

**ОСОБЕНОСТИ НА
РАДИОАКТИВНОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ
НА БИОСФЕРАТА ПРИ НОРМАЛНА
ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ЯДРЕНИ
РЕАКТОРИ**



Първият експериментален ядрен реактор е конструиран през 1942 г. в Чикаго от италианския физик **Енрико Ферми**.






През 1954 г. **Съветският съюз** пуска в експлоатация **първата в света атомна електроцентрала.**

- По-късно много страни в Европа, Америка, Азия построиха енергетични и експериментални ядрени реактори. **Общият им брой в света днес надхвърля 400.**
- През 1974 г. **България** пуска в експлоатация Козлодуйската атомна централа. Днес тя разполага с **2 реактора с мощност по 1000 Мвт** а четирите от по 440 Мвт понастоящем са затворени.
- Около **40% от добиваната в България** електроенергия се произвежда от атомната електроцентрала. Този процент за Франция е почти 80.
- Много от атомните **централи** в света са разположени в гъсто населени **райони**. Това налага ефективно решение на всички проблеми на **радиационната безопасност** на персонала и цялото население и **опазване на природната среда** от замърсяване с радиоактивни вещества.



Атомните реактори, енергетични и експериментални, представляват сложни съоръжения за поддържане на управляема верижна реакция.

- От атомната физика е известно, че облъчването на ядрата на някои тежки елементи (уран, плутоний) с неутрони предизвиква верижна реакция на деление.
- съдържащият се в естествения уран ^{235}U се разделя на два по-леки елементи от средната част на Менделеевата таблица;
- в хода на верижната реакция се отделя голямо количество енергия и се излъчват 2 - 3 неутрона и гама лъчи;
- при определени условия може да започне лавинообразна верижна реакция и да възникне ядрен взрив;



За разлика от атомната бомба, в ядрените реактори делението на ядрата на тежките елементи е под контрол.

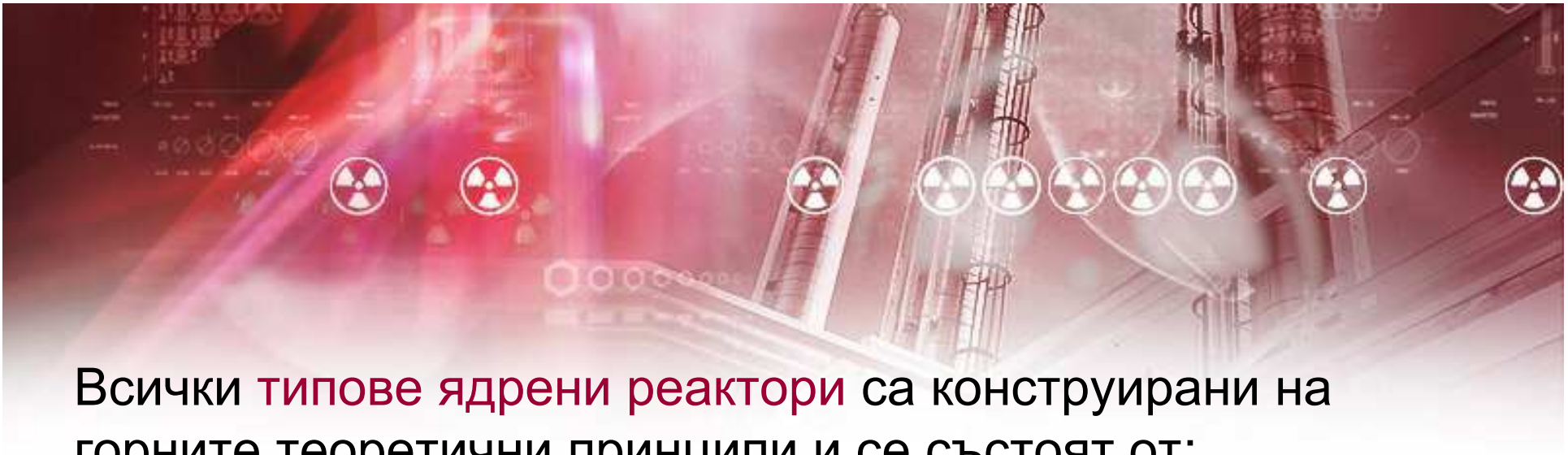
- В тях се осъществява стационарна, самоподдържаща се верижна реакция и се осигурява т.н. критичен режим, при който коефициентът на размножение на неутроните (K) е равен точно на единица.
 - коефициентът е равен на 1, когато един неутрон от първия акт на деление (първото поколение) предизвиква второ деление и най-малко един неутрон от второто деление, предизвиква трето деление и т.н.;
 - когато $K < 1$ настъпва подкритичен режим - броят на деленията постепенно намалява и реакцията спира;
 - когато $K > 1$ броят на дяещите се ядра се увеличава и верижната реакция се усилва;



Фиг. 2 Взрив на атомна бомба

Фиг. 3 Взрив на водородна бомба





Всички **типове ядрени реактори** са конструирани на горните теоретични принципи и се състоят от:

- **активна зона**, в която се намират **горивните елементи**. Те съдържат уранов **окис** или **метален уран**, **херметически** затворен в метални обвивки;
- **забавители на неутроните** - използват се: **графит**, **тежка вода**, **обикновена вода** и др.;
- **топлоносител** или **охладител** - **вода**, **тежка вода**, **течен натрий**, **азот**, **специални течности** и др.;
- система за **регулиране скоростта на реакцията**- състои се от **пръти от кадмий**, **бор** и др. леки елементи, **които поглъщат неутрони**. С тях се поддържа критичен режим на верижната реакция или тя може да бъде спряна;
- други конструктивни елементи: **защитни съоръжения**, които намаляват дозата гама лъчи и неутрони; **пулт за дистанционно управление**;



Фиг. 4 Командна зала в АЕЦ

Фиг. 5 Поглед отвътре – АЕЦ





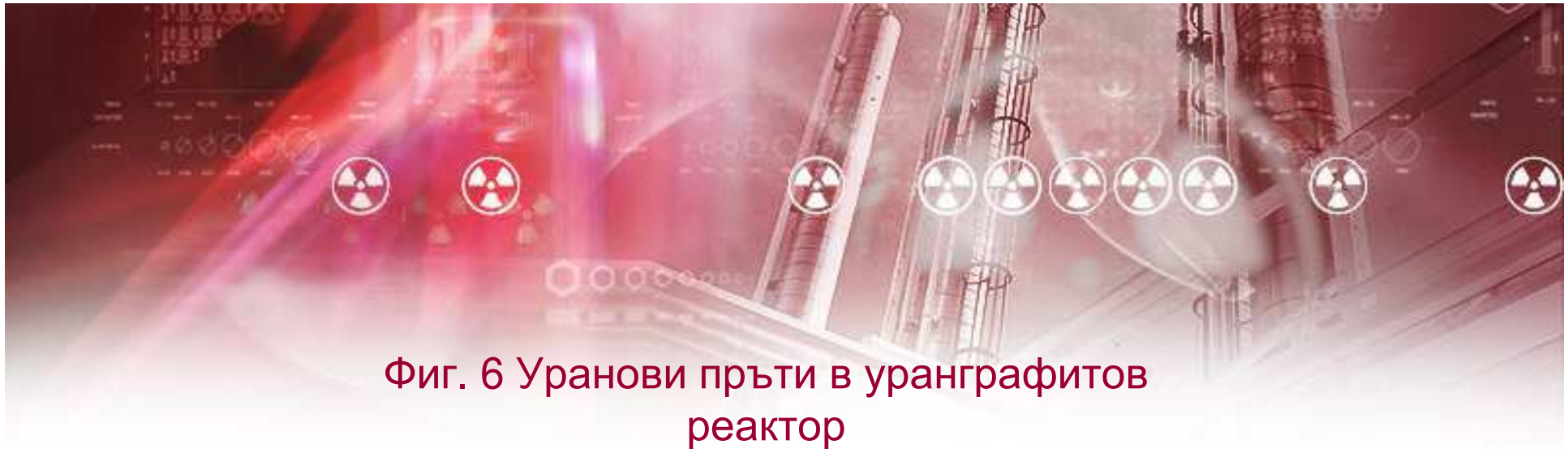
Българските ядрени реактори са от т.н. водно-воден тип - ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 и т.н.

- При този модел ядреното гориво е поставено в стоманен корпус, който е монтиран в бетонна шахта.
- Водата от т.н. първи контур служи и като забавител на неутрони и като топлоносител.
- Тя се загрява от горивните елементи до висока температура и се намира под високо налягане.
- Чрез нея топлината се предава на водата от втория контур, която се превръща в пара, постъпваща в турбината.
- След отработване парата се охлажда с вода от трети контур и след кондензация отново се превръща в пара.

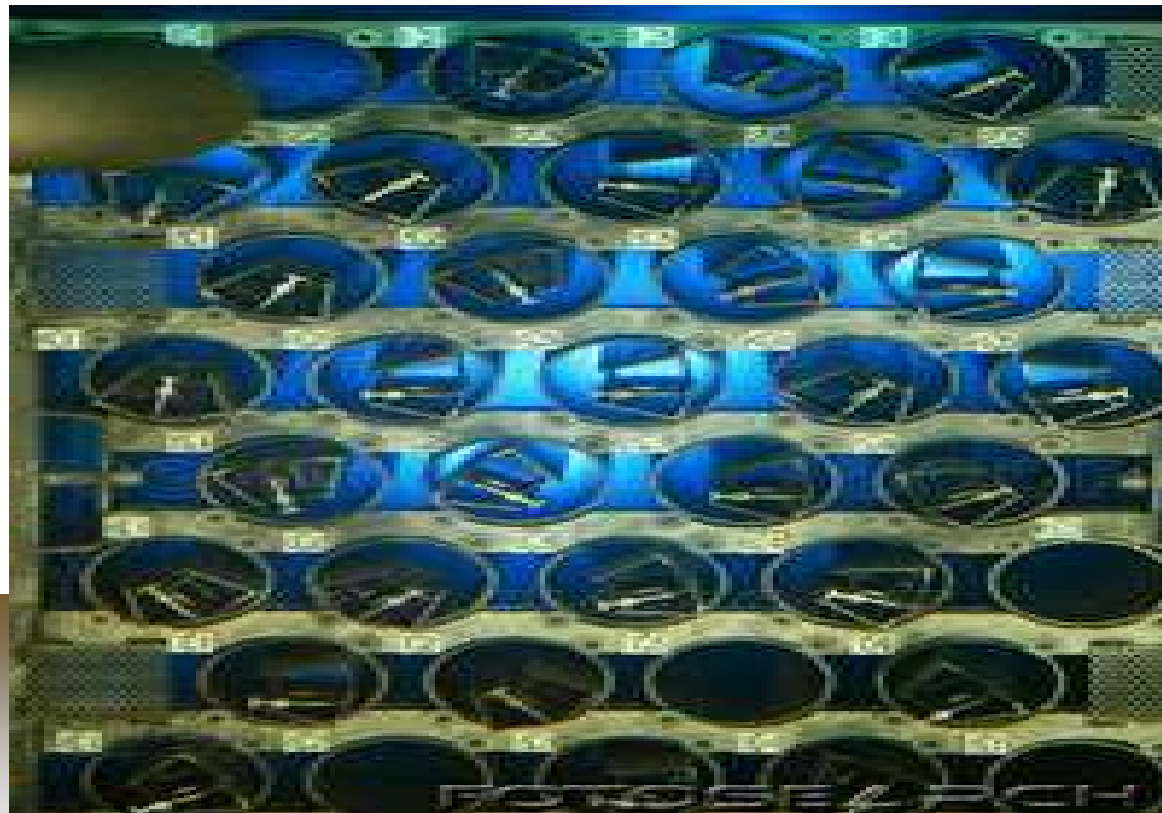


Други видове реактори:

- Реакторите с **кипяща вода** наподобяват водно-водните, но горивните елементи превръщат **водата директно в пара**, която движи **турбината**.
- В реакторите с **газово охлаждане**, като забавител на неутрони се използва **графит**, а като топлоносител - **въглероден двуокис**.
- В **уран-графитения реактор (КРМК)**, ядреното гориво под формата на **уранови пръти** е поставено в **графитен блок**, който изпълнява ролята на забавител на неутроните. **Регулиращите скоростта на реакцията пръти** от кадмий са **разположени перпендикулярно на урановите** и преминават също през графитения блок.



Фиг. 6 Уранови пръти в уранграфитов реактор





- В конструктивно **безопасните реактори** ядреното гориво е смесено със стабилен торий, под формата на **малки сфери**.
- При изпускане контрола на верижната реакция и повишаване на температурата, стабилният торий **поглъща неутроните и верижната реакция спира**.
- Вместо вода в този тип реактори като **топлоносител** се използва **течен хелий**.



- В резултат на верижната реакция, в ядрените реактори се образуват голям брой изкуствени радионуклиди – продукти на деление, елементи, образувани в резултат на радиоактивните превръщания и на ядрените реакции на радиоактивните и стабилни продукти на деление.
- В ядрените реактори се образуват около 600 радионуклиди, с масово число от 72 до 166 и 60 актиниди – трансуранови и трансплутониви елементи;



- Освен продуктите на деление, в резултат на облъчване на въздуха в зоната на реактора с неутрони, се образуват радиоактивни газове и аерозоли - **аргон-41, кислород-19, желязо-59, силиций-31** и др.
- Продуктите **на корозия на стоманата**, както и примесите и замърсяванията на **течния топлоносител**, при преминаване в активната зона също се **облъчват с неутрони и стават вторично радиоактивни**. Поради това в топлоносителя от първи контур могат да се открият: **кобалт-60, кобалт-58, желязо-59, хром-51, манган-54, манган-56, волфрам-185, молибден-99, натрий-24**.
- Облъчването **на обикновена вода** с неутрони дава: **тритий, азот-16, азот-17, натрий-24, хлор-38, калций-45**.



Водата от първия контур на водно-водните реактори е винаги замърсена с радиоактивни вещества.

- поради корозия и нарушена херметичност радиоактивните елементи могат да замърсят водата и на втория контур;
- водата в третия контур е винаги чиста и може да бъде изпускана в откритите водоеми - реки, езера и т.н.;



Замърсената с радиоактивни вещества вода от **първия контур** подлежи на **деконтаминация** с помощта на **йонобменни филтри**.

- в **съвременните АЕЦ** такова почистване е предвидено и за водата от **втория контур**;
- отделените от топлоносителя **радиоактивни** елементи се отвеждат в **атмосферата** през **високи комини**, където се разреждат в големия обем **атмосферен въздух**;
- тези радиоактивни **изхвърляния** при **нормална** експлоатация на АЕЦ, т.к. контролирани изхвърляния **не представляват** опасност за замърсяване **на околната среда**. Този процес е технически овладян и получените напълно безопасни разреждания не довеждат до увеличаване **на радиационния фон**;



Нормалната експлоатация на АЕЦ все пак е свързана с невисоко замърсяване на околната среда с радиоактивни вещества.

- За водно-водните реактори основните замърсители са радиоактивните изотопи на благородните газове и йода.
- в радиоактивната смес на ядреното гориво се установяват:
 - 18 изотопа на криптона (Kr)
 - 15 изотопа на ксенона (Xe)
 - 20 изотопа на йода (I)
- поради много малкият период на полуразпад и незначителните количества повечето от тези изотопи имат малък относителен дял в сумарната активност;



- По-съществено значение за формиране на радиоактивната обстановка около АЕЦ имат:
 - Криптон-85**
 - Ксенон-133**
 - Ксенон-135**
 - Йод-131**
 - Йод-133**
- Делът на радиоелементите - продукти на ядрено деление (стронций-89, стронций-90, цезий-134, цезий-137) както и изотопите, получени в резултат на облъчването с неутрони на корозионните материали (кобалт-58, кобалт-60, манган-54 и т.н.) е също много малък.



ОСОБЕНОСТИ НА РАДИОАКТИВНОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ НА БИОСФЕРАТА ПРИ АВАРИИ В ЯДРЕНИ РЕАКТОРИ




Понятието ядрена авария

- **Илин и съавт.** приемат, че авария е всяко краткотрайно или продължително ненормално изхвърляне в околната среда на голямо количество радиоактивни вещества.
- **Гусев и Беляев** дават строго количествена дефиниция на ядрена авария, в зависимост от степента на дехерметизация на облицовката на горивните елементи.
 - според тях ядрена авария има когато над 1% от повърхността на горивните елементи имат газова нехерметичност за изотопите на **криптона, ксенона и йода** и над 0,1% нехерметичност, допускаща контакт на топлоносителя с **ядреното гориво**;
 - нехерметичност под горните проценти е в рамките на нормалната експлоатация на реакторите;



Фиг. 7 Аварията в Чернобилската АЕЦ – 1986 г.





Мащабите на аварията и последствията за околната среда варират в широки граници.

- Преобладаващата част от аварията, станали до сега са **малки** и са предизвикали **радиоактивно замърсяване на малки територии, в близост до реактора.**
- **Най-тежките и най-опасни аварии в АЕЦ се дължат на загуба на контрол над верижната реакция и прегряване на горивните елементи, което може да завърши с парна или химическа експлозия.**
 - **парната експлозия** се дължи на прегряване на водата в първи контур и може да предизвика **разрушаване на част от инсталацията, включително и активната зона;**
 - **химическа експлозия** настъпва при прегряване на водата в първи контур до **много висока температура** и деструкция на водата до водород и кислород. В такъв случай **водородът** може да се затопли и да предизвика **експлозия;**



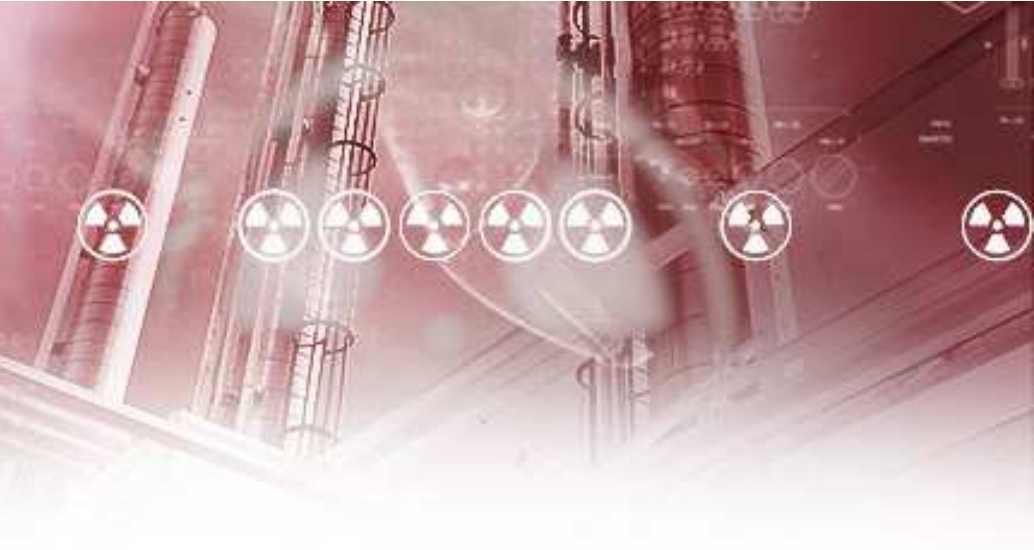
- **Прегряването на водата** може да се дължи на различни причини:
 - повреда в системата за регулиране на верижната реакция;
 - повреда /отказ на помпите, които осигуряват **циркулацията** на топлоносителя (водата) в системата;
 - внезапно **спиране на енергозахранването** и др ;
- **Ядрен взрив**, аналогичен на експлозия на **атомна бомба**, е невъзможен, поради различния състав на ядреното гориво и различната конфигурация на горивните елементи в реактора.



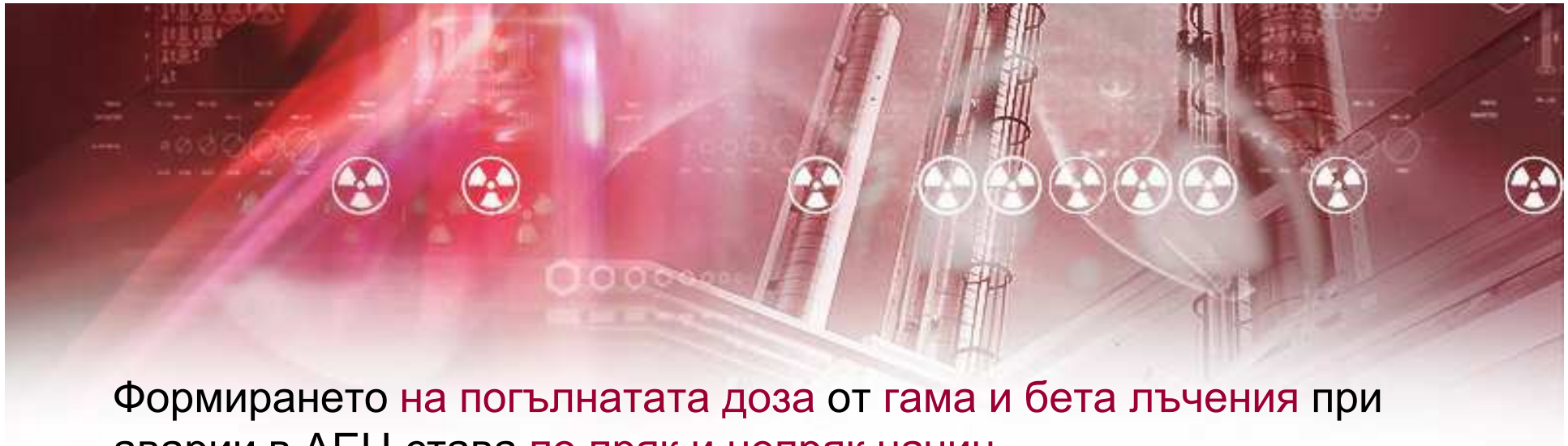
Причини за ядрените аварии

- грешки на оператора
- отказ на оборудването
- недостатъци в конструкцията

- Най-честата причина за досегашните аварии в АЕЦ са грешките на персонала.
- Една от най-големите аварии, станала в Чок Ривър, САЩ, е предизвикана от две грешки на оператора:
 - вместо да подаде забавител на неутрони (деутериева вода) операторът е прекратил постъпването на обикновена вода, използвана като топлоносител;
 - старши операторът забелязва тази грешка и наредил да бъдат въведени регулиращите (кадмиеви) пръти в активната зона, но операторът прави втора грешка, като извършва друга, ненужна операция;
 - в резултат на тези грешки активната зона бързо се прегрява и започва да се стопява. Образува се водород, който се запалил и предизвикал тежка химическа експлозия с разрушаване на активната зона;
- С изключение на няколко тежки аварии, при всички останали е имало изхвърляне на изотопи през комина на централата.

- 
- Радиоактивното изхвърляне може да бъде под формата на струя или радиоактивен облак.

- Факторите, от които зависи степента на радиоактивното замърсяване са:
 - метеорологични условия
 - географски условия
 - височина на комина
 - продължителност на изхвърлянето
 - физико-химически свойства на аерозолите и др.
 - При наличие на вятър изхвърлянето от комина е под формата на струя.
 - При слаб вятър или пълно безветрие се образува радиоактивен облак, който се разпространява около централата чрез дифузия.



Формирането на погълнатата доза от гама и бета лъчения при аварии в АЕЦ става по пряк и непряк начин.

- А) Пряк път (начин)** - външно облъчване с гама кванти и бета частици от изотопи, съдържащи се в атмосферата или отложени на земната повърхност.
- **вътрешно облъчване (пряк път)** се дължи на радиоизотопи, постъпващи в организма чрез **вдишвания въздух**;
 - **радиоактивните изотопи на благородните газове** предизвикват само външно облъчване или облъчване на дихателните пътища. Те не се инкорпорират в организма, тъй като са **инертни в химическо отношение** и не участват в обменните процеси;
 - **прекият път** на формиране на погълнатата доза се наблюдава в зоната на **локалните отлагания**;

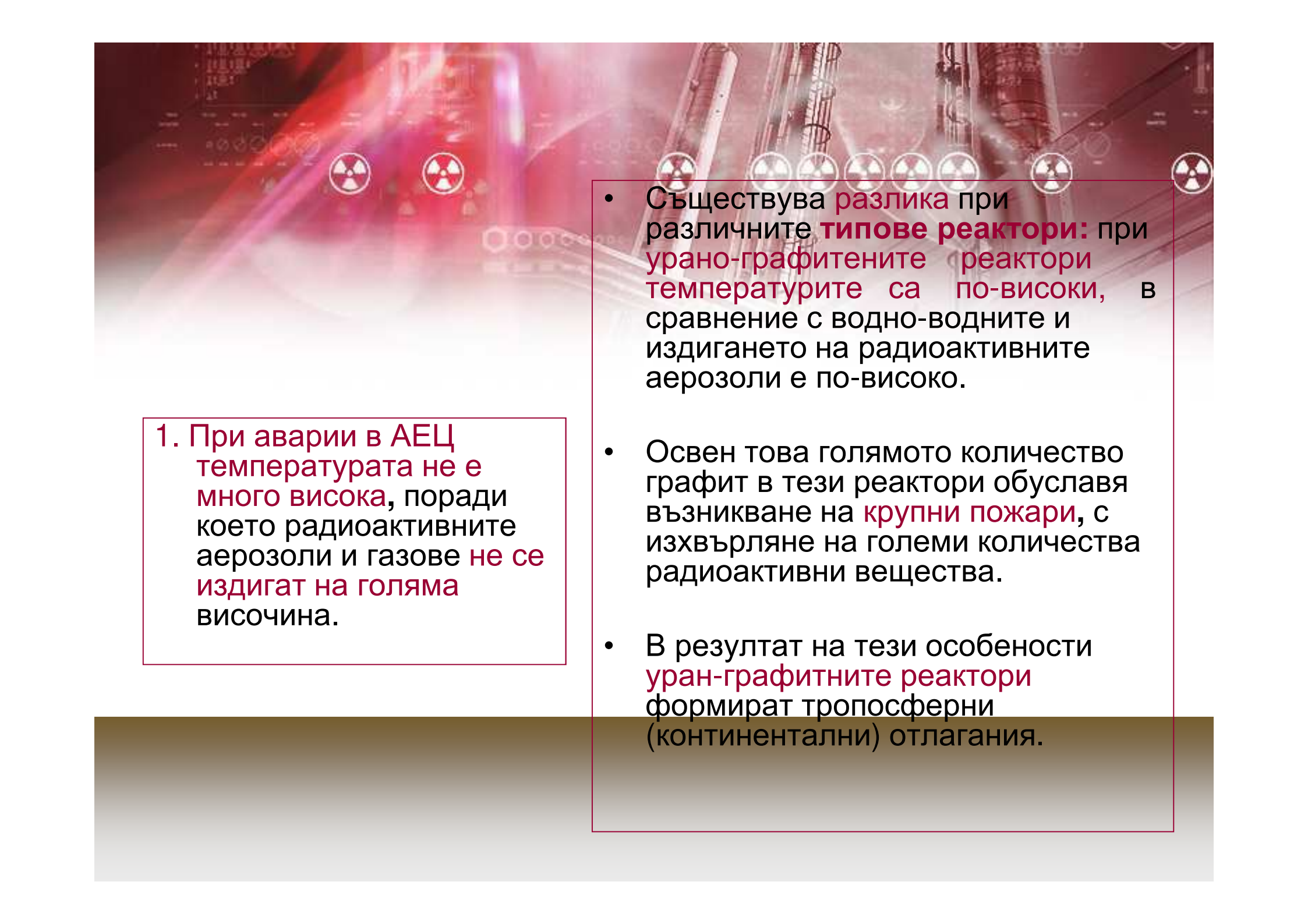


Б) Непрекият път на формиране на абсорбираната доза се дължи на **вътрешно облъчване** с радионуклиди, които постъпват в организма в резултат на **миграцията по хранителните или биологичните вериги**.

- Този **начин** на облъчване на организма се наблюдава при хора, живеещи в по-отдалечените от АЕЦ райони, т.е. в **зоната на трансферните отлагания**.

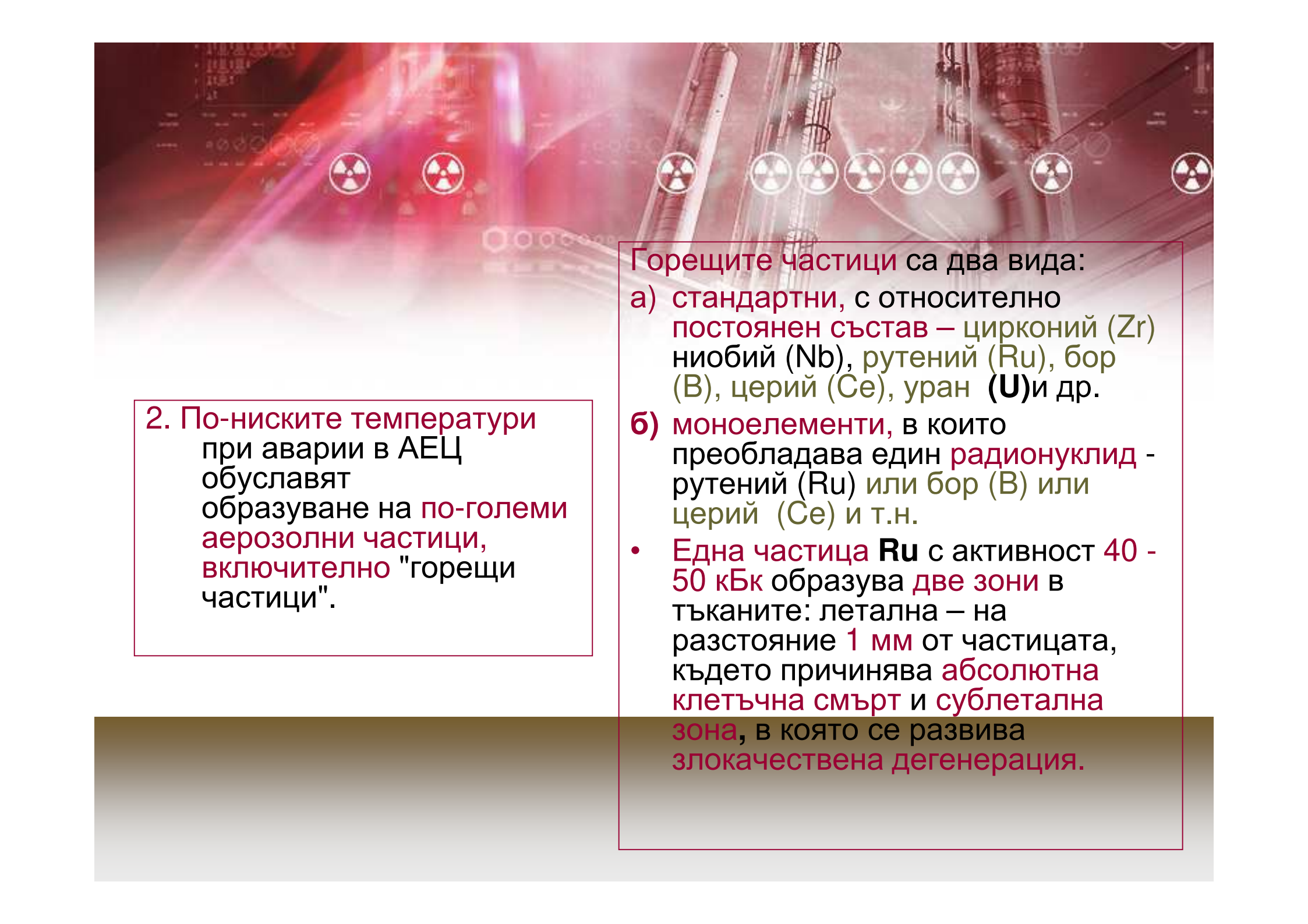


- Радиоактивното замърсяване при аварии в АЕЦ наподобява на това при ядрени взривове, но съществуват и разлики, които се дължат да различните условия, при които се формира радиоактивния блок.



1. При аварии в АЕЦ температурата не е много висока, поради което радиоактивните аерозоли и газове не се издигат на голяма височина.


- Съществува разлика при различните типове реактори: при урано-графитените реактори температурите са по-високи, в сравнение с водно-водните и издигането на радиоактивните аерозоли е по-високо.
- Освен това голямото количество графит в тези реактори обуславя възникване на крупни пожари, с изхвърляне на големи количества радиоактивни вещества.
- В резултат на тези особености уран-графитните реактори формират тропосферни (континентални) отлагания.



2. По-ниските температури при аварии в АЕЦ обуславят образуване на по-големи аерозолни частици, включително "горещи частици".

Горещите частици са два вида:

- а) стандартни, с относително постоянен състав – цирконий (Zr) ниобий (Nb), рутений (Ru), бор (B), церий (Ce), уран (U) и др.
 - б) моноелементи, в които преобладава един радионуклид - рутений (Ru) или бор (B) или церий (Ce) и т.н.
- Една частица Ru с активност 40 - 50 кБк образува две зони в тъканите: летална – на разстояние 1 мм от частицата, където причинява абсолютна клетъчна смърт и сублетална зона, в която се развива злокачествена дегенерация.



3. При **аварии** в ядрени реактори радиоактивното замърсяване е много по-продължително в сравнение с ядрените взривове.

4. При **ядрените аварии** съставът на радиоактивните изхвърляния зависи от времето на **презареждане на реактора** с ядрено гориво. С течение на **времето** в горивните елементи се натрупват повече **дългоживеещи изотопи**, а делът на краткоживеещите намалява непрекъснато.

5. При **ядрени аварии** в околната среда се изхвърля сравнително малка част **от общата радиоактивност** в реактора, докато при ядрени взривове **почти 100%** от образуваните изотопи. Напр. при аварията в **Чернобил** са изхвърлени **само 3%** от **радионуклидите** в реактора.




ВИДОВЕ РАДІОАКТИВНИ ОТЛАГАННЯ



При аварии в АЕЦ се образуват главно локални и тропосферни отлагания, докато при въздушни ядрени взривове – предимно стратосферни.

1. Локални отлагания се образуват от едри частици, които падат в близост до реактора, за 24 часа, под влияние на гравитацията.
 - по-дребните частици се преместват под влияние на хоризонталните въздушни течения;
 - увеличено локално отлагане на радиоактивни частици се наблюдава при неблагоприятни метеорологични условия: напр. при силна облачност, радиоактивните частици стават центрове на кондензация и предизвикват валежи, които свалят върху земната повърхност значителни количества радиоактивни вещества;



2. Тропосферните (континентални) отлагания се състоят от малки частици (под 1 мм), които остават в горната част на атмосферата в дисперсно състояние.

- радиоактивният облак, от който се образуват тропосферните отлагания се разкъсва под влияние на въздушните течения;
- вертикалното разместване на атмосферните слоеве може да доведе до интензивно отлагане на радиоактивни вещества в отделни райони на земната повърхност;
- доминиращите за района хоризонтални въздушни течения, чиято скорост може да стигне до 100 км/ч. може да пренесат радиоактивните частици на огромни разстояния за кратко време;
- тропосферните отлагания остават във въздуха за сравнително кратко време. Средният им престой там е 30 дни.
- В сравнение с локалните, тропосферните отлагания създават ниска плътност на замърсяване на земната повърхност;

- **Дребнодисперсните частици** на тропосферните отлагания падат на земята много **бавно** по следните **няколко механизма**:
 - а) **Влажният способ** има най-голямо значение за почистване на тропосферата от радиоактивни частици – те стават **центрове на кондензация и ледообразуване** и падат на земята под формата на дъжд или сняг.
 - б) **гравитационният способ** има малко значение за тропосферните отлагания - поради **малките размери на частиците**.
 - в) **коагулационен способ** – при съчетание на **сухо време** и **пълно безветрие** радиоактивните частици **коагулират** с локалните аерозоли (нерадиоактивен прах). В резултат на удрянето им една в друга те **полепват** помежду си като **формират по-едри частици**, които **падат на земята** под влияние на гравитацията.
 - г) при наличие **на вятър и сухо време** радиоактивните частици полепват по почвата, предметите и главно по растенията. Това се дължи на **ламинарното движение** на въздушния поток около растенията и предметите и **рязката промяна** в посоката на въздушната струя.



3. Стратосферните отлагания се формират главно при **опити с ядрено оръжие** (особено при експлозии в атмосферата). Радиоактивните частици престояват в атмосферата с години. Могат да се отложат във **всяка точка на земната повърхност**, поради което се наричат **глобални**.

Изотопният състав на радиоактивните частици (аерозоли), образувани при аварии в АЕЦ и при опити с ядрено оръжие зависи от много фактори и варира в широки граници.

- ❑ В ранните срокове след постъпване на радиоактивните смеси в атмосферата главната радиационна опасност е радиоактивният йод.
- ❑ Най-опасни са изотопите с масово число 131 до 135 и период на полуразпад от 1 час до 8 дни.
- ❑ От петте изотопа на йода най-голямо значение има *йод-131*.
 - Той има период на полуразпад 8.06 дни.
 - Разпада се като излъчва гама кванти и бета частици;
 - Независимо от пътя на постъпване отлага се почти изцяло в щитовидната жлеза (критичен орган);
 - Отделя се чрез всички органи, отделящи вода. Преминава плацентата

- Трайното радиоактивно замърсяване на атмосферата след ядрени аварии обаче се дължи на изотопите с относително голям период на полуразпад. Това са продуктите на деление на урана - цезий-137, стронций-90, итрий-90, церий-144, барий-140 и др.



- ❑ *Цезий-137* е високотоксичен изотоп и има изключителна способност да се включва в биологичните вериги и попада в човешкия организъм след консумация на контаминирани продукти, основно месо. Резорбира се отлично в храносмилателния тракт.
- Стабилният изотоп на цезия по химични свойства е много близък до калия и рубидия.
- Освен цезий-137 по-малко значение като замърсител има *цезий-134*.
- *Цезий-137* е бета и гама излъчващ изотоп.
- Периодът на полуразпад е 30 години.
- Дъщерният му продукт барий-137 излъчва гама кванти и има много кратък период на полуразпад (2 - 55 мин).
- *Цезий-137* се разпределя равномерно в организма – мускули, тъкани.
- Отделя се главно чрез бъбреци и храносмилателен тракт.



- ❑ **Sr-90** е важен радиоизотоп, