

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского"**

**Научно-исследовательский институт химии**

**Учебное пособие**

**ПРОБЛЕМЫ ИСКУССТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ.  
АВАРИИ НА АТОМНЫХ РЕАКТОРАХ.  
ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ.**

**Составители: Сулейманов Е.В.  
Коршунов А.О.**

Подготовлено в рамках выполнения проекта «Мониторинг и прогнозирование состояния хранилища радиоактивных отходов Нижегородской области и разработка мер по предотвращению попадания радионуклидов в объекты окружающей природной среды» (соглашение №14.37.21.0812 от 31 августа 2012 г.)

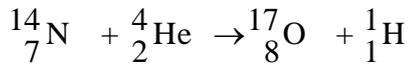
## Оглавление

Искусственная радиоактивность.....	3
История открытия .....	3
Механизм .....	3
Классификация ядерных реакций.....	3
Параметры ядерных реакций .....	4
Применение.....	5
Ядерный топливный цикл .....	6
Источники радиационного воздействия на человека .....	15
Медицинские источники воздействия .....	16
Атомная энергетика .....	18
Другие источники облучения.....	19
Ядерные испытания .....	21
Радиационные аварии .....	23
Аварии на ПО “Маяк”.....	23
Аварии на атомных станциях.....	26
Литература .....	41

# Искусственная радиоактивность

## История открытия

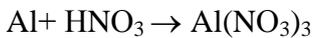
1919г., Э.Резерфорд



1934г., Ф.Жолио-Кюри, И.Кюри



выделение методом изотопных носителей:

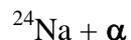
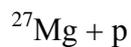
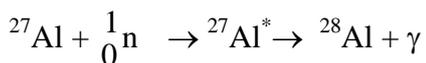


## Механизм

1 этап – поглощение частицы

2 этап – распад на продукты

Множественность путей распада:



В ходе ядерных реакций соблюдаются законы сохранения Z, A, E, I.

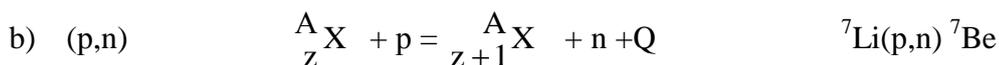
## Классификация ядерных реакций

1. По типам частиц, их вызывающим:

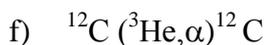
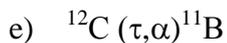
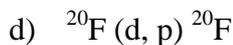
${}^1_0n$	${}^2_1\text{D}$	${}^0_{+1}e$ ( $\beta^+$ )
${}^1_1p$	${}^{3,4}_2\text{He}$ ( $\alpha$ )	$\pi^-$
$\gamma(h\nu)$	${}^0_{-1}e$ ( $\beta^-$ )	тяжелые ионы

a) Виды реакций вызываемых нейтронами:

$(n, \gamma), (n, p), (n, \alpha), (n, 2n)$



c) Ядерный фотоэффект  $(\gamma, n), (\gamma, -)$



2. По способам и средствам осуществления:

1) Лабораторные источники  ${}^1_0 n$  (Ra – Be)

2) Ускорители заряженных частиц

3) Ядерные реакторы

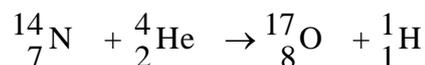
### Параметры ядерных реакций

1. Энергетический эффект (Q)

a)  $Q < 0$  (эндо) Есть порог  $E \text{ частицы} \geq P$

$W$  – кинетическая энергия системы после соударения

$E \text{ частицы} \geq |Q| (1 + m/M)$ , где  $m$  – масса частицы,  $M$  – масса атома мишени



18,005678      18,006958

$Q = -0,0013 \cdot 931 = 1,21 \text{ МэВ}$

$E \text{ частицы} \geq 1,21 (1 + 4/14) = 1,48 \text{ МэВ}$

b)  $Q > 0$  (экзо) реже ( $Q$  – мало)

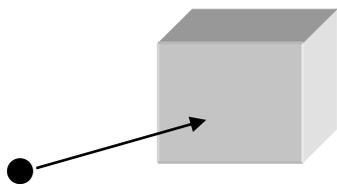
2. Электростатический барьер.

$$B = \frac{z_1 z_2 e^2}{z_1 + z_2}$$

$E \geq B$

Для реакции  $N + \alpha$        $B = 3,5 \text{ МэВ}$

### 3. Эффективное сечение.



- 1)  $x$  – толщина
- 2)  $N$  – число бомбардирующих частиц
- 3)  $R$  – частиц прореагировало
- 4)  $n$  – число атомов в мишени ( $\text{см}^{-1}$ )

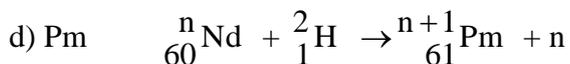
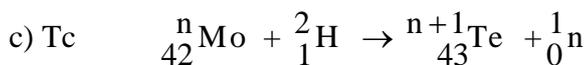
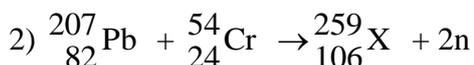
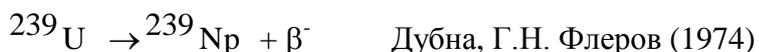
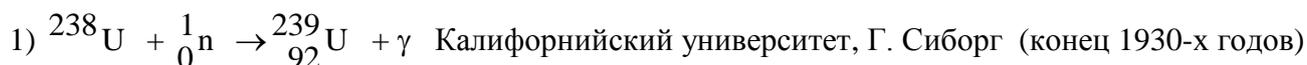
$$\delta = R / (N n x) = V / n x, \text{ где } V - \text{выход, \%}$$

Численно  $\delta$  - выход, приходящийся на 1 атом мишени

## Применение

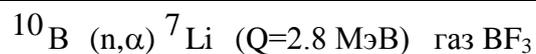
### 1. Синтез элементов

#### а) трансурановые элементы



### 2. Получение и детектирование:

Получение	$T_{1/2}$	Источник	Исх. энергия $E_n$ , МэВ	Выход $\eta$ , %
Ra + Be	1622 года	${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$	7	$\approx 12$



# Ядерный топливный цикл

## 1. Разведка запасов урана

### 2. Добыча

- 1) Рентабельность  $\omega(U) \geq 0,035$  мас. %
- 2) Запасы  $^{235}\text{U}$  - 30-40 лет;  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  - столетия
- 3) Масштабы добычи урана  
1970 год  $40 * 10^3$  тонн  
2000 год  $100 * 10^3$  тонн
- 4) Способы добычи
  - а) шахты
  - б) карьеры
- 5) Изоляция отходов (хвосты)

## 3. Концентрирование

- 1) до 65% мас. U
- 2) извлечение 85-95% мас. U
  - а) кислотное вскрытие ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  + окислители  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NaClO}_4$ ,  $\text{MnO}_2$ )  
$$\text{U}_3\text{O}_8 \rightarrow \text{UO}_2\text{SO}_4$$
  - б) Содовое вскрытие урановых руд 5-10% р-р  $\text{NaCO}_3$  70-90<sup>0</sup>C
    - $\text{Na}_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$  р-р
    - +  $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$  более селективен, менее агрессивен
  - в) Щелочное вскрытие моноцита (для получения Th)  $\text{Th}_3(\text{PO}_4)_4$

## 4. Изотопное обогащение

$^{235}\text{U}$  от 0,72%  $\rightarrow$  3 - 4%

- 1) Метод газовой диффузии через мембрану
- 2) Метод газового центрифугирования  $\text{UF}_6$   
концентрат ( $\text{U}_3\text{O}_8$ )  $\xrightarrow{\text{HF}}$   $\text{UF}_4$   $\xrightarrow{\text{BrF}_6}$   $\text{UF}_6$
- 3) Магнитная сепарация ионов

## 5. Изготовление ТВЭЛов

## 6. Ядерный реактор

Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется ядерным (или атомным) реактором.

Зона ядерной реакции	Парогенератор	Турбина	Генератор	Электроэнергия
----------------------	---------------	---------	-----------	----------------

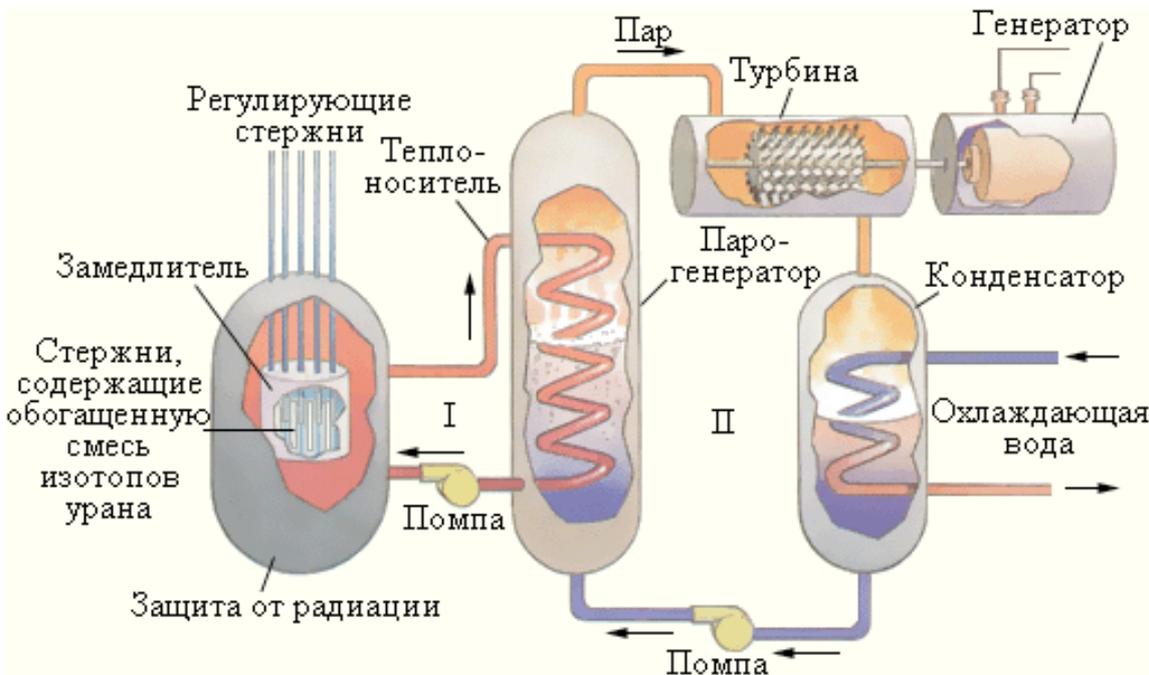
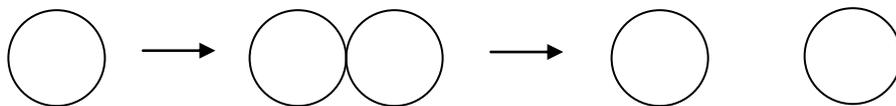


Схема устройства ядерного реактора на медленных нейтронах

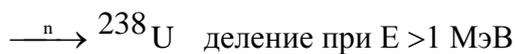
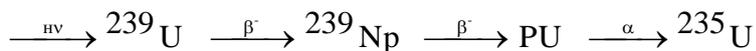
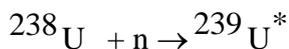
### Цепная реакция деления

способность к делению при  $Z=120$ ,  $A=300$  - ядро свободно делится  $\sim \frac{Z^2}{A}$  - параметр деления



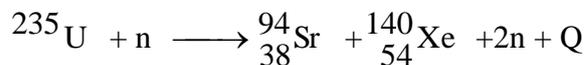
При  $A=100$  деление ядер уже выгодно, но велика энергия активации.

$${}^{238}\text{U} \quad \frac{Z^2}{A} = 35,6 \quad E_{\text{акт}} \sim 6 \text{ МэВ}$$

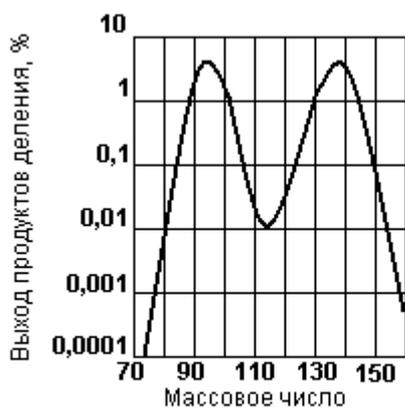




а) Энергия деления (Q)



б) Продукты деления



Выход продуктов деления  $\text{U}^{235}$  на тепловых нейтронах.

X	M, а.е.м.	X	M, а.е.м.
${}^{235}\text{U}$	235,11240	<b>Sr</b>	<b>93,93796</b>
$1_n$	1,00893	<b>Xe</b>	<b>139,92847</b>
		<b>2n</b>	<b>2*1,00893</b>
	$\Sigma=236,12133$		$\Sigma=235,88429$
			$\Delta m = 0.23704$
			$Q = 0.23*704*931=220 \text{ МэВ}$



## Типы реакторов

### а) Топливо

Ядерные параметры некоторых изотопов (для максвелловского распределения тепловых нейтронов  $t = 20^{\circ}\text{C}$ )

Изотоп	Эффективное сечение, <i>барн</i>			Нейтронный выход на одно деление, $\nu$	Период полураспада $T$ , лет
	деления, $\sigma_f$	радиационного захвата, $\sigma_c$	поглощения $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$		
$^{232}\text{Th}$	-	7	7	-	$1,39 \cdot 10^{10}$
$^{233}\text{U}$	<b>530</b>	<b>61</b>	<b>591</b>	<b>2,55</b>	<b><math>1,62 \cdot 10^5</math></b>
$^{234}\text{U}$	<0,6	92	92	-	$2,52 \cdot 10^5$
$^{235}\text{U}$	<b>576</b>	<b>104</b>	<b>680</b>	<b>2,47</b>	<b><math>7,1 \cdot 10^8</math></b>
$^{236}\text{U}$	-	6	6	-	$2,4 \cdot 10^7$
$^{238}\text{U}$	$<10^{-3}$	2,75	2,75	-	$4,5 \cdot 10^9$
$^{239}\text{Pu}$	<b>770</b>	<b>338</b>	<b>1180</b>	<b>2,91</b>	<b>24400</b>
$^{240}\text{Pu}$	<40	510	5810	-	6600
$^{241}\text{Pu}$	1110	380	1480	2,95	12,9
$^{242}\text{Pu}$	-	30	30	-	$5 \cdot 10^5$

Каждый ядерный реактор состоит из следующих основных элементов: топлива, замедлителя нейтронов и теплоносителя. Используя различные виды этих элементов, можно создать огромное многообразие типов реакторов. Данные для таких комбинаций приведены в табл. Разумеется, многие комбинации не осуществимы по различным причинам, однако возможных типов все-таки достаточно много и отыскание наиболее экономичных из них является одной из задач опытного реакторостроения.

b) Типы реакторов

- на медленных n      Топливо  $^{235}\text{U}$  ,  $^{239}\text{Pu}$  ,  $^{233}\text{U}$
- на быстрых n       $^{238}\text{U}$  (природная смесь)
- реакторы – накопители    а)  $^{232}\text{Th}$  (n, $\gamma$ )  $^{233}\text{Th}$  (-, $\beta^-$ )  $^{233}\text{Pa}$  (-, $\beta^-$ )  $^{233}\text{U}$   
    б)  $^{238}\text{U}$  (n, $\gamma$ )  $^{239}\text{U}$  (-, $\beta^-$ )  $^{239}\text{Np}$  (-, $\beta^-$ )  $^{239}\text{Pu}$

c) Типы основных элементов ядерных реакторов.

Топливо	Форма топлива	Замедлитель	Теплоноситель	Конструкция
1. Природный уран	1. Металлические стержни	1. Нет	1. Газ	1. Однократное сжигание
2. Природный уран, обогащенный $^{235}\text{U}$	2. Компактные окислы	2. Графит	2. Вода (обычная или тяжелая)	2. С зоной воспроизводства
3. $^{233}\text{U}$	3. Раствор металла или соединения в замедлителе или в другом веществе	3. Бериллий	3. Расплавленные металлы, соли	3. Без зоны воспроизводства
4. $^{239}\text{Pu}$	4. Суспензия	4. Окись бериллия	4. Жидкое топливо	4. Гетерогенный (топливо и замедлитель не смешаны)
		5. Обычная вода		5. Гомогенный (топливо и замедлитель смешаны)
		6. Тяжелая вода		
		7. Смесь обычной и тяжелой воды		
		8. Органические вещества		

**Цикл реактора**

загрузка → обновление ТВЭЛов → полная разгрузка

- 1) Выгорание
- 2) Накопление поглотителей
- 3) Физические изменения ТВЭЛов

**7. Безопасность атомного реактора**

Для обеспечения безопасности реактора в аварийных ситуациях требуется:

- прекратить реакцию деления;

- обеспечить охлаждение заглушенной активной зоны (после прекращения реакции деления в реакторе имеется остаточное тепловыделение);

- ограничить распространение радиоактивности.

Для этих целей предусматривается аварийная защита реактора, система аварийного охлаждения реактора (САОР), локализирующая система и средства ослабления выхода радиоактивности в окружающую среду (реактор имеет до пяти защитных оболочек и устройства для направленного выброса радиоактивности через барботеры и фильтры).

Кроме того, работа реакторов основана на принципе дублирования, если одна система отказывает, вторая берет на себя её функции.

Имевшие место до настоящего времени аварийные ситуации на атомных реакторах были вызваны в основном следующими причинами:

- остановкой циркулярных насосов;
- полной потерей внешнего электроснабжения;
- разрывом петли контура теплоносителя;
- разрывом сетевого трубопровода.

В некоторых случаях это приводило к прекращению теплоотвода в сеть и разрушению (расплавлению) топливных урановых кассет, составленных из ТВЭЛов.

Основными мотивами возникновения этих аварийных ситуаций обычно являлись:

- несовершенство проектов,
- недостаточный уровень подготовленности обслуживающего персонала,
- низкое качество строительных работ и оборудования,
- форсированные темпы наладки,
- отсутствие надежных средств диагностики состояния металла,
- сварных соединений реактора и оборудования,
- отсутствие надежного электронного и электротехнического оборудования для контроля работы реакторов.

В последнее время произошел перелом в рассмотренных проблемах в сторону их коренного улучшения. По-мнению атомщиков, сейчас можно создать реактор, безопасность которого зависела бы не столько от своевременного активного вмешательства извне, сколько от внутренних, пассивных характеристик самой конструкции.

## 8. Обращение с отработанным ядерным топливом

### Состав отработанного топлива реакторов ВВЭР

Параметр	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
Среднее количество выгружаемого топлива в год, т/ГВт	35	25
Средняя глубина выгорания, ГВт*сут/т	28	41
Обогащение $^{235}\text{U}$ , %:		
начальное	3,6	3,3-4,4
конечное	до 0,7	до 1,3
Удельная активность топлива (выдержка три года), Бк/т	$(2-2,25) 10^{16}$	$3 \cdot 10^{16}$
Содержание нуклоидов (выдержка три года), кг/т:		
U	960	947
Pu	9-9,5	9,9
Np	0,5-0,6	0,7
Am	0,15	0,2
Cm	0,04	0,06
Pd	0,7-1,4	0,8-1,5
Tc	0,8-0,9	0,9-1,0
$^{90}\text{Sr}$ , Бк/т	$\sim 2,4 \cdot 10^5$	$\sim 3,5 \cdot 10^{15}$
$^{137}\text{Cs}$	$\sim 3,0 \cdot 10^{15}$	$\sim 4,8 \cdot 10^{15}$
Общее содержание продуктов деления, кг/т	$\sim 30$	$\sim 42$
Остаточное тепловыделение при выдержке, кВт/т:		
один год	11	15
три года	2,8	4,2

### Стадии обращения с отработанным топливом

1. Выдерживание ТВЭЛов в бассейне до двух лет при АЭС

- снятие основной радиации
- остывание (спад выделения энергии за счет распада продуктов)

$$600 \text{ кВт/т} \xrightarrow{10 \text{ дней}} 10 \text{ кВт/т}$$

2. Хранение (10-50 лет, либо до  $\infty$ ) вне АЭС

3. Переработка

- резка
- растворение

4. Разделение

- отделение осколочных элементов (отходы и извлечение полезных изотопов)
- регенерация U
- выделение  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$

Пример: регенерация U (Пурекс-процесс)

- $\text{UO}_2 (\text{NO}_3)_2 + 2(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}$  (ТБФ в керосине)
- Резкстракция водой

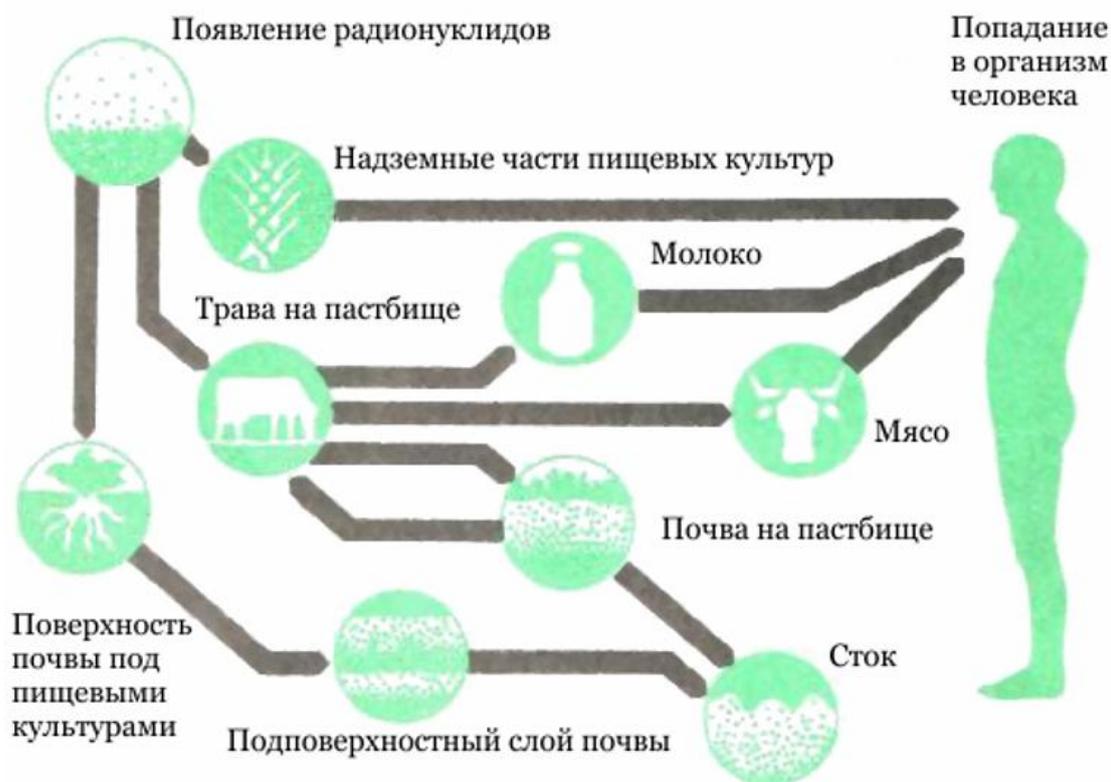


## Источники радиационного воздействия на человека

В отличие от естественных источников радиации, искусственная радиоактивность возникла и распространяется исключительно силами людей.

Основные техногенные радиоактивные источники:

- ядерное оружие,
- промышленные отходы,
- АЭС,
- рентгеновская техника и медицинская аппаратура лучевой терапии,
- предметы старины, вывезенные из «запретных» зон после аварии Чернобыльской АЭС,
- производства, связанные с использованием радиоактивных изотопов
- транспортные и научно-исследовательские ядерно-энергетические установки
- специальные военные объекты
- некоторые драгоценные камни.



Внешнее облучение организма производят искусственные излучатели, находящиеся в воздухе, в земле, стенах помещения или используемые в производственных, научных, медицинских и бытовых целях.

Внутреннее облучение зависит от радиоактивных веществ, попадающих внутрь организма человека с вдыхаемым воздухом, продуктами питания, водой. Вдыхаемые с аэрозолями радиоактивные газы попадают в дыхательную систему. Из нее они проникают в кровь, лимфу, желудочно-кишечный тракт и разносятся по всему организму,

оседая в различных органах и тканях: костях, печени, селезенке, щитовидной железе и др. При вдыхании воздуха через нос задерживается до 83% радиоактивной пыли.

Второй путь попадания радиоактивных веществ - пищеварительный тракт. Из него эти вещества всасываются в кровь и попадают в различные органы человека. Поступление радиоактивных веществ в организм человека через кожу возможно при открытых ранах и повреждениях.

За последние десятилетия человек усиленно занимался проблемами ядерной физики. Он создал сотни искусственных радионуклидов, научился использовать возможности атома в самых различных отраслях - в медицине, при производстве электро- и тепловой энергии, множества приборов, при поиске полезных ископаемых и в военном деле. Все это, естественно, приводит к дополнительному облучению людей.

В большинстве случаев дозы невелики, но иногда техногенные источники оказываются во много тысяч раз интенсивнее, чем естественные.

### **Медицинские источники воздействия**

Самое первое применение источники излучения нашли в медицинской практике. И сейчас это направление успешно развивается, принося огромную пользу людям в диагностике и лечении многих заболеваний.

В настоящее время основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации, вносят медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением облучения.

Согласно последним оценкам НКДАР ООН, медицинское облучение вносит самый большой и возрастающий вклад в антропогенное облучение.

Средние уровни облучения, обусловленные медицинским диагностическим использованием источников излучения, в развитых странах приблизительно эквивалентны 50% глобального среднего уровня естественного облучения.

0,5—1 мбэр	ежедневный 3-часовой просмотр ТВ в течение года,
150—200 мбэр	годовая доза за счет естественного радиационного фона,
370 мбэр	флюорография (одна процедура),
3000 мбэр	однократное облучение при рентгенографии зубов,
30000 мбэр	рентгеноскопия желудка (одна процедура),
30000 мбэр	обслуживание радоновых ванн,
8500 мбэр	радиофармацевтическая процедура.

Индивидуальные дозы, получаемые разными пациентами при радиационной терапии, сильно варьируют, превышая во много раз среднегодовые дозы от естественных источников. Однако эти уровни следует считать приемлемыми, поскольку воздействие направлено на исцеление больного от заболеваний, угрожающих его жизни.

Так известно, что только в нашей стране живут около двух миллионов человек, излеченных от рака благодаря радиационной терапии. Успешное лечение многих болезней обязано своим результатом своевременной радиационной диагностике.

Совершенствование методологии и технических средств уже привело к снижению радиационного воздействия при диагностике в десятки раз (при некоторых обследованиях дозы менее 0,1 мЗв), сохраняя при этом высокую эффективность.



Со времени открытия рентгеновских лучей самым значительным достижением в разработке методов рентгенодиагностики стала компьютерная томография. Этот метод позволяет во много раз уменьшить дозы облучения людей по сравнению с обычными методами.

Широкое применение в лечении и установлении диагноза находит радиоизотопная медицина. С помощью радиоактивных изотопов, вводимых в организм человека, определяется место локализации и размеры опухоли или же проверяется функция органа. Методы лучевой терапии используются для лечения злокачественных опухолей.

В годовой коллективной дозе облучения населения Российской Федерации на долю медицинского облучения приходится около 30%. С учетом массового характера профилактических медицинских рентгенологических процедур НРБ-99/2009 установлен предел годовой дозы облучения, равный 1 мЗв (0,1 бэр). Его превышение допускается лишь в условиях неблагоприятной эпидемиологической обстановки, требующей проведения дополнительных исследований или вынужденного использования методов с большим дозообразованием.

## Атомная энергетика

При ядерных реакциях, происходящих в активной зоне реактора, выделяются радиоактивные газы: ксенон  $^{133}\text{Xe}$  ( $T_{1/2} = 5$  сут), криптон  $^{85}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 10$  лет), радон  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3.8$  сут) и другие. Эти газы поступают в фильтр-адсорбер, где теряют свою активность и только после этого выбрасываются в атмосферу. В окружающую среду поступает также некоторое количество изотопа углерода  $^{14}\text{C}$  и трития  $^3\text{H}$ .

Другой источник радионуклидов, попадающих в окружающую среду от функционирующих АЭС, – дебалансная и техническая вода. ТВЭЛы, находящиеся в активной зоне реактора, часто деформируются, и продукты деления попадают в теплоноситель.

Дополнительным источником радиации в теплоносителе являются РН, образующиеся в результате облучения материалов реактора нейтронами.

Поэтому периодически вода первого контура обновляется и очищается от РН.

Наносят ли вред окружающей среде атомные электростанции? Опыт эксплуатации отечественных АЭС показал, что при правильном техническом обслуживании и налаженном мониторинге окружающей среды они практически безопасны. Радиоактивное воздействие на биосферу этих предприятий не превышает 2% от местного радиационного фона.

Выбросы АЭС на 99.9% состоят из инертных радиоактивных газов (ИРГ). В процессе деления образуется около 20 радиоизотопов криптона и ксенона, из которых основной вклад в ИРГ вносят изотопы криптона  $^{88}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 2.8$  ч) и ксенона  $^{133}\text{Xe}$  (5.3 сут),  $^{135}\text{Xe}$  (9.2 ч) дающие различный вклад, в зависимости от типа реактора.

На долю всех оставшихся радионуклидов (в основном это  $^{131}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^3\text{H}$ ) приходится менее одного процента. Еще в меньшем количестве наблюдаются выбросы небольшого количества продуктов коррозии реактора и первого контура и осколков деления ядер урана  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mg}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Cs}$ .

Для Российских АЭС в среднем в численном выражении это составляет на 1 ГВт·ч выработанной электроэнергии  $5 \cdot 10^{12}$  Бк для ИРГ, и  $4 \cdot 10^7$  Бк для суммы всех остальных радионуклидов.

Большинство радионуклидов газоаэрозольных выбросов, включая ИРГ, имеют довольно небольшой период полураспада и без ущерба для окружающей среды распадаются, не успевая поступить в атмосферу. Тем не менее, для обеспечения безопасности по отношению к этим



радионуклидам на АЭС, как правило, предусмотрена специальная система задержки газообразных выбросов в атмосферу.

### **Другие источники облучения**

- сжигание угля на тепловых электростанциях;
- курение.
- потребительские товары (радиолюминесцентные, электронные приборы, цветные телевизоры и др.);

### **ТЭЦ**

Уголь, подобно большинству других природных материалов, содержит ничтожные количества первичных радионуклидов. При сжигании угля большая часть его минеральных компонент спекается в шлак или золу, куда в основном и попадают радиоактивные вещества.

Мировой выброс урана и тория от сгорания угля составляет около 40000 т ежегодно. ТЭЦ на угле России выбрасывают радионуклиды, превышающие 1000 т. в год по урану. Для сравнения предприятиями Росатома России в 2004 г. в водные объекты сброшено около 7 т урана, выбросу в атмосферу – 2,9 т.

ТЭЦ на угле в течение года выделяется больше радиоактивности, чем АЭС, а в золе содержится столько урана-235, что достаточно для изготовления двух атомных бомб. Экспериментально установлено, что индивидуальные дозы облучения в районе расположения ТЭЦ мощностью 1000 МВт превышают аналогичную дозу вблизи АЭС в 5-10 раз.

Годовая доза в районе вокруг ТЭС на угле составляет 0,5—5 мбэр/год.

### **Курение**

В процессе курения на конце сигареты в месте образования белого пепла заметен голубоватый дымок. Это горит радиоактивный цезий. Курение усугубляет действие радиации, что, естественно, отражается на продолжительности жизни курящих.

В заключение следует отметить, что источником облучения являются и многие общепотребительные предметы, содержащие радиоактивные вещества.

Едва ли не самым распространенным источником облучения являются часы со светящимся циферблатом. Они дают годовую дозу, в 4 раза превышающую ту, что обусловлена утечками на АЭС. Такую же коллективную эффективную эквивалентную дозу получают работники предприятий атомной промышленности и экипажи авиалайнеров (рис. 4.18).

Обычно при изготовлении таких часов используют радий, что приводит к облучению всего организма, хотя на расстоянии 1 м от циферблата излучение в 10 000 раз слабее, чем на расстоянии 1 см. Сейчас пытаются заменить радий тритием или прометием-147, которые

приводят к существенно меньшему облучению. К концу 70-х годов у населения Великобритании все еще находились в пользовании 800 000 часов с циферблатом, содержащим радий. В 1967 году были опубликованы соответствующие международные стандарты, и тем не менее часы, выпущенные ранее, все еще находятся в употреблении. Радиоактивные изотопы используются также в светящихся указателях входа-выхода, в компасах, телефонных дисках, прицелах и т.п.

В США продаются антистатические щетки для удаления пыли с пластинок и фотопринадлежностей, действие которых основано на испускании  $\alpha$ -частиц. В 1975 году Национальный совет Великобритании по радиационной защите сообщил, что при некоторых обстоятельствах они могут оказаться небезвредными.

Принцип действия многих детекторов дыма также основан на использовании  $\alpha$ -излучения. К концу 1980 года в США было установлено более 26 млн. таких детекторов, содержащих америций-241, однако при правильной эксплуатации они должны давать ничтожную дозу облучения. Радионуклиды применяют в дросселях флуоресцентных светильников и в других электроприборах и устройствах. В середине 70-х годов в одной только Западной Германии в эксплуатации находилось почти 100 млн. таких приборов, которые, впрочем, не приводят к заметному облучению, по крайней мере если они исправны.

При изготовлении особо тонких оптических линз применяется торий, который может привести к существенному облучению хрусталика глаза. Для придания блеска искусственным зубам широко используют уран, который может служить источником облучения тканей полости рта. Национальный совет Великобритании по радиационной защите рекомендовал прекратить использование урана для этой цели, а в США и ФРГ, где производится большая часть зубного фарфора, была установлена его предельная концентрация. Радиоактивные вещества в этих случаях применяют с чисто эстетической целью, поэтому облучение здесь совершенно неоправданно.

Источниками рентгеновского излучения являются цветные телевизоры, однако при правильной настройке и эксплуатации дозы облучения от современных их моделей ничтожны. Рентгеновские аппараты для проверки багажа пассажиров в аэропортах также практически не вызывают облучения авиапассажиров. Тщательные обследования, проведенные в начале 70-х годов, показали, что во многих школах США и Канады использовались рентгеновские трубки, которые могли служить довольно мощным источником радиации.

## Ядерные испытания

Основными источниками радиоактивного загрязнения природной среды являются производство и испытания ядерного оружия. До 2000 г. в мире было проведено около 2 тыс. испытательных взрывов. Из них на долю США приходится 50,5% взрывов, СССР, России – 35,1%, Франции – 10,1%, Англии – 2,3%, Китая – 1,8% взрывов. Значительная часть этих испытаний сопровождалась существенными поступлениями в окружающую среду радиоактивных веществ.

При ядерных взрывах образуются две группы радиоактивных изотопов

I - изотопы с коротким  $T_{1/2}$  (йод-131, барий-140 и др.). Они создают наибольшую опасность в ближайший период времени после взрыва и в непосредственной близости от места ядерного взрыва, так как за ограниченное время своего существования не успевают далеко распространиться.



II - изотопы с  $T_{1/2}$  от нескольких десятилетий до нескольких тысяч лет. Это, в частности, изотоп углерода – углерод-14 с периодом полураспада свыше 5 тыс. лет. Вместе с пищей углерод-14 попадает в животные и растительные организмы и постепенно накапливается в них. В результате внутреннее облучение возрастает, что чревато генетическими мутациями разного рода, в том числе и вредными, которые могут проявиться через несколько поколений.

К числу наиболее опасных относится стронций-90.  $T_{1/2}$  равен 28 годам. По своим химическим свойствам стронций близок к кальцию и поэтому замещает его в биологических процессах обмена веществ.

Близок к стронцию-90 по основным свойствам цезий-137. Его накопление в организме сопровождается тяжелыми последствиями – формированием наследственных дефектов, проявляющихся у последующих поколений.

В результате всех проведенных ядерных взрывов в биосферу попало огромное количество радиоактивных веществ, вследствие чего радиоактивный фон вырос в среднем на 3%.

Этот новый уровень фоновой радиоактивности не представляет какой-либо опасности для живых организмов. Но в ряде регионов земного шара накопление антропогенных

радиоактивных веществ может существенно превосходить средние величины и достигать критических размеров.

При наземных или воздушных ядерных взрывах радиоактивные вещества поднимаются высоко в воздух. Примерно 35-40% этих веществ попадает в тропосферу. Их полное удаление осуществляется за период от 1 до 3 месяцев. Около 60% продуктов атомных взрывов попадает в стратосферу. Их удаление занимает до 10 лет.

Поэтому как бы далеко от мест ядерных взрывов ни находилась территория, она не будет защищена от радиоактивного загрязнения.

В результате испытаний ядерного оружия в окружающую среду выброшено около 30 млн. кюри  $^{137}\text{Cs}$  и 20 млн. кюри  $^{90}\text{Sr}$ . В шестидесятые годы в биосферу попало около 5 т  $^{239}\text{Pu}$ .

Все это привело к мощной вспышке глобального радиационного фона. В настоящее время большая часть радионуклидов, выброшенных в атмосферу в результате ядерных испытаний, осела на поверхность Земли и смыта в океаны.

# Радиационные аварии

## Аварии на ПО «Маяк»

Самое крупное из известных сейчас скопление радионуклидов находится на Урале, в 70-и км к северо-западу от Челябинска на территории производственного объединения «Маяк».

ПО «Маяк» было создано на базе промышленного комплекса, построенного в 1945—1949 гг. Здесь в 1948 г. был пущен первый в стране промышленный атомный реактор, в 1949 г. — первый радиохимический завод, изготовили первые образцы атомного оружия.

В настоящее время на территории области расположены три из десяти закрытых административно-территориальных образований Госкорпорации «Росатом», в которых сосредоточены производства, составляющие полный ядерный цикл.

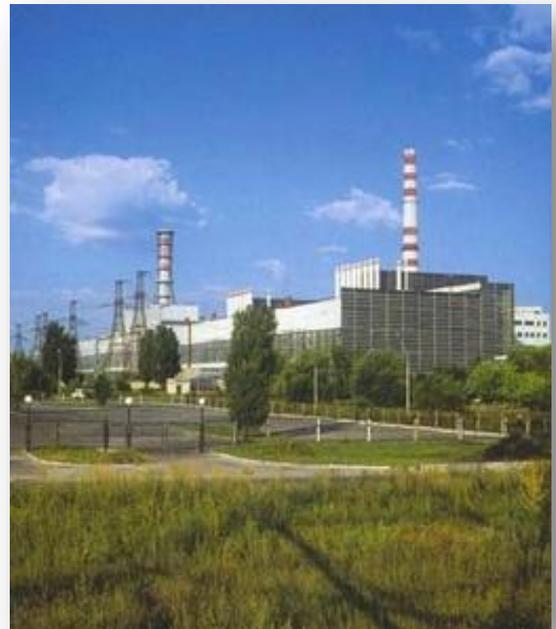
Многолетняя деятельность ПО «Маяк» сопровождалась беспрецедентными в мировой практике радиационными инцидентами и авариями, что обусловило радиоактивное загрязнение части территорий не только Челябинской, но также Свердловской и Курганской областей.

В результате сброса отходов радиохимического производства непосредственно в открытую речную систему Обского бассейна через р. Теча (1949—1951 гг.), а также вследствие аварий 1957 и 1967 гг. в окружающую среду было выброшено 23 млн. Ки активности. Радиоактивное загрязнение охватило территорию в 25 тыс. км<sup>2</sup> с населением более 500 тыс. человек.

В 1957 г. в результате теплового взрыва емкости с РАО произошел мощный выброс радионуклидов (церий-144, цирконий-95, стронций-90, цезий-137 и др.) с суммарной активностью 2 млн. Ки.

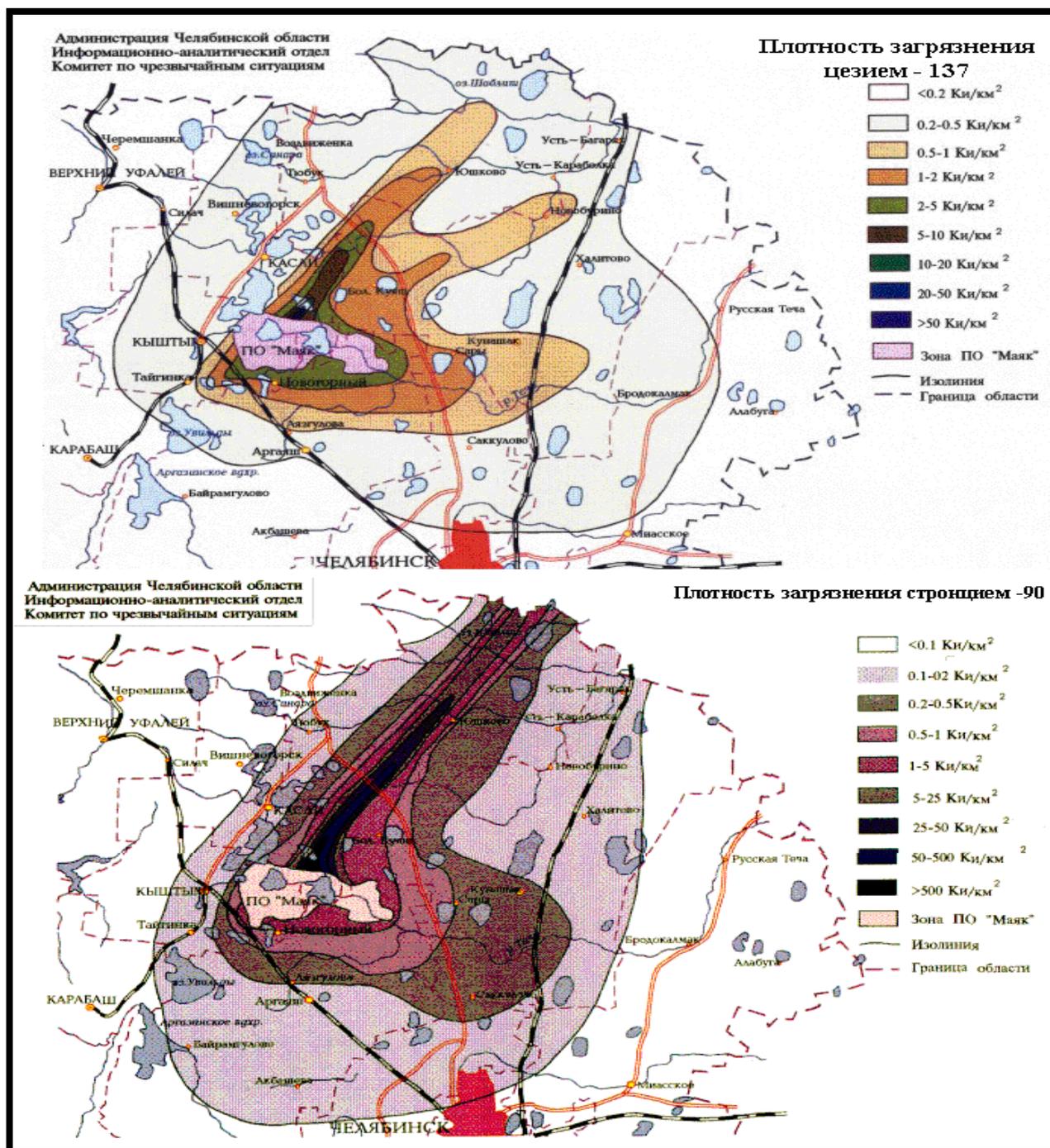
Возник «Восточно-Уральский радиоактивный след» длиной до 110 км и шириной до 35—50 км. Общая площадь загрязненной территории, ограниченной изолинией 0,1 Ки/км<sup>2</sup> по стронцию-90, составила 23 тыс. км<sup>2</sup>. Около 10 тыс. человек из 19 населенных пунктов в зоне наиболее сильного загрязнения с большой задержкой были эвакуированы и переселены.

Зона радиационного загрязнения на Южном Урале расширилась вследствие ветрового разноса радиоактивных аэрозолей с пересохшей части технологического водоема № 9 ПО «Маяк» (оз. Карачай) в 1967 г. В настоящее время в этом резервуаре на около 120 млн. Ки



активности, преимущественно за счет стронция-90 и цезия-137. Под озером сформировалась линза загрязненных подземных вод объемом около 4 млн. м<sup>3</sup> и площадью 10 км<sup>2</sup>. Существует опасность проникновения загрязненных вод в другие водоносные горизонты и выноса радионуклидов в речную сеть.

Зоны загрязнения с активностью по стронцию-90: 1 - более 50 Ки/км<sup>2</sup>; 2 - более 5 Ки/км<sup>2</sup>;



3 - более 0,1 Ки/км<sup>2</sup>; 4 - более 0,02 Ки/км<sup>2</sup> через год после аварии

В результате проведенных исследований было установлено, что радиационному воздействию подверглось около 28 тыс. человек. Из них более половины (73%) получили

эффективные эквивалентные дозы менее 20 бэр. Около 12% получили дозы более 50 бэр и примерно 8% - более 100 бэр.

В отдельных случаях жители могли получить дозу 300 – 400 бэр. Всего было зарегистрировано и подтверждено 64 случая заболеваний хронической лучевой болезнью

Суммарная активность твердых и жидких РАО, накопленных в ходе деятельности ПО «Маяк», достигает 1 млрд. Ки. Сосредоточение огромного количества РАО, загрязнение водоемов, возможность проникновения загрязненных подземных вод в открытую гидрографическую систему Обского бассейна создают исключительно высокую степень радиационного риска на Южном Урале.

Росатом сообщает, что несмотря на присутствие ядерного объекта, радиационный фон в ближайшем населённом пункте, г. Озёрске, в 5 раз ниже, чем, например, в Челябинске, Екатеринбурге и Санкт-Петербурге.

## Аварии на атомных станциях

Мелких и средних аварий у более чем 400 действующих в мире реакторов было много. Самые крупные аварии - в Уиндскейле в 1957 г. (Великобритания) и на реакторе Тримайл-Айленд (США) в 1979.

В случае аварии на Тримайл-Айленд за пределы корпуса реактора вышло 25% радиоактивного йода, 53% цезия, но в окружающую среду за пределы внешних защитных сооружений реактора выдвинулось относительно небольшое количество радиоактивных продуктов.

Крупномасштабные радиационные загрязнения и облучение населения происходило в начале деятельности предприятий ядерного топливного цикла в США (Хендфордский ядерный комплекс, 1945--1956 гг.) и в СССР (Южный Урал, ПО «Маяк», 1946--56).

Преодоление последствий даже небольшой по масштабам радиационной аварии отнимает огромные силы и средства.

На радиохимических заводах в Красноярском крае, Челябинской и Томской областях накоплено отходов общей активностью свыше 2 млрд. Ки. Отработав ресурсный срок, ждут утилизации около 100 многоцелевых АПЛ, причем более половины стоят несколько лет с невыгруженным ОЯТ. Выведены из эксплуатации и ждут демонтажа атомные ледоколы "Ленин" и "Сибирь", атомные реакторы на Белоярской и Нововоронежском АЭС, а на подходе - энергоблоки других российских АЭС. Не разобраны и не утилизированы километровые газодиффузионные корпуса станций.

Гонка вооружений и несовершенство технологии оставили наследство, знакомство с которым заставляет думать о том, как очистить территорию страны от РАО прошлых лет. В 1959-1992 гг. наша супердержава сбросила в северные моря ЖРО суммарной активностью около 20,6 тыс. Ки и ТРО - суммарной активностью около 2,3 млн. Ки. В мелководных заливах Новой Земли и Карском море по данным Комиссии при Администрации Президента России захоронено: 5 объектов с 7 реакторами с невыгруженным ОЯТ, представляющих наибольшую опасность по составу продуктов деления и актиноидов; 5 объектов с 10 реакторами с выгруженным ОЯТ. Это в основном АПЛ, отсеки подводных лодок, 3 реактора с атомохода "Ленин" с экранной сборкой ОК-150, из которой не удалось извлечь 125 облученных ТВЭЛов. Общая активность затопленных РАО в арктические моря на момент затопления оценивается в 2,5 млн.Ки.

## Авария на Чернобыльской АЭС

### Характеристика АЭС

Чернобыльская АЭС расположена на территории Украины в 3 км от города Припять, в 18 км от города Чернобыль, в 16 км от границы с Белоруссией и в 110 км от Киева.

Ко времени аварии на ЧАЭС действовали четыре энергоблока на базе реакторов РБМК-1000 (реактор большой мощности канального типа) электрической мощностью 1000 МВт (тепловая мощность — 3200 МВт) каждый. Ещё два аналогичных энергоблока строились. ЧАЭС производила примерно десятую долю электроэнергии УССР.



### Авария

01:23 26 апреля 1986 года на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС произошёл взрыв, который полностью разрушил реактор.

Разрушающая фаза аварии началась с того, что от перегрева ядерного топлива разрушились тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) в определенной области в нижней части активной зоны реактора. Это привело к разрушению оболочек нескольких каналов, в которых находятся эти ТВЭЛы, и пар под давлением около 7 МПа получил выход в реакторное

пространство, в котором нормально поддерживается атмосферное давление. Давление в реакторном пространстве резко возросло, что вызвало дальнейшие разрушения уже реактора в целом, в частности отрыв верхней защитной плиты со всеми закрепленными в ней каналами. Герметичность корпуса реактора и вместе с ним контура циркуляции теплоносителя была нарушена, и произошло обезвоживание активной зоны реактора. При наличии положительного парового эффекта реактивности, это привело к разгону реактора на мгновенных нейтронах (аналог ядерного взрыва).

Здание энергоблока частично обрушилось, при этом погибли два человека. В различных помещениях и на крыше начался пожар. Впоследствии остатки активной зоны расплавились, смесь из расплавленного металла, песка, бетона и фрагментов топлива растеклась по подреакторным помещениям. В результате аварии произошёл выброс в окружающую среду радиоактивных веществ, в том числе изотопов урана, плутония, йода-131 ( $T_{1/2}$  — 8 дней), цезия-134 ( $T_{1/2}$  — 2 года), цезия-137 ( $T_{1/2}$  — 17-30 лет), стронция-90 ( $T_{1/2}$  — 28 лет).



### Причины аварии

Единой версии причин аварии, с которой было бы согласно всё экспертное сообщество специалистов в области реакторной физики и техники, не существует. Существуют две официальными причины чернобыльской аварии.

Государственная комиссия, сформированная в СССР для расследования причин катастрофы, возложила основную ответственность за неё на оперативный персонал и руководство ЧАЭС.

МАГАТЭ создало свою консультативную группу, известную как Консультативный комитет по вопросам ядерной безопасности, который на основании материалов, предоставленных советской стороной, и устных высказываний специалистов в своём отчёте 1986 года, также в целом поддержал эту точку зрения.

Утверждалось, что авария явилась следствием маловероятного совпадения ряда нарушений правил и регламентов эксплуатационным персоналом.

Грубые нарушения правил эксплуатации АЭС, совершённые её персоналом заключаются в следующем:

- проведение эксперимента «любой ценой», несмотря на изменение состояния реактора;
- вывод из работы исправных технологических защит, которые просто остановили бы реактор ещё до того, как он попал в опасный режим;
- замалчивание масштаба аварии в первые дни руководством ЧАЭС.

Однако в 1991 году комиссия Госатомнадзора СССР заново рассмотрела этот вопрос и пришла к заключению, что «начавшаяся из-за действий оперативного персонала Чернобыльская авария приобрела неадекватные им катастрофические масштабы вследствие неудовлетворительной конструкции реактора». Комиссия проанализировала нормативные документы и не подтвердила некоторые обвинения в адрес персонала станции.

В 1993 году INSAG опубликовал дополнительный отчёт. Согласно отчёту, наиболее вероятной причиной аварии являлись ошибки проекта и конструкции реактора, эти конструктивные особенности оказали основное влияние на ход аварии и её последствия.

Основными факторами возникновения аварии:

- реактор не соответствовал нормам безопасности и имел опасные конструктивные особенности;
- низкое качество регламента эксплуатации в части обеспечения безопасности;
- неэффективность режима регулирования и надзора за безопасностью в ядерной энергетике, общая недостаточность культуры безопасности в ядерных вопросах как на национальном, так и на местном уровне;
- отсутствовал эффективный обмен информацией по безопасности как между операторами, так и между операторами и проектировщиками, персонал не обладал достаточным пониманием особенностей станции, влияющих на безопасность;
- персонал допустил ряд ошибок и нарушил существующие инструкции и программу испытаний.

### **Недостатки реактора**

Реактор РБМК-1000 обладал рядом конструктивных недостатков и по состоянию на апрель 1986 года имел десятки нарушений и отступлений от действующих правил ядерной безопасности. Два из этих недостатков имели непосредственное отношение к причинам аварии:

- Положительный паровой коэффициент реактивности
- «Концевой эффект»

**Положительный паровой коэффициент реактивности.** Реактор был спроектирован таким образом, что паровой коэффициент реактивности был положительным, то есть повышение интенсивности парообразования способствовало высвобождению положительной реактивности. В тех условиях, в которых работал энергоблок во время эксперимента (малая мощность, большое выгорание, отсутствие дополнительных поглотителей в активной зоне), воздействие положительного парового коэффициента не компенсировалось другими явлениями, влияющими на реактивность, и реактор имел положительный быстрый мощностной коэффициент реактивности. Это делало реактор нестабильным и ядерноопасным.

**«Концевой эффект».** «Концевой эффект» в реакторе РБМК возникал из-за неудачной конструкции стержней. Суть эффекта заключается в том, что при определённых условиях в течение первых секунд погружения стержня в активную зону вносилась положительная реактивность вместо отрицательной.

## Последствия аварии

### *Характеристика радиоактивных выбросов*

К моменту аварии реактор проработал 865 суток. Полная масса топлива, загруженного в активную зону, составляла 190,2 тонны. Выбросы определялись как внутренними процессами хода аварии - протекания различного рода химических реакций, так и внешними воздействиями: засыпкой верхней части реактора, изменяющимися метеоусловиями в регионе и др.

Кроме топлива, в активной зоне в момент аварии содержались продукты деления и трансурановые элементы — различные радиоактивные изотопы, накопившиеся во время работы реактора. Именно они представляют наибольшую радиационную опасность. Большая их часть осталась внутри реактора, но наиболее летучие вещества были выброшены наружу, в том числе:

- все благородные газы, содержащиеся в реакторе;
- примерно 55 % йода в виде смеси пара и твёрдых частиц, а также в составе органических соединений;
- цезий и теллур в виде аэрозолей.

Суммарная активность веществ, выброшенных в окружающую среду, составила, по различным оценкам, до  $14 \cdot 10^{18}$  Бк (примерно  $38 \cdot 10^7$  Ки), в том числе:

- 1,8· 10<sup>18</sup> Бк йода-131;
- 0,085· 10<sup>18</sup> Бк цезия-137;
- 0,01· 10<sup>18</sup> Бк стронция-90;
- 0,003· 10<sup>18</sup> Бк изотопов плутония;
- на долю благородных газов приходилось около половины от суммарной активности.

Радионуклид йод-131 в значительной степени определил в начальный период аварии масштабы и степень опасности воздействия её на аграрные экосистемы и население. Являясь биологически активным, изотоп йода-131 обладает способностью быстро по пищевым цепям переходить из загрязненных кормов в молоко и мясо, и избирательно накапливаться в щитовидной железе человека и животных. До аварии йод-131 не наблюдался в атмосфере, поэтому его присутствие явилось хорошим индикатором наличия радиоактивности.

Изотопы стронция и цезия определили долгосрочное воздействие аварийных выбросов.

Картина загрязнения окружающей среды после аварии имела весьма сложный характер. В ближней зоне во многих местах радионуклидный состав выпадений приближался к его составу в топливе.

За пределами ближней зоны наблюдалось существенное фракционирование радионуклидов, в частности, значительное обогащение выпадений йодом-131 и цезием-137.

Вблизи площадки АЭС наблюдались высокие уровни загрязнения плутонием, стронцием и др. нелетучими радионуклидами.

В ближней зоне произошло также выпадение основной части "горячих частиц" мелкодисперсных частиц топливной матрицы размером от нескольких до десятков микрон, содержащих радиоизотопы бария, цезия, циркония, ниобия, рутения, железа, кобальта, силикатных соединений и др.

В первые 2-3 дня загрязненные радионуклидами выбросы распространялись в северном, а с 29 апреля 1986 г, в течение ряда дней в южном направлении. "Горячие частицы" были обнаружены и за пределами стран СНГ. 27 апреля радионуклиды были зарегистрированы в Швеции, затем в Финляндии, Польше, Китае, Японии и США. Всего было отмечено повышение радиоактивного фона в 23 странах.

#### *Облучения населения после аварии*

В первые часы ликвидации аварии было госпитализировано 237 человек с диагнозом острой лучевой болезни. Из них 28 человек умерли. 27 апреля в г. Припяти была официально зарегистрирована радиационная активность в 1 Р/ч. В связи с этим к 16 ч 45 мин. 27 апреля из города было вывезено 40 тыс. жителей. В последующие дни до 4 мая им прилегающих районов за пределы 30-км зоны было выселено около 120 тыс. человек.

Несвоевременность, неполнота и противоречивость официальной информации о катастрофе породили множество независимых интерпретаций. Иногда жертвами трагедии считают не только граждан, умерших сразу после аварии, но и жителей прилегающих областей. При таком подсчёте, чернобыльская катастрофа значительно превосходит атомную бомбардировку Хиросимы по числу пострадавших.

Гринпис и Международная организация «Врачи против ядерной войны» утверждают, что в результате аварии только среди ликвидаторов умерли десятки тысяч человек, в Европе зафиксировано 10 тыс. случаев уродств у новорождённых, 10 тыс. случаев рака щитовидной железы и ожидается ещё 50 тысяч.

Разброс в официальных оценках меньше, хотя число пострадавших от Чернобыльской аварии можно определить лишь приблизительно. Кроме погибших работников АЭС и пожарных, к ним относят заболевших военнослужащих и гражданских лиц, привлекавшихся к ликвидации последствий аварии, и жителей районов, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Определение того, какая часть заболеваний явилась следствием аварии — весьма сложная задача для медицины и статистики. Считается, что большая часть смертельных случаев, связанных с воздействием радиации, была или будет вызвана онкологическими заболеваниями.

<b>Средние дозы, полученные разными категориями населения</b>			
<b>Категория</b>	<b>Период</b>	<b>Количество, чел.</b>	<b>Доза (мЗв)</b>
Ликвидаторы	1986—1989	600 000	около 100
Эвакуированные	1986	116 000	33
Жители зон со «строгим контролем»	1986—2005	270 000	более 50
Жители других загрязнённых зон	1986—2005	5 000 000	10—20

Наибольшие дозы получили примерно 1000 человек, находившихся рядом с реактором в момент взрыва и принимавших участие в аварийных работах в первые дни после него. Эти дозы варьировались от 2 до 20 грэй и в ряде случаев оказались смертельными.

Большинство ликвидаторов, работавших в опасной зоне в последующие годы, и местных жителей получили сравнительно небольшие дозы облучения на всё тело. Для ликвидаторов они составили, в среднем, 100 мЗв, хотя иногда превышали 500. Дозы, полученные жителями, эвакуированными из сильно загрязнённых районов, достигали иногда нескольких сотен мЗв, при среднем значении, оцениваемом в 33 мЗв. Дозы, накопленные за годы после аварии,

оцениваются в 10—50 мЗв для большинства жителей загрязнённой зоны, и до нескольких сотен для некоторых из них.

Для сравнения, жители некоторых регионов Земли с повышенным естественным фоном дозы облучения, равные примерно 100—200 мЗв за 20 лет.

В настоящее время большинство жителей загрязнённой зоны получает менее 1 мЗв в год сверх естественного фона.

#### *Радиоактивное загрязнение лесных насаждений.*

Радиоактивные выбросы из разрушенного реактора в значительной степени были адсорбированы лесными насаждениями, окружающими АЭС. Они выполнили, тем самым, защитную буферную роль и во многом предотвратили разнос радионуклидов из ближней зоны аварии. Но некоторым оценкам, древесным ярусом леса в зоне ЧАЭС было задержано 60-90 % радиоактивных выпадений.

Вместе с тем, поглощение, лесными экосистемами радиоактивных веществ привело к значительному радиоактивному воздействию на леса.



Основная часть дозы внешнего облучения ими была получена в 1986 г. Наиболее высокие дозы облучения имели место на участке,

расположенном в 1,5-2,0 км к западу от АЭС, вблизи п. Янов, На этом участке находились сосновые древостои 40-50 -летнего возраста. К осени 1986 г. все деревья сосны вымерли ("рыжий лес"). Доза внешнего облучения составила при этом не менее 100 Гр.

#### *Правовые последствия*

Мировой атомной энергетике в результате Чернобыльской аварии был нанесён серьёзный удар. С 1986 до 2002 года в странах Северной Америки и Западной Европы не было построено ни одной новой АЭС, что связано как с давлением общественного мнения, так и с тем, что значительно возросли страховые взносы и уменьшилась рентабельность ядерной энергетике.

В СССР было законсервировано или прекращено строительство и проектирование 10 новых АЭС, заморожено строительство десятков новых энергоблоков на действующих АЭС в разных областях и республиках.

В законодательстве СССР, а затем и России была закреплена ответственность лиц, намеренно скрывающих или не доводящих до населения последствия экологических катастроф, техногенных аварий. Информация, относящаяся к экологической безопасности мест, ныне не может быть классифицирована как секретная.

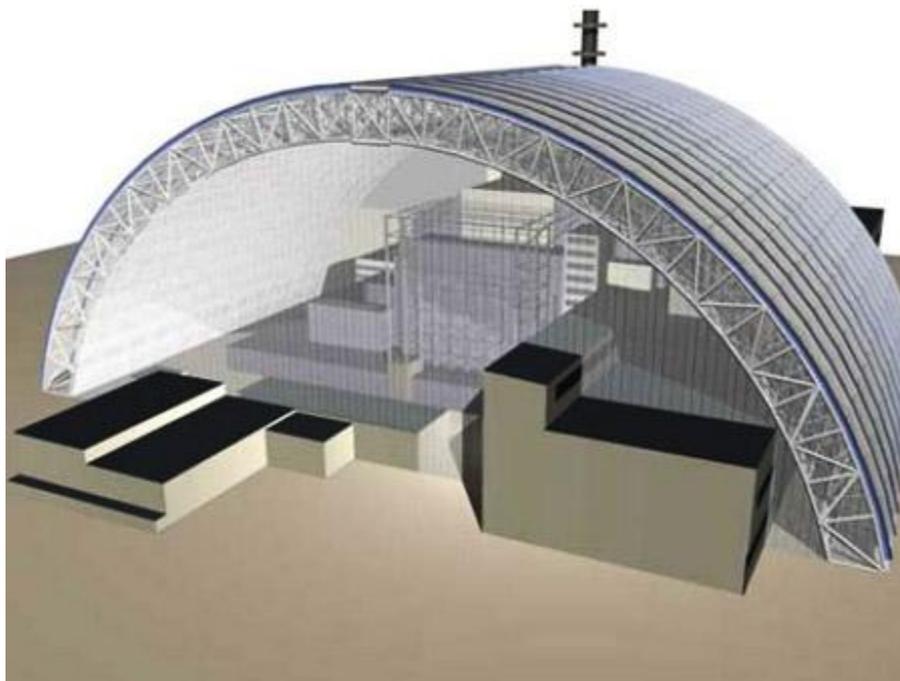
### *Судьба станции*

После аварии на 4-м энергоблоке работа электростанции была приостановлена из-за опасной радиационной обстановки. Однако уже в октябре 1986 года, после обширных работ по дезактивации территории и постройки «саркофага» (объект «Укрытие»), 1-й и 2-й энергоблоки были вновь введены в строй; в декабре 1987 года возобновлена работа 3-го.

15 декабря 2000 г. по приказу Президента Украины навсегда остановлен реактор энергоблока № 3 Чернобыльской АЭС. Станция прекратила генерацию электроэнергии.

В марте 2004 года Европейский банк реконструкции и развития объявил тендер на проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию нового саркофага для ЧАЭС.

24 ноября 2012 года на площадке объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС был выполнен первый подъем восточной части Арки весом 5300 тонн на 22 метра. Всего для этой части будет выполнено 3 таких подъема.



**Укрытие «Арка»**

# Авария на АЭС Фукусима-1

## Общая характеристика АЭС

АЭС Фукусима-Даичи (Фукусима-1)— атомная электростанция, расположенная в городе Окума в уезде Футаба префектуры Фукусима.

Фукусима-1 с шестью энергоблоками мощностью 4,7 ГВт была одной из 25 крупнейших атомных электростанций в мире. Фукусима-1 — это первая АЭС, построенная и эксплуатируемая Токийской энергетической компанией (ТЕРСО). Расположенная в 11,5 км южнее АЭС Фукусима-2 также эксплуатируется компанией ТЕРСО.

<b><u>Основные сведения</u></b>	Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4	Блок 5	Блок 6
Электрическая мощность, МВт	460	784	784	784	784	1100
Тип реактора	BWR-3	BWR-4				BWR-5
Тип защитной оболочки	Mark I					Mark II
Число топливных кассет	400	548	548	548	548	764
Число управляющих стержней	97	137	137	137	137	185

12 марта в 15:36 (06:36 UTC), т.е. примерно через сутки после сильнейшего за время наблюдения землетрясения в Японии на 1 блоке АЭС Фукусима-1 произошел взрыв водорода, который разрушил здание реактора. С этого момента все события на АЭС классифицировались как радиационная авария.



## Причины аварии

В качестве основных причин аварии на японской АЭС «Фукусима-1» называют землетрясение, вызвавшее неисправности в линиях электропередачи, а также цунами, которое залило помещения дизель-генераторов и вызвало их остановку. Недостатки в организации

аварийного электроснабжения жизненноважных агрегатов АЭС, проектные недостатки, а также просчеты персонала во время ликвидации аварийных событий.

### Роль землетрясения и цунами

11 марта в 14:46 по местному времени (05:46 UTC) 2011 г. в Японии произошло сильное землетрясение с эпицентром на глубине 24 км, которое вызвало в Тихом океане цунами, обрушившееся на северо-восточную часть о-ва Хонсю.



Расположение японских АЭС относительно эпицентра землетрясения и 5-бальная граница сейсмической волны

В момент землетрясения три работающих энергоблока АЭС Фукусима-1 были остановлены действием системы аварийной защиты, которая сработала в штатном режиме.

Оценки времени прибытия и высоты волн цунами были выполнены на основе прямых измерений японскими экспертами.

На АЭС Фукусима-1 первая волна высотой 3 м была зарегистрирована в 15:27 местного времени (JST). Вторая волна подошла в 15:35 и ее высота не была зарегистрирована, поскольку

был превышен максимально измеряемый уровень в 7,5 м. Высота подпорной стенки АЭС составляла для 1-4 энергоблоков 10 м; для 5 и 6 энергоблоков 13 м.

#### *Организация электроснабжения*

Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные электростанции, что явилось причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и привело, в конечном счете, к последовательному расплавлению активных зон на реакторах 1, 2 и 3 энергоблоков.

Следует отметить, что одна из линий высоковольтного электроснабжения находилась на момент землетрясения на ремонте, а другая была автоматически отключена из-за повреждений подстанции. Кроме того ряд опор высоковольтных линий из-за землетрясения были повреждены или сломаны. В результате отключения от внешних сетей, включились аварийные дизель-генераторы для каждого энергоблока свои. Через 40 минут, когда подошла первая волна цунами, и залила помещения, где размещались дизельные генераторы, сработала их защита, и все генераторы кроме одного на 6 энергоблоке остановились. Переменный ток перестал поступать в сеть. В результате перестали работать насосы, качающие охлаждающую морскую воду в реактор.

В 15:42 11 марта владелец и управляющая компания ТЕРСО определила, что наступили события, подпадающие под категорию таких начальных событий, которые определены в Статье 10 закона о Ядерной Чрезвычайной Готовности, и передала соответствующие сообщения в местные и федеральные органы власти.

Еще через час, стало окончательно ясно, что отсутствуют реальные средства для охлаждения топливных элементов в реакторах 1 и 2-го энергоблоков.

#### *Недостатки реактора*

В проекте АЭС Фукусима-1 отсутствуют пассивные системы безопасности, выполняющие функции аварийного отвода тепла охлаждения реакторов и бассейнов выдержки топлива ядерного топлива, а также пассивная система удаления водорода (каталитические рекомбинаторы) из первичной и вторичной защитной оболочки.

#### *Человеческий фактор*

Это как ошибки персонала, вызванные как неготовностью к такой аварии, так и неграмотным вмешательством в процесс ликвидации её последствий премьер-министра Японии Наото Кана.

Управляющая компания не подготовила в достаточной мере персонал к работе в чрезвычайной ситуации, кризисный менеджмент во время катастрофы оказался ниже всякой критики. Значительные ошибки были допущены и в первые дни ликвидации аварии – вину

за это авторы парламентского доклада возлагают на организации, в чьём ведении находится контроль за безопасностью национальной атомной энергетики, и токийское правительство. Те, кто непосредственно отвечал за принятие важнейших решений, не понимали своих задач, а контролирующие организации, за долгие годы так и не сумевшие принять необходимые для действий в аварийной ситуации предписания, превратили в хаос эвакуацию людей из кризисных областей: одних жителей региона позже, чем нужно проинформировали о возникшей опасности, других перевозили с относительно чистых территорий на более загрязнённые.

#### *Ликвидация аварии*

Согласно одобренному правительством Японии плану, полная ликвидация последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» займёт приблизительно 30–40 лет. В декабре 2011 года было объявлено о завершении холодной остановки реакторов и были начаты работы по извлечению отработанного ядерного топлива из бассейнов. Затем предполагается извлечь ядерное топливо из самих реакторов и полностью демонтировать оборудование станции.

#### *Эвакуационные меры*

11 марта правительство Японии эвакуировало население из трёхкилометровой зоны вокруг АЭС Фукусима-1.

12 марта эвакуация была объявлена из десятикилометровой зоны.

14 марта зона эвакуации расширена до двадцати километров вокруг станции. Люди, живущие на расстоянии от 20 до 30 километров от АЭС, должны оставаться в помещении.

15 марта над АЭС в радиусе 30 км запрещены воздушные полёты.

24 марта зона расширена до 30 километров (для желающих покинуть зону), что может увеличить количество эвакуируемых вдвое.

31 марта, возможно, будет принято решение относительно эвакуации жителей с территории в радиусе 40 км от АЭС.

По состоянию на 15 марта были эвакуированы по одним данным 185 000, по другим — 200 тысяч человек. По состоянию на 23 марта эвакуировано более 320 000 человек, однако это число включает и людей, эвакуированных из-за цунами.

#### *Радиоэкологические последствия аварии*

В результате аварии на АЭС «Фукусима-1» в атмосферу и океан попали радиоактивные элементы, в частности йод 131 (имеет очень короткий период полураспада) и цезий 137 (имеет период полураспада 30 лет). На промплощадке станции также было обнаружено незначительное количество плутония.

Общий объём выбросов радионуклидов составил 20 % от выбросов после Чернобыльской аварии. Население 30-километровой зоны вокруг АЭС было эвакуировано. Площадь заражённых земель, подлежащих дезактивации, составляет 3 % территории Японии.



Радиоактивные вещества были обнаружены в питьевой воде и продуктах питания не только в самой префектуре Фукусима, но и в других районах страны. Многие страны, в том числе и Россия, запретили ввоз японских продуктов и «фонящих» радиоактивных машин.

Впервые после Чернобыльской аварии атомной энергетике был нанесён серьёзный удар. Мировое сообщество вновь задумалось о том, может ли атомная энергетика быть безопасной. Многие страны заморозили свои проекты в этой отрасли, а Германия и вовсе заявила, что к 2022 году отключит последнюю АЭС и будет развивать альтернативные источники электроэнергии.

В океанических масштабах концентрация радиоактивных веществ быстро снизилась и не представляет заметной угрозы. возможны только заметные мутации флоры и фауны близ зараженного побережья необходим санитарный контроль национальных служб государств, выходящих к тихому океану, за потребляемыми морепродуктами.

#### *Влияние на экономику*

- Прямые и косвенные убытки от аварии на "Фукусима-1" превысят четверть триллиона долларов!
- Дефицит электроэнергии в стране и пересмотр национальной энергетической стратегии.
- Влияние на дальнейшее развитие мировой атомной энергетике.
- Нарушение инфраструктуры префектур Японии и сокращение трафика перевозок.
- Рост госдолга, уже составляющего 226% к ВВП страны и рост курса йены.
- Перемещение производственных мощностей на материк.
- Нарушение глобальных производственных цепочек, изменение схем глобальной логистики.

#### *Влияние на дальнейшее развитие мировой атомной энергетике*

Авария на АЭС «Фукусима» повлияла на дальнейшее развитие мировой атомной энергетики. Радиационная авария 6 уровня без последствий обойтись не может. При этом системной угрозы мировой атомной энергетике нет, в ее развитии возможны паузы, не исключены откаты назад, но закрыть ее не возможно. Сейчас это неотъемлемый элемент глобальной индустриально-технологической экономики, занявший свою нишу в мировом энергетическом хозяйстве. Для стран с высокой плотностью населения, скудными запасами органических топливных ископаемых, высокой степенью общеэкономического и технологического развития отказ от атомной энергетике тождественен энергетической национальной катастрофе.

# Литература

- Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ.- М.:Мир, 1990.-79с.
- Несмеянов Ан.Н. Радиохимия. М.: Химия, 1972. - 592 с.
- Булдаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек.- М.:Энергоатомиздат, 1990.
- Петьков, В.И. Энергетика и окружающая среда.- Н.Новгород: ННГУ, 1994.- 56 с.
- Кирьянов, К.В. Аварии на атомных реакторах.-Н.Новгород:ННГУ, 1996.- 80 с.
- Шарова, Т.В. Радиоактивность и экология. Радиоактивность в окружающей среде: Для студентов гуманитарных специальностей.- Н.Новгород: ННГУ, 1994.-56 с.
- Лукутцов, А.А. Радиоактивность и экология. Радиоактивность в природе.-Н.Новгород: ННГУ, 1994.- 31 с.
- Шарова, Т.В. Радиоактивность и экология. Радиоактивный фон внутри помещений: Методическая разработка.-Н.Новгород: Нижегородский государственный университет, 1993.- 37 с.
- Егоров, Н.П. Современные экологические проблемы.-Н.Новгород: ННГУ, 1993.- 32 с.

## ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

- <http://www.bp.com>
- <http://ru.wikipedia.org>
- <http://www.chornobyl.ru>
- <http://www.atomic-energy.ru>
- <http://rad-stop.ru>
- <http://www.xumuk.ru>
- <http://www.dozimetr.biz>
- <http://www.greenpeace.org>
- <http://rb.mchs.gov.ru>
- <http://profbeckman.narod.ru>
- <http://globalproblems.narod.ru/>
- <http://www.world-nuclear.org/>
- <http://alternergy.ru/>