

# РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ В РОССИИ, УКРАИНЕ, США И ВЕЛИКОБРИТАНИИ

## 1. РАЗВИТИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Первая в мире атомная электростанция (АЭС) опытно-промышленного назначения электрической мощностью 5 МВт была введена в эксплуатацию в СССР, в г. Обнинске Калужской области 27 июня 1954 года. Основным ее агрегатом является реактор на тепловых нейтронах. Ядерное топливо – обогащенный уран – размещается в графитовом замедлителе, в 128 рабочих каналах. Внутри каждого из них циркулирует теплоноситель – дистиллированная вода высокой степени очистки.

Уже на первой, Обнинской АЭС были предусмотрены различные системы, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала. Во всех помещениях были установлены приборы контроля уровня радиоактивности, снабженные световой и звуковой сигнализацией.

Эксплуатация Обнинской АЭС дала богатый опыт для конструирования АЭС большой мощности. Однако широкое строительство энергетических АЭС было начато в Советском Союзе далеко не сразу после успешного пуска первой атомной станции. В СССР достаточно длительное время хотя и позитивно, но весьма сдержанно относились к сооружению АЭС. Открыв эру ядерной энергетики, Советский Союз начал активно развивать ее у себя лишь с середины 70-х гг.

Развитие ядерной энергетики способствует укреплению энергетической независимости отдельных стран и тем самым оказывает стабилизирующее влияние на мировую экономику. Об этом свидетельствует, в частности, опыт Франции, где на АЭС производится больше половины всей вырабатываемой в стране электроэнергии.

В Советском Союзе на начало 1989 г. насчитывалось 46 энергоблоков АЭС общей электрической мощностью 35,4 ГВт. В 1988 г. на советских атомных электростанциях было выработано 215,7 млрд. кВт·ч электроэнергии; прирост выработки электроэнергии за этот год составил 15,3%. СССР вышел на третье место в мире по данному показателю. В то же время доля АЭС в общем объеме производства электроэнергии в Советском Союзе в 1988 г. составила лишь около 12%.

Развитие ядерной энергетики в СССР первоначально основывалось на двух типах ядерных реакторов (оба типа – на тепловых нейтронах). На начальной стадии это были уран-графитовые каналы кипящие реакторы. Последним из данной серии является РБМК – реактор большой мощности канальный. Широко эксплуатируется в различных регионах страны и поставляется за рубеж другой тип реактора – ВВЭР

(водо-водяной энергетический реактор). К 80-м гг. началось внедрение еще одного типа ядерной энергетической установки – реактора на быстрых нейтронах. Важная особенность реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что они не только обеспечивают производство электроэнергии, но и воспроизводят ядерное топливо (например, плутоний-239) в результате поглощения ядрами урана-238 части быстрых нейтронов, выпускаемых в процессе деления ядер исходного топлива.

В СССР разрабатывалось и частично реализовалось еще одно направление использования атомной энергии в мирных целях. Известно, что при обеспечении городов и поселков горячей водой для отопления и бытовых нужд страна расходует до 40% общего объема органического топлива. С целью экономии органического топлива и был разработан проект специальных атомных станций теплоснабжения (АСТ). Эксплуатация АСТ с двумя водо-водяными реакторами тепловой мощностью по 500 МВт позволит обеспечить горячей водой городской район с населением около 400 тыс. человек и даст возможность закрыть 270 мелких котельных.

Развитие атомной энергетики в Советском Союзе на первый взгляд не было насущной необходимостью. Действительно, СССР был обеспечен запасами органического топлива на многие годы. Однако около 90% топливных и 80% гидроэнергетических ресурсов находились в азиатской части СССР. В то же время основная доля потребления электроэнергии приходилась на европейскую часть страны, где проживало около 70% населения. Именно поэтому после исследования возможностей покрытия недостатка электроэнергии в европейских регионах страны специалисты пришли к выводу об экономической целесообразности строительства в европейской части СССР именно атомных электростанций.

Очень важно видеть и экологический аспект проблемы. По имеющимся расчетам, при сжигании органического топлива ежегодно в атмосферу выбрасывается 200 – 250 млн. т золы и около 60 млн. т сернистого ангидрида. К 2100 г. эти выбросы могут возрасти до 1,5 млрд. т и 400 млн. т соответственно. Кроме того, в атмосферу из труб тепловых электростанций попадает большое количество оксидов азота, углерода и других элементов, включая естественные токсичные и радиоактивные элементы (например, радий и полоний). Сернистый газ уже обуславливает так называемые кислотные дожди в странах Северного полушария. Оценивая степень опасности или безопасности атомной энергетики, следует помнить, что обычные тепловые электростанции примерно в 100 раз сильнее, чем атомные (при безаварийной работе), загрязняют окружающую среду вредными выбросами, в том числе и радиоактив-

ными (изотопы из семейства урана и тория, калий-40). В частности, в угле содержится радиоактивный изотоп углерода, который при сжигании выбрасывается в составе углекислого газа.

Вслед за первой в мире советской атомной электростанцией их начали строить и в других странах. В конце 1956 г. в Великобритании (Колдер-Холл) пустили промышленную ядерную электростанцию мощностью 46 МВт с графитовым замедлителем. Тепло из реактора здесь отводилось углекислым газом. В конце 1957 г. ввели в строй атомную электростанцию мощностью 60 МВт в США (Шиппингпорт).

По данным МАГАТЭ, в 1987 г. атомные электростанции действовали в 26 странах мира. В общей сложности в конце 1987 г. в мире работало 406 атомных реакторов. При этом ядерная энергетика обеспечивала около 16% мирового электроснабжения. В этом же году насчитывалось 19 стран, в которых доля выработанной на АЭС электроэнергии составила 10% и более от общего объема ее производства. Выработка электроэнергии на атомных электростанциях во всем мире составила в 1985 г. около 1400 ТВт·ч. Именно такое количество электроэнергии было получено во всем мире в 1954г. Для выработки этого количества электроэнергии на тепловых электростанциях потребовалось бы сжигание 570 млн. т угля.

В некоторых странах доля вырабатываемой на АЭС электроэнергии по отношению к общему объему производства очень высока. Так, в 1987 г. она составила во Франции 70%, в Бельгии – 67%, в Швеции – 50%. В 1984 г. Франция в области энергообеспечения на 84% зависела от импорта электроэнергии, а в 1985 г. эта зависимость сократилась до 64%. В Канаде в 1987 г. доля АЭС в производстве электроэнергии равнялась 14,7%, а в ее провинции Онтарио она составляла более 40%. В США атомная энергетика выработала в 1987 г. 16,6% всей произведенной электроэнергии, а в шести штатах этот показатель превышал 50%.

## 2. РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ В ВЕЛИКОБРИТАНИИ И США В ПЕРИОД, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЕ

Если оценивать процесс развития мировой ядерной энергетике в целом, то, несколько утрируя, можно сказать, что начальный этап (60-е годы) был периодом эйфории. Он характеризовался высокими темпами строительства АЭС и оптимистическими прогнозами развития ядерной энергетике. На втором этапе в ряде стран происходила переоценка роли ядерной энергетике. Это было связано со снижением конкурентоспособности АЭС по отношению к другим источникам электроэнергии, росту финансовых затрат на обеспечение ядерной безопасности и разра-

ботку более совершенных моделей ядерных реакторов, а также, в немалой степени, целым рядом радиационных аварий.

Только за период с 1971 по 1985 гг. в 14 странах мира имела место 151 авария разной степени сложности с различными (в том числе и весьма тяжелыми) последствиями для людей и окружающей среды<sup>1</sup>.

Первая в мире радиационная авария на ядерном реакторе имела место в Уиндскейле (Великобритания). Она произошла 10 октября 1957 года на одном из реакторов завода, производящего оружейный плутоний. В этом реакторе в качестве ядерного топлива использовался естественный уран, замедлителем служили графитовые блоки активной зоны. Для охлаждения реактора применялся прокачиваемый через активную зону воздух. Нагретый в процессе охлаждения реактора воздух выбрасывался в атмосферу через трубы высотой 125 м, в верхней части которых были смонтированы фильтры для задержки радиоактивных аэрозолей.

Интенсивные нейтронные потоки в данном типе реакторов обуславливают высокое энерговыделение в графите, приводящее к разогреву активной зоны. Временный перебой в системе охлаждения в сочетании с ошибками обслуживающего персонала в критической ситуации и техническими погрешностями контрольно-измерительной аппаратуры привел к резкому повышению температуры в активной зоне. В результате нарушения режима охлаждения около 150 каналов, загруженных твэлами, раскалились до температуры красного свечения металла. Оболочки отдельных твэлов разрушились, и попытка разгрузить каналы реактора оказалась безуспешной. В активной зоне вспыхнул пожар. В течение последующих двух суток активная зона реактора была охлаждена с помощью воды, но большое количество радиоактивных веществ успело выделиться в окружающую среду. Обстановка осложнилась тем, что данный реактор, построенный по одному из ранних проектов, не был размещен в герметичном сооружении, специально разработанном для локализации последствий аварии подобного вида. Кстати, защитные свойства такого герметичного сооружения, предусмотренного на случай аварии, имели большое значение для локализации последствий более поздней аварии в США на реакторе Три Майл Айленд.

Вследствие аварии в атмосферу поступило около 20000 Ки радиоактивного  $^{131}\text{I}$ , 600 Ки  $^{137}\text{Cs}$ , 80 Ки  $^{89}\text{Sr}$  и 9 Ки  $^{90}\text{Sr}$ . Западный ветер разнес радиоактивность по территории Великобритании и через Северное море на Европейский континент. Данные последствия имели место не

---

<sup>1</sup> При этом нельзя забывать, что за тот же период значительно большее количество аварий с тяжелыми последствиями произошло на химических предприятиях. О вреде, наносимом тепловыми электростанциями, говорилось выше.

только из-за отсутствия вокруг реактора герметичного сооружения, но также и из-за отсутствия на выходе линий спецвентиляции древесно-угольных фильтров, способных задерживать радиоактивный  $^{131}\text{I}$ , обязательных в США для промышленных реакторов, охлаждаемых обычной водой.

При установлении факта значительного выброса радиоактивных продуктов в атмосферу была проведена оценка потенциальной опасности выброса для населения. Оценка проводилась по трем факторам: 1) внешнее облучение; 2) вдыхание радиоактивных аэрозолей; 3) попадание радиоактивных веществ в организм человека с загрязненной пищей и водой.

Результаты исследований показали, что наиболее высокий уровень мощности дозы от радиоактивного облака, перемещавшегося по направлению ветра, составил 4 мР/ч. Эта величина превышала естественный уровень радиации в 400 раз. Общая доза облучения, полученная человеком, который находился бы в течение недели на открытом воздухе в районе максимальных выпадений на почву  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, составила бы 30 – 50 мР.

Удельная активность воздуха в прилегающих к заводу районах в первые сутки достигала величин, в два раза превышающих допустимую для лиц профессиональной группы. В дальнейшем активность воздуха быстро понизилась.

Активность воды ближайших водохранилищ, проточных вод и водопроводной воды по  $^{131}\text{I}$  во всех случаях не превышала 1/6 от максимально допустимого уровня.

Во время аварии никаких значительных выпадений на почву, за исключением  $^{131}\text{I}$ , не произошло. Площадь территории, на которой удельная активность коровьего молока могла превышать 0,1 мкКи/л, составляла 518 км<sup>2</sup>. На этой территории было временно запрещено употребление молока в пищу.

Измерения активности щитовидной железы населения, проживающего в районе Уиндскейла, показали, что максимальные дозы внутреннего облучения оказались равными 16 рад для детей, для взрослых – 9,5 рад.

Таким образом, результаты исследований по оценке последствий радиационной аварии на реакторе в Уиндскейле свидетельствуют, что в данном случае опасность внешнего переоблучения населения была невелика; дополнительное внутреннее облучение за счет попадания в организм радионуклидов через органы дыхания и с питьевой водой было незначительным; поступление же в организм радиоактивного  $^{131}\text{I}$  с мо-

локом и молочными продуктами представляло несомненную потенциальную опасность внутреннего переоблучения.

Результаты исследований медико-биологических последствий радиационной аварии на реакторе в Уиндскейле имеют универсальное значение. Они совпадают с результатами аналогичных исследований при авариях на других реакторах и при проводившихся испытаниях ядерного оружия. Результаты всех этих испытаний приводят к одинаковым выводам относительно потенциальной опасности различных возможных последствий. Как и в случае аварии в Уиндскейле, они свидетельствуют о малой значимости фактора внешнего облучения. Несколько более значимым является поступление радионуклидов в организм через дыхательные пути и с питьевой водой. Наиболее высокой потенциальной опасностью внутреннего переоблучения обладает употребление загрязненных радиоактивными веществами пищевых продуктов.

На протяжении ряда лет серьезные радиационные аварии имели место в США. Еще 24 июня 1959 г. в Санта-Сюзанне (штат Калифорния) в результате выхода из строя системы охлаждения в экспериментальном энергетическом реакторе произошло расплавление части топливных элементов.

Авария реактора в районе города Айдахо-Фолс 3 января 1961 г. произошла на небольшом экспериментальном водно-кипящем реакторе, разработанном для обеспечения электричеством и теплом военных сооружений, расположенных в местах, удаленных от обычных источников энергии. Построенный по одному из первых проектов и расположенный в относительно пустынном районе, реактор не имел вокруг себя герметичного сооружения. При попытке пуска реактора после долгой остановки по невыясненной причине произошло отклонение от номинального течения процесса, вызвавшее резкое повышение давления пара в емкости реактора и последующий взрыв. Мощность дозы внутри помещения реактора, измеренная рабочими, проводящими спасательные работы, превысила 10 Зв/ч. Пребывание в поле излучения с такой мощностью дозы в течение 0,5 ч приводит к острой форме лучевой болезни четвертой степени с наиболее вероятным летальным исходом. Именно поэтому данная авария сопровождалась человеческими жертвами. Однако, несмотря на отсутствие герметичного сооружения вокруг реактора, основная часть выброшенных радионуклидов осталась внутри помещения реактора. В полумиле от границы запретной зоны мощность дозы составляла 20 мкЗв/ч. Таким образом, существенных последствий аварии за пределами помещения реактора не наблюдалось.

