

ӨЗІН-ӨЗІ РЕТТЕУ  
«ТӘЖІРИБЕШІЛ ЭКОЛОГТАР  
ҚАУЫМДАСТЫҒЫ»



САМОРЕГУЛИРУЕМАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
«АССОЦИАЦИЯ ПРАКТИКУЮЩИХ  
ЭКОЛОГОВ»

Аналитический доклад по теме

**«Атомная электростанция, принцип работы, аварии  
и восстановительные мероприятия»**

Саморегулируемая организация «Ассоциация практикующих экологов»

Казахстан 2022

## Содержание

Введение .....	5
1. Принцип работы АЭС .....	7
2. Аварии на АЭС .....	9
3. Чернобыльская ядерная катастрофа .....	10
3.1 Причины аварии на Чернобыльской АЭС .....	11
3.2 Источники выброса радионуклидов .....	12
3.3 Влияние на сельскохозяйственную среду .....	14
3.3.1 Влияние на лесную среду .....	16
3.3.2 Влияние на другие страны .....	16
3.4 Восстановительные мероприятия после Чернобыльской катастрофы .....	18
3.4.1 Меры в отношении городской среды .....	19
3.4.2 Меры в отношении сельскохозяйственной среды .....	19
3.4.3 Меры в отношении лесной среды .....	20
3.4.4 Меры в отношении водной среды .....	21
3.5 Укрытие .....	21
3.6 Демонтаж Укрытия .....	23
4. Авария на АЭС «Фукусима -1» .....	24
4.1 Причины аварии на Фукусиме .....	26
4.2 Защита населения .....	27
4.3 Выбросы .....	27
4.3.1 Выбросы в море .....	28
4.4 Влияние на окружающую среду .....	28
4.5 Рассеивание .....	29
4.5.1 Рассеивание в атмосфере .....	29
4.5.2 Рассеивание в океане прямых выбросов и сбросов в море .....	30
4.6 Послеаварийное восстановление .....	31
4.6.1 Защитные мероприятия в отношении пищевых продуктов, питьевой воды и сельского хозяйства .....	31
4.7 РЕАБИЛИТАЦИЯ ПОСТРАДАВШИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ .....	32
4.8 Территория интенсивного контроля загрязнения .....	33
4.9 Последствия для здоровья .....	34
4.9.1 Радиологические последствия для биоразнообразия .....	35
4.9.2 Финансовые последствия аварии .....	36

<b>4.10. Фукусима сегодня .....</b>	<b>36</b>
<b>Заключение.....</b>	<b>37</b>
<b>Список использованной литературы .....</b>	<b>38</b>

## **Список сокращений**

**АЭС** – Атомная электростанция

**МАГАТЭ** – Международное агентство по атомной энергии

**ЧАЭС** – Чернобыльская атомная электростанция

**ПБк** – Пикобеккерель ( единица измерения )

**СССР** – Союз Советских Социалистических Республик

**ЦК КПСС** – Центральный комитет Коммунистической партии Советского Союза

**ВНИПИЭТ** – Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт  
энергетических технологий

**НБК** – Новый безопасный конфаймент

**ТЕПКО** – Токийская электроэнергетическая компания

**НКДАР** – Научный комитет по действию атомной радиации

**ЧЗО** – Чернобыльская зона отчуждения

## Введение

16 июля 1945 года человечество вступило в атомный век. В тот день на военном полигоне в США впервые удалось извлечь энергию из ядра урана. Однако, первая в мире промышленная АЭС мощностью 5 МВт была пущена в СССР в г. Обнинске в 1954 г.

Современные крупные АЭС имеют блочную структуру, т.е. состоят из нескольких блоков (реактор + турбина) с мощностью около 1000 МВт каждый. Все развитые страны двигаются по пути всё более широкого использования АЭС. Доля электроэнергии, вырабатываемая на АЭС во Франции, приближается к 80%, в Бельгии эта доля – около 60%, в Швеции – 42%, Южной Корее – 40%, Швейцарии – 38%, Испании – 36%, Финляндии – 32%, Японии – 31%, Германии – 30%, Англии – 26%, США – 21%, России – 13%. Атомная энергетика решает проблему исчерпания естественных органических источников энергии (уголь, газ, нефть) и снимает трудности перемещения больших количеств традиционного топлива на значительные расстояния и в труднодоступные населенные пункты. Миниатюрные АЭС – весьма эффективные и удобные источники энергии для подводных лодок и крупных надводных судов. Электроэнергия, вырабатываемая АЭС, относится к наиболее дешёвой.<sup>1</sup>



Рисунок 1 – Атомная электростанция.

Ядерная энергия выделяется при расщеплении ядра урана. Из него вылетают две частицы – протоны. Они расщепляют следующие ядра, из которых также выделяется энергия и протоны, этот процесс называется «цепная реакция». Чтобы затормозить силу цепной реакции и высвободить энергию не сразу, а постепенно, нужна атомная электростанция (АЭС). В отличие от АЭС при применении ядерной энергии в военных целях деление ядер происходит лавинообразно, практически моментально, в результате накапливается гигантское количество энергии и происходит взрыв.

<sup>1</sup> Nuclear power plant, атомная электростанция <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e011.htm>

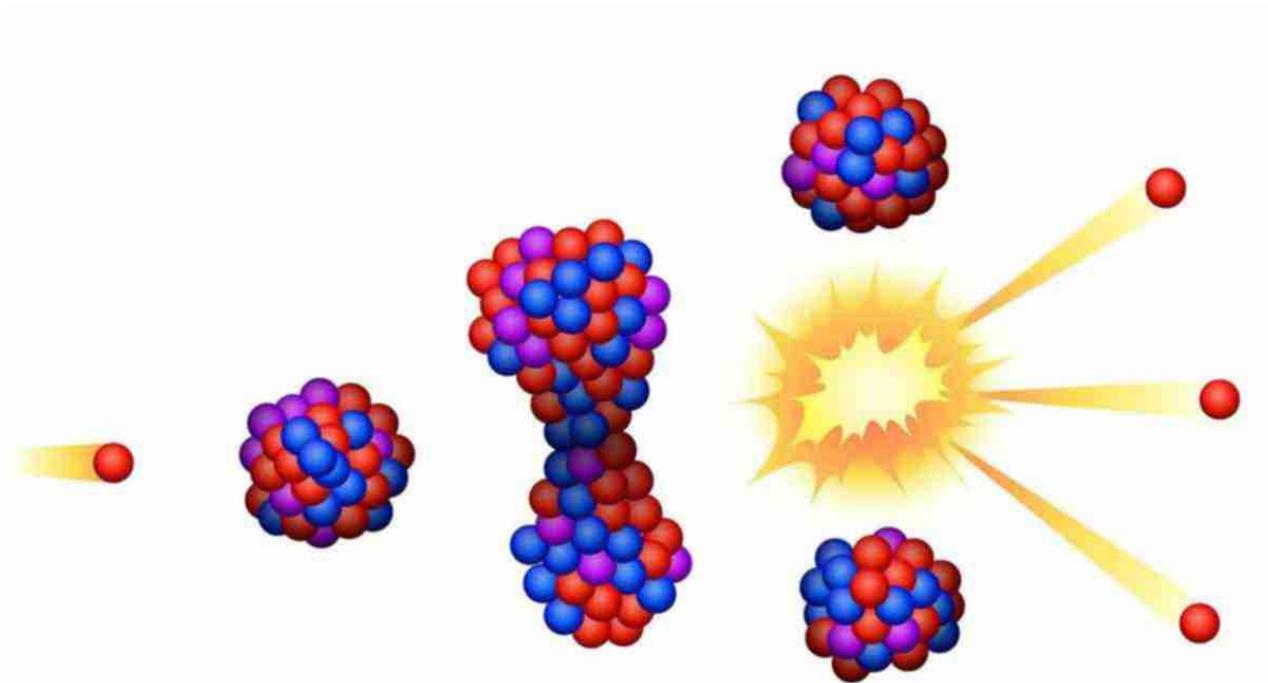


Рисунок 2 – Расщепление ядра урана.

Атомы состоят из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Ядро – это устойчивое образование, которое сложно разрушить. Однако, ядра атомов некоторых веществ обладают нестабильностью и могут излучать в пространство различную энергию и частицы. Это излучение называют радиоактивным, и оно включает в себя несколько составляющих (альфа-, бета- и гамма-излучение). Эти излучения различны, различно и их действие на человека и меры защиты от него.

Альфа-излучение — это поток тяжелых положительно заряженных частиц. Возникает в результате распада атомов тяжелых элементов, таких как уран, радий и торий. В воздухе альфа-излучение проходит не более пяти сантиметров и, как правило, полностью задерживается листом бумаги или внешним омертвевшим слоем кожи. Однако если вещество, испускающее альфа-частицы, попадает внутрь организма с пищей или воздухом, оно облучает внутренние органы и становится опасным.

Бета-излучение — это электроны, которые значительно меньше альфа-частиц и могут проникать вглубь тела на несколько сантиметров. От него можно защититься тонким листом металла, оконным стеклом и даже обычной одеждой. Попадая на незащищенные участки тела, бета-излучение оказывает воздействие, как правило, на верхние слои кожи. Во время аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году пожарные получили ожоги кожи в результате очень сильного облучения бета-частицами. Если вещество, испускающее бета-частицы, попадет в организм, оно будет облучать внутренние ткани.

Гамма-излучение — это фотоны, т.е. электромагнитная волна, несущая энергию. В воздухе оно может проходить большие расстояния, постепенно теряя энергию в результате столкновений с атомами среды. Интенсивное гамма-излучение, если от него не защититься, может повредить не только кожу, но и внутренние ткани. Плотные и тяжелые материалы, такие как железо и свинец, являются отличными барьерами на пути гамма-излучения.

Альфа-излучение по его характеристикам практически не опасно, если не вдохнуть его частички или не съесть с пищей. Бета-излучение может причинить ожоги кожи в

результате облучения. Самые опасные свойства у гамма-излучения. Оно проникает глубоко внутрь тела, и вывести его оттуда очень сложно, а воздействие очень разрушительно.<sup>2</sup>

## 1. Принцип работы АЭС

Вся реакция происходит внутри атомного реактора, которая устанавливается в герметично защищенной зоне, она опасна из-за повышенной радиации. Внутри атомного реактора располагаются топливные элементы, которые содержат изотоп урана +238 и изотоп урана +235.

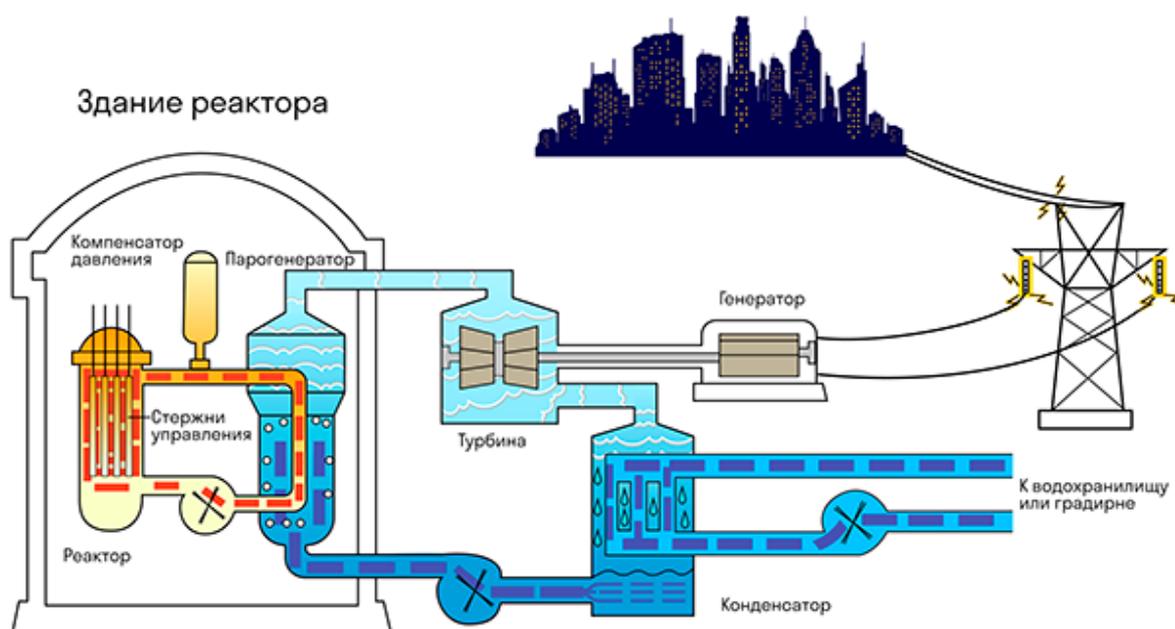


Рисунок 3 – Принцип работы АЭС.

Уран упакован в специальные сборки, они называются тепловыделяющие элементы – твэлы. Твэлы состоят из десятков трубок внутри которых помещены таблетки урана.

<sup>2</sup>Интернет портал Nado5.ru Радиоактивность <https://www.nado5.ru/e-book/radioaktivnost-alfa-beta-gamma-izluchenie>

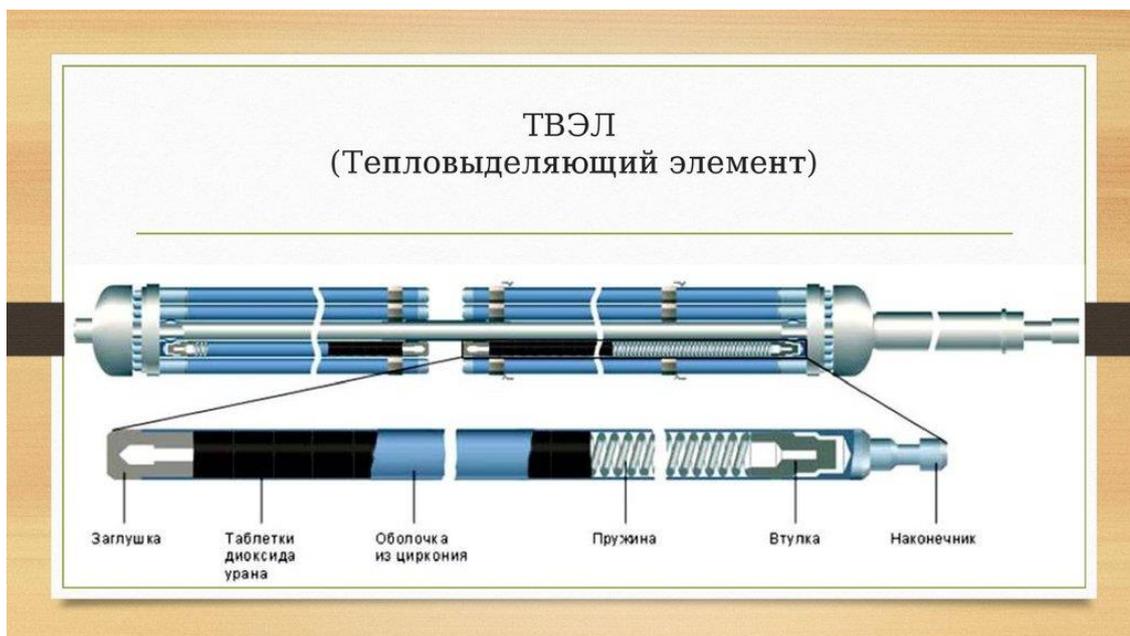


Рисунок 4 –Тепловыделяющий элемент.

Сердечник реактора (главный источник энергии) заполнен дистиллированной водой, в которую погружены твэлы, на этом этапе считается что цепная реакция запущена. Свободные протоны пролетают из одной трубки в другую, расщепляя ядра урана. Для контроля реакции, в активную зону вводятся стержни с бором. Этот элемент активно поглощает свободные частицы. Чтобы притормозить эту реакцию стержни опускаются ниже, чтобы разогнать, наоборот поднимают. Вода в реакторе нагревается быстро, до 300 градусов. По трубам первого контура она попадает в парогенераторы. Здесь она отдает свое тепло воде из второго контура и через циркуляционный насос возвращается в реактор, при этом между собой жидкости не смешиваются. Холодная вода второго контура моментально закипает, превращается в пар и покидает реакторный блок, далее ее поджидает турбина. Масса турбины без вспомогательного оборудования 2170 тонн. Пар давит на лопатки, раскручивая турбину 3000 оборотов в минуту. На конце турбины установлен электрогенератор, который и вырабатывает электрический ток. По сути, атомная станция это большая паровая машина, и как у каждой паровой машины, у нее есть свои выбросы. Но в этой воде никакой радиации нет. Радиационная опасность связана только с водой первого контура, циркулирующей внутри реакторного блока. Она превращает в пар воду второго контура, не соприкасаясь с ней. Чтобы вернуть пар в жидкое состояние его охлаждают озерной водой. Нагретая вода по отводному каналу попадает в градвний. Это башни высотой 150 метров. Здесь воду поднимают на 75 метров и сбрасывают вниз. При падении она охлаждается и к водозабору станции уже подходит нормальной температуры. В отличии от тепловых электростанций никаких выбросов гари и золы, только водяной пар. Поэтому атомную энергетику считают одной из самых экологически чистых.<sup>3</sup>

С точки зрения экологии, АЭС также имеют заметные преимущества перед тепловыми электростанциями. Решение проблем утилизации ядерных отходов основывается на достижениях современной науки и техники.

<sup>3</sup>Как работает атомная электростанция <https://rosatom.ru/about-nuclear-industry/powerplant/>

## 2. Аварии на АЭС

Список аварий на АЭС не ограничивается Чернобылем, МидАйлендом, Фукусимой. Аварии происходят достаточно часто.

Самые первые в истории крупные радиационные аварии произошли в ходе наработки ядерных материалов для первых атомных бомб.

1 сентября 1944 года в США, штат Теннесси, в Окриджской национальной лаборатории при попытке прочистить трубу в лабораторном устройстве по обогащению урана произошел взрыв гексафторида урана, что привело к образованию опасного вещества — гидрофтористой кислоты. Пять человек, находившихся в это время в лаборатории, пострадали от кислотных ожогов и вдыхания смеси радиоактивных и кислотных паров. Двое из них погибли, а остальные получили серьезные травмы.

В 1945 году в процессе исследований влияния отражателя из карбида вольфрама на величину критических параметров сборки из двух плутониевых полусфер общей массой 6,2 кг в лаборатории Лос-Аламоса началась история техногенных аварий Атомной энергетики. В результате превышения критической массы, в исследуемой сборке возникла неуправляемая цепная реакция, в процессе которой успело разделиться 1016 ядер плутония-239 прежде, чем экспериментатор своими руками не разрушил эту сборку. Сам он получил дозу облучения 800 Рентген и скончался менее чем через месяц.

В СССР первая тяжелая радиационная авария произошла 19 июня 1948 года, на следующий же день после выхода атомного реактора по наработке оружейного плутония (объект «А» комбината «Маяк» в Челябинской области) на проектную мощность. В результате недостаточного охлаждения нескольких урановых блоков произошло их локальное сплавление с окружающим графитом, так называемый «козел». В течение девяти суток «закозлившийся» канал расчищался путем ручной рассверловки. В ходе ликвидации аварии облучению подвергся весь мужской персонал реактора, а также солдаты строительных батальонов, привлеченные к ликвидации аварии.

12 декабря 1952 года. Канада, штат Онтарио, Чолк-Ривер, АЭС NRX. Первая в мире серьезная авария на атомной электростанции. Техническая ошибка персонала привела к перегреву и частичному расплавлению активной зоны. Тысячи кюри продуктов деления попали во внешнюю среду, а около 3800 кубических метров радиоактивно загрязненной воды было сброшено прямо на землю, в мелкие траншеи неподалеку от реки Оттавы. В составе команды, занимавшейся экологической очисткой 2 территории станции, работал будущий президент США Джими Картер, тогда ядерный инженер военно-морского флота (The Careless Atom, 1969).

29 ноября 1955 года «человеческий фактор» привел к аварии американского экспериментального реактора EBR-1 (штат Айдахо, США). В процессе эксперимента с плутонием, в результате неверных действий оператора, реактор саморазрушился, выгорело 40% его активной зоны.<sup>4</sup>

5 октября 1966 года. США, штат Мичиган, г.Ньюпорт, АЭС «Энрико Ферми» Авария в системе охлаждения экспериментального ядерного реактора вызвала частичное расплавление активной зоны. Персонал успел вручную остановить его. Потребовалось полтора года, чтобы вновь запустить реактор на полную мощность (Let the Facts Speak, 1992).

В апреле 1967 года произошел очередной радиационный инцидент в ПО «Маяк». Озеро Карачай, которое ПО «Маяк» использовало для сброса жидких радиоактивных отходов, сильно обмелело; при этом оголилось 2—3 гектара прибрежной полосы и 2-3 гектара дна озера. В результате ветрового подъема донных отложений с оголившихся участков дна водоема была вынесена радиоактивная пыль около 600 Ки активности. Была

<sup>4</sup> Крупные аварии на АЭС

<https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PMGAVRILOV/study/Tab/%D0%90%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%202.pdf>

загрязнена территория в 1 тысячу 800 квадратных километров, на которой проживало около 40 тысяч человек.

17 октября 1969 года. Франция, АЭС «Сант-Лаурен». При перегрузке топлива на работающем реакторе оператор ошибочно загрузил в топливный канал не тепловыделяющую сборку, а устройство для регулирования расхода газов. В результате расплавления пяти тепловыделяющих элементов около 50 килограммов расплавленного топлива попало внутрь корпуса реактора. Произошел выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду. Реактор был остановлен на один год.

Список аварий можно продолжать, самые крупные из них, это авария на Чернобыле в 1986 году в СССР, и в Фукусиме в 2011 году в Японии.<sup>5</sup>

### 3. Чернобыльская ядерная катастрофа

26 апреля 1986 года случилась авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Последствия самой крупной катастрофы в истории мирного атома специалисты со всего мира устраняют до сих пор.

В ночь на 26 апреля на 4-м энергоблоке ЧАЭС проводились испытания турбогенератора. Планировалось остановить реактор (при этом планомерно была отключена система аварийного охлаждения) и замерить генераторные показатели. Безопасно заглушить реактор не удалось. В 1 час 23 минуты по времени Москвы на энергоблоке произошел взрыв и пожар. ЧП стало крупнейшей катастрофой в истории атомной энергетики: была полностью разрушена активная зона реактора, здание энергоблока частично обрушилось, произошел значительный выброс радиоактивных материалов в окружающую среду.

27 апреля был эвакуирован город Припять (47 тыс. 500 человек), а в последующие дни – население 10-километровой зоны вокруг ЧАЭС. Всего в течение мая 1986 года из 188 населенных пунктов в 30-километровой зоне отчуждения вокруг станции были отселены около 116 тыс. человек.<sup>6</sup> В реакторе, установленном на ЧАЭС, было 190 тонн топлива в виде природного урана. Взрывом было выброшено 1/4 всех радиоактивных веществ. Остальная часть выделялась почти 10 суток, пока реактор не был, наконец, заглушен. С изменением ветра менялось и направление распространения радиоактивного облака: через день повышенный фон зарегистрировали в Скандинавии, через 2 – в центральной Европе, через 4 – на Балканах.

Самые легкие радиоактивные частицы поднялись в верхние слои атмосферы. Они осаждались очень медленно – от месяца до года, несколько раз обогнув земной шар и распространяясь по всему Северному полушарию. Дождь очень эффективно вымывает радионуклиды из атмосферы. Там, где пролились апрельско-майские дожди, образовались радиоактивные пятна.<sup>7</sup>

Осаждение частиц из атмосферы можно вызвать и искусственно, если в воздух с помощью авиации или специальных метеорологических снарядов распылить вещества, которые соберут на своей поверхности изотопы. Чтобы предотвратить бесконтрольное распространение облака и не допустить загрязнения крупных промышленных центров, такая операция тоже осуществлялась.

---

<sup>5</sup> Доклад аварии на АЭС

<https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PMGAVRILOV/study/Tab/%D0%90%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%202.pdf>

<sup>6</sup> ТАСС Чернобыль

[https://tass.ru/spec/chernobyl?utm\\_source=google.kz&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=google.kz&utm\\_referrer=google.kz](https://tass.ru/spec/chernobyl?utm_source=google.kz&utm_medium=organic&utm_campaign=google.kz&utm_referrer=google.kz)

<sup>7</sup> Чернобыльская катастрофа и ее последствия <https://10gdp.by/roditel/467-chernobylskaya-katastrofa-i-ejo-posledstviya>

Ликвидировало аварию больше 600 тысяч человек – «ликвидаторов». В течение 3-х месяцев после катастрофы 30 сотрудников и пожарников ЧАЭС погибли в результате облучения. Более 350 тыс. жителей было эвакуировано.

Радиоактивные вещества выпали тремя крупными пятнами: в Украине, в Беларуси и западных областях России. Загрязнение стронцием-90 носит более локальный характер. Повышенный уровень обнаружен на территории 21,1 тыс. км<sup>2</sup> (10% от территории республики). Загрязнение почвы изотопами плутония охватывает около 4 тыс. км<sup>2</sup> (2% площади республики). Это Гомельская и Могилевская области.

В результате бета-распада <sup>241</sup>Pu на радиоактивно загрязненных территориях происходит образование америция <sup>241</sup> в количествах, сравнимых с количеством основных источников. В связи с тем, что <sup>241</sup>Am по радиотоксичности близок к изотопам плутония, радиоактивное загрязнение почвы будет продолжаться до 2060 года. Через 100 лет после аварии на ЧАЭС, в 2086 году, общая активность почвы на загрязненных территориях будет в 2,4 раза выше, чем в начальный послеаварийный период. Снижение альфа активности почвы от <sup>241</sup>Am ожидается после 2400 года.<sup>8</sup>

### 3.1 Причины аварии на Чернобыльской АЭС

Анализ причин аварии выполняли организации и отдельные специалисты как в бывшем СССР, так и за его пределами. Можно сформулировать несколько причин, которые обусловили предаварийное состояние реактора и катастрофический рост его мощности: перед аварией реакторная установка находилась в таком физическом и теплогидравлическом состоянии стабильности, которое могли нарушить даже незначительные возмущения. Такое состояние реактора было предопределено действиями персонала и возникло до начала испытания режима выбега генератора. Все параметры реактора перед началом испытаний, кроме оперативного запаса реактивности, находились в пределах, разрешенных технологическим регламентом. Непосредственным импульсом для возникновения аварии явился ввод в действие системы аварийной остановки реактора, что из-за порочной конструкции стержней регулирования и защиты привело к вводу в реактор положительной реактивности и началу разгона мощности. Этот разгон принял катастрофический масштаб из-за большого парового коэффициента реактивности, который присущ реакторам большой мощности канального типа (РБМК-1000), и влияние которого особенно велико на низком уровне мощности (незначительное содержание пара. Таким образом, непосредственными причинами аварии явились нейтронно-физические и конструктивные особенности реактора РБМК-1000, реализации которых способствовали действия персонала. К основным недостаткам реактора РБМК-1000 в его исполнении по состоянию на 1986 год следует отнести:

- низкую скоростную эффективность системы управления и защиты реактора (ввод стержней управления и защиты в реактор производился за 18 секунд, в то время, как на реакторах других типов он составлял 2-4 секунды), что не позволяло системе управления и защиты справиться с быстропротекающими процессами;

- конструкцию стержней управления и защиты, которая приводила к тому, что при определенных обстоятельствах аварийная защита не останавливала реактор, а вводила в него положительную реактивность и становилась инициатором разгона мощности реактора;

- недопустимо высокий плотностной (паровой) коэффициент реактивности, в результате чего, во-первых, в определенных режимах общий мощностной коэффициент реактивности реактора становился положительным и, во-вторых, снижение плотности

---

<sup>8</sup>Клиническая поликлиника г.Минск <https://10gdp.by/roditel/467-chernobylskaya-katastrofa-i-ejo-posledstviya>

теплоносителя в реакторе, независимо от причины, приводило к катастрофическому росту мощности;

- двугорбое по высоте поле энерговыделения, которое в совокупности с недостатками системы управления и защиты реактора создавало предпосылки для формирования в нижней половине реактора квазисамостоятельной активной зоны с недопустимо высокой скоростью роста мощности в случае срабатывания аварийной защиты реактора при малом оперативном запасе реактивности.

Именно эти недостатки реактора РБМК-1000 стали причинами аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года. Они были следствием допущенных создателями реактора отступлений от требований безопасности, формализованных в ПБЯ 04-74 («Правила ядерной безопасности атомных электростанций»), и ОПБ-73 («Общие положения обеспечения безопасности атомных электростанций при проектировании, строительстве и эксплуатации»). Оба документа действовали при проектировании второй очереди Чернобыльской АЭС.

К этому следует добавить, что реактор РБМК-1000 и проект Чернобыльской АЭС, в целом, обладали и другими существенными отступлениями от требований нормативных документов. В частности, проектом АЭС была предусмотрена ограниченная система локализации аварии, в состав герметичного контура которой была включена лишь часть реактора и систем его охлаждения. И, что еще важнее, проектом не были предусмотрены приборы контроля и информации оператору об оперативном запасе реактивности, не говоря об автоматической защите реактора при отклонениях этого параметра за установленные пределы. Но именно этот параметр, при его снижении ниже определенного значения, превращал аварийную защиту, которая при любых обстоятельствах должна была остановить реактор, в инструмент разгона его мощности.

Анализ действий персонала, споры о которых продолжаются до сегодняшнего дня, показал, что персонал действительно совершил ряд ошибок, но степень его вины была сознательно преувеличена в информации, представленной СССР в МАГАТЭ в 1986 году. Авария, в силу своих масштабов затронувшая многие страны мира, разрушила миф о непогрешимости советской ядерной науки и техники. Скрыть масштабы аварии, а также ее последствий не удалось. Надо было найти причины, которые в наименьшей степени раскрывали бы истинную картину положения дел и не ставили под сомнение качество советской техники. Так и появился лозунг - виноват персонал. Санкционирован этот подход был политическим руководством страны.<sup>9</sup>

### **3.2 Источники выброса радионуклидов**

После первоначального взрыва на ЧАЭС графит реактора загорелся. Несмотря на героические усилия персонала по борьбе с пожаром, графит горел много дней, и выбросы радиоактивного материала продолжались до 6 мая 1986 года. Компетентные органы тогдашнего СССР не сразу объявили о произошедшей аварии. Однако выбросы были настолько крупными, что присутствие свежих продуктов деления было вскоре замечено в скандинавских странах, и ретроспективные расчеты возможных траекторий указали, что авария произошла на территории бывшего СССР. Первые оценки количества выброшенного в результате аварии и выпавшего на территории бывшего СССР  $^{137}\text{Cs}$  были сделаны на основе воздушных радиометрических измерений загрязненных территорий бывшего СССР, эти оценки указывали на то, что в результате выпало около 40 ПБк ( $1 \times 10^6$  кюри). Оценки этих выбросов с годами уточнялись, и в настоящее время оценка общего объема выпавшего

---

<sup>9</sup>ГСП ЧАЭС Причины и масштабы аварии <https://chnpp.gov.ua/ru/about/history-of-the-chnpp/42-about/accident-of-1986/529-2012-02-01-08-01-38529>

на территорию бывшего СССР  $^{137}\text{Cs}$  примерно в два раза больше первоначальных оценок, т.е. 80 ПБк. Большинство радионуклидов, выбросы которых были наиболее значительными, обладали коротким периодом физического полураспада, а радионуклиды с более длительным периодом полураспада в основном составляли лишь малую часть выброса. В первоначальный период после аварии наибольшую радиологическую опасность представлял радионуклид йода  $^{131}\text{I}$ , позже внимание было переключено на цезий  $^{137}\text{Cs}$ . Период полураспада выброшенных радионуклидов указан в таблице 1.<sup>10</sup>

Таблица 1  
Выброшенные радионуклиды

	Период полураспада	Активность выброса (ПБк)
<i>Инертные газы</i>		
Криптон - 85	10,72 лет	33
Ксенон - 133	5,25 дней	6500
<i>Летучие элементы</i>		
Теллур – 129м	33,6 дней	240
Теллур - 132	3,26 дней	~ 1150
Йод - 131	8,04 дней	~ 1760
Йод - 133	20,8 часов	910
Цезий - 134	2,06 лет	~47
Цезий - 136	13,1 дней	36
Цезий - 137	30,0 лет	~85
<i>Элементы с промежуточной летучестью</i>		
Стронций - 89	50,5 дней	~115
Стронций -90	29,12 лет	~10
Рутений -103	39,3 дней	>168
Рутений - 103	368 дней	>73
Барий – 140	12,7 дней	240
<i>Тугоплавкие элементы (включая топливные частицы)</i>		
Цирконий - 95	64,0 дней	84
Молибден - 99	2,75 дней	>72
Церий - 141	32,5 дней	84
Церий - 144	284 дня	~50
Нептуний - 239	2,35 дней	400
Плутоний - 238	87,74 лет	0,015
Плутоний - 239	24 065 лет	0,013
Плутоний - 240	6 537 лет	0,018
Плутоний - 241	14,4 лет	~2,6
Плутоний - 242	376 000 лет	0,00004
Кюрий - 242	18,1 лет	~0,4

<sup>10</sup> Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)

К 2005 году активность большей части выброшенных при аварии радионуклидов в результате распада уже достигла уровней, не вызывающих беспокойства. Интерес в течение следующих нескольких десятилетий будет по-прежнему представлять  $^{137}\text{Cs}$  и в меньшей степени  $^{90}\text{Sr}$ ; последний остается наиболее важным радионуклидом в зоне, непосредственно прилегающей к площадке Чернобыльской АЭС. По прошествии длительного времени (от сотен до тысяч лет) единственные радионуклиды, которые, как ожидается, будут представлять интерес, - это изотопы плутония. Единственный радионуклид, уровни активности которого, как полагается, будут увеличиваться в последующие годы, - это  $^{241}\text{Am}$ , который образуется в результате распада  $^{241}\text{Pu}$ , требуется около ста лет для формирования максимального объема  $^{241}\text{Am}$  из  $^{241}\text{Pu}$ .

### **3.3 Влияние на сельскохозяйственную среду**

На первоначальном этапе прямое выпадение многих различных радионуклидов на поверхность играло главную роль в загрязнении сельскохозяйственных растений и потребляющих их животных. Непосредственно после аварии наибольшую озабоченность вызвали выбросы и выпадения изотопов радиоактивного йода, но эта проблема была ограничена первыми двумя месяцами вследствие короткого периода физического полураспада (8 дней) наиболее важного изотопа йода –  $^{131}\text{I}$ . Радиоактивный йод в высоких концентрациях быстро попадал в молоко в Беларуси, Российской Федерации и Украине, приводя к значительным дозам облучения щитовидной железы среди тех, кто потреблял молоко, особенно среди детей. В других странах Европы последствия аварии были различными. Повышенные уровни радиоактивного йода в молоке наблюдались в некоторых загрязненных южных районах, где молочный скот уже содержался на открытом воздухе. Различные виды сельскохозяйственных растений, в частности листовые овощи и зелень, были также загрязнены радионуклидами в различной степени в зависимости от уровней выпадений и стадии произрастания. Прямые выпадения на поверхность растений представляли собой проблему в течение почти двух месяцев. После первоначальной фазы прямого загрязнения поглощение радионуклидов корнями растений из почвы стало приобретать все большее значение и сильно зависело от времени. Радиоизотопы цезия ( $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$ ) вызвали наибольшие проблемы, а после распада  $^{134}\text{Cs}$  радионуклидом, вызывающим проблемы на некоторых территориях Беларуси, России и Украины, остается  $^{137}\text{Cs}$ .

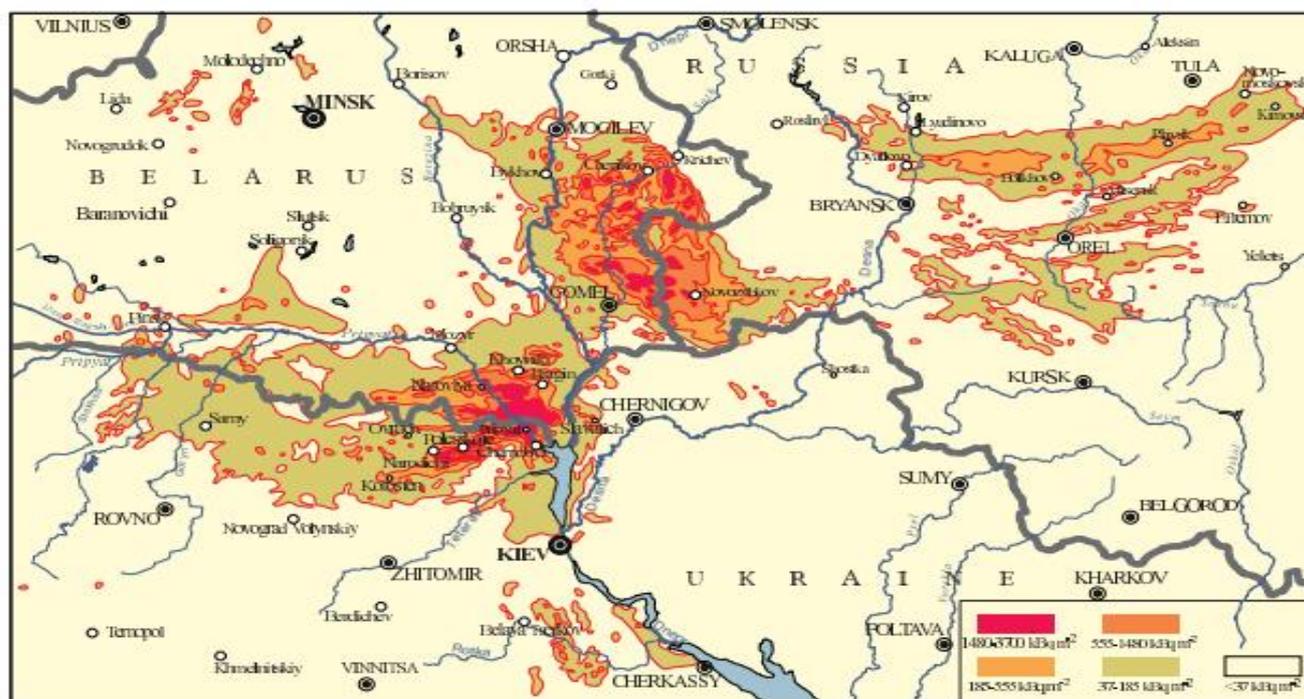


Рисунок 5 - Выпадения  $^{137}\text{Cs}$  на поверхность почвы в районах Украины, Беларуси и России вблизи от места аварии, 1986 год.<sup>11</sup>

Кроме того, проблемы на территориях, непосредственно прилегающих к реактору, вызывает  $^{90}\text{Sr}$ , но на удалении уровни его выпадений были слишком малы, чтобы иметь радиологическое значение. Уровни выпадений других радионуклидов, таких, как изотопы плутония и  $^{241}\text{Am}$ , либо были слишком малы, либо эти радионуклиды почти не поглощались корнями, и поэтому они не вызвали реальных проблем в сельском хозяйстве. В общем, как и ожидалось, первоначальное существенное снижение уровня перехода радионуклидов в растительность и к животным происходило в связи с выветриванием, физическим распадом, миграцией радионуклидов вниз по колонке грунта и снижением бионакопления радионуклидов в почве. В частности, в загрязненных системах интенсивного земледелия, в основном на территории бывшего Советского Союза, произошло существенное снижение уровня перехода цезия-137 в растения и к животным, особенно в первые несколько лет. Однако в последние десятилетия не наблюдалось дальнейшего явного снижения, а длинные периоды эффективного полужизни трудно определить количественно. После первоначального периода концентрации радиоактивного цезия в пищевых продуктах стали зависеть не только от уровней выпадений, но также от видов почвы, методов земледелия и типов экосистемы. Основные сохраняющиеся проблемы на пострадавших территориях существуют в системах интенсивного земледелия с высоким содержанием органических материалов в почве, где животные пасутся на естественных пастбищах, которые не распахиваются и не удобряются. В частности, это затрагивает сельских жителей на территории бывшего СССР, которые в основном ведут натуральное хозяйство и владеют молочным скотом.

В долгосрочной перспективе содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мясе и молоке, а также в меньшей степени в овощах остается наиболее важным фактором, формирующим дозу внутреннего облучения человека. Поскольку его концентрация как в растительной, так и в животной пище в последние десятилетия снижалась весьма медленно, на уровне 3-7% в год, вклад  $^{137}\text{Cs}$  в дозу будет по-прежнему доминирующим в ближайшие десятилетия. Вклад других

<sup>11</sup> Доклад МАГАТЭ Чернобыльская авария [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)

долгоживущих радионуклидов –  $^{90}\text{Sr}$ , изотопов плутония и  $^{241}\text{Am}$  – в дозу облучения человека по-прежнему не будет представлять какого-либо значения.

### 3.3.1 Влияние на лесную среду

После чернобыльской аварии наиболее высокие уровни поглощения радиоактивного цезия были зарегистрированы в лесной растительности и обитающих в лесах и на возвышенностях животных, где наивысшая концентрация  $^{137}\text{Cs}$  была обнаружена в продуктах лесного происхождения вследствие постоянной регенерации радиоактивного цезия в лесных экосистемах. Особенно высокие концентрации  $^{137}\text{Cs}$  были обнаружены в грибах, ягодах и дичи, и эти высокие уровни сохраняются со времени аварии. Таким образом, хотя произошло общее снижение величины доз облучения в связи с потреблением сельскохозяйственных продуктов, высокие уровни загрязнения в лесных пищевых продуктах до сих пор превышают уровни вмешательства во многих странах. Следует ожидать, что это будет продолжаться в течение нескольких ближайших десятилетий. Следовательно, со временем повышается относительная важность вклада лесной среды в величину радиоактивного облучения групп населения в нескольких пострадавших странах. В первую очередь именно сочетание миграции и физического распада  $^{137}\text{Cs}$  в почве будет способствовать любому дальнейшему снижению загрязнения лесных пищевых продуктов. Большой перенос радиоактивного цезия по схеме лишайник-оленина-человек наблюдался после чернобыльской аварии в северных арктических и субарктических территориях Европы. Чернобыльская авария привела к значительному загрязнению оленины в Финляндии, Норвегии, Российской Федерации и Швеции, а также вызвала серьезные проблемы среди народности лопарей. Использование древесины и древесной продукции вносит лишь небольшой вклад в формирование дозы облучения населения, хотя зола может содержать большие активности  $^{137}\text{Cs}$  и потенциально привести к более высоким дозам, чем при другом использовании дерева. Цезий-137 в древесине имеет меньшее значение, хотя дозы в целлюлозно-бумажной промышленности еще следует оценить. Лесные пожары увеличили концентрации радионуклидов в воздухе в 1992 году, хотя не в большой степени. Возможные радиологические последствия лесных пожаров широко обсуждались, но не ожидается, что они вызовут какие-либо проблемы с переносом радионуклидов из загрязненных лесов, за исключением, возможно, наиболее близко прилегающих к пожару территорий.

### 3.3.2 Влияние на другие страны

Во время аварии погодные условия почти во всей Европе характеризовались обширным антициклоном, т.е областью высокого атмосферного давления в тропосфере с постепенным его понижением.<sup>12</sup> На высотах 700–800 м и 1500 м район Чернобыльской АЭС находился в юго-западной периферийной части зоны высокого атмосферного давления с воздушными массами,двигающимися к северо-западу со скоростью от 5 до 10 м/с. На рассвете воздушные массы смешивались на высоте примерно 2500 м. В результате это привело к быстрому перемешиванию поднявшихся в воздух радиоактивных осколков по всему смешанному слою и рассеянию радиоактивного облака в различных слоях высоты перемешивания. Дальнейшее рассеяние образовавшихся во время аварии частиц произошло в воздушных слоях на высоте 700–1500 м, поскольку воздушные массы двигались на северо-восток и затем повернули к северу; этот радиоактивный след был обнаружен в скандинавских

<sup>12</sup> Интернет портал География <https://geographyofrussia.com/anticiklon/>

странах. Надземные воздушные массы 26 апреля передвигались на запад и северо-запад и достигли Польши и скандинавских стран 27–29 апреля. В южной и западной Украине, Республике Молдова, Румынии, Словакии и Польше погодные условия характеризовались малоградиентным полем низкого давления.

Страна	Районы с диапазоном плотности выпадений $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{км}^2$ )			
	37–185 $\text{кБк}/\text{м}^2$	185–555 $\text{кБк}/\text{м}^2$	555–1480 $\text{кБк}/\text{м}^2$	>1480 $\text{кБк}/\text{м}^2$
Российская Федерация	49 800	5 700	2100	300
Беларусь	29 900	10 200	4200	2200
Украина	37 200	3 200	900	600
Швеция	12 000	–	–	–
Финляндия	11 500	–	–	–
Австрия	8 600	–	–	–
Норвегия	5 200	–	–	–
Болгария	4 800	–	–	–
Швейцария	1 300	–	–	–
Греция	1 200	–	–	–
Словения	300	–	–	–
Италия	300	–	–	–
Республика Молдова	60	–	–	–

Рисунок 6 - Территории в Европе, загрязненные Чернобыльскими выпадениями в 1986 году.<sup>13</sup>

В последующие дни циклон стал медленно перемещаться на юго-восток, и малоградиентное поле давления с несколькими плохо определяемыми областями давления распространилось над большей частью европейского сектора бывшего СССР. Одна из областей давления вызвала небольшой приповерхностный циклон, который утром 27 апреля находился в районе к югу от Гомеля. Позднее выбросы из реактора до 7–8 мая переносились в основном в юго-западном и южном направлениях. В течение первых пяти дней после аварии ветер менялся по всем направлениям. В течение нескольких дней после аварии результаты измерения уровней излучения в воздухе над Европой, Японией и США показали присутствие радионуклидов на высотах до 7000 м. Сила взрыва, быстрое перемешивание воздушных потоков из-за гроз около Чернобыльской АЭС и присутствие теплых фронтальных масс воздуха между Чернобыльской АЭС и Балтийским морем – все это внесло свой вклад в перенос радионуклидов на таких высотах.

Атмосферные осадки имеют большое значение в определении того, может ли быть сильно загрязнен соответствующий район, поскольку процессы выпадения дождя (захват штормовой системой) и вымывание (дождь, идущий сквозь загрязненные массы воздуха) являются важными механизмами переноса выброшенного материала на землю. В частности значительная гетерогенность выпадений радиоактивного материала обусловлена присутствием или отсутствием осадков во время прохождения радиоактивного облака. Также имеются различия в поведении относительно того, насколько эффективны различные радионуклиды или химические формы одного и того же радионуклида переносятся дождем или вымываются. В ходе развития аварии выпало много осадков, и это в некоторых районах привело к высокому уровню выпадений радионуклидов на поверхность земли на больших расстояниях от реактора. В случае сухого выпадения уровни загрязнения были ниже, но смесь радионуклидов, захваченная растительностью, была существенно обогащена

<sup>13</sup> Экологические последствия аварии на Чернобыле и их преодоление [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)

изотопами радиоактивного йода; в случае влажного выпадения содержание радионуклидов в осадках было аналогично содержанию радионуклидов в радиоактивном облаке. В результате уровни и соотношения радионуклидов в районах с различными видами выпадений различались.

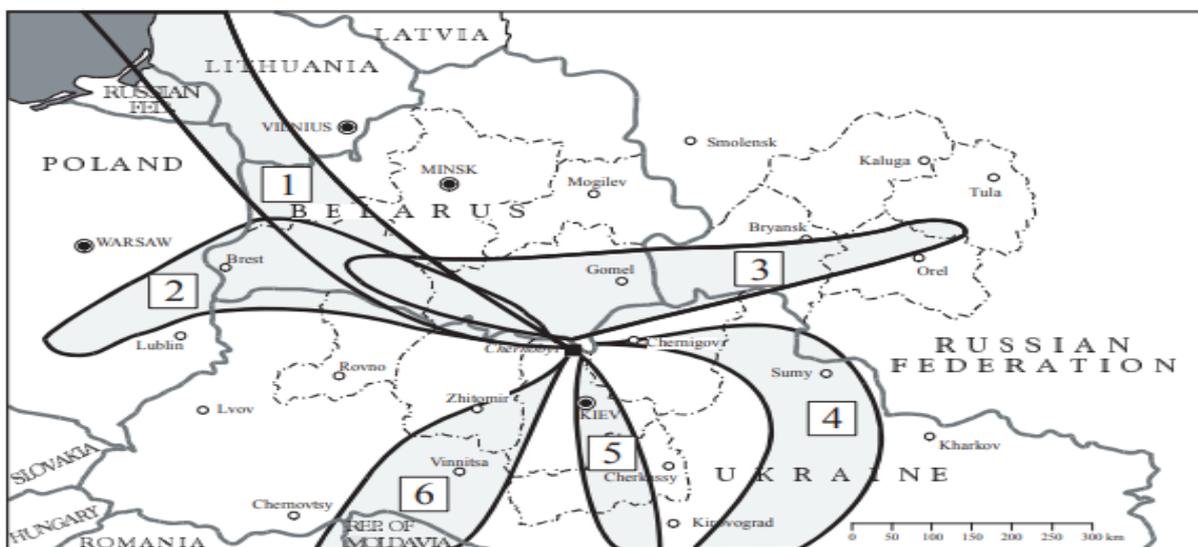


Рис. 3.2. Расчет формирования радиоактивных следов в соответствии с метеорологическими условиями для мгновенных выбросов в следующие даты и время (Гринвичское время): 1) 26 апреля 1986 года, 00:00; 2) 27 апреля, 00:00; 3) 27 апреля, 12:00; 4) 29 апреля, 00:00; 5) 2 мая, 00:00; и 6) 4 мая, 12:00 [3.16].

Рисунок 7 - Расчет формирования радиоактивных следов в соответствии с метеорологическими условиями.

### 3.4 Восстановительные мероприятия после Чернобыльской катастрофы

После чернобыльской аварии компетентные органы СССР ввели целый ряд краткосрочных и долгосрочных контрмер для смягчения последствий загрязнения окружающей среды. В рамках этих контрмер были задействованы большие объемы человеческих, экономических и научных ресурсов. К сожалению, не всегда присутствовала открытость и транспарентность в действиях компетентных органов, и информация не распространялась среди общественности. Это частично может объяснить причину некоторых проблем, которые возникли позже в отношении связи с общественностью, а также недоверия общественности компетентным органам. Подобная ситуация во многих других странах помимо Российской Федерации, Беларуси и Украины привела к подрыву доверия к компетентным органам, что в свою очередь привело к проведению исследований того, каким образом освещать такие крупные аварии в атмосфере гласности и транспарентности и каким образом пострадавшие люди могут принимать участие в процессах принятия решений. Уникальный опыт применения контрмер после чернобыльской аварии уже широко используется как на национальном, так и на международном уровнях, с тем чтобы повысить степень готовности в отношении будущих ядерных и радиологических аварийных ситуаций.<sup>14</sup>

Во время чернобыльской аварии существовали надлежащим образом разработанные международные и национальные руководства по общим вопросам радиационной защиты населения и конкретные руководства, применимые в случае крупных ядерных аварийных ситуаций. Базовая методология руководств, используемых в бывшем СССР, отличалась от той, которая была принята в международной системе, но пределы доз в нормах радиационной

<sup>14</sup> ГСП ЧАЭС Послеаварийная эксплуатация <https://chnpp.gov.ua/ru/about/history-of-the-chnpp/posleavarijnaya-ekspluatatsiya-i-ostanovka>

безопасности были аналогичны. Существующие в то время международные и национальные нормы широко применялись для защиты населения европейских стран, пострадавших в результате аварии. Масштабы долгосрочных последствий чернобыльской аварии потребовали разработки некоторых дополнительных национальных и международных норм радиационной безопасности в результате изменения радиологических условий.

### **3.4.1 Меры в отношении городской среды**

В течение первых лет после чернобыльской аварии в загрязненных регионах СССР широко применялась дезактивация поселков в качестве контрмеры для снижения дозы внешнего облучения населения и вдыхания вторично взвешенных радиоактивных веществ. Дезактивация оказалась экономически эффективной с точки зрения снижения дозы внешнего облучения в тех случаях, когда перед ней проводилась оценка восстановительных мероприятий на основе методов анализа затрат и выгод, а также данных дозиметрии внешнего облучения. После очистки территорий не наблюдалось вторичного загрязнения очищенных участков. В результате дезактивации городских территорий образовались значительные объемы радиоактивных отходов низкого уровня активности, которые, в свою очередь создали проблему их захоронения. В качестве научной базы для разработки усовершенствованных рекомендаций по дезактивации городских территорий использовались многочисленные экспериментальные исследования и соответствующее моделирование. Такие рекомендации могли бы использоваться в случае любых крупномасштабных радиоактивных загрязнений городских территорий в будущем.<sup>15</sup>

### **3.4.2 Меры в отношении сельскохозяйственной среды**

Контрмеры, принятые на ранней стадии чернобыльской аварии, оказались только частично эффективными с точки зрения поступления радиоактивного йода через молоко, поскольку не хватало своевременной информации об аварии и руководящих материалов в отношении рекомендуемых действий, особенно для частных фермеров. Это привело к значительному облучению радиоактивным йодом некоторой части населения пострадавших стран. Наиболее эффективными контрмерами на ранней стадии были исключение из рациона питания скота загрязненных пастбищных трав и отказ от молока. В некоторых странах весьма эффективным оказалось кормление скота чистым фуражом, однако эта контрмера не была широко использована в СССР из-за недостатка незагрязненных кормов. Часто проводился убой скота, но это было неоправданной с радиологической точки зрения мерой и вызвало значительные гигиенические, практические и экономические проблемы. Через несколько месяцев после аварии во всех загрязненных районах эффективно применялись долгосрочные сельскохозяйственные контрмеры в отношении радиоактивного цезия и радиоактивного стронция, эти контрмеры включали кормление животных чистым фуражом и обязательную переработку молока. Это позволило продолжить большую часть сельскохозяйственного производства на пострадавших территориях и в результате привело к значительному снижению дозы. Наиболее важной предпосылкой был радиационный мониторинг сельскохозяйственных земель, кормов и пищевых продуктов, включая мониторинг концентраций цезия в мясе скота. Наиболее крупной долгосрочной проблемой было загрязнение молока и мяса радиоактивным цезием. В СССР и позднее в трех независимых странах этот вопрос решался путем обработки земли, используемой для

---

<sup>15</sup> МАГАТЭ Меры в отношении городской среды [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)

выращивания сельскохозяйственных кормов, чистого кормления скота и введения животным связывающих цезий веществ – сорбентов. Чистое кормление является одной из наиболее важных и эффективных мер, используемых в странах, в которых концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства превышала уровни действий.

В долгосрочной перспективе радиационная обстановка окружающей среды меняется весьма медленно; однако эффективность экологических контрмер остается на постоянном уровне. Применение сельскохозяйственных контрмер в трех наиболее пострадавших странах существенно снизилось с середины 90-х годов прошлого века в связи с экономическими проблемами. Уже через короткое время это привело к увеличению содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции растительного и животного происхождения. В этих трех странах до сих пор остаются сельскохозяйственные угодья, которые не используются. Эти земли могли бы использоваться после соответствующих реабилитационных мероприятий, но в настоящее время это трудно сделать в связи с юридическими, экономическими и социальными ограничениями. В тех случаях, когда во время планирования и применения контрмер наряду с радиологическими факторами принимались во внимание социально-экономические факторы, эти контрмеры лучше воспринимались населением. В западной Европе до сих пор применяется ряд контрмер в отношении продукции животноводства, производимой на возвышенностях и в лесистой местности, из-за высокого и продолжительного поглощения радиоактивного цезия пострадавшими системами экстенсивного земледелия. Впервые практические долгосрочные сельскохозяйственные контрмеры были разработаны, опробованы и осуществлены в столь широком масштабе, они включают коренное улучшение пастбищ, чистое кормление скота перед убоем, применение сорбентов и обработку и культивацию почвы. Их осуществление на площади более 3 миллиардов гектар сельскохозяйственных земель позволило свести к минимуму объем продукции с концентрациями радионуклидов выше уровня действий во всех трех странах.<sup>16</sup>

### 3.4.3 Меры в отношении лесной среды

Основными контрмерами по отношению к лесной среде, применяемыми после чернобыльской аварии, являлись административные запретительные контрмеры (ограничения на различные виды деятельности, обычно ведущиеся в лесах), и технологические контрмеры. Широко применяемые в трех наиболее пострадавших странах и частично в Скандинавии ограничения включали следующие меры, которые снизили дозы облучения людей вследствие запрещения их пребывания в радиоактивно загрязненных лесах и использования лесных продуктов:

а) ограничение доступа населения и работников лесных хозяйств в качестве контрмеры против внешнего облучения;

б) ограничения на сбор ягод и грибов и охоты на диких животных. В трех наиболее пострадавших странах широко распространен сбор грибов, и поэтому это ограничение было особенно важным;

с) ограничения на сбор дров населением в целях предотвращения внешнего облучения в домах и на приусадебных участках при сгорании древесины, а также при захоронении золы или ее использовании в качестве удобрения;

д) изменение охотничьего сезона, целью которого являлось ограничение потребления мяса с высокими уровнями загрязнения радиоактивным цезием;

е) предотвращение пожаров, особенно в районах крупномасштабного выпадения радионуклидов, с целью избежания вторичного загрязнения окружающей среды.

<sup>16</sup> Меры в отношении сельско-хозяйственной среды [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)

Однако накопленный в трех наиболее пострадавших странах опыт показал, что такие ограничения могут также в результате иметь значительные негативные социальные последствия, и рекомендации компетентных органов населению могут в конечном итоге игнорироваться. Исправить такое положение можно путем реализации соответствующих образовательных программ на местах, направленных на подчеркивание актуальности предлагаемых изменений в использовании некоторых лесных массивов.

### **3.4.4 Меры в отношении водной среды**

В течение месяцев и многих лет после аварии принимались многочисленные контрмеры для защиты водных систем от перехода радионуклидов из загрязненных почв. В общем плане эти меры оказались неэффективными и дорогостоящими, а также привели к относительно высоким дозам облучения работников, осуществляющих эти контрмеры. Наиболее эффективной контрмерой явилось раннее ограничение забора питьевой воды из загрязненных источников и переход к использованию альтернативных запасов воды. Ограничения потребления пресноводной рыбы оказались эффективными в Скандинавии и Германии; однако в Беларуси, Российской Федерации и Украине таких ограничений, возможно, не всегда придерживались. Маловероятно, что любые будущие контрмеры для защиты поверхностных вод будут оправданы с точки зрения экономической стоимости на единицу снижения дозы. Ожидается, что ограничение на потребление рыбы останется в силе в некоторых случаях (закрытых озерах) еще несколько десятилетий.

Будущие усилия в данной области должны быть сконцентрированы на информировании общественности, поскольку до сих пор существует неправильное понимание населением того, что радиоактивно загрязненные воды и рыба могут являться риском для здоровья.<sup>17</sup>

## **3.5 Укрытие**

Разрушение четвертого энергоблока Чернобыльской атомной электростанции привело к обширному радиоактивному загрязнению и образованию больших объемов радиоактивных отходов внутри блока, на площадке Чернобыльской АЭС и на окружающей территории Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО).

После взрыва реактора Чернобыльской АЭС были уничтожены абсолютно все барьеры биологической защиты и системы безопасности, которые защищали окружающую среду от радиоактивных элементов ядерного топлива. В короткие сроки после аварии остро стал вопрос о консервации 4 реактора путем строительства сооружения которое могло бы ограничить выбросы радиоактивного материала с разрушенного реактора в атмосферу, а также снизить радиационный фон вокруг самого реактора.

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 29.05.86 года на Министерство среднего машиностроения СССР была возложена задача по захоронению 4 реактора. В дальнейшем построенный над реактором саркофаг получит официальное название «Объект Укрытие». Возглавил работы по захоронению и дезактивации территории вокруг ЧАЭС Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий (ВНИПИЭТ). Он же выступил в роли генерального проектировщика объекта «Укрытие».

Проблематика исполнения работ заключалась в том, что на момент аварии в 1986 году отсутствовала практика ликвидации подобных аварий.

---

<sup>17</sup> IAEA Реабилитация водной среды на Чернобыльской АЭС [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)

Обращая внимание на важность объекта «Укрытие» было разработано 18 вариантов проекта. Практически все они требовали огромных затрат по ресурсам как строительным, так и временным. В конечном итоге, после подсчета материальных затрат и дозовых нагрузок было принято решение возводить защитное сооружение максимально используя при этом остатки уцелевших конструкций 4 энергоблока. Таким образом весь объект «Укрытие» представляет собой совокупность «старых» конструкций разрушенного 4 блока и «новых», которые были построены после аварии.

Ввиду таких инженерных решений на свет появился объект, аналогов которых в мире не существует. Основным его предназначением является создание физического барьера на пути выхода радиоактивных материалов (аэрозолей, пыли) и радиоактивного излучения в окружающую среду.

В основе этих физических барьеров лежат наружные защитные конструкции, построенные после аварии: каскадная стена, контрфорсные и пионерные стены, накрытие над реакторным залом, деаэрационной этажеркой и машинным залом. Опорным контуром, на который опираются несущие элементы накрытия над реактором служат относительно уцелевшие конструкции 4 энергоблока.

Для реализации такого проектного решения потребовалось решить две самых сложных проблемы. Во-первых, нужно было обследовать техническое состояние уцелевших конструкций в крайне сложных радиационных условиях. Провести оценку возможности их использования в качестве элементов конструкций. Во-вторых, нужно было выбрать такие методы строительства, которые бы минимизировали время и радиационное влияние на персонал.

За короткий промежуток времени были построена вся необходимая инфраструктура для будущих работ по возведению «Саркофага» (базы снабжения, бетонные заводы, пункты перегрузки строительных материалов, места для проживания строительного персонала и т.д.). Также были организованы меры по безопасности в плане радиационного фактора, которые позволяли сократить до минимума вынос радиоактивных элементов за пределы «грязной зоны». Создание дозиметрических постов, пунктов дезактивации транспорта и непосредственное разделение того же транспорта на «грязный» и «условно чистый».

Для начала необходимо было подготовить «плацдарм» для ведения будущего строительства, то есть провести дезактивацию крыш станции и прилегающих территорий от радиоактивного материала. Под понятием радиоактивный материал имеется ввиду остатки активной зоны реактора (графит, обломки кассет с топливом), элементы строительных конструкций, пожарные автомобили, которые в первые часы аварии приняли на себя огромную дозу радиации и также стали кусками высокоактивного радиоактивного мусора. Также необходимо было снять верхний слой зараженной почвы. Всем этим занималась специальная инженерная техника, роботы и люди. В первую очередь люди, так как в высоких полях радиации техника просто отказывалась работать.<sup>18</sup>

Строительство объекта «Укрытие» требовало введения таких организационных и технологических решений, которые бы могли снизить до минимума, на сколько это возможно, радиационный фактор на персонал. Максимально эффективной была технология монтажа всех элементов конструкции Саркофага в «чистой зоне» и последующий монтаж этих конструкций при помощи дистанционного управления.

Практически при всех монтажно-строительных работах использовалась уникальная на то время техника и механизмы. Например, при монтаже всех крупных конструкций перекрытия Саркофага использовались гусеничные краны «Демаг» грузоподъемностью до 650 тонн. Для подачи бетона в верхние секции каскадных стен применялись телескопические бетононасосы «Швинг» и «Путцмайстер».

В процессе строительства защитного сооружения было заложено приблизительно 345 тысяч м<sup>2</sup> бетонной смеси и смонтировано около 7 тысяч тонн металлоконструкций.

<sup>18</sup> Объект Укрытие <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/37/075/37075404.pdf>

Для безопасности в дальнейшей эксплуатации объекта Укрытия также были созданы системы пылеподавления, проведена вентиляция и организованы системы пожаротушения. Нужно отметить, что для создания такого сложного и уникального сооружения в условиях крайне сложной радиационной обстановки потребовалось 206 суток. Все строительство велось в 3 смены. То есть работы велись круглосуточно. 30 ноября 1986 года объект «Укрытие» был сдан в эксплуатацию.

В то же время «Саркофаг» является недостаточно безопасным объектом так как был создан на скорую руку и не отвечает правилам и требованиям строительства подобных объектов. Также он никогда не имел так называемого «срока эксплуатации». Во время приемки «Саркофага» не было абсолютно никаких нормативных документов по его эксплуатации, не было никаких нормативов по безопасности. Время — это был худший враг для объекта Укрытия. Проводить проверку многих метрических элементов конструкций на предмет той же коррозии металла было практически невозможно в силу ограниченного доступа во многие места самого объекта «Укрытие». Со временем деградация строительных конструкций привела бы к ухудшению защиты, а в итоге и возможному разрушению Саркофага.<sup>19</sup>

### 3.6 Демонтаж Укрытия

Саркофаг был построен в 1986 г. над разрушенным 4-ом энергоблоком Чернобыльской АЭС.

За 33 года саркофаг покрылся трещинами, а бетонные плиты покосились. Несмотря на укрепление сооружения в 2004-2008 гг. проведенное недавно исследование показало высокую долю вероятности обрушения саркофага. В случае обрушения бетонные плиты упадут на реактор и поднимут в воздух радиоактивные вещества. Защиту в этом случае должен обеспечить Новый безопасный конфаймент (НБК, т.н. арка), установленный над саркофагом и введенный в эксплуатацию в июле 2019 г.

Однако радиоактивные вещества при возможном обрушении Укрытия-1 осядут на стенки защитной конструкции НБК, превратив все сооружение в огромный источник радиации. Угроза серьезная, поскольку в саркофаге на данный момент сейчас находится около 180 т слабообогатленного урана-235, 70 тыс. т радиоактивного покореженного металла, бетона, стеклообразной массы, 35 т радиоактивной пыли с общей активностью более 2 млн кюри.

---

<sup>19</sup> Chernobyl adventure <https://chernobyladventure.com/blog-istoriya-ukrutie>



Рисунок 8 – Демонтаж объекта «Укрытие»

SSE Chernobyl NPP, предприятие по выводу из эксплуатации блоков Чернобыльской АЭС и преобразованию объекта Укрытие в экологически безопасную систему, заключило контракт на демонтаж сооружения. В ходе 1<sup>го</sup> и 2<sup>го</sup> этапов демонтажа инженеры оценят текущее состояние объекта Укрытие-1.

Кроме того, планируется провести проектные работы, чтобы понять, какое именно оборудование будет необходимо для разборки старого саркофага, работы с большими объемами радиоактивных отходов. 3<sup>й</sup> этап окажется самым сложным - это собственно демонтаж саркофага.

Работа будет усложняться тем, что некоторые части саркофага в течение 30 лет подвергались не только воздействию радиации, но и естественной коррозии. При помощи роботизированных кранов элементы объекта укрепят, освободившиеся части саркофага демонтируют, очистят и пустят на утилизацию. Цена контракта составляет более 2 млрд грн, проект будет финансироваться за счет бюджета Украины. Предполагается, что все работы будут закончены к 20 декабря 2023 г. После демонтажа саркофага начнется очистка опасных отходов, оставшихся в 4<sup>м</sup> энергоблоке Чернобыльской АЭС.<sup>20</sup>

#### **4. Авария на АЭС «Фукусима -1»**

Атомная электростанция "Фукусима-1" ввелась в эксплуатацию 26 марта 1971 года. Расположена в городе Окума, в префектуре Фукусима на восточном побережье Японии. Расстояние до Токио составляет примерно 220 километров.

11 марта 2011 года в 14:46 по местному времени мощное землетрясение ударило по городу Сендай в 95 километрах от АЭС. Оно было вызвано внезапным выбросом энергии на

<sup>20</sup> Новостной портал neftegaz.ru <https://neftegaz.ru/news/nuclear/479506-demontazh-neobkhodim-sarkofag-nad-4-m-energoblokom-chernobylskoy-aes-planiruyut-demontirovat-k-2023/>

границе раздела литосферных плит, где Тихоокеанская тектоническая плита резко сдвинулась под Северо-американскую тектоническую плиту. Произошел разрыв части земной коры, согласно оценкам, размером примерно 500 км в длину и 200 км в ширину, который привел к мощному землетрясению магнитудой 9,0 и цунами, обрушившемуся на обширные территории прибрежных районов Японии, включая северо-восточную часть побережья, где некоторые волны достигали высоты свыше десяти метров. Землетрясение и цунами привели к гибели большого числа людей и широкомасштабным разрушениям в Японии. Погибли более 15 000 человек и свыше 6000 получили ранения. Значительный ущерб был причинен зданиям и объектам инфраструктуры, в частности вдоль северо-восточного побережья Японии.

У жителей прибрежных районов было всего 10 минут после экстренного предупреждения о приближающемся цунами, чтобы попытаться спастись.



Рисунок 9 - Цунами обрушивается на Японию, 11 марта 2011 год.

Затопление подвальных помещений "Фукусимы", где располагались распределительные устройства, резервные генераторы и батареи, произошло стремительно. Станция оказалась обесточенной, в результате чего отказала система аварийного охлаждения.

Вплоть до 15 марта команды ликвидаторов поочередно пытались предотвратить взрывы в реакторах. В три часа ночи 15 марта руководству АЭС сообщили, что ситуация стала критической, и с территории станции необходимо эвакуировать всех спасателей, а в 6:10 утра раздался мощный взрыв в третьем блоке. Первый приказ об экстренной эвакуации населения из трехкилометровой зоны был выпущен 11 марта, а к 15 марта зона эвакуации составляла уже 20 километров.<sup>21</sup>

<sup>21</sup> BBC news Ядерная катастрофа на Фукусиме <https://www.bbc.com/russian/features-56339483>

## 4.1 Причины аварии на Фукусиме

На атомной электростанции (АЭС) "Фукусима-дайити", эксплуатацию которой осуществляет Токийская электроэнергетическая компания (ТЕПКО), землетрясение повредило линии электроснабжения на площадке, а цунами привело к значительному разрушению эксплуатационной инфраструктуры, а также инфраструктуры, обеспечивающей безопасность на площадке. В совокупности это привело к потере внешнего энергоснабжения и выходу из строя источников электроснабжения на площадке. Это, в свою очередь, привело к утрате функции охлаждения на трех работавших реакторных блоках, а также в бассейнах выдержки отработавшего топлива. Четыре других атомных электростанций, располагающихся вдоль побережья, также пострадали в различной степени от землетрясения и цунами. Однако все работавшие реакторные блоки этих станций были безопасно остановлены. Человеческий фактор

Несмотря на усилия операторов АЭС "Фукусима-дайити", направленные на сохранение контроля над станцией, произошел перегрев активной зоны реакторов энергоблоков 1-3, ядерное топливо расплавилось и целостность трех защитных оболочек была нарушена. Из реакторных корпусов высокого давления произошли выбросы водорода, которые привели к взрывам внутри реакторных зданий блоков 1, 3 и 4, и в результате были разрушены конструкции и оборудование и пострадал персонал станции. Радионуклиды со станции поступили в атмосферу и затем осаждались на поверхности суши и океана. Кроме того, произошли прямые сбросы в море.

Население, проживающее на территориях в радиусе 20 км от площадки станции и в других районах, было эвакуировано, и жителям в радиусе 20-30 км было рекомендовано оставаться в укрытых местах, а затем им была предложена добровольная эвакуация. Были введены ограничения в отношении распределения, а также потребления продовольствия и потребления питьевой воды.



Рисунок 10 - Эпицентр землетрясения и находящиеся поблизости атомные электростанции.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Авария на АЭС <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>

## 4.2 Защита населения

Эвакуация людей из района АЭС "Фукусима-дайти" началась вечером 11 мая 2011 года, и зона эвакуации постепенно расширялась в радиусе от 2 км до 3 км и затем 10 км от станции. К вечеру 12 марта 2011 года она была увеличена до 20 км. Таким же образом расширялась и зона, в которой население было проинструктировано использовать укрытие, – от 3-10 км от станции вскоре после аварии до 20-30 км к 15 марта. В радиусе 20-30 км от АЭС населению было указано находиться в укрытии вплоть до 25 марта, когда правительство страны рекомендовало добровольную эвакуацию. Введение стабильного иода (иодная профилактика) с целью иодного блокирования щитовидной железы не осуществлялось единообразно, главным образом из-за отсутствия детальной регламентации. Имели место трудности с эвакуацией вследствие разрушения инфраструктуры в результате землетрясения и цунами и связанных с этим проблем коммуникационно транспортного характера.

Значительные трудности возникли также с эвакуацией больных из больниц и домов престарелых в зоне радиусом 20 км. 22 апреля существующая 20-километровая зона эвакуации была объявлена "районом ограниченного доступа", возвращение в который было взято под контроль. За пределами "района ограниченного доступа" были также определены "районы плановой эвакуации" – в местах, где могли быть превышены конкретные дозовые критерии. При обнаружении радионуклидов в окружающей среде принимались решения в отношении принятия защитных мер в сельскохозяйственных районах и введения 13 ограничений на потребление и распределение пищевых продуктов и потребление питьевой воды. Кроме того, была введена система сертификации для пищевых и других продуктов, предназначенных для экспорта. В ходе аварийной ситуации для информирования общественности и реагирования на вопросы, вызывающие обеспокоенность у населения, использовались различные средства, включая телевидение, радио, интернет и "горячие" телефонные линии. Информация, получаемая от населения в порядке обратной связи через "горячие" линии и консультационные службы, позволяла выявлять потребности в легко воспринимаемой информации и вспомогательных материалах.

## 4.3 Выбросы

Было выполнено множество оценок выбросов радионуклидов вследствие аварии на АЭС "Фукусима-дайти" с использованием опробованных математических моделей, методов и соответствующих компьютерных кодов. На ранней стадии аварии в шлейфе выбросов в атмосферу также присутствовали инертные газы  $85\text{Kr}$  и  $133\text{Xe}$  с периодами полураспада 10,76 лет и 5,25 суток, соответственно. Короткоживущий  $131\text{I}$  с периодом полураспада 8,02 суток был одним из элементов, способствующих накоплению эквивалентных доз в щитовидной железе в случае перорального или ингаляционного поступления. Более долгоживущие  $134\text{Cs}$  и  $137\text{Cs}$  с периодами полураспада 2,06 лет и 30,17 лет, соответственно, способствовали накоплению эквивалентных доз и эффективных доз при внешнем и внутреннем облучении. Хотя  $131\text{I}$  распадается относительно быстро, его воздействие может привести к образованию относительно высоких эквивалентных доз в щитовидной железе. В некоторых районах в окружающей среде может сохраняться  $137\text{Cs}$ ; если не будет проведена реабилитация, он может и далее способствовать накоплению эффективной дозы у людей. Кроме того, в различных количествах происходил выброс радионуклидов стронция, рутения и некоторых актинидов (например, плутония). У главных въездных ворот станции (которые находятся примерно в 1 км от энергоблоков 1–3) в период с 05:30 до 10:50 13 марта было зарегистрировано появление нейтронов. Согласно оценкам,

нейтроны появились в результате спонтанного деления ядер радионуклидов, выброс которых произошел в результате повреждения активной зоны реактора. Такое явление было предсказуемым, и сообщалось о присутствии этих радионуклидов в относительно небольших объемах. Инертные газы составляют значительную часть первоначальных выбросов с АЭС "Фукусима-дайти", согласно оценкам объем выбросов составил от примерно 6000 – 12 000 ПБк  $^{133}\text{Xe}$  (по первоначальным оценкам 500–15 000 ПБк). Средняя общая активность высвободившегося  $^{131}\text{I}$  составила примерно 100–400 ПБк, а активность  $^{137}\text{Cs}$  – примерно 20 ПБк (или по первоначальным оценкам 90–700 ПБк и 7–50 ПБк). Выбросы в результате данной аварии оцениваются приблизительно в одну десятую объема выбросов, связанных с аварией на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Большая часть выбросов рассеялась над северной частью Тихого океана; в результате повторное подтверждение объема и изотопного состава высвободившегося материала (параметры источника выброса) путем измерения содержания отложений радионуклидов в окружающей среде невозможно.

### 4.3.1 Выбросы в море

Большая часть выбросов в атмосферу рассеялась над северной частью Тихого океана в поверхностном слое воды. Имели место прямые выбросы, а также сбросы в море с площадки, при этом основным источником высокорadioактивной воды стал желоб вблизи АЭС "Фукусима-дайти". Пиковый уровень радиоактивных выбросов наблюдался в начале апреля 2011 года. Объем прямых выбросов и сбросов  $^{131}\text{I}$  в море по оценкам составил 10–20 ПБк. Прямые выбросы и сбросы  $^{137}\text{Cs}$  по оценкам в результате большинства анализов составили 1–6 ПБк, однако в некоторых оценках указывались значения от 2,3 до 26,9 ПБк.<sup>23</sup>

## 4.4 Влияние на окружающую среду

В результате аварии произошел выброс радионуклидов в окружающую среду. Оценка выбросов проводилась многими организациями с применением различных моделей. Большая часть выбросов в атмосферу подверглась переносу преобладающими ветрами с рассеиванием и осаждением в северной части Тихого океана. Неопределенности в оценках количества и состава выбросов радиоактивных веществ было сложно устранить по ряду причин, в том числе из-за отсутствия данных мониторинга осаждения атмосферных выбросов на поверхность океана. Изменения направления ветра привели к тому, что на суше произошло осаждение относительно небольшой части атмосферных выбросов, в основном в северо-западном направлении от АЭС "Фукусима-дайти". Наличие и активность осадений радионуклидов в земной среде контролировались путем мониторинга и характеристики. Измеренные уровни активности радионуклидов снижаются с течением времени вследствие процессов физического распада, переноса в окружающей среде, а также мероприятий по очистке. Помимо радионуклидов, поступавших в океан в результате атмосферного осаждения, происходили жидкие выбросы и сбросы с площадки АЭС "Фукусима-дайти" непосредственно в море. Точное перемещение радионуклидов в океане сложно оценивать только путем измерений, и для оценки рассеивания радионуклидов в океане был использован ряд моделей их переноса в океане. Высвобожденные радионуклиды, такие как  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , были обнаружены в питьевой воде, продовольствии и некоторых непродовольственных продуктах. В рамках реагирования на аварию власти Японии ввели ограничения с целью не допустить потребления и использования этих продуктов.

---

<sup>23</sup>Выбросы в море <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>

## 4.5 Рассеивание

Для оценки рассеивания было использовано множество теоретических моделей. Были произведены масштабные замеры концентрации активности  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в окружающей среде, в том числе в воздухе, почве, морской воде, отложениях и биоте, их результаты также применялись для оценки рассеивания выбросов.

### 4.5.1 Рассеивание в атмосфере

Радиоактивные выбросы перемещались в атмосфере в основном на восток и север Японии по направлению преобладающего ветра, а затем – по всему земному шару. На рисунке 11 приведен пример множества моделей атмосферного переноса, которые использовались для оценки переноса различных радионуклидов в атмосфере и схем их осаднения и описывают результаты моделирования глобального рассеивания  $^{137}\text{Cs}$ .

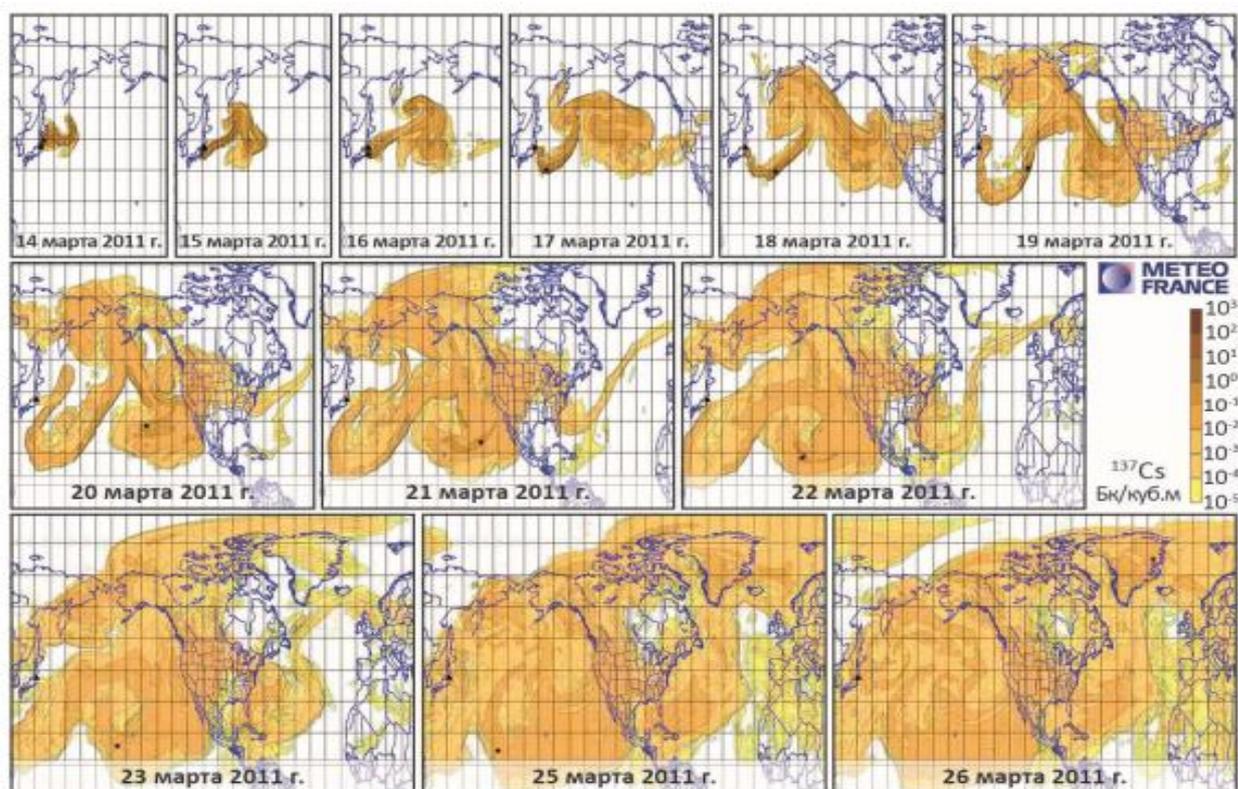


Рисунок 11 - Результаты одной из глобальных моделей рассеивания  $^{137}\text{Cs}$  в атмосфере.<sup>24</sup>

Концентрация активности в воздухе показана на рисунке с использованием приведенной в источнике исходной цветовой маркировки, где небольшие изменения оттенка цвета соответствуют изменению величины концентрации активности на один порядок. Эта иллюстрация приводится для подтверждения вывода о том, что концентрация активности в атмосфере значительно уменьшилась по мере удаления от АЭС "Фукусима-дайти". Высококочувствительные сети радиационного мониторинга обнаружили крайне низкие уровни

<sup>24</sup> Доклад МАГАТЭ Рассеивание в атмосфере <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>

радиоактивности, связываемые с данной аварией, даже в Европе и Северной Америке. При этом последствия этих выбросов на уровне глобальной фоновой радиоактивности окружающей среды пренебрежимо малы.

#### 4.5.2 Рассеивание в океане прямых выбросов и сбросов в море

Большая часть радионуклидов, высвободившихся и сброшенных с промплощадки в море, переместилась на восток с течением «Курисио», была перенесена на большие расстояния океаническим водоворотом в северной части Тихого океана и подверглась сильному растворению в морской воде. Радиоактивность распространилась на большие расстояния в океане и была обнаружена в крайне малых количествах вдалеке от места аварии, в некоторых случаях в элементах океанской биоты, таких как обыкновенный тунец. Точное перемещение радионуклидов в океане трудно оценить только путем измерений, однако для анализа схем рассеивания радионуклидов был использован ряд моделей их переноса в океане. На рисунке 12 приведены примеры этих моделей, описывающие рассеивание  $^{137}\text{Cs}$  в северной части Тихого океана.

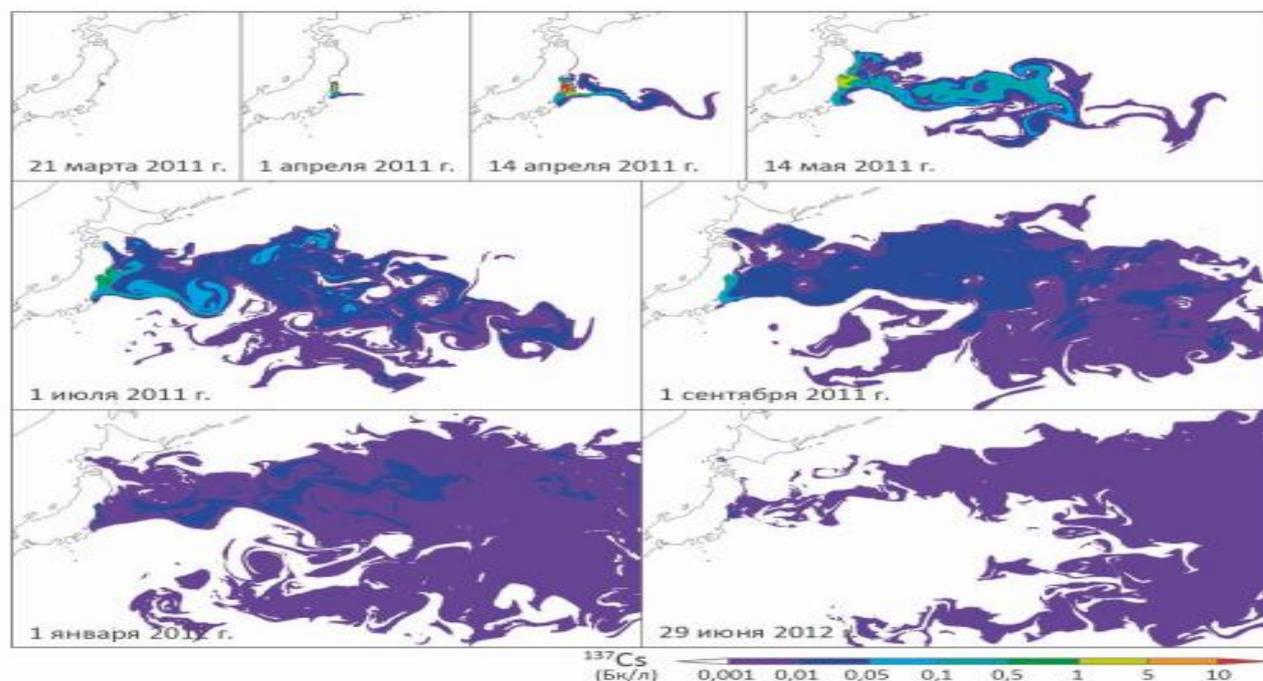


Рисунок 12 - Пример моделирования загрязнения воды изотопом  $^{137}\text{Cs}$  в период с 21 марта 2011 года по 29 июня 2012 года.<sup>25</sup>

На рисунке используется исходная цветовая маркировка, приведенная в тех источниках, из которых взяты иллюстрации. Как и в случае рассеивания в атмосфере, небольшие изменения в оттенке или насыщенности цвета соответствуют изменению величины концентрации активности на один порядок. Эта иллюстрация приводится для подтверждения вывода о том, что активность в океане заметно уменьшилась по мере удаления от АЭС "Фукусима-Дайити". Все модели показывают, что активность  $^{137}\text{Cs}$  в океане была весьма низкой.

<sup>25</sup>Авария на АЭС Фукусима-Дайити <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>

## **4.6 Послеаварийное восстановление**

Сразу же после аварии на АЭС «Фукусима-дайти» первоочередное внимание было уделено стабилизации состояния реакторов на станции и защите населения путем реализации мер, которые включали укрытие и эвакуацию жителей затронутых аварией районов, а также введение ограничений на потребление пищевых продуктов и питьевой воды. По мере продолжения работ и после стабилизации состояния на площадке АЭС больше внимания стало уделяться послеаварийным восстановительным мероприятиям, в том числе возрождению местных общин и восстановлению инфраструктуры. В данном разделе речь идет о ходе послеаварийного восстановления до марта 2015 года, а также о планах на будущее. В основном в нем идет речь о ситуации существующего облучения, наступившей после аварийной фазы.

### **4.6.1 Защитные мероприятия в отношении пищевых продуктов, питьевой воды и сельского хозяйства**

До аварии были разработаны критерии концентраций активности конкретных радионуклидов в случае ядерной аварии для введения ограничений в отношении пищевых продуктов и питьевой воды, производимых в Японии. Однако эти показатели не были приняты для использования в случае аварийной ситуации в качестве конкретных нормативных пределов. 17 марта 2011 года в соответствии с Законом о безопасности пищевых продуктов эти критерии были приняты в качестве временных нормативных показателей для уровней радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде. После обнаружения радиоактивного материала в окружающей среде были приняты меры для введения контроля за пищевыми продуктами и питьевой водой. Такие меры включали: установление уровней концентрации радионуклидов радиоактивного цезия и радиоактивного йода в пищевых продуктах и питьевой воде в качестве временных нормативных показателей согласно Закону о безопасности пищевых продуктов, превышение которых вело к ограничению использования пищевых продуктов и питьевой воды, и замеры концентраций радионуклидов в пробах пищевых продуктов и питьевой воды. В течение нескольких недель уровни радиоактивного йода ( $^{131}\text{I}$ ) значительно снизились ввиду его короткого периода полураспада (около 8 дней), и ограничения в отношении пищевых продуктов в среднесрочной и долгосрочной перспективе устанавливались только на основе концентраций радиоактивного цезия. 21 марта 2011 года правительство страны начало вводить ограничения на распространение конкретных пищевых продуктов, обусловленные изменившимся положением. Ограничения на пищевые продукты устанавливались на основе мониторинга проб пищевых продуктов, позволявшего определить, какие продукты выходили за пределы критериев, и установить затронутые географические местности. В отношении защитных мер применительно к пищевым продуктам и напиткам возник ряд проблем, а именно: определение критериев (концентрации активности радионуклидов), которые могут быть использованы в качестве основы для контроля пищевых продуктов; определение того, какие пищевые продукты в разных географических местностях были или могли быть затронуты на уровнях, превышающих эти критерии; недостаточность инфраструктуры и ресурсов для проб и анализа; и устранение обеспокоенности некоторых местных органов относительно отбора проб и проведения анализов.

4 апреля 2011 года была установлена политика, позволившая вводить ограничения на пищевые продукты не только в районах в пределах границ префектур, но и в соответствующих случаях в более мелких географических районах (таких как города, поселки и деревни). В рамках этой политики был предусмотрен процесс установления или снятия ограничений в отношении различных пищевых продуктов. Префектуры могли

просить об изменении ограничений при условии, что результаты мониторинга были ниже временных нормативных показателей три раза подряд в пробах еженедельного мониторинга.

5 апреля 2011 года на основе замеренных концентраций  $^{131}\text{I}$  в пробах рыб были добавлены временные нормативные показатели для концентраций активности радиоактивного йода в рыбных продуктах. 8 апреля 2011 года была определена политика в отношении ограничений на выращивание риса на сельскохозяйственных землях, уровень радиоактивного цезия которых превышал установленные критерии. 14 апреля 2011 года были установлены в качестве временных допустимых показателей уровни концентрации радионуклидов радиоактивного цезия и радиоактивного йода в животном корме. Несмотря на ограничения в отношении животного корма некоторые результаты проб говядины превышали временные нормативные показатели (в июле 2011 года). С тем чтобы не допустить попадания этого мяса к потребителям, был введен режим контроля.

1 апреля 2012 года начали действовать стандартные пределы, заменившие временные нормативные показатели. В этих пределах были предусмотрены концентрации активности для радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде на основе эффективной дозы 1 мЗв в год (тогда как для временных нормативных показателей использовался критерий 5 мЗв в год) и с учетом составляющих дозы в виде ряда радионуклидов, выброс которых произошел во время аварии. Вследствие этого данные показатели оказались гораздо ниже временных нормативных показателей, которые они заменили.<sup>26</sup>

#### **4.7 РЕАБИЛИТАЦИЯ ПОСТРАДАВШИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ**

Долгосрочной целью послеаварийного восстановления является воссоздание приемлемой основы для полноценного функционирования общества в пострадавших районах. Необходимо рассмотреть возможность реабилитации пострадавших в результате аварии территорий, с тем чтобы снизить дозы облучения до значений, соответствующих принятым референтным уровням. При подготовке к возвращению эвакуированных жителей необходимо учитывать такие факторы, как восстановление инфраструктуры и обеспечение жизнеспособности и устойчивой экономической деятельности общества.

До аварии на АЭС «Фукусима-дайити» в Японии не было установлено какой-либо политики или стратегий в отношении послеаварийной реабилитации, и поэтому возникла необходимость их разработки после аварии. Политика реабилитации территорий была введена в действие правительством Японии в августе 2011 года. В рамках этой политики были распределены сферы ответственности национального и местного правительств, оператора и населения, а также созданы институциональные механизмы, необходимые для выполнения и координации программы работы. Была разработана стратегия реабилитации, и началось ее осуществление. В стратегии указывалось, что в первую очередь реабилитации подлежат жилые районы, включая здания, земли фермерских хозяйств, дороги и объекты инфраструктуры, с уделением особого внимания снижению уровней внешнего облучения.

Основным путем облучения являются внешние дозы, получаемые от осевших на земле и на других поверхностях радионуклидов. В этой связи стратегия реабилитации сосредоточена на работах по дезактивации с целью снижения уровней активности радиоактивного цезия в первоочередных для реабилитации районах, что позволяет уменьшить потенциальную возможность получения таких доз облучения. Контроль и снижение доз внутреннего облучения обеспечивается за счет продолжения применения мер по ограничению потребления определенных пищевых продуктов, а также путем проведения

---

<sup>26</sup> IAEA Восстановление после ядерной аварии <https://www.iaea.org/ru/10-let-posle-avarii-na-aes-fukusima-dayiti/vosstanovlenie-posle-yadernoy-avarii>

мероприятий по реабилитации сельскохозяйственных угодий. После аварии власти в Японии приняли «референтный уровень» (контрольный уровень) в качестве целевого дозового уровня для всех операций в рамках стратегии реабилитации. Этот уровень соответствует нижнему значению диапазона, указанного в международных руководствах. Применение низкого референтного уровня влечет за собой увеличение объемов загрязненных материалов, образующихся в ходе мероприятий по реабилитации, увеличивая тем самым затраты и потребление ограниченных ресурсов. Приобретенный в Японии опыт мог бы использоваться при разработке практических руководств по применению международных норм безопасности в ситуациях послеаварийного восстановления. На основе дополнительных годовых доз, оцененных осенью 2011 года, были определены две категории загрязненных территорий. В сферу ответственности правительства страны входили составление и реализация планов реабилитации в первой зоне («особом районе дезактивации») – в радиусе 20 км от площадки АЭС «Фукусима-дайти», а также в районах, в которых по прогнозам дополнительные годовые дозы в результате загрязнения местности должны были в первый год после аварии превысить 20 мЗв. В сферу ответственности местных органов (муниципалитетов) вошло проведение мероприятий по реабилитации в другой зоне («территории интенсивного контроля загрязнения»), в пределах которой по прогнозам дополнительные годовые дозы должны были превышать 1 мЗв, но оставаться ниже 20 мЗв.

Были поставлены конкретные цели снижения доз, включая долгосрочную цель – достичь значения дополнительной годовой дозы 1 мЗв или ниже.

Принятая стратегия реабилитации на разработку стратегии реабилитации повлиял тот факт, что доз внутреннего облучения после аварии в основном удалось избежать благодаря введенным ограничениям в отношении пищевых продуктов и питьевой воды. В связи с этим описываемые в настоящем докладе мероприятия по реабилитации в первую очередь касались работ по дезактивации в целях снижения уровней доз внешнего облучения. В принятой правительством Японии стратегии реабилитации был выработан подход к быстрому снижению доз излучения, предусматривающий первоочередную реабилитацию жилых районов, фермерских хозяйств и лесных массивов, примыкающих к жилым районам или сельскохозяйственным угодьям. С целью облегчения этой задачи в августе 2011 года подлежащие реабилитации земли были классифицированы следующим образом. — Особый район дезактивации. Этот район частично охватывает бывшие «территории ограниченного доступа», т.е. зону эвакуации в радиусе 20 км от АЭС «Фукусима-дайти» и бывшие «районы плановой эвакуации», которые были расположены за 20-километровой зоной вокруг станции и в которых дополнительные годовые индивидуальные дозы в первый год после аварии могли превышать 20 мЗв. В пределах особого района дезактивации ответственность за составление и осуществление планов реабилитации лежит на правительстве Японии.

#### **4.8 Территория интенсивного контроля загрязнения**

Сюда входят те муниципалитеты, в которых по оценкам в первый год дополнительные индивидуальные дозы облучения в некоторых районах могли составлять от 1 до 20 мЗв.

Муниципалитеты осуществляют дозиметрический контроль с целью выявления районов, в которых требуется дезактивация, и проводят в этих районах мероприятия по реабилитации с финансовой и технической помощью правительства страны. В 2012 и 2013 годах районы, в отношении которых были подготовлены распоряжения об эвакуации, были разбиты еще на три следующие категории на основе расчетной суммарной годовой дозы для жителей этих районов, если таковые остались.

— Зона 1 (зеленого цвета). Районы, в отношении которых готовы отмены распоряжений об эвакуации. Ожидалось, что годовая доза составит 20 мЗв или менее.

— Зона 2 (оранжевого цвета). Районы, в которых местным жителям жить не разрешается. Ожидалось, что годовая доза превысит 20 мЗв.

— Зона 3 (красного цвета). Районы, в которые, как предполагалось, местные жители не смогут вернуться в течение длительного времени. Расчетная годовая доза была выше 50 мЗв, и ожидалось, что средняя годовая доза в течение шести лет после аварии составит более 20 мЗв.<sup>27</sup>

#### 4.9 Последствия для здоровья

Ни у работников, ни у населения не было выявлено каких-либо ранних радиационноиндуцированных последствий для здоровья, которые можно было бы отнести на счет аварии. Латентный период отдаленных последствий воздействия облучения на здоровье может длиться десятилетия, поэтому не следует исключать возможность того, что наличие таких последствий у подвергшегося облучению населения будет обнаружено через несколько лет после облучения. Согласно выводу НКДАР ООН, в группе работников, получивших эффективные дозы 100 мЗв или более, в "будущем ... можно ожидать повышенного риска заболеваемости раком. Однако выявление какого-либо повышенного уровня заболеваемости раком в этой группе не представляется возможным из-за трудностей, связанных с подтверждением столь невысокого уровня заболеваемости по сравнению с обычными колебаниями статистических показателей, характеризующих заболеваемость раком". Для проверки состояния здоровья пострадавшего от аварии населения было проведено медицинское обследование населения префектуры Фукусима. Цель этого обследования состояла в раннем обнаружении и лечении заболеваний, а также профилактике заболеваний, связанных с жизненными условиями. Также производился масштабный скрининг щитовидной железы у детей. Для этих целей используется сверхчувствительное оборудование, способное выявлять бессимптомные дефекты щитовидной железы у значительного числа обследуемых детей (которые невозможно было бы обнаружить клиническими методами). Маловероятно, что обнаруженные в ходе обследования дефекты связаны с радиационным облучением в результате аварии. Скорее всего, это естественные дефекты щитовидной железы, возникающие у детей в этом возрасте. Наиболее вероятным последствием аварии со значительными выбросами радиоактивного йода является рост заболеваемости детей раком щитовидной железы. Поскольку зарегистрированные дозы облучения щитовидной железы в связи с данной аварией в целом были низкими, рост заболеваемости раком щитовидной железы в детском возрасте в результате аварии представляется маловероятным. Вместе с тем оставались неопределенности в отношении эквивалентных доз облучения щитовидной железы, полученных детьми непосредственно после аварии. Последствия пренатального облучения не наблюдались и не предвидятся, поскольку зарегистрированные дозы значительно ниже порогового значения, при котором такие последствия могут иметь место. Случаев незапланированного прерывания беременности, обусловленных радиологической ситуацией, зарегистрировано не было.

Относительно возможности того, что облучение взрослых людей приведет к возникновению наследственных эффектов у их потомков, НКДАР ООН сделал вывод, что в целом, "несмотря на позитивные результаты исследований, основанных на изучении животных, увеличение частоты возникновения наследственных эффектов у населения в настоящее время нельзя однозначно объяснить воздействием облучения". У некоторых лиц из населения, пострадавших от ядерной аварии, были зарегистрированы определенные психологические состояния. Поскольку многие из этих людей пострадали не только от

<sup>27</sup> IAEA <https://www.iaea.org/ru/newscenter/pressreleases/magate-publikuet-pervyy-doklad-o-bezopasnosti-zaplanirovannogo-sbrosa-vody-s-aes-fukusima-daviti>

аварии, но и в результате совокупного воздействия серьезного землетрясения и разрушительного цунами, затруднительно оценить, в какой степени эти эффекты могут быть связаны только лишь с ядерной аварией. Результаты исследования психического состояния и жизненных условий, проведенного в рамках медицинского обследования населения префектуры Фукусима, свидетельствуют о наличии у некоторых уязвимых групп пострадавшего населения таких связанных с аварией психологических проблем, как состояние повышенной тревоги и посттравматические стрессовые расстройства. По оценкам НКДАР ООН, "самыми серьезными последствиями [аварии] в плане здоровья стали психическое состояние и социальное благополучие, обусловленные тем огромным воздействием, которое оказали землетрясение, цунами и ядерная авария, а также страх и распространение негативных стереотипов, связанных с гипотетической опасностью подвергнуться действию ионизирующего излучения".<sup>28</sup>

#### **4.9.1 Радиологические последствия для биоразнообразия**

В период непосредственно после аварии были проведены некоторые ограниченные по объему наблюдения, однако прямых радиационно индуцированных последствий для растений и животных зафиксировано не было. Существующие методологии оценки радиологических последствий имеют свои ограничения, но исходя из прошлого опыта и уровней содержания радионуклидов в окружающей среде, представляется маловероятным, что авария будет иметь сколько-нибудь серьезные радиологические последствия для популяций живых организмов или экосистем. Охрана окружающей среды включает «защиту и сохранение: нечеловеческих биологических видов – как животных, так и растений, а также их биоразнообразия; товаров и услуг, зависящих от окружающей среды. Этот термин охватывает также производство продовольствия и кормов; ресурсов, используемых в сельском хозяйстве, лесоводстве, рыболовстве и туризме; благ, используемых в духовной, культурной и рекреационной деятельности; сред, таких как почва, вода и воздух; природных процессов, таких как круговорот углерода, азота и воды». Землетрясение и цунами стали источником серьезного экологического стресса для земной и морской сред вдоль северо-восточного побережья Хонсю.

Первоочередной задачей после аварии была защита людей, а не живых организмов окружающей среды, контролировать облучение которых представляется сложным. Хотя жители зоны в радиусе 20 км от станции были эвакуированы для минимизации их радиационного облучения, предотвратить облучение живых организмов помимо человека, населяющих эти районы, было невозможно. Наивысший уровень оцененной поглощенной дозы для растений отмечался в первые недели после аварии, но он не достигал уровней, при которых можно ожидать наступления острых последствий. На раннем этапе после аварии соответствующие референтные уровни были превышены для некоторых условных живых организмов земной среды (таких как сосна, трава, олени и крысы). Вместе с тем общего воздействия на популяции этих организмов или экосистемы зафиксировано не было. При дозах менее 1,2 Гр хвойным породам деревьев может быть причинен лишь незначительный вред, тогда как дозы в диапазоне 10–20 Гр могут повлечь за собой более серьезный вред, ведущий к гибели. Исходя из оцененных доз можно заключить, что прямые летальные эффекты для дикорастущей травы, которая обладает большей стойкостью к облучению, маловероятны. Что касается земных животных, то оцененная мощность дозы на раннем этапе показала, что вероятность расстройств репродуктивной системы весьма мала. Хотя на ранних этапах аварии мощность дозы и превысила некоторые референтные значения, это не должно негативно отразиться на популяциях растений и животных и экосистемах. Долгосрочных последствий не ожидается также потому, что оцененные кратковременные дозы были в

<sup>28</sup> Доклад ООН Последствия для здоровья людей <https://www.nippon.com/ru/news/yjj2021030901138/>

целом намного ниже уровней, на которых можно было бы ожидать острых эффектов, причиняющих большой вред, а также потому, что значения мощности дозы после аварии относительно быстро снизились.<sup>29</sup>

#### 4.9.2 Финансовые последствия аварии

В финансовом отношении авария на «Фукусиме-1», тоже имеет тяжелые последствия, особенно для Японии и, в частности, для владельца АЭС – компании ТЕРСО. Атомная отрасль тоже понесла значительный урон, например, после аварии резко снизились котировки уранодобывающих компаний и упали спотовые цены на сырье для атомных электростанций. По оценкам экспертов, постройка новых АЭС, после аварии в Японии, возрастет на 20 – 30%. Компания ТЕРСО, по требованию правительства Японии, обязана выплатить компенсации для 80 тысяч человек, пострадавших от последствий аварии, сумма выплат может достичь \$130 млрд. Сама же компания – владелец АЭС потеряла \$32 млрд своей рыночной стоимости, из-за снижения цены своих акций. И хотя АЭС и была застрахована на несколько миллионов долларов, этот случай, по договору не подпадает под категорию «страхового».<sup>30</sup>

#### 4.10. Фукусима сегодня

Спустя одиннадцать лет видимых признаков катастрофы почти не осталось. Повсюду в 20-километровой зоне вокруг ядерного объекта экскаваторы и краны снесли офисные здания и дома, ставшие непригодными для проживания из-за землетрясения, многолетнего запустения и радиоактивного загрязнения. Горы мешков, содержащих все, что осталось после дезактивации, которые годами портили визуал ландшафта, вывезены. На многих полях и лугах установлены солнечные батареи. С одной стороны, уровень радиации упал, была проведена дезактивация, сегодня закрыто только 2,4 процента территории префектуры. С другой стороны, 37 000 бывших жителей все еще находятся в эвакуации.

Тем временем все приказы об эвакуации из 20-километровой зоны отменены. Но большая часть населенных пунктов вблизи АЭС и к северо-западу от станции все еще сильно загрязнены. На общей площади в почти 340 кв. км радиоактивность как минимум в 50 раз превышает стандартный предел в один миллизиверт. Пока в этих городах созданы только небольшие дезактивированные особые экономические зоны, которые призваны служить плацдармом для будущего возвращения жителей. В населенные пункты, расположенные на некотором удалении от АЭС, вернулись от 30 до 60 процентов бывших жителей. Однако семей с детьми очень мало. Они опасаются радиации, да и многие уже прижились на новых местах. Таким образом, большинство репатриантов - пожилые люди.<sup>31</sup>

<sup>29</sup> Официальный сайт МАГАТЭ

<https://www.iaea.org/ru/search/google/%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%A4%D1%83%D0%BA%D1%83%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0>

<sup>30</sup> Факультет проблем физики и энергетики [https://mipt.ru/dppe/science\\_articles/fukushima1.php](https://mipt.ru/dppe/science_articles/fukushima1.php)

<sup>31</sup> Как живет Фукусима <https://www.dw.com/ru/kak-zhivet-fukusima-spustja-desjat-let-posle-avarii-na-ajes/a-56829299#:~:text=%D0%A1%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BB%D0%B0%20%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%2011%20%D0%BC%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%202011,%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BE%20%D0%BA%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8E%20%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D1%8B>

## Заключение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиацией была загрязнена территория площадью почти 200 тыс. км<sup>2</sup>. Пострадали северная часть Украины, Беларусь и запад России. Что касается Японии, то территория, загрязненная радиацией охватила 26 тыс. км<sup>2</sup>, в неё вошли район префектуры Фукусима, а также регион Тохоку и Токийский столичный округ.

Выброс радиоактивных веществ в атмосферу при аварии на АЭС «Фукусима-1» в 8 раз ниже, чем наблюдался во время Чернобыльской аварии. Намного выше при аварии на Чернобыльской АЭС было и число жертв. Однако, авария на АЭС «Фукусима-1» имеет характер, принципиально отличающийся от характера чернобыльской катастрофы. В Чернобыле основную опасность для здоровья людей представлял выброс радиоактивных элементов непосредственно в момент аварии. В дальнейшем радиоактивное заражение прилегающих к АЭС территорий лишь снижалось в результате естественного снижения радиоактивности нестабильных элементов и их постепенного размывания в окружающей среде. АЭС «Фукусима-1» расположена на побережье океана, благодаря чему значительная часть радиоактивных веществ (520 тонн) была сброшена в океанскую воду. С одной стороны этим обусловлено значительно менее интенсивное заражение прилегающих территорий (к тому же, в отличие от Чернобыля, на Фукусиме не было взрыва реактора как такового, а значит -- не было массивованного разлета радиоактивных частиц по воздуху), но с другой -- утечка в океан зараженной воды с поврежденных реакторов «Фукусимы-1» пагубно сказывается на состоянии вод и обитателей океана.

Основное преимущество Японии - в организации процесса ликвидации аварии. Несмотря на серьезные масштабы аварии, возможность серьезных радиационных последствий вблизи от станции, а также доказательства трансграничного переноса радиоактивных веществ на территорию стран Западной Европы, на протяжении первых нескольких суток руководство СССР не информировало население своей страны, а также мировое сообщество о случившемся. Более того, уже в первые дни после аварии были предприняты меры по засекречиванию данных о ее реальных и прогнозируемых последствиях. Японцы отреагировали на катастрофу предельно быстро: организована эвакуация, жителям близлежащих районов озвучены способы борьбы с облучением, выдана директива принимать йод в больших количествах. В будущем это наверняка не позволит проявиться такой волне заболеваний щитовидной железы со смертельным исходом, которая имела место в СССР, а потом - в России, Украине и Белоруссии.

Кроме того, ликвидаторы аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии технически лучше оснащены и менее многочисленны, чем в Чернобыле 1986 года. В СССР на устранение последствий были брошены сотни тысяч недостаточно укомплектованных средствами защиты людей, многие из которых были солдатами-срочниками. Именно такой подход и объясняет необычайно высокую смертность среди ликвидаторов ЧАЭС.

По прошествии 36 лет авария на Чернобыльской АЭС является самой дорогой в истории человечества, сумма ущерба составляет 7 520 000 000 000 рублей. Авария же на АЭС «Фукусима-1» оценивается в 2 368 000 000 000 рублей.

Последствия аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» будут проявляться еще многие столетия по двум причинам. Во-первых, нарушения в человеческом организме под действием радиации очень часто носят наследственный, генетический характер. Во-вторых, период распада остатков радиоактивного топлива - вопрос десятков лет. В то же время ускорить этот механизм и/или обезвредить зараженные территории с современными технологиями просто невозможно.<sup>32</sup>

---

<sup>32</sup> Оценка экологических последствий аварий атомных электростанций на примере Чернобыльской АЭС и Фукусима – 1 <https://studbooks.net/1002354/ekologiya/zaklyuchenie>

## Список использованной литературы

1. Nuclear power plant, атомная электростанция <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e011.htm>
2. Интернет портал Nado5.ru Радиоактивность <https://www.nado5.ru/e-book/radioaktivnost-alfa-beta-gamma-izluchenie>
3. Как работает атомная электростанция <https://rosatom.ru/about-nuclear-industry/powerplant/>
4. Крупные аварии на АЭС <https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PMGAVRILOV/study/Tab/%D0%90%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%202.pdf>
5. Доклад аварии на атомных электростанциях <https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PMGAVRILOV/study/Tab/%D0%90%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%202.pdf>
6. ТАСС Чернобыль [https://tass.ru/spec/chernobyl?utm\\_source=google.kz&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=google.kz&utm\\_referrer=google.kz](https://tass.ru/spec/chernobyl?utm_source=google.kz&utm_medium=organic&utm_campaign=google.kz&utm_referrer=google.kz)
7. Чернобыльская катастрофа и ее последствия <https://10gdp.by/roditel/467-chernobylskaya-katastrofa-i-ejo-posledstviya>
8. Клиническая поликлиника г. Минск <https://10gdp.by/roditel/467-chernobylskaya-katastrofa-i-ejo-posledstviya>
9. ГСП ЧАЭС Причины и масштабы аварии <https://chnpp.gov.ua/ru/about/history-of-the-chnpp/42-about/accident-of-1986/529-2012-02-01-08-01-38529>
10. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)
11. Доклад МАГАТЭ Чернобыльская авария [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)
12. Интернет портал География <https://geographyofrussia.com/anticiklon/>
13. Экологические последствия аварии на Чернобыле и их преодоление [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)
14. ГСП ЧАЭС Послеаварийная эксплуатация <https://chnpp.gov.ua/ru/about/history-of-the-chnpp/posleavarijnaya-ekspluatatsiya-i-ostanovka>
15. МАГАТЭ Меры в отношении городской среды [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)
16. Меры в отношении сельскохозяйственной среды [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)
17. ИАЕА Реабилитация водной среды на Чернобыльской АЭС [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239r_web.pdf)
18. Объект Укрытие <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/37/075/37075404.pdf>
19. Chernobyl adventure <https://chernobyladventure.com/blog-istoriya-ukrutie>
20. Новостной портал neftegaz.ru [https://neftegaz.ru/news/nuclear/479506-demontazh-neobkhodim-sarkofag-nad-4-m-energoblokom-chernobylskoy-aes-planiruyut-demontirovat-k-2023-/](https://neftegaz.ru/news/nuclear/479506-demontazh-neobkhodim-sarkofag-nad-4-m-energoblokom-chernobylskoy-aes-planiruyut-demontirovat-k-2023/)
21. BBC news Ядерная катастрофа на Фукусиме <https://www.bbc.com/russian/features-56339483>
22. Авария на АЭС <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>

23. Объем выбросов на Фукусиме <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>
24. Доклад МАГАТЭ Рассеивание в атмосфере <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>
25. Авария на АЭС Фукусима-Дайити <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf>
26. ИАЕА Восстановление после ядерной аварии <https://www.iaea.org/ru/10-let-posle-avarii-na-aes-fukusima-dayiti/vosstanovlenie-posle-yadernoy-avarii>
27. ИАЕА <https://www.iaea.org/ru/newscenter/pressreleases/magate-publikuet-pervyy-doklad-o-bezopasnosti-zaplanirovannogo-sbrosa-vody-s-aes-fukusima-dayiti>
28. Доклад ООН Последствия для здоровья людей <https://www.nippon.com/ru/news/yjj2021030901138/>
29. Официальный сайт МАГАТЭ <https://www.iaea.org/ru/search/google/%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%A4%D1%83%D0%BA%D1%83%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0>
30. Факультет проблем физики и энергетики [https://mipt.ru/dppe/science\\_articles/fukushima1.php](https://mipt.ru/dppe/science_articles/fukushima1.php)
31. Как живет Фукусима сегодня <https://www.dw.com/ru/kak-zhivet-fukusima-spustja-desjat-let-posle-avarii-na-ajes/a-56829299#:~:text=%D0%A1%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BB%D0%B0%20%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%2011%20%D0%BC%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%202011,%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BE%20%D0%BA%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8E%20%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D1%8B.>
32. Оценка экологических последствий аварий атомных электростанций на примере Чернобыльской АЭС и Фукусима – 1 <https://studbooks.net/1002354/ekologiya/zaklyuchenie>