минералов с некоторым содержанием глины	Ограниченная конкуренция с калием и аммонием в поглощении корнями	Подзолистые и другие песчаные почвы
Низкая	Высокое содержание питательных элементов, значительная доля глинистых минералов	Радиоцезий крепко удерживается в почвенной матрице, сильная конкуренция с калием и аммонием в поглощении корнями	Чернозем, суглинок
Радиоактивный стронций			
Высокая	Низкое содержание питательных и органических веществ	Ограниченная конкуренция с кальцием в поглощении корнями	Подзолистые, торфяные почвы
Низкая	Высокое содержание питательных и органических веществ	Сильная конкуренция с кальцием в поглощении корнями	Умбрийские