5 октября 1966 г. на экспериментальном реакторе "Энрико Ферми" в Детройте в результате выхода из строя системы охлаждения имело место частичное расплавление активной зоны.

Авария реактора фирмы "Tennessee Valley Authority" произошла вблизи г. Браунсферри в 1975 г. Данная энергетическая установка состояла из двух 1000-мегаваттных водно-кипящих реакторов. При техническом обслуживании одного из реакторов рабочий, проверявший с помощью свечи утечку в зоне между помещением пульта управления и герметичным сооружением реактора, нечаянно поджег изоляцию электрического кабеля. Пламя быстро распространилось по кабелю и проникло в щель, затронув пластиковое покрытие, которое начало тлеть. Происшествие длительное время оставалось незамеченным, т.к. происходило за пределами помещения пульта управления. Когда пожар заметили, реакторы были остановлены. При этом сохранялась необходимость продолжать охлаждение активной зоны водой и отводить тепло, выделяющееся в результате радиоактивного распада осколков деления урана. Осуществлять эти действия становилось все труднее, т.к. кабели системы управления горели и, соответственно, выходили из строя. Однако благодаря наличию дублирующих систем удалось поддерживать необходимый уровень охлаждения реактора, и, в конечном счете, огонь был погашен путем затопления очага пожара водой. Несмотря на сильное повреждение электрических цепей системы управления реактором, активная зона не была разрушена, выброса радионуклидов не произошло, и никто из персонала не пострадал.

Одной из крупнейших радиационных аварий в мире была авария на втором блоке АЭС Три Майл Айленд (ТМІ-2) с реакторной установкой PWR, происшедшая 28 марта 1979 года. Атомная станция включает два водно-опрессованных реактора. Авария произошла в результате чрезвычайно маловероятного сочетания ошибки оператора и технической неисправности. Примерная последовательность событий, приведших к аварии, такова:

1. Операторы нечаянно выключили насос, с помощью которого осуществлялась подача сконденсированного пара из турбины в парогенератор.
2. При этом автоматически должен был включиться дублирующий насос, однако его вентили, которые по регламенту работы реактора должны быть открыты, оказались закрытыми. Это также являлось ошибкой персонала реактора. Давление в реакторе возросло, в результате чего сработала система автоматической защиты. Управляющие стержни были введены в активную зону для гашения цепной реакции, а предохранительный клапан открылся для стравливания избыточного давления.
3. Когда давление вернулось к норме, предохранительный клапан не закрылся вследствие технической неисправности.

4. Регламентом работы были предусмотрены способы закрытия клапана вручную. Это могло быть выполнено, однако операторы не получили информации о технической неисправности клапана, т.к. индикатор на пульте управления показывал, что клапан закрылся.
5. В результате возникла неконтролируемая ситуация, когда в течение двух часов через открытый клапан происходила потеря пара и воды из активной зоны. Как следствие столь невероятного сочетания неоднократных ошибок персонала с множественными техническими неисправностями уровень воды в баке реактора значительно понизился и в активной зоне, частично оставшейся без охлаждения, произошло локальное расплавление оболочек части тепловыделяющих элементов.

В итоге значительное количество радиоактивных веществ вместе с паром и водой было вынесено за пределы реактора. При этом произошел и частичный выброс радиации за пределы герметичного аварийного сооружения вокруг реактора, т.к. оказалось, что последнее имело пролом.

В составе выброса из реактора в атмосферу содержалось значительное количество радиоактивных изотопов инертных газов, главным образом – ксенона и криптона. Выброс радиоактивного йода был небольшим, потому что основная его часть была задержана древесно-угольными фильтрами газоочистительной системы или растворена в воде. По существу все нелетучие продукты ядерного деления остались внутри аварийного герметичного сооружения, закрывающего реактор.

В целях предотвращения медико-биологических последствий была осуществлена эвакуация населения, проживающего в прилегающих к АЭС районах. Однако вследствие того, что произошло радиоактивное заражение прилегающей к АЭС зоны лишь короткоживущими изотопами, вскоре оказалось возможным вернуть население.

Комиссия, назначенная президентом США, а также комиссия Комитета по контролю за атомными реакторами пришли к выводу, что уровни радиации, обусловленные выбросом радионуклидов в окружающую среду, слишком незначительны, чтобы вызвать какие-либо существенные последствия для здоровья населения, проживавшего вблизи АЭС.

25 января 1982 г. на реакторе "Джина" произошел разрыв трубы парогенератора и выброс радиоактивного пара в атмосферу.

30 января 1982 г. на атомной станции близ города Онтарио (штат Нью-Йорк) в результате аварии в системе охлаждения реактора произошла утечка радиоактивных веществ в атмосферу.

28 февраля 1985 г. на АЭС Самер-Плант при пуске реактора была преждевременно достигнута критичность, а значит, имел место неконтролируемый разгон.

В 1986 г. произошел взрыв резервуара с радиоактивным газом на заводе по обогащению урана в Уэбберс Фолс, в результате чего один человек погиб, восемь получили ранения.

Сами западные эксперты признавали, что в США трижды создавалась ситуация столь же критическая, как в Чернобыле.

### 3. КЫШТЫМСКАЯ РАДИАЦИОННАЯ АВАРИЯ 1957 г.

#### 3.1. ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ "МАЯК".

В период, предшествующий Чернобыльской катастрофе, ряд радиационных аварий имел место и на ядерных энергетических установках и радиохимических предприятиях СССР.

Среди них особое место занимает взрыв емкости с радиоактивными отходами, происшедший 29 сентября 1957 г. на комбинате "Маяк" близ Кыштыма (Южный Урал). Химический комбинат "Маяк" расположен в закрытом городе Озерск. До 1990 года город был известен как Челябинск-40. Город расположен примерно в 15 км на восток от города Кыштым и в 70 км севернее города-миллионера Челябинска. Приблизительно в 10 км от Озерска, в котором проживают 85000 человек, расположены ядерные реакторы. Строительство химического комбината "Маяк" началось в ноябре 1945 года, а первый реактор был пущен в июне 1948 года. Весь комплекс занимает площадь около 90 км<sup>2</sup>.

Перед специалистами и рабочими, создававшими предприятие, была поставлена задача, от которой в то время зависела безопасность страны – достичь паритета с США в ядерном вооружении. Для ее решения были предоставлены значительные ресурсы, однако все технические решения принимались и осуществлялись в предельно сжатые сроки. Разработка технологических процессов шла предельно быстро, производство фактически создавалось по результатам экспериментов, и проверять принятые решения в промышленных масштабах было невозможно.

На химическом комбинате "Маяк" в эксплуатации находилось 6 реакторов, производивших плутоний для ядерного оружия. Из них 5 реакторов были уран-графитовыми и один – на тяжелой воде. Сегодня эти реакторы остановлены. Реактор на тяжелой воде был позднее реконструирован в реактор на легкой воде и сейчас находится в эксплуатации. Помимо этого, есть еще один реактор на легкой воде, который исполь-

зуется для производства изотопов для гражданского потребления. На "Маяке" также имеется одна установка для остекловывания концентратов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и около 100 емкостей, где хранятся высокоактивные ЖРО.

Пять уран-графитовых реакторов химического комбината "Маяк" находятся в двух различных областях на юго-восточном побережье озера Кызылташ. Все реакторы имели прямоточный режим охлаждения активной зоны, при котором озерная вода перекачивалась напрямую через реактор и сливалась обратно в озеро.

Первый из реакторов (А-реактор) был уран-графитовым производственным реактором. 1168 каналов с природным ураном в вертикальных алюминиевых трубах были рассчитаны сначала на тепловую мощность 100 МВт. Позднее мощность была увеличена до 500 МВт. Диаметр активной зоны составлял 9,4 м, высота – 9,2 м. Верхняя часть реактора находилась в 9,3 м под землей. Реактор был построен в 1948 году, на его сооружение ушло всего 18 месяцев.

Для загрузки реактора был использован весь запас урана-235, которым располагал СССР к тому времени. 19 июня 1948 года произошел пуск реактора. Плутоний, выработанный этим реактором, был использован в первой советской атомной бомбе, испытания которой прошли 29 августа 1949 года на Семипалатинском полигоне. Реактор находился в эксплуатации 39 лет и был заглушен в 1987 году<sup>2</sup>.

ИР-реактор использовался для производства плутония и испытаний топлива для А-реактора и реакторов типа РБМК. Это небольшой уран-графитовый реактор мощностью 65 МВт с 248 каналами. Строительство реактора было начато 18 августа 1950 года. Он был пущен 22 декабря 1951 года и "заглушен" 24 мая 1987 года после 36 лет эксплуатации.

Следующие три реактора (АВ-1, АВ-2, АВ-3) – это большие уран-графитовые реакторы, имеющие общее проектное решение. Каждый из них содержит по 2001 каналу. Активная зона АВ-2 представляет собой вертикальный цилиндр диаметром 11,8 м и высотой 7,6 м. Биологическая защита активной зоны – трехслойная. Первый слой состоит из воды с песком толщиной 1,5 м и бетонной стены толщиной 2 м; второй –

---

<sup>2</sup> Утилизацию реактора планируется провести в три этапа. На первом этапе реактор "глушится" и расхлаживается, топливо извлекается. На втором этапе, который уже начат, демонтируется его оборудование, полости заполняются бетоном. Этот процесс рассчитан на 5 лет. Последний этап займет 20-25 лет. На этом этапе будет принято решение о дальнейших действиях с реактором: его консервации там, где он сейчас находится, либо транспортировки в другой пункт захоронения.

из смеси песка и бокситовой руды толщиной 1,5 м и слоя бетона толщиной 3 м; третий – бассейн с водой толщиной 1,5 м.

Реактор АВ-1 был пущен в 1955 году и "заглушен" 12 августа 1989 года; АВ-2 – пущен в апреле 1951 года, "заглушен" в июле 1990 года; АВ-3 – пущен 15 сентября 1952 года, "заглушен" 1 ноября 1990 года.

Реактор на тяжелой воде, "Руслан", был следующим реактором, пущенным на х/к "Маяк". Его запуск был предположительно осуществлен в период с 1948 по 1951 год. Реактор находился в эксплуатации примерно до 1980 года. В конце 80-х он был реконструирован в реактор на легкой воде мощностью 1000 МВт и предназначался, в частности, для производства трития, который используется при создании термоядерного оружия.

Наконец, на х/к "Маяк" находился в эксплуатации еще один реактор на легкой воде мощностью 1000 МВт – "Людмила", который использовался также для производства трития и других изотопов.

Через полгода после пуска А-реактора в декабре 1948 года, на х/к "Маяк" была введена в эксплуатацию первая установка по переработке отработанного ядерного топлива. Эта установка находилась в эксплуатации до 1961 года, после чего был начат процесс ее утилизации.

Другая установка (радиохимическая установка РТ-1) была пущена в 1956 году. Изначально установка была рассчитана на переработку оружейного плутония из отработанного ядерного топлива (ОЯТ) пяти реакторов-размножителей. В 1976 году установку реконструировали для переработки в гражданских целях плутония, получаемого из отработанного ядерного топлива атомных станций, реакторов атомных подводных лодок и ледоколов, исследовательских реакторов, реакторов на быстрых нейтронах (БН-350 и БН-600). Страны восточной Европы и Финляндия поставляют сюда на переработку отработанное ядерное топливо с водородных реакторов АЭС, построенных в этих странах СССР или, после 1991 г., Россией. Установка РТ-1 способна перерабатывать около 400 тонн ОЯТ в год, или от 300 до 900 топливных сборок в год. В технологии используется обработка ОЯТ трибутилфосфатом, в процессе которой извлекается 99 процентов урана и плутония, содержащегося в отработанном топливе. При переработке 1 тонны топлива образуется 45 м<sup>3</sup> высокоактивных, 150 м<sup>3</sup> среднеактивных и 2000 м<sup>3</sup> низкоактивных жидких отходов, а также 7500 кг твердых радиоактивных отходов.

В период с 1976 по 1991 гг. перерабатывалось в среднем около 200 тонн ОЯТ в год. Начиная с 1991 года количество перерабатываемого отработанного топлива уменьшилось. Причиной этого являются трудности с доставкой ОЯТ из стран СНГ, а также из восточно-

европейских стран – Чехословакии, Болгарии и Венгрии. В 1995 году Финляндия приняла решение о прекращении экспорта ОЯТ с электростанции Ловиса, начиная с 1996 года. Согласно имеющимся данным, за 1992 год было переработано около 120 тонн ОЯТ. Это соответствует производству 1 тонны реакторного плутония в год.

В свое время планировалось использование плутония, получаемого при переработке ОЯТ объектов гражданского назначения, в качестве топлива для реакторов-размножителей. Но из-за серьезных задержек с программой Минатома, касающейся реактора-размножителя, окись плутония ( $PuO_2$ ) была помещена во временные хранилища. По данным 1992 года, в хранилище находилось 25 тонн реакторного плутония.

Установка по остекловыванию концентратов жидких радиоактивных отходов находится в эксплуатации с 1987 года. Производительность этой установки – 500 л/ч. Ее технология основана на преобразовании концентратов ЖРО в фосфатное стекло. Первая керамическая плавильная печь проработала 13 месяцев, после чего электроды были выведены из строя в результате высокой силы тока (2000 А). Была сконструирована новая печь, и процесс остекловывания возобновился с 25 июня 1991 года.

Полученная стекловидная масса помещается в нержавеющие емкости (диаметром 0,63 м и высотой 3,4 м) в наземном хранилище, оборудованном принудительной вентиляцией. Сегодня на х/к "Маяк" хранится около 4000 таких емкостей. Хранение предполагается осуществлять в течение 20 – 30 лет, до введения в эксплуатацию подземного могильника.

К началу 1995 года было произведено остекловывание концентратов с общей активностью 218 МКи, полученных из ЖРО объемом 8500 м<sup>3</sup>. Вес остеклованных отходов составил 1600 тонн. За пять лет существования установки в среднем в год остекловывались концентраты ЖРО с активностью около 50 МКи. Сегодня все образующиеся высокоактивные отходы остекловываются.

Кроме того, на х/к "Маяк" существовало несколько производственных установок для топлива типа МОХ (смесь урана и плутония). Две установки выведены из эксплуатации, две функционируют, создание пятой установки приостановлено. Первая экспериментальная установка находилась в эксплуатации в 60-70-х годах. Для производства экспериментальных топливных элементов, предназначенных для исследовательских реакторов-размножителей, использовалось около 1 тонны оружейного плутония. В период с 1986 по 1987 гг. в эксплуатации находилась небольшая установка по производству топлива типа МОХ для реакторов на быстрых нейтронах (типа БН). Ее производительность со-

ставляла 35 кг оружейного плутония в год (5 топливных сборок в год). С 1988 года в эксплуатации находилась установка по производству топлива типа МОХ для испытания в реакторах на быстрых нейтронах. Ее производительность составляла 70 – 80 кг оружейного плутония в год (10 сборок в год). Начиная с этого же года, в эксплуатации находилась установка по производству топливных сборок (10 сборок в год) для испытания в реакторах на быстрых нейтронах. Было также начато строительство завода по производству топлива МОХ, но работы приостановили, когда готовность завода составляла 50-70 %. Предусматривалось, что производство топлива для трех запланированных реакторов-размножителей (южно-уральский проект) будет составлять 5 – 6 тонн в год. На этой установке планировалось также производство топлива типа МОХ для реакторов ВВЭР.

Строительство южно-уральской атомной электростанции было начато в 1984 году (Южно-уральский проект). Изначально проект должен был включать три реактора-размножителя на быстрых нейтронах типа БН-800 (800 МВт). Вода для охлаждения ядерных реакторов должна была поступать из водоемов, в которые х/к "Маяк" производит сброс радиоактивных отходов. Перед поступлением на АЭС вода должна была проходить очистку. Предполагалось, что реакторы будут снабжать электроэнергией Челябинскую область и выпаривать часть воды из водоемов, предотвращая, таким образом, возможные затопления. Реализация проекта была приостановлена в 1987 г., когда уже заложили фундамент для двух реакторов. Причиной остановки строительства послужили экономические трудности, а также выступления общественности и властей Челябинской области против этого проекта. Осенью 1992 года Минатом выделил средства на возобновление строительства. Но из-за высокого уровня инфляции финансовое обеспечение оказалось недостаточным, и проект так и не был возобновлен.

### 3.2. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ И АВАРИЙНЫЕ ВЫБРОСЫ РАДИОАКТИВНОСТИ

В эпоху стремительной гонки вооружений не оставалось времени для создания совершенных схем локализации радиоактивных отходов от переработки облученного ядерного топлива. Проблема локализации радиоактивных отходов казалась тогда и менее важной, и менее сложной, чем задача наработки и выделения плутония. С позиций сегодняшнего дня многие решения по обращению с отходами радиохимического производства видятся недостаточно продуманными. Однако понимание всей сложности и значимости проблемы локализации радиоактивных

отходов пришло лишь со временем, и во многом оно основано именно на опыте совершенных ошибок. К сожалению, трудный путь к такому пониманию оставил следы не только в человеческой памяти, но и в природе – загрязненные озера, реки, грунтовые воды и территории. Такие следы остались и в других странах, развивавших ядерную технологию, в том числе и в США.

Долгое время химический комбинат "Маяк" производил плановые сбросы радиоактивных отходов, образующихся в результате деятельности перерабатывающей установки. В соответствии с использовавшимся в то время упрощенным способом локализации жидких радиоактивных отходов, образующихся в результате переработки отработанного ядерного топлива, путем их разбавления в природных водоемах, в период с 1949 по 1956 гг. ЖРО сбрасывались в реку Течу в 6 км от ее истока. Всего в Течу было сброшено около 76 миллионов м<sup>3</sup> радиоактивной воды с общей бета-активностью 2,75 МКи. Радиоактивность жидких отходов в основном определялась содержанием в них радионуклидов стронция, цезия, ниобия и рутения. Около 25 % активности обуславливали изотопы  $^{90}_{38}\text{Sr}$  и  $^{137}_{55}\text{Cs}$ .

Сбросы ЖРО привели к сильному радиоактивному загрязнению реки Теча, в результате чего тысячи людей, проживавших в населенных пунктах ниже по течению реки, подверглись повышенному облучению. С 1953 года было запрещено использовать речную воду в качестве питьевой. До 1960 года из населенных пунктов, расположенных по течению р. Теча, было эвакуировано около 7500 человек. Для предотвращения распространения сброшенных радиоактивных отходов была построена система водоемов. Тем самым была предпринята попытка уменьшить скорость течения воды, чтобы радиоактивные частицы успевали оседать на дно и не переносились далее по речной системе.

В начале 50-х гг., после того, как стало ясно, что сброс ЖРО в речную систему приводит к распространению радиоактивного загрязнения, сброс наиболее высокоактивных отходов в р. Теча был прекращен. Химический комбинат "Маяк" начал сбрасывать ЖРО в озеро Карачай. В период с 1962 по 1966 г., из-за отсутствия достаточного количества дождей, озеро начало мелеть. Весной 1967 года часть озера высохла, в результате чего оголилось около 5 гектаров дна. Начавшиеся той весной сильные ветры разнесли радиоактивную пыль, в результате чего возникло радиоактивное загрязнение территории площадью около 1800 км<sup>2</sup>. Загрязнение, в основном, было обусловлено радионуклидами  $^{137}_{55}\text{Cs}$  и  $^{90}_{38}\text{Sr}$ , суммарная активность которых приблизительно составляла 600 Ки. Численность населения на территории с уровнем радиоак-

тивного загрязнения 0,1 Ки/км<sup>2</sup> по <sup>90</sup><sub>38</sub>Sr и 0,3 Ки/км<sup>2</sup> по <sup>137</sup><sub>55</sub>Cs составляла около 40 тыс. человек.

В результате плановых сбросов ЖРО в окружающую среду попало около 150 МКи радиоактивности, из них 120 МКи было сброшено в озеро Карачай. Сбросы высокоактивных жидких отходов в Карачай продолжались вплоть до 1953 года, после чего было построено временное хранилище. Средне- и низкоактивные отходы до сих пор сбрасываются в озеро.

В 1953 г. в эксплуатацию был принят комплекс для хранения жидких высокоактивных отходов, состоящий из нескольких подземных охлаждаемых бункеров. Каждый бункер представлял собой прямоугольное заглубленное бетонное сооружение (с толщиной бетонных стен 1,5 м) с ячейками-каньонами для установки 20 стальных емкостей по 300 м<sup>3</sup> каждая. Емкости охлаждались водой, протекавшей по кольцевому зазору между стенками емкости и каньона, и были оборудованы вентиляционной системой для разбавления радиолизных газов до взрывобезопасных концентраций, измерителями уровня и температуры растворов и охлаждающей воды.

Рассмотрим вкратце технологическую схему хранения высокоактивных жидких отходов. За 40 лет работы радиохимического завода технология переработки облученного топлива несколько раз изменялась. Первоначально облученное топливо обрабатывалось по так называемой цельноацетатной осадительной схеме. В соответствии с этой схемой после азотнокислого растворения топлива и выделения из раствора урана и плутония образовывались высокоактивные отходы, содержащие до 100 г/л нитрата натрия и 80 г/л ацетата натрия. Так как в этих растворах присутствовало большое количество долгоживущих радионуклидов, а также остатки урана и плутония, растворы в течение года выдерживались в емкостях для снижения их активности, а затем направлялись на доизвлечение урана и плутония. После переработки часть растворов снова направлялась на хранение в емкости, а менее активная часть удалялась в водоем-хранилище.

### 3.3. РАДИАЦИОННАЯ АВАРИЯ 1957 г.

Со временем стало ясно, что измерительные приборы, взятые из химической промышленности, не выдерживают условий радиохимического производства, и позднее необходимую аппаратуру и методы контроля разработали заново. Но к осени 1957 г. измерительные приборы в комплексе емкостей-хранилищ пришли в неудовлетворительное состояние. Из-за высоких радиационных полей и конструктивных особенно-

стей кабельных коридоров ремонт системы контроля оказался невозможен. Поскольку в хранилищах емкости были целиком погружены в воду, при испарении растворов они постепенно всплывали, что приводило к нарушению герметичности линий приема и выдачи радиоактивных веществ. Это, в свою очередь, вызывало радиоактивное загрязнение охлаждающей воды. Пришлось организовать очистку охлаждающей воды в одном из отделений завода, однако производительность этого отделения была недостаточной, поэтому пришлось перевести емкости на периодический режим охлаждения. Это было нарушением условий охлаждения, что приводило к саморазогреву емкостей. Но контроль температуры в емкостях отсутствовал, поскольку показания контролирующих приборов в условиях сильных радиационных полей были недостоверными.

29 сентября 1957 г. в 16 ч 20 мин по местному времени на радиохимическом комбинате "Маяк" произошел взрыв одной из емкостей-хранилищ ЖРО. Взрыв полностью разрушил емкость из нержавеющей стали, содержащую 70 – 80 т отходов и находившуюся в бетонном каньоне на глубине 8,2 м, сорвал и отбросил на 25 м бетонную плиту перекрытия каньона. Из хранившихся в емкости 20 МКи радиоактивных веществ около 10 % было поднято в атмосферу на высоту до 1 км. Остальную часть отходов взрывом разбросало вокруг емкости. В результате образовалось радиоактивное облако, которое перемещалось в северо-северо-восточном направлении и обусловило радиоактивное загрязнение части территорий Челябинской, Свердловской и Тюменской областей. Загрязненные территории впоследствии получили название: Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС).

Расследование, проведенное после аварии специальной комиссией, показало, что ее наиболее вероятной причиной был взрыв сухих солей нитрата и ацетата натрия, образовавшихся в результате выпаривания растворов в емкости из-за их саморазогрева при нарушении условий охлаждения.

Так как при взрыве была повреждена вентиляционная система всего комплекса, основной задачей послеаварийных работ стало ее восстановление. Одновременно создавался более надежный приборный контроль, и проводилась дезактивация загрязненных участков промышленной площадки. В течение конца 1957 и начала 1958 гг. эти работы были в основном закончены. Емкости оборудовали индивидуальными вентиляционными системами и приборами контроля, что потребовало прокладки новых кабельных трасс, установки новой аппаратуры, а также датчиков температуры и уровня.

После введения в действие нового комплекса емкостей-хранилищ, в котором были исключены выявившиеся недостатки, все растворы из

старого комплекса были переработаны, емкости отмыты, дезактивированы и заполнены чистой водой.

Случаев радиоактивного загрязнения обширных территорий до 1957 г. не было. Сложившаяся радиационная обстановка усугублялась не только отсутствием практики крупномасштабных аварийно-восстановительных работ, но и недостатком научных знаний о поведении радионуклидов в окружающей среде, о степени возникшей радиационной опасности. Тем не менее, в этих сложных условиях были предприняты в целом правильные действия по защите персонала и населения, восстановлению производственной и хозяйственной деятельности на загрязненной территории.

### 3.4. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА ПОСЛЕ АВАРИИ

Рассеянная при взрыве смесь радиоактивных продуктов в основном содержала короткоживущие радионуклиды  $^{144}_{58}\text{Ce}$ ,  $^{144}_{59}\text{Pr}$ ,  $^{95}_{40}\text{Zr}$ ,  $^{95}_{41}\text{Nb}$ , однако, главную радиационную опасность на протяжении длительного времени после аварии представлял долгоживущий  $^{90}_{38}\text{Sr}$  (2,7 % от суммарной активности) в равновесии с его дочерним продуктом  $^{90}_{39}\text{Y}$  (период полураспада стронция гораздо больше, чем иттрия, и потому при установившемся динамическом равновесии общая активность  $^{90}_{38}\text{Sr}$  и  $^{90}_{39}\text{Y}$  равна удвоенной активности стронция).

Формирование ВУРСа в основном закончилось через 11 ч после взрыва. Все это время ветер сохранял направление на северо-северо-восток, поэтому след оказался сильно вытянутым. Поскольку при его образовании атмосферные осадки не выпадали, а до установления постоянного снежного покрова случались периоды сухой погоды с сильными ветрами, в течение первых полутора месяцев происходило перераспределение радиоактивных веществ на местности (ветровой перенос). Это привело к дополнительному загрязнению участков, прилегающих к головной части следа, где радиоактивное заражение было максимальным. Поэтому след в области головной части оказался более широким и размытым в восточном направлении.

В качестве "реперного" радионуклида, по содержанию которого оценивали радиоактивное загрязнение, был принят  $^{90}_{38}\text{Sr}$ : с одной стороны, его период полураспада достаточно велик, с другой – он содержался в смеси в заметном количестве и играл наиболее важную роль в формировании доз долговременного облучения живых организмов. Поэтому ниже плотность загрязнения указана именно по  $^{90}_{38}\text{Sr}$ . Кроме того, многие показатели приводятся в расчете на единичную плотность за-

грязнения этим радионуклидом ( $1 \text{ Ки/км}^2$ ). Чтобы охарактеризовать радиационную обстановку в конкретной точке, необходимо такой показатель умножить на плотность загрязнения  $^{90}_{38}\text{Sr}$ .

В границах плотности загрязнения этим радионуклидом  $0,1 \text{ Ки/км}^2$  длина следа достигла 300 км, а ширина – 30 – 50 км, в границах  $2 \text{ Ки/км}^2$  – соответственно 105 км и 8 – 9 км. Плотность загрязнения  $2 \text{ Ки/км}^2$  была признана предельной для безопасного проживания населения и определила официальную границу ВУРСа.

Таблица 1. Состав аварийного выброса

Радионуклид	Период полураспада	Вид излучения	Вклад в активность смеси, %
$^{89}_{38}\text{Sr}$	51 сут	$\beta, \gamma$	следы
$^{90}_{38}\text{Sr} + ^{90}_{39}\text{Y}$	28,6 года <sup>3</sup>	$\beta$	5,4
$^{95}_{40}\text{Zr} + ^{95}_{41}\text{Nb}$	65 сут	$\beta, \gamma$	24,9
$^{106}_{44}\text{Ru} + ^{106}_{45}\text{Rh}$	1 год	$\beta, \gamma$	3,7
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30 лет	$\beta, \gamma$	0,036
$^{144}_{58}\text{Ce} + ^{144}_{59}\text{Pr}$	284 сут	$\beta, \gamma$	66
$^{147}_{61}\text{Pm}$	2,6 года	$\beta, \gamma$	следы
$^{155}_{63}\text{Eu}$	5 лет	$\beta, \gamma$	следы
<i>Pu</i> (смесь изотопов)		$\alpha$	следы

Общая площадь территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению на уровне, достоверно отличающемся от фонового, составила 15 – 23 тыс. км<sup>2</sup>, в том числе в границах  $2 \text{ Ки/км}^2$  – около 1 тыс. км<sup>2</sup>. Вдоль оси следа с удалением от ядерного предприятия плотность загрязнения монотонно убывала от  $4000 \text{ Ки/км}^2$  в головной части до  $0,1 \text{ Ки/км}^2$  у дальних границ. Распределение в поперечном направлении

<sup>3</sup> Для смесей материнского и дочернего радионуклидов указан период полураспада материнского.

характеризовалось резко выраженным максимумом на оси, превосходящим плотность загрязнения на периферии в 10 – 1000 раз.

Радиоактивное загрязнение было обнаружено во всех без исключения объектах окружающей среды. Так, уровень  $\beta$ -активности в первые недели после аварии вырос по сравнению с предаварийным в траве в  $10^2 - 2 \cdot 10^5$  раз, открытых водоемах – в  $(1,5 - 3) 10^4$  раз, зерне пшеницы – в  $25 - 10^3$  раз, коровьем молоке – в  $10 - 2 \cdot 10^3$  раз.

*Таблица 2. Распределение территории по начальной плотности загрязнения*

Плотность загрязнения, Ки/км <sup>2</sup>	Площадь, км <sup>2</sup>
0,1 – 2	$(15 - 23) \cdot 10^3$
2 – 20	600
20 – 100	280
100 – 1000	100
1000 – 4000	17

В начальный период мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения на открытых местах на высоте 1 м составляла 150 мкР/ч (в расчете на 1 Ки/км<sup>2</sup>), причем 90 % дозы определялись вкладом  $^{95}_{40}\text{Zr} + ^{95}_{41}\text{Nb}$ . При плотности загрязнения 4000 Ки/км<sup>2</sup> мощность достигала 0,6 Р/ч. Однако нередко наблюдались существенные отклонения мощности дозы от среднего значения. В частности, кроны деревьев первоначально задержали до 90 % выпавших радиоактивных веществ. В результате над землей образовались объемные источники  $\gamma$ -излучения, и потому в лесу мощность дозы на высоте 1 м была в 2 – 3 раза выше, чем на открытой местности. Обратная картина наблюдалась над поверхностью озер и рек: быстрое оседание и разбавление радиоактивных веществ приводили, по меньшей мере, к десятикратному ослаблению мощности дозы.

В последующем радиационная обстановка на территории ВУРСа изменилась к лучшему – опасность облучения человека и природных объектов снизилась в основном в результате четырех факторов:

- радиоактивного распада короткоживущих радионуклидов;
- перераспределения радиоактивных веществ, в том числе за счет заглубления в почве и донных отложениях;
- изменения механизмов поступления радионуклидов в растительность (прекратилось непосредственное поверхностное загрязнение растений, снизилось загрязнение, обусловленное ветровым переносом);

– хозяйственной деятельности, в частности, мероприятий по радиационной защите населения.

Благодаря радиоактивному распаду плотность загрязнения по смеси радионуклидов за 30 лет уменьшилась более чем в 30 раз, по стронцию-90 – в 2 раза. По этой же причине энергия  $\gamma$ -излучения на 1 распад  ${}_{38}^{90}\text{Sr}$  упала почти в 2000 раз (это излучение определяется в основном короткоживущими радионуклидами), что наряду с заглублением радионуклидов в почве привело к снижению мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения на высоте 1 м в 2800 раз. Поэтому экспозиционная доза  $\gamma$ -излучения – 0,5 Р за 30 лет (в расчете на 1 Ки/км<sup>2</sup>) – сформировалась практически за первый год после аварии.

Концентрация радионуклидов в различных экосистемах снизилась к настоящему времени в сотни или даже в тысячи раз, причем наиболее быстро этот процесс шел в первые пять лет. В дальнейшем радиоактивное загрязнение стало связано только с присутствием  ${}_{38}^{90}\text{Sr}$ , и снижение уровней загрязнения определялось закономерностями его поведения в окружающей среде.

### 3.5. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Район радиоактивного загрязнения – участок Зауральской степи с относительно ровным рельефом. Около 50 % его площади покрыто березовыми лесами, березово-сосновыми насаждениями, а также лугами на водоразделах и в понижениях рельефа. Почвенный покров неоднороден: наиболее распространены серые лесные почвы, чернозем выщелоченный, дерново-подзолистые почвы. Фауна типична для лесостепной зоны – насекомоядные и хищные птицы, грызуны (заяц, мыши), парнокопытные (лось, косуля), мелкие хищники. 10 % территории занимают заросшие непроточные озера с небогатой видами ихтиофауной (плотва, окунь, щука, карась, линь).

Перераспределение выпавших радионуклидов началось сразу после загрязнения территории и происходило в основном в вертикальном направлении: с деревьев и травянистого покрова – на поверхность почвы, а с поверхности воды – в донные отложения. Почвы и донные отложения стали основными аккумуляторами радиоактивности.

Поведение и скорость миграции радионуклидов в почве зависят от ее физико-химических свойств: емкости поглощения, определяемой в первую очередь содержанием обменного кальция<sup>4</sup>, кислотности, содер-

<sup>4</sup> При взаимодействии с водой некоторые катионы почв в раствор не переходят, а обмениваются в эквивалентном количестве на катионы солевого почвенного рас-

жания гумуса, илистых фракций, минерального состава песка, водопроницаемости и т.д. Подвижность каждого радионуклида в почве определяется растворимостью его химических соединений в воде и сорбционной способностью почвы по отношению к нему.

По химической подвижности в характерных для загрязненного региона почвах выпавшие радионуклиды образовали (в порядке возрастания) следующий ряд:  $^{137}_{55}\text{Cs}$ ,  $^{90}_{38}\text{Sr}$ ,  $^{144}_{58}\text{Ce}$ ,  $^{106}_{44}\text{Ru}$ . Минимальная подвижность цезия обусловлена его высокой способностью к сорбции на частицах почвы с включением его атомов в кристаллическую решетку глинистых минералов – через 1 – 2 года она снижается в 2 – 10 раз. Содержание в почвах подвижных форм стронция практически не меняется со временем и составляет 76 – 90 % от общего его содержания в верхнем слое почвы. Подвижность  $^{90}_{38}\text{Sr}$  и  $^{137}_{55}\text{Cs}$  минимальна в черноземе и несколько выше в серой лесной и дерново-подзолистой почвах из-за различия в интенсивности почвообразования.

Если в первые 1 – 2 года после выпадения радиоактивных веществ до 90 % их было сосредоточено в поверхностном слое глубиной до 2 см, то к настоящему времени в нем произошла естественная дезактивация. За 30 лет в ненарушенном слое почв  $^{90}_{38}\text{Sr}$  и  $^{137}_{55}\text{Cs}$  проникли на глубину более 10 см. В то же время на пахотных участках за 30 лет радионуклиды равномерно распределились в объеме пахотного слоя, а их миграция вниз составила сотые доли процента от общего содержания в почве.

Поведение радионуклидов в растительном покрове, подчиняясь закономерностям биогеохимического круговорота, зависит от миграции веществ из растений в почву и из почвы в растения. Если в первые 1 – 3 года при преимущественно поверхностном внекорневом загрязнении под действием ветрового переноса преобладал нисходящий поток радиоактивных веществ (обусловленный опаданием растений и их органов), то в последующем, когда  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в основном усваивался корнями растений из почвы, установилось равновесие радионуклидов в растительном покрове и почве.

На пастбищах и сенокосах природные процессы (отмирание растительности, механическое перемещение под действием ветра и дождя) переместили с наступлением зимы около 90 % радиоактивных веществ под растительный покров (на почву и дернину). В следующий вегетационный сезон радиоактивное загрязнение травянистых растений было

---

творя. Общее количество обменных катионов, содержащееся в 100 г сухой почвы, называется емкостью поглощения, или емкостью обмена.

обусловлено на 20 – 65 % ветровым переносом, на 25 – 70 % – корневым усвоением из дернины и на 10 % из почвы. На протяжении первых трех лет дернина была основным источником загрязнения, а затем благодаря ее минерализации и ослаблению ветрового переноса главным источником стало корневое усвоение из почвы (95 – 99 % в настоящее время). Максимальное содержание  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в травянистых растениях отмечалось на пятый год, что совпадает со сроками достижения мигрирующим в глубь почвы  $^{90}_{38}\text{Sr}$  зоны корневого питания большинства видов растений с поверхностной корневой системой.

Корневое усвоение  $^{90}_{38}\text{Sr}$  различными травянистыми растениями меняется, в первую очередь, в зависимости от их потребности в кальции (неизотопном химическом аналоге стронция), и это определяет заметные различия в накоплении  $^{90}_{38}\text{Sr}$  растениями различных видов при произрастании их на различных почвах.

При установившемся корневом усвоении  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в растительном покрове лугов и залежных земель находится 1,6 – 4 % запаса  $^{90}_{38}\text{Sr}$ , в отмершей растительности – 0,06 – 0,3 %; в дернине – 0,04 – 57 %, остальное – в минерализованной части почвы.

В лесонасаждениях 80 – 90 % выпавшей радиоактивности вначале задержалось в кронах деревьев и нисходящая миграция также началась сразу после загрязнения. Смыв и выдувание радиоактивных веществ в первые месяцы привели к снижению содержания радионуклидов в кронах на 20 – 40 %. В листопад у березовых насаждений на подстилку переместилось около 80 % сосредоточенной в кронах радиоактивности. Через 8 месяцев в надземной биомассе берез содержалось 10 – 20 % общего запаса радиоактивных веществ, сосны – 40 – 50 %. Летом 1958 г. содержание радиоактивных веществ в биомассе надземного яруса смешанного сосново-березового леса составляло 0,2 – 17,4 % от запаса радиоактивных веществ на единицу площади. В дальнейшем радионуклиды в лесах перераспределялись за счет их усвоения корневой системой из подстилки и почвы, опадания хвои, листьев, мелких веток, травянистой растительности, миграции в системе подстилка – минерализованная часть почвы.

В результате биогенного разложения подстилки и промывания ее осадками радиоактивные вещества постепенно мигрировали в минерализованную верхнюю часть почвы. Через 8 лет в подстилке оставалось 10 %  $^{90}_{38}\text{Sr}$ , а через 30 лет – 3 – 4 %. В минерализованной же части почвы его запас постепенно возрастал – до 75 % через 5 лет и 95 % через 30

лет. В поверхностном (0 – 5 см) слое почвы максимальное содержание  $^{90}_{38}\text{Sr}$  наблюдалось на 12 – 14-ый год после аварии, затем оно стало снижаться за счет миграции в более глубокие слои почвы.

В первые 10 лет увеличивалось содержание  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в древесине и коре, из них 3 года содержание этого радионуклида в древесине определялось остаточным и внекорневым загрязнением, из-за чего концентрация была максимальной в листве и ветвях. Через 3 – 5 лет вклад корневого пути поступления стал возрастать и в последующем доминировал. Концентрация  $^{90}_{38}\text{Sr}$  медленно снижалась в листьях и ветвях и нарастала в древесине и коре.  $^{137}_{55}\text{Cs}$  в древесную растительность поступило в 10 раз меньше, чем  $^{90}_{38}\text{Sr}$ .

На территории ВУРСа в границах загрязнения 2 Ки/км<sup>2</sup> расположено 14 непроточных озер. Основными процессами первоначального распределения радионуклидов в непроточных водоемах являются осаждение с частицами взвесей и выпадающих солей, ионообменная и молекулярная адсорбция донными отложениями, поглощение водными организмами и отложение на дне неживого вещества биогенного происхождения. Совокупность этих процессов характеризует скорость самоочищения воды. До достижения динамического равновесия в распределении радионуклидов в озерах происходило достаточно быстрое самоочищение воды: концентрация радиоактивных веществ уменьшилась в 2 раза через 120 – 190 суток по  $^{90}_{38}\text{Sr}$ , 18 – 110 суток по  $^{106}_{44}\text{Ru}$ , 1 – 24 суток по  $^{144}_{58}\text{Ce}$ . Из-за небольшой биомассы озер дальнейшее распределение почти полностью зависело от взаимодействия воды с донными отложениями (в основном, сапропелевым илом и торфянистыми отложениями), обладающими высокой адсорбционной и ионообменной способностью. Спустя год около 90 %  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в озерах было сосредоточено в илах, через 3 года – около 96 %. В целом концентрация радиоактивных веществ в воде озер уменьшилась за 5 – 6 лет в 2 раза, а за 30 лет – более чем в 1500 раз.

Водный сток и ветровой перенос доминировали среди всех абиогенных процессов миграции радиоактивных веществ. Водный сток на территории ВУРСа, недостаточно интенсивный из-за ровного рельефа и умеренного количества осадков, аккумулируется в бессточных понижениях, котловинах озер и немногочисленных мелких реках. Поверхностный сток радиоактивных веществ в растворенной (ионной) и твердой формах определяется поверхностным водным стоком (около 80 % его

приходится на весенний период) и зависит от запаса радионуклидов в верхнем слое почвы и растворимости их в воде.

В целом поверхностный сток не привел к существенному перераспределению радиоактивных веществ на территории ВУРСа.

Грунтовый сток, который характерен для возвышенных, дренированных и незалесенных водоразделов и обусловлен прежде всего инфильтрацией атмосферных осадков, на территории ВУРСа играет второстепенную роль.

Общее количество радиоактивности, вынесенной водным стоком с территории ВУРСа, составило всего 500 Ки, причем 60 % этого количества пришлось на первые 5 лет.

Ветровой перенос находящихся на поверхности почвы, растительности и других элементах ландшафта радионуклидов и их вторичное осаждение были наиболее интенсивными в начальный период, когда радиоактивные вещества еще слабо закрепились на поверхности, и наблюдались преимущественно весной и осенью. Летом, когда поверхность зарастала травами, и зимой при снежном покрове ветровой перенос снижался в 10 – 100 раз.

Общий ежегодный ветровой перенос радиоактивных веществ составлял 0,1 – 1 % от их содержания в первый год после аварии и  $10^{-3}$  –  $10^{-2}$  % – впоследствии. В целом за первые три года таким путем было удалено около 2 % запаса радионуклидов с территории ВУРСа.

Таким образом, водная и ветровая миграции не привели к дезактивации территории, изменению плотности загрязнения, смещению оси и границ следа.

### 3.6. ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ФЛОРУ И ФАУНУ НА ТЕРРИТОРИИ СЛЕДА

Авария 1957 г. дала обширный фактический материал для исследований влияния радиоактивного загрязнения на дикие растения и животных – до этого радиобиологи располагали информацией лишь о медицинских, но не общебиологических или экологических аспектах действия ионизирующих излучений. С момента образования ВУРСа на его территории были начаты наблюдения за изменениями состояния и поведения живых организмов и их сообществ. Эти наблюдения показали, что, как и следовало ожидать, при облучении природных экосистем обнаруживаются не только первичные радиационные эффекты (непосредственное влияние излучений на отдельные компоненты биогеоценозов), но и вторичные – опосредованные процессы, начало которым кладут

первичные изменения. Взаимосвязь между ними во многом определяет устойчивость экосистем к облучению.

Преобладающая доля энергии излучения (до 75 %) приходилась на  $\beta$ -частицы, а энергия  $\beta$ -электронов поглощается слоем биологической ткани толщиной несколько сантиметров. Поэтому распределение доз по различным компонентам биогеоценозов было близко к распределению в них радионуклидов.

Во-вторых, основной вклад в активность выпадений вносили короткоживущие радионуклиды с периодом полураспада менее года ( ${}_{40}^{95}\text{Zr}$ ,  ${}_{44}^{106}\text{Ru}$ ,  ${}_{58}^{144}\text{Ce}$ , а также их дочерние продукты), и лишь через 1 – 1,5 года после аварии главной стала роль долгоживущих радионуклидов –  ${}_{38}^{90}\text{Sr}$  и  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ . В результате накопление доз протекало в два этапа – в период начального, или "острого", облучения (первые 1 – 1,5 года) и в период отдаленного, или хронического, облучения, причем большая часть поглощенной дозы сформировалась в начальный период.

Наконец, радиоактивный выброс и значительная часть "острого" периода облучения пришлись на фазу физиологического покоя растений и многих животных, при которой восстановительные процессы в организмах заторможены. Поэтому степень радиационных повреждений определялась не столько мощностью дозы и динамикой режима облучения, сколько интегральной дозой, накопленной в органах и тканях.

Таким образом, основные радиобиологические эффекты (исключая генетические) были вызваны дозой, накопленной в течение осени и зимы 1957/58 гг. Они проявились весной 1958 г. при возобновлении метаболической активности организмов и обнаруживались несколько последующих лет. В дальнейшем, при хроническом облучении с невысокой мощностью дозы, наблюдались только генетические эффекты.

В "острый" период максимальному облучению подверглись деревья сосны, хвоя которых долго удерживала выпавшие радионуклиды, семена трав, а также почки возобновления и генеративные отпрыски растений, находившиеся на поверхности почвы или близко к ней. Спящие почки возобновления и семена трав получили за этот период дозу до 40 рад, хвоя сосны – до 20, семена деревьев в кронах – до 4 рад (в расчете на плотность загрязнения 1 Ки/км<sup>2</sup>).

Среди млекопитающих и птиц наибольшие дозы накопили те виды, для которых было существенным не столько внешнее облучение, сколько облучение желудочно-кишечного тракта при потреблении загрязненной пищи. Исключением стали мышевидные грызуны. Поскольку размеры их тела сравнимы с длиной пробега  $\beta$ -частиц, а к тому же эти животные преимущественно обитают в почве и на ее поверхности и в поисках корма далеко не перемещаются, они получили максимальную

дозу на все тело. В порядке возрастания накопленных доз животные и птицы образуют следующий ряд: перелетные птицы, хищные млекопитающие, хищные зимующие птицы, крупные травоядные, мышевидные грызуны.

Сегодня известно, что наиболее чувствительны к радиации хвойные деревья. Одно из первых практических доказательств этого было получено на территории ВУРСа. Именно у сосны весной 1958 г. проявились первые лучевые эффекты – кончики хвои пожелтели, а затем полностью или частично усохли (в зависимости от накопленной дозы). Кроме того, многие верхушечные и боковые почки облученных сосен не тронулись в рост, а из уцелевших образовались короткие и толстые пучки побегов с удлиненной хвоей.

На участках с плотностью загрязнения  $180 \text{ Ки/км}^2$  (что соответствовало накоплению за первый год в хвое дозы свыше 3 – 4 крад) сосны к осени 1959 г. полностью погибли. Общая площадь таких участков составила около  $20 \text{ км}^2$ . Гибель сосны под воздействием радиации наблюдалась и после аварии на Чернобыльской АЭС.

На участках с плотностью загрязнения около  $40 \text{ Ки/км}^2$ , где поглощенные дозы в кронах деревьев превышали 0,5 крад, радиационное повреждение сосны выражалось в пожелтении, усыхании и опадении части хвои, дефектах развития новой хвои, снижении прироста побегов и ствола, снижении жизнеспособности семян и пыльцы, фенологических сдвигах (задержке сроков пробуждения почек, цветения и др.). Эти нарушения отмечались в течение двух лет после образования ВУРСа.

Березовые леса оказались значительно более устойчивыми к радиоактивному загрязнению. Полная гибель березы отмечалась только на участках с максимальной плотностью загрязнения –  $4000 \text{ Ки/км}^2$ . При более низких дозах у берез усыхал верхний ярус кроны, листья оказывались недоразвиты, в течение 4 лет после аварии отмечались фенологические сдвиги. Общая площадь территории, на которой наблюдались радиационные повреждения березы, составила около  $17 \text{ км}^2$ .

Различия в устойчивости сосновых и березовых лесов к радиационному загрязнению объясняются двумя причинами. Во-первых, радиочувствительность сосны сама по себе выше, чем у березы. Во-вторых, поглощенная доза оказалась значительно больше в кронах сосен из-за длительного пребывания радионуклидов на хвое (березы сбросили загрязненные листья в период осеннего листопада вскоре после аварии).

Если в луговых сообществах с простой структурой изменения были обусловлены в основном прямым действием облучения (первичные эффекты), то в лесных они представляли сочетания первичных и вторичных эффектов. На тех участках, где после усыхания крон деревья

гибли, под их пологом менялся микроклимат, прежде всего освещенность и содержание влаги. Так, в сильно поврежденных смешанных лесах освещенность почвы увеличилась в 5 раз, количество поступающей к ней влаги – в 1,5 – 2 раза. К тому же из-за фенологических сдвигов (запаздывание появления листьев на березе) весной значительно удлинился световой день в нижнем ярусе леса. Все это способствовало интенсивному размножению травянистой растительности, общая масса которой увеличилась в 3 – 5 раз по сравнению с незагрязненными лесами.

Самой многочисленной группой животных на территории ВУРСа являются беспозвоночные. Сокращение численности и гибель под действием радиации отмечалась только у видов с долгой продолжительностью жизненного цикла и длительной фазой развития, протекающей в лесной подстилке, дернине или поверхностном слое почвы. Наиболее сильно эти эффекты проявились у дождевых червей, многоножек и клещей при плотности загрязнения свыше 100 Ки/км<sup>2</sup> (что соответствует поглощенной дозе более 600 рад за "острый" период).

Гораздо слабее были выражены радиационные эффекты у летающих насекомых, способных быстро расселяться на большой территории, или у беспозвоночных, имеющих укрытие. В частности, не замечено угнетающего воздействия радиации на муравьев, хотя основную часть жизни они проводят на поверхности лесной подстилки.

Как показывают расчеты, птицы и млекопитающие осенью и зимой 1957 – 58 гг. могли получить летальные дозы только при постоянном обитании на участках с плотностью загрязнения свыше 1000 Ки/км<sup>2</sup>. Поскольку подавляющая часть птиц, обитающих на территории следа, относится к перелетным, а авария произошла осенью, можно полагать, что воздействие радиоактивного загрязнения на них началось лишь с весны 1958 г., когда мощность дозы в кронах деревьев снизилась в 10 раз. По расчетам, поглощенная доза в теле птиц за лето 1958 и 1959 гг. не превысила 100 – 200 рад, что значительно ниже летальных значений (800 – 1000 рад). Гибели птиц как в эти, так и в последующие годы не зарегистрировано, а их численность не зависела от плотности загрязнения.

Среди млекопитающих, обитавших на загрязненной территории, наибольшее количество радиационных эффектов наблюдалось у мышевидных грызунов. При плотности загрязнения свыше 1000 Ки/км<sup>2</sup> (мощность дозы в "острый" период более 10 рад/сут) увеличилась смертность и снизилась продолжительность жизни особей. Такие первичные эффекты облучения, наблюдавшиеся в течение 10 – 15 лет, при-

вели к вторичным нарушениям – изменению структуры популяций, ослаблению защитных реакций.

Однако через 15 лет, когда сменилось около 20 поколений животных, их популяции на загрязненных участках по всем показателям сравнялись с остальными. При этом у популяций, обитающих на территории ВУРСа, возросла радиоустойчивость, что было выявлено в специальных опытах с дополнительным облучением. Летальные дозы для животных, обитающих в районе следа, оказались в 1,3 раза выше, чем для контрольных.

В популяциях других млекопитающих (лось, косуля, волк, рысь, заяц) подобных радиационных эффектов не замечено.

Для фауны озер поглощенные дозы за "острый" период составили примерно 1 – 2 крад, причем мощность дозы снижалась со скоростью, превосходящей скорость снижения активности выпавших радионуклидов, за счет оседания последних в толщу донных отложений. Наиболее уязвимым звеном водных экосистем оказались растительноядные рыбы (каarp, карась) – зимой они залегают в ил, а это приводит к дополнительному облучению тела.

На остальные, менее уязвимые звенья водных экосистем (планктон, водоросли, беспозвоночные) вредного влияния облучения не обнаружено.

Выше шла речь о нестохастических радиационных эффектах, которые не связаны с облучением генетических структур организма. Такие эффекты успевают развиться и проявиться за несколько лет после начала облучения, после чего частично или полностью компенсируются восстановительными процессами. Проявление же стохастических эффектов (в частности, генетических) требует несравнимо большего времени.

В первые годы после аварии и образования ВУРСа отечественная генетическая наука, в том числе радиационная генетика популяций, еще переживала трагический период своего развития, связанный с подавлением свободы научного поиска в биологической науке, когда любое отклонение от учения невежественно-агрессивного фанатика Т. Д. Лысенко жестоко каралось. В итоге исследования генетических нарушений в такой уникальной природной лаборатории, какой оказалась после аварии территория ВУРСа, начались лишь через 5 лет после аварии, т.е. уже в период относительно слабого хронического облучения. Поэтому для восстановления полной картины помимо непосредственных наблюдений потребовались и специальные эксперименты.

Проведенные исследования убедительно показали, что радиоактивное загрязнение привело к увеличению темпов мутационных про-

цессов в популяциях растений и животных. По мере снижения мощности поглощенной дозы происходило и снижение скорости мутационных процессов, часть которых (в частности, хромосомные aberrации) быстро вышла на стационарный уровень, а другая (например, биохимические мутации – изменения структуры отдельных белков) не достигла его даже сегодня.

Для популяций в целом учащение большинства мутаций не играет существенной роли вследствие их быстрого уничтожения в ходе естественного отбора. Однако некоторые генетические изменения (например, те же биохимические мутации) могут накапливаться из поколения в поколение, особенно при длительном хроническом облучении в условиях низких доз. На территории ВУРСа этот эффект обнаружен у двух видов растений – василька шероховатого и сосны обыкновенной, произрастающих на участках с плотностью загрязнения от единиц до десятков Ки/км<sup>2</sup>. У быстро размножающихся животных (таких, как мыши полевки), обитавших на участках с плотностью загрязнения от 100 до 1000 Ки/км<sup>2</sup>, частота мутаций также возросла в 1,5 – 2 раза по сравнению со спонтанной.

Вопрос о последствиях накопления биохимических мутаций в природных популяциях, которое наблюдается и сегодня на отдельных участках ВУРСа, остается открытым – на него генетика популяций пока вообще не ответила. Очевидно лишь, что никаких уродств генетической природы, т.е. закрепленных в потомстве резких патологических отклонений от традиционного внешнего вида и поведения, на территории следа не обнаружено.

### 3.7. ОБЛУЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ И МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ

В отсутствие опыта крупных радиационных аварий (до 1957 г.) первое, что предстояло сделать радиобиологам и медикам, это разработать стратегию и тактику радиационной защиты населения на обширной территории ВУРСа. Прежде всего необходимо было определить величины внешнего  $\gamma$ -облучения от проходящего облака, загрязнения почвы и среды обитания, в том числе одежды, а также внутреннего облучения от радиоактивных веществ, поступающих в организм с воздухом, пищей и водой. В момент образования облака и начальный (острый) период существования следа (1 – 1,5 года) преобладало внешнее облучение, позднее – внутреннее. За время прохождения облака внешнее облучение составило 0,13 мбэр. Наибольшее радиационное воздействие пришлось на жителей трех ближайших к радиохимическому предприятию деревень. Это послужило основанием для их экстренной эвакуации: в пер-

вые 10 суток 1100 человек отселили в безопасную зону (менее 0,1 Ки/км<sup>2</sup>), обеспечили жильем и работой (личное имущество и скот были уничтожены, а материальные убытки возмещены).

Дальнейшая эвакуация, которая в "острый" период была основной мерой радиационной защиты, проводилась в соответствии с радиационной обстановкой. По мере уточнения радиационной обстановки были разработаны предельно-допустимые уровни радиоактивного загрязнения продуктов и окружающей среды, намечены основные меры радиационной защиты, которые в основном пришлось на начальный период аварии.

Таблица 3. Динамика эвакуации и дозы облучения населения до эвакуации

Группа и численность населения, тыс. чел.	Средняя плотность загрязнения территории, Ки/км <sup>2</sup>	Сроки эвакуации, сут	Средняя доза, бэр	
			Внешнее облучение	Эффективная эквивалентная доза
А 1,15	500	7 – 10	17	52
Б 0,28	65	250	14	44
В 2	18	250	3,9	12
Г 4,2	8,9	330	1,9	5,6
Д 3,1	3,3	670	0,68	2,3

Данные за 30 лет, прошедших после аварии, свидетельствуют, что из общей дозы внешнего облучения (260 мбэр) более половины получено в первые 120 сут, около 90 % – в первые два года. В "острый" период максимальные дозы внутреннего облучения пришлось на желудочно-кишечный тракт, поскольку пища, потребляемая населением (за исключением молока), была загрязнена  $^{95}_{40}\text{Zr}$ ,  $^{106}_{44}\text{Ru}$ ,  $^{144}_{58}\text{Ce}$ , а также их дочерними продуктами. Из дозы облучения желудочно-кишечного тракта (2 бэр за 30 лет) 12 % накоплено в первые 10 сут, 80 % – в первый год. В "острый" период существенно увеличилась и доза облучения костной ткани и красного костного мозга за счет отложения  $^{90}_{38}\text{Sr}$ : соответственно от 9 и 3 за первый месяц до 720 и 220 мбэр за первый год.

Исходя из принятого допустимого поступления  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в организм (1,4 мКи/год – за счет дыхания и воды) и отсутствия возможности снабжать население чистыми продуктами, необходимо было организовать радиационный контроль на площади около 1000 км<sup>2</sup> (50 населен-

ных пунктов). С этой целью спустя 3 мес. после аварии начали работать 8 вновь организованных радиологических лабораторий. За первые два года было забраковано и уничтожено более 6 тыс. т сена, 3 тыс. т зерна, тысячи тонн картофеля, овощей, молока, мяса и яиц. Однако контроль оказался неэффективным как по объему контролируемой продукции, так и по срокам исполнения. Поскольку полностью заменить загрязненные продукты не представлялось возможным, была предпринята дополнительная эвакуация населения с территории, на которой плотность загрязнения превышала 4 Ки/км<sup>2</sup>. Отселение началось через 8 мес. и закончилось через 1,5 года после образования ВУРСа. Всего (вместе с экстренным отселением) было переселено более 10 тыс. человек из 23 населенных пунктов. Экстренное отселение позволило снизить потенциальную дозу внешнего облучения за 30 лет в 77 раз (костной ткани и красного костного мозга – в 500), эффективную эквивалентную дозу – почти в 100 раз. Плановое отселение уменьшило потенциальную дозу на 20 % для кости и на 40 – 90 % для красного костного мозга.

На территории ВУРСа, где плотность загрязнения превышала 4 Ки/км<sup>2</sup>, была создана охраняемая санитарно-охранная зона площадью около 700 км<sup>2</sup>. На этой территории вплоть до 1961 г. исключалась любая хозяйственная деятельность. Специальные механизированные отряды дезактивировали населенные пункты и сельскохозяйственные угодья. В первые 1,5 года было перепахано около 20 тыс. га в головной и промежуточной частях следа.

Начиная со второго года после аварии, внутреннее облучение населения формировалось, в основном, за счет  $^{90}_{38}\text{Sr}$ , содержащегося в продуктах местного происхождения. Однако в результате принятых мер и природных процессов, влияющих на накопление  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в растениях, радиоактивность продуктов снизилась и уменьшается каждые 5,5 лет вдвое. Таким образом, внутреннее облучение за счет отложения  $^{90}_{38}\text{Sr}$  в скелете со временем уменьшалось. За 30 лет доза на костную ткань достигла 8 бэр, на красный костный мозг – 2,6 бэр; половина этих доз была сформирована за первые 6 – 7 лет. Эффективная эквивалентная доза за 30 лет составила 1,2 бэр, причем на внешнее облучение тела и внутреннее облучение костной ткани и красного костного мозга приходится по 20 % от нее.

Улучшение радиационной обстановки в целом и принятые меры радиационной защиты населения позволили в 1962 г. сократить площадь санитарно-охранной зоны до 200 км<sup>2</sup>.

Медицинский контроль за состоянием здоровья населения начался через год после аварии. Осмотр специалистами, биохимические ис-

следования крови, электрокардиографическое обследование, контроль артериального давления и частоты сердечных сокращений не выявили достоверных отклонений от контрольной группы, не подвергшейся действию радиации. Среди жителей населенных пунктов в головной части следа клинических проявлений лучевой болезни не наблюдалось. Обследование населения показало, что около 75 % людей были практически здоровы, а у остальных 25 % были обнаружены различные соматические заболевания, причем более половины составляли заболевания сердечно-сосудистой системы и почти треть – болезни органов дыхания.

Позже среди находившихся под медицинским контролем была выделена критическая группа, у которой радиационное воздействие пришлось на период формирования и становления организма, а дозы облучения оказались наибольшими. Треть из них была практически здоровой, у остальных обнаружены очаги хронической инфекции. Особностей в заболеваемости облученных по сравнению с контрольными группами не выявлено, в том числе и по онкологическим заболеваниям.

*Таблица 4. Смертность в возрасте до 1 года на 1 тысячу новорожденных*

Причины	На территории следа	На границе следа	Контрольная группа
Расстройство питания	15,2 ± 2,8	12,3 ± 3	5 ± 1
Пневмония	1,7 ± 1,0	3,1 ± 1,5	16,1 ± 1,8
Инфекции	1,6 ± 0,9	2,3 ± 1,3	3,0 ± 0,8
Болезнь новорожденных	8,7 ± 2,2	13,8 ± 3,2	14,5 ± 1,7
Все причины	27,7	31,4	28,6

Одним из чувствительных критериев поражения при действии ионизирующих излучений служит ранняя детская смертность и внутриутробные аномалии развития. Хотя в те годы детская смертность была высокой, принципиальных отличий по данному показателю от контрольной группы обнаружено не было.

Наибольший интерес представляет анализ смертности от злокачественных опухолей, поскольку по прошествии значительного времени этот фактор является главным проявлением предшествующего облучения. Однако недостаточно обширная выборка не позволила сделать вы-

вод о существенной разнице между количеством смертей от рака в группе населения, проживавшей на территории следа, и в контрольной группе. Примечательно, что при этом в Челябинской области была установлена корреляция частоты онкологических заболеваний и выбросов в атмосферу  $SO_2$ . Хотя сам  $SO_2$  не является канцерогеном, он весьма удобен как показатель общей химической загрязненности. В отсутствие выбросов  $SO_2$  уровень заболеваемости составил 225 случаев, а при выбросах 50, 100 и 150 тыс. т/год – соответственно 250, 275 и 300 случаев на 100 тыс. чел. в год. Эти данные позволяют считать, что в Челябинской области повышенная смертность от онкологических заболеваний связана не с радиоактивным загрязнением, а с выбросом токсичных веществ металлургическими и химическими предприятиями.

#### 4. АВАРИЙНЫЕ СИТУАЦИИ НА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ В СССР В ПЕРИОД, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЕ

Авария на Чернобыльской АЭС стала самой серьезной среди всех, которые когда-либо случались на атомных станциях в мире. Однако и в период с 1954 по 1986 гг. на ядерных реакторах в СССР имел место ряд аварийных ситуаций.

7 мая 1966 г. произошел разгон на мгновенных нейтронах реактора в г. Мелекесе. Цепную реакцию погасили, сбросив в реактор два мешка с борной кислотой.

На протяжении 15 лет (с 1964 по 1979 гг.) неоднократно имело место разрушение (пережог) топливных сборок в активной зоне на первом энергоблоке Белоярской АЭС.

7 января 1974 г. произошел взрыв железобетонного газгольдера для выдержки радиоактивных газов на первом блоке Ленинградской АЭС.

6 февраля на том же первом блоке Ленинградской АЭС случился разрыв промежуточного контура охлаждения. Причиной аварии послужило вскипание воды в контуре с последующим гидроударом. Авария повлекла за собой жертвы (три человека погибли) и привела к сбросу радиоактивной воды во внешнюю среду.

В октябре 1975 г. на том же объекте имело место частичное разрушение активной зоны с выбросом в атмосферу около 1,5 МКи высокоактивных радионуклидов.

В 1977 г. произошло расплавление части топливных сборок в активной зоне на втором блоке Белоярской АЭС.

31 декабря 1978 г. произошел крупный пожар на втором блоке Белоярской АЭС. Пожар возник из-за обрушения плиты перекрытия на

маслобак турбины. В результате пожара выгорели все кабельные коммуникации систем контроля, и реактор остался неконтролируемым.

В сентябре 1982 г. из-за ошибочных действий персонала произошло разрушение центральной топливной сборки на первом блоке Чернобыльской АЭС, сопровождавшееся выбросом радиоактивности на промзону и г. Припять.

В октябре 1982 г. имел место взрыв генератора на первом блоке Армянской АЭС. При этом машинный зал сгорел, но активную зону удалось спасти.

27 июня 1985 г. из-за ошибочных действий персонала произошла авария на первом энергоблоке Балаковской АЭС. При проведении пусконаладочных работ вырвало предохранительный клапан, и перегретый пар стал поступать в помещение, где работали люди. В итоге аварии 14 человек погибли.

подавляющее большинство происшествий на АЭС в СССР не было предано гласности за исключением аварий 1982 года на первых блоках Армянской и Чернобыльской АЭС, о которых было вскользь упомянуто в газете "Правда" уже после избрания Генеральным секретарем ЦК КПСС Ю. В. Андропова.

## 6. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ КАТАСТРОФА 1986 г.

### 6.1 ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Чернобыльская АЭС расположена в восточной части белорусско-украинского Полесья, на берегу р. Припяти, впадающей в Днепр, в 18 км от районного центра – города Чернобыля. Работы по сооружению станции были начаты в январе 1970г. Строительство АЭС велось очередями. Каждая из них включала два энергоблока, имевшие общие системы спецводоочистки и вспомогательные сооружения на площадке. В их состав, например, входят хранилище жидких и твердых радиоактивных отходов, открытые распределительные устройства, газовое хозяйство, резервные дизель-генераторные электростанции и др.

Источником технического водоснабжения энергоблоков является наливной пруд-охладитель площадью 22 км<sup>2</sup>. Предусмотрены также отдельные насосные станции 3-го и 4-го блоков.

26 сентября 1977 г. был включен в единую энергосистему страны первый турбогенератор. 21 декабря 1978 г. осуществлен пуск 2-го, 3 декабря 1981 г. – 3-го, 31 декабря 1983 г. – 4-го энергоблока. Таким образом, на 1 января 1986 г. мощность четырех блоков станции составляла

4000 МВт и соответствовала проектным параметрам. 3-й и 4-й энергоблоки размещались не отдельно друг от друга, а в одном здании, будучи отделены друг от друга только внутренними стенами и служебными помещениями.

На Чернобыльской АЭС были установлены ядерные реакторы РБМК-1000. Тепловая мощность каждого реактора составляет 3200 МВт. В состав каждого энергоблока входят два турбогенератора электрической мощностью по 500 МВт каждый (общая электрическая мощность одного энергоблока – 1000 МВт). Топливом для РБМК служит слабо обогатенная по  ${}^{235}_{92}\text{U}$  двуокись урана. В исходном состоянии (до физпуска реактора) каждая тонна топлива содержит примерно 20 кг  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Стационарная загрузка двуокиси урана в один реактор равна 180 т. Ядерное горючее загружается в аппарат в виде тепловыделяющих элементов – твэлов. Каждый твэл представляет собой трубку из циркониевого сплава, в которую помещаются таблетки двуокиси урана. Твэлы размещают в активной зоне реактора в виде так называемых тепловыделяющих сборок (ТВС), объединяющих по 18 твэлов. Активная зона реактора РБМК-1000 содержит около 1700 ТВС, которые помещаются в графитовую кладку, для чего в ней делаются специальные вертикальные технологические каналы. По ним же циркулирует и теплоноситель. В РБМК теплоносителем является вода, которая в результате теплового воздействия от протекающей в реакторе цепной реакции доводится до кипения, и пар через верхнюю часть технологического канала и затем паропроводящую коммуникацию поступает в горизонтальные сепараторы, в которых он отделяется от воды и подается на турбины, вырабатывающие электроэнергию.

Этот круговорот воды в реакторе осуществляется главными циркуляционными насосами (ГЦН). Их восемь – шесть задействованных в работе и два резервных.

Сам реактор помещен внутри бетонной шахты, которая является средством биологической защиты. Графитовая кладка заключена в цилиндрический корпус толщиной 30 мм. Размер активной зоны реактора – 7 м по высоте и 12 м в диаметре. Весь аппарат опирается на бетонное основание, под которым располагается бассейн-барботер системы локализации аварии.

На реактивность реактора значительное влияние оказывают процессы, происходящие в активной зоне. Это влияние определяется коэффициентом реактивности. Так, в реакторе РБМК влияние изменений температуры графита, урана или теплоносителя на реактивность реактора и, соответственно, интенсивность цепной реакции определяется температурным коэффициентом реактивности (по графиту, урану и теп-

лоносителю). Влияние на реактивность изменения паросодержания в активной зоне характеризуется паровым коэффициентом реактивности, изменения давления в контуре циркуляции теплоносителя – барометрическим коэффициентом реактивности.

Величина и знак (положительный или отрицательный) коэффициентов реактивности оказывают существенное влияние на обеспечение безопасной эксплуатации реактора (особенно в переходных процессах) и на выбор характеристик системы регулирования реактора.

Система управления и защиты (СУЗ) реактора РБМК-1000 включает в себя 211 стержней-поглотителей и аппаратуру контроля уровня и распределения нейтронного потока. Она обеспечивает пуск, ручное и автоматическое регулирование мощности, плановую и аварийную остановки реактора. Последняя автоматически осуществляется по сигналам аварийной защиты (АЗ) или при нажатии кнопки.

АЗ срабатывает при превышении заданных уровней и скорости нарастания нейтронного потока, при превышении значений технологических параметров, характеризующих безопасную работу энергоблока, при отказах в работе оборудования.

По своему функциональному назначению стержни СУЗ в реакторе РБМК делятся на стержни аварийной защиты (АЗ), перекомпенсации и аварийной защиты (ПКАЗ), автоматического регулирования (АР), локального автоматического регулирования (ЛАР), локальной аварийной защиты (ЛАЗ), укороченные стержни-поглотители для регулирования поля энерговыделения по высоте реактора (УСП), стержни ручного регулирования (РР). По сигналу АЗ в активную зону автоматически вводятся все стержни СУЗ.

Для обеспечения возможности выведения реактора на заданный уровень мощности в нем при загрузке топлива создается запас реактивности, который компенсируется поглощающими стержнями, введенными в активную зону.

До аварии на ЧАЭС в реакторах РБМК регламентом эксплуатации был установлен оперативный запас реактивности, равный для рабочего состояния 30 стержням РР, а для переходных процессов (при переходе с одного уровня мощности на другой) – 15 стержням. При таком запасе реактивности обеспечивалась возможность управления распределением нейтронного потока по активной зоне и быстрой остановки реактора в аварийных случаях. При уменьшении запаса реактивности до 26 стержней дальнейшую эксплуатацию энергоблока можно было продолжать лишь с разрешения главного инженера АЭС. В переходных процессах оперативный запас мог кратковременно уменьшаться, но, как уже упоминалось, до уровня не ниже 15 стержней.

Однако, как показал анализ реального положения дел, на ЧАЭС число стержней запаса реактивности иногда уменьшалось с согласия руководства станции с целью поддержания мощности в ущерб безопасности аппарата.

Важно отметить конструктивные особенности реакторов РБМК-1000, которые являются сугубо российским проектом. На Западе изначально развивалось альтернативное направление – корпусные водоохлаждаемые реакторы PWR, аналогом которых в России являются реакторы ВВЭР. Основным конструктивным недостатком реакторов РБМК является отсутствие защитной оболочки – дополнительного барьера безопасности. Защитная оболочка спасла население США при аварии на АЭС ТМІ-2 с корпусным реактором. Отсутствие такой оболочки на ЧАЭС позволило радионуклидам проникнуть далеко за пределы АЭС, даже за пределы СССР.

Разработчики данной реакторной установки не предусмотрели создания таких систем безопасности, которые полностью исключали бы возможность неконтролируемого роста потока нейтронов при непредсказуемом, казалось бы, невероятном сочетании различных нарушений технологического регламента, правил эксплуатации. В частности, существовала принципиальная возможность выводить в верхнее положение из активной зоны все стержни.

К известным до аварии недостаткам РБМК прежде всего относится наличие значительного положительного эффекта реактивности в случае уменьшения плотности теплоносителя. Уменьшение плотности теплоносителя имеет место, в частности, при увеличении содержания в каналах пара, а при этом происходит рост реактивности аппарата, т.к. вода в этом реакторе играет еще и роль поглотителя нейтронов. То, что в реакторе РБМК-1000 был положительный паровой коэффициент, безусловно, является дефектом физических принципов, заложенных в конструкцию реактора, за который несут ответственность его разработчики. Только в реакторе РБМК была возможна ситуация, когда закипание воды и осушение активной зоны приводили к неконтролируемому росту цепной реакции, плавлению твэлов и тепловому взрыву активной зоны. Для всех других типов реакторов потеря теплоносителя – воды – прекращает цепную реакцию, и они останавливаются без вмешательства человека.

Более того, как было выяснено после аварии, конструктивные особенности поглощающих стержней были таковы, что опускание из верхнего положения разом всех аварийных стержней (в результате нажатия кнопки АЗ) приводило к введению положительной реактивности

в первые секунды (что и подтолкнуло реактор к взрыву) и только потом – отрицательной.

После аварии эти недостатки РБМК были устранены на всех действующих АЭС с реакторами РБМК.

Наконец, вследствие больших размеров канальные реакторы характеризуются большим количеством ядерного топлива. В реакторе многие детали изготовлены из циркония – материала, при окислении которого в воде выделяется водород. По потенциальной опасности возможности аварии со взрывом водорода реакторы РБМК в 5 раз опаснее корпусных реакторов.

## 6.2. ПРИЧИНЫ АВАРИИ

Авария произошла на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. примерно в 1 ч 23 мин по московскому времени. В результате произошло разрушение активной зоны реакторной установки и части здания 4-го блока, а также выброс значительной части накопившихся в активной зоне радиоактивных продуктов в атмосферу.

Причиной случившейся катастрофы явилось непредсказуемое сочетание нарушений регламента и режима эксплуатации энергоблока, допущенных обслуживающим персоналом. В результате этих нарушений возникла ситуация, в которой проявились существовавшие до аварии недостатки РБМК.

В конце апреля 1986 г. предполагалось остановить реактор 4-го энергоблока на планово-предупредительный ремонт. Перед остановкой были запланированы испытания одного из турбогенераторов в т.н. режиме выбега с нагрузкой собственных нужд блока. Суть эксперимента заключалась в моделировании ситуации, когда турбогенератор может остаться без подачи пара. Для этого был разработан специальный режим, в соответствии с которым при отключении подачи пара генератор за счет инерционного вращения ротора некоторое время продолжал бы вырабатывать электроэнергию, необходимую для собственных нужд, в частности, для питания главных циркуляционных насосов.

Качество программы испытаний, которая не была должным образом подготовлена и согласована, оказалось низким. В ней был нарушен ряд важнейших положений регламента эксплуатации. В частности, ему предписывалось отключение системы аварийного охлаждения реактора (САОР). Этого нельзя делать ни в какой ситуации. Однако это было сделано. Такие действия были обоснованы тем, что в ходе эксперимента могло произойти автоматическое срабатывание САОР, что помешало бы завершению испытаний в режиме выбега. В результате несколько

часов реактор эксплуатировался без этого чрезвычайно важного элемента системы безопасности.

На первый взгляд планируемые испытания представляли собой чисто электротехническую проблему, т.к. предполагалась проверка работы не реактора, а турбогенератора, отключенного от пара. Реально же эти испытания непосредственно затрагивали работу реактора, т.к. предполагавшееся отключение энергоблока от пара с учетом последующих изменений параметров процесса могло привести к неконтролируемому введению положительной реактивности. В программе эксперимента не было указано, куда в ходе его проведения отводить излишки пара, т.к. для турбогенератора он уже не требовался. А увеличение паросодержания в каналах реактора неминуемо должно было привести к введению положительной реактивности и изменению режима охлаждения активной зоны. При этом, как уже говорилось, программа санкционировала отключение САОР.

Согласно восстановленному комиссией после аварии ходу событий, 25 апреля 1986 г. ситуация развивалась следующим образом.

В 1 ч 00 мин, в соответствии с графиком остановки реактора на планово-предупредительный ремонт, персонал приступил к снижению мощности аппарата, работавшего на номинальных параметрах. Однако этот процесс был приостановлен по требованию диспетчера энергосистемы.

В 14 ч 00 мин, в соответствии с программой эксперимента, была отключена САОР, что являлось грубейшим нарушением правил эксплуатации реактора.

В 23 ч 10 мин от диспетчера было получено разрешение на остановку реактора, и началось дальнейшее снижение его мощности (тепловой) до 1000 – 700 МВт, как и предусматривалось программой эксперимента. Но оператор не справился с управлением, в результате чего мощность упала почти до нуля.

В 1 ч 00 мин 26 апреля персоналу наконец удалось поднять мощность реактора и стабилизировать ее на уровне 200 МВт (тепловых) вместо 1000 – 700, предусмотренных программой эксперимента.

Здесь следует отметить, что одним из продуктов деления, образующимся в ходе цепной реакции, является изотоп  $^{135}_{53}\text{J}$ , имеющий период полураспада около 7 часов. Затем он переходит в  $^{135}_{54}\text{Xe}$ , обладающий большим сечением поглощения тепловых нейтронов. Ксенон, который иногда называют "нейтронным ядом", имеет период полураспада около 9 часов и постоянно присутствует в активной зоне реактора. Но при нормальной работе аппарата он частично выгорает за счет погло-

щения нейтронов, поэтому количество ксенона практически сохраняется на одном уровне.

При снижении же мощности реактора и соответственно уменьшении потока нейтронов в активной зоне количество ксенона возрастает. Происходит так называемое "отравление реактора". При этом реактор попадает в глубоко подкритичное состояние, известное под названием "йодной ямы". Пока она не пройдена, т.е. пока "нейтронный яд" не распадется, реактор должен быть остановлен.

Именно это произошло на 4-м энергоблоке ЧАЭС в ночь с 25 на 26 апреля из-за снижения мощности реактора. Но, несмотря на категорическое требование регламента останавливать реактор в подобной ситуации, персонал произвел подъем мощности до 200 МВт. Для этого пришлось поднять в верхнее положение почти все поглощающие стержни. По данным распечатки программ быстрой оценки состояния на 1 ч 22 мин 30 с, в активной зоне находилось всего 6 – 8 стержней. Это количество было примерно вдвое меньше предельно допустимого, что также являлось грубейшим нарушением требований регламента.

В 1 ч 23 мин 04 с оператор закрыл стопорно-регулирующие клапаны турбогенератора №8, прекратив подачу на него пара. Начался режим выбега. В момент отключения турбогенератора должна была сработать еще одна система автоматической защиты, останавливающая реактор. Но персонал заблаговременно отключил и ее.

Действия персонала привели к увеличению объемного паросодержания в каналах, во много раз большему, чем при нормальной работе реактора. Рост паросодержания вызвал введение положительной реактивности, причем колебания мощности могли привести к ее дальнейшему росту. Реактор начал разгоняться.

В 1 ч 23 мин 40 с начальник смены 4-го энергоблока, осознав опасность ситуации, дал команду нажать кнопку аварийной защиты. Практически все стержни из верхнего положения пошли вниз, но через несколько секунд раздались взрывы. Ввод стержней из верхнего положения, как показали позже специальные исследования, из-за их конструктивных особенностей оказался неэффективным и привел дополнительно к введению положительной реактивности.

Оценки, проведенные специалистами после аварии, показали, что с уровня 0,07 от номинального мощность реактора возросла до пятикратного превышения номинального уровня. Это привело к необратимым изменениям в активной зоне, в частности, к нагреву всех элементов, образованию водорода, возгоранию графитовой кладки и взрывам образовавшегося водорода.

В плане сравнения различных аварий интересна точка зрения, сформулированная академиком В. А. Легасовым:

"Реакторщики, естественно, изучали все аварии на АЭС и, если было нужно, предпринимали дополнительные меры безопасности. Особенно после шумевшей аварии на станции Тримайл-Айленд в США. Но не изучали, к сожалению, аварии в других отраслях промышленности. А ход событий на Чернобыльской станции, приведших к трагедии, ничем не напоминал ни одну из аварийных ситуаций на других АЭС, но был чрезвычайно, до деталей схож с тем, что произошло на химическом заводе в Бхопале (Индия) в 1984 г.

До деталей. У нас работа в ночь на субботу, там – в воскресенье. Здесь отключили аварийную защиту, там отключили играющую защитную функцию холодильники и абсорбер. Там была техническая неисправность задвижки, пропуск воды и, как результат, экспоненциально развивающаяся экзотермическая реакция при отключенных холодильниках, здесь – избыток пара и рост реактивности. Главное же в том, что и там, и тут персонал смог, имел технические возможности, несмотря на все запреты, отключить защитные устройства".

### 6.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИАЦИИ И МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ АВАРИИ

Выброс радионуклидов за пределы аварийного блока ЧАЭС представлял собой растянутый во времени процесс, состоявший из нескольких стадий.

27 апреля 1986 г. высота загрязненной радионуклидами воздушной струи, выходящей из поврежденного энергоблока, превышала 1200 м, мощность дозы в ней на удалении 5 – 10 км от места аварии составляла около 1 Р/ч. Суммарный выброс продуктов деления (без радиоактивных инертных газов) по расчетам специалистов составил 50 МКи, что примерно соответствует 3,5% общего количества радионуклидов в реакторе на момент аварии. Выброс активности, обусловленной легколетучими радионуклидами (изотопами криптона и ксенона, йодом, цезием, теллуром и др.), составил более 90 МКи. К 6 мая 1986 г. выброс радиоактивности в основном завершился.

Первоначально распространение радиоактивного загрязнения воздушных потоков происходило в западном и северном направлениях, в последующие два – три дня – в северном, а с 29 апреля 1986 г. в течение нескольких дней – в южном направлении (в сторону Киева). Загрязненные воздушные массы распространились на значительные расстояния по территории Белоруссии, Украины и России, а также за пределами СССР. Через 15 дней после аварии уровень  $\gamma$ -фона в 5 мР/ч был зафиксирован на расстоянии 50 – 60 км к западу и 35 – 40 км к северу от

ЧАЭС. В Киеве уровни радиации в мае 1986 г. достигали нескольких десятых миллирентгена в час.

Радиоактивному загрязнению в значительной мере подверглись Гомельская и Могилевская области Белоруссии, районы Киевской и Житомирской областей Украины, примыкающие к 30-километровой зоне вокруг ЧАЭС, часть Брянской области России. Всего же в той или иной степени оказались загрязненными радионуклидами 11 областей Советского Союза, в которых проживает 17 млн. человек. Мелкодисперсные радиоактивные частицы с воздушными потоками достигли отдельных районов Кавказа, Сибири и Средней Азии. Общая площадь загрязнения в пределах от 1 до 5 Ки/км<sup>2</sup> оценивается в 150000 км<sup>2</sup>.

Значительно меньшее повышение уровней радиации было зафиксировано в целом ряде стран, где были выявлены некоторые радионуклиды, выброс которых в атмосферу произошел в результате аварии на ЧАЭС. В 6 ч утра 27 апреля 1986 г. это было зарегистрировано соответствующими службами в Швеции, затем в Финляндии и Польше. В МАГАТЭ поступила информация об изменении радиологической обстановки и принятых защитных мерах от 23 государств – его членом. Кроме того, первоначальный выброс из поврежденного реактора, высота которого превышала 1 км, привел к переносу части радиоактивных веществ за пределы Европы, в частности, в Китай, Японию и США.

Выводы и рекомендации бюро Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) для Европы, а также официальные сообщения национальных служб здравоохранения ряда европейских стран были таковы: уровень радиации в странах Европы не создавал опасности для здоровья людей. Начиная с 15 мая ВОЗ получала регулярную информацию об уровнях радиации на интересующих ее территориях Советского Союза. С 9 мая данные о радиационной обстановке из семи различных метеостанций ежедневно передавались по телеграфу в МАГАТЭ. Одна из станций, Остер, была расположена в 60 км от Чернобыля. Шесть других размещались вдоль западной границы СССР, в городах Ленинграде, Риге, Вильнюсе, Бресте, Рахове и Кишиневе. Таким образом, контролировалась практически вся западная граница, через которую могли переноситься радиоактивные вещества на территории соседних государств.

Данные, полученные с этих станций, показали, что мощность дозы в северо-западных районах СССР в большинстве случаев составляла около 0,01 мР/ч, то есть соответствовала естественному уровню. На западе, в районе Бреста, уровень радиации был незначительно повышен, но к 20 мая он практически нормализовался. Повышенные уровни радиации сохранялись к тому времени в юго-западных районах (в городах Рахове и Кишиневе – 0,025 мР/ч).

В связи с тем, что некоторые средства массовой информации на Западе распространяли информацию о радиационной обстановке в странах Европы, не соответствующую действительности, генеральный директор МАГАТЭ Ханс Бликс писал: "Мы могли сетовать – что я иногда и делаю, – что средства массовой информации стремятся помещать на первых полосах сведения, основанные на любых панических измышлениях или слухах, и, таким образом, вызывают неоправданную тревогу у населения".

В выбросах из аварийного реактора были выделены 23 основных радионуклида. Большую часть из них составляли короткоживущие изотопы, которые распались в течение нескольких месяцев после аварии. В первые минуты после взрыва и образования радиоактивного облака наибольшую опасность представляли изотопы инертных газов. Атмосферные условия в районе ЧАЭС в момент аварии способствовали тому, что радиоактивное облако прошло мимо г. Припяти и постепенно рассеялось в атмосфере, теряя свою активность. В дальнейшем тревогу врачей вызывали выпавшие на почву короткоживущие радиоизотопы, в первую очередь  $^{131}_{53}\text{J}$ . Несмотря на то, что период его полураспада менее 8 суток, он обладает большой активностью и опасен тем, что передается по пищевым цепям, быстро усваивается человеком и накапливается в щитовидной железе. В связи с этим были введены ограничения на употребление некоторых пищевых продуктов, и проводилась йодная профилактика. Кроме того, все работавшие в наиболее опасной зоне в обязательном порядке пользовались респираторами.

В середине июня 1986 г. заместитель председателя Госкомитета по использованию атомной энергии СССР Б. Семенов так прокомментировал сложившуюся ситуацию:

"За пределами 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС основными радиационными факторами, воздействующими на население Украины, Белоруссии, Молдавии и отдельных областей РСФСР, на территории которых произошло выпадение радиоактивных осадков, является внешнее гамма-излучение и поступление  $^{131}_{53}\text{J}$  с пищевыми продуктами в количествах, не опасных для здоровья населения.

Прежде всего, речь идет о молоке. Отдельные его партии, где содержание  $^{131}_{53}\text{J}$  превышает установленный норматив, направляются на переработку в продукты, которые могут быть выдержаны в течение одного-двух месяцев. Кстати, наш норматив на содержание в молоке  $^{131}_{53}\text{J}$  в 10 раз жестче, чем тот, который был установлен в Англии, когда там при аварии реактора в атмосферу тоже попал изотоп  $^{131}_{53}\text{J}$ .

Что же касается овощей, фруктов, зерновых, урожай которых ожидается в середине лета и осенью, нет никаких оснований предполагать, что они окажутся загрязненными  $^{131}_{53}\text{J}$ ".

После распада большей части радиоактивного йода внимание радиохимиков и медиков привлекал, прежде всего, плутоний. Он характеризуется сравнительно небольшой активностью и, соответственно, большим периодом полураспада. Кроме того, он чрезвычайно токсичен, и его накопление даже в малых дозах опасно для легких. В результате проведенных исследований выяснилось, что протяженность зон с повышенной концентрацией плутония была незначительной, а химические формы и размеры частиц, в составе которых он оказался, легко задерживались респираторами.

Следующей проблемой стали долгоживущие изотопы стронция и цезия, в первую очередь –  $^{137}_{55}\text{Cs}$ . Их наличие на той или иной территории в течение нескольких лет обуславливало необходимость проведения дополнительных дезактивационных работ, а также определяло решение вопросов эвакуации населения, сельскохозяйственных работ, режима питания людей и др.

Непосредственно от аварии погибло 30 человек. Из них 28 скончались от острой лучевой болезни. С подозрением на диагноз "острая лучевая болезнь" разной степени тяжести было госпитализировано 237 человек из числа персонала, находившегося вблизи аварийного блока. Впоследствии у 92 из них этот диагноз не подтвердился. Из 145 человек с подтвердившимся диагнозом IV степень острой лучевой болезни была отмечена у 21 человека (на 1 января 1988 г. 20 из них умерли), III степень – у 21 человека (7 умерли), II степень – у 53 человек (один умер), I степень – у 50 человек. Среди населения 30-километровой зоны и других районов случаев заболевания острой лучевой болезнью не отмечалось. По официальным данным, с учетом людей, принимавших участие в работах по ликвидации последствий Чернобыльской аварии, от острой лучевой болезни скончались 134 человека, 104 из них – в течение 15 лет, прошедших с момента аварии.

Что касается отдаленных последствий повышения радиационного фона для населения, то потенциальное увеличение количества онкологических заболеваний в районах, подвергшихся наибольшему радиоактивному загрязнению, первоначально оценивалось в 1 – 1,5%. Эти данные были приведены советскими врачами осенью 1986 г. на специальной сессии Генеральной ассамблеи МАГАТЭ в Вене. Считается, что вероятность генетических последствий в 3 раза меньше, чем онкологических.

Обратимся к статистике. Специальная выборка по Могилевской, Гомельской, Киевской и Брянской областям свидетельствует, что рождаемость в Брянской области за 1985 – 1987 гг., т.е. до и после аварии, составила 15,3 – 16,3 – 16 новорожденных на тысячу человек. Сравним эти данные со средним показателем по РСФСР: 16,5 – 17,2 – 17. Итак, в 1986 г. рождаемость незначительно выросла, в 1987 г. роста не наблюдалось. При этом картина по Брянской области не отличалась от общероссийской.

Показательны данные о детской смертности. Например, в Киевской области за те же годы она составляла 15,5 – 12,2 – 12,1 на тысячу новорожденных, в Гомельской области – 16,3 – 13,4 – 13,1. Объяснение такого снижения детской смертности может быть только одно – после аварии было усилено медицинское наблюдение, в связи с чем значительно снизилась частота желудочно-кишечных заболеваний – одной из важных причин детской смертности в возрасте до одного года.

Что касается динамики онкологических заболеваний в этих же регионах, то, например, в Могилевской области в 1985 г. было зарегистрировано 239 случаев на 100 тыс. населения, в 1986 г. – 258, в 1987 – 268 случаев. Налицо явный рост, но и в целом по стране наблюдалась такая же картина. Более того, и в некоторых развитых странах Запада уровень заболеваемости раком достиг уже 400 случаев на 100 тыс. населения. Поэтому однозначно объяснить рост количества онкологических заболеваний в нашей стране аварией на Чернобыльской АЭС невозможно.

В 1992 – 1995 гг. (по прошествии скрытого латентного периода) зарегистрировано удвоение частоты заболеваемости лейкозами среди "ликвидаторов" по сравнению с ожидаемым спонтанным уровнем, рост заболеваемости щитовидной железой (из 55 случаев 12 отнесены на счет радиации). Кроме того, среди "ликвидаторов" зарегистрирован существенный рост числа случаев инвалидности: с 1991 по 1994 гг. – в 6,6 раз, с 1994 по 1997 гг. – в 1,6 раза. Выявлен рост заболеваемости раком щитовидной железой среди детей: 170 случаев в Брянской области, из которых 55 отнесены к воздействию радиации.

Завершая анализ последствий радиационных аварий и, в частности, крупнейшей из них – Чернобыльской катастрофы, необходимо отметить, что после 1986 года ни на одной атомной электростанции в мире не случилось ни одной серьезной аварии, сопровождающейся значительным выбросом радионуклидов в окружающую среду. Можно сказать, что аварии, к сожалению неоднократно имевшие место на различных атомных электростанциях в период до аварии на ЧАЭС, были проявлением "болезни роста" атомной энергетики. Они многому научили и

заставили внести серьезные коррективы в требования, предъявляемые к конструкции и вообще к уровню безопасности ядерных энергетических установок.

Несмотря на то, что непосредственно после аварии на ЧАЭС некоторые проекты по введению в строй новых атомных электростанций были заморожены, к 2001 году доля АЭС в общем энергетическом балансе России возросла с 12% до 14,9%. Общее число нарушений в работе АЭС в России только за 2000 г. снизилось на 29%. Наблюдается резкое снижение количества внеплановых остановок реакторов. Поэтому имел место пуск Ростовской АЭС, имеются предложения и по другим проектам. Сохранились позиции ядерной энергетики и в других ведущих странах (во Франции и сегодня более 70% электроэнергии производится на АЭС).

Итак, после ряда крупных аварий атомные электростанции не отвергнуты человечеством, а ужесточены требования к их безопасности. Причиной такой стратегии является экономическая выгода АЭС и их экологическая чистота при нормальной, безопасной эксплуатации.

В завершение темы интересно привести слова генерального директора МАГАТЭ Ханса Бликса, сказанные вскорости после аварии на ЧАЭС:

"Однако является ли уникальным ущерб в более широком значении? Мощность блоков Чернобыльской АЭС составляет 4000 мегаватт (электрических). То же количество электроэнергии, произведенное с помощью угля, будет стоить определенного числа потерь среди шахтеров и транспортных рабочих, а загрязнение вызовет определенное число случаев смерти и нанесение ущерба лесам, озерам, земле и городам, а также станет причиной раковых заболеваний. И это случится не в результате аварии, а при нормальных рабочих условиях. Так что даже при нынешних напряженных обстоятельствах, особенно в такое время, мы должны сохранять в наших суждениях необходимое чувство пропорции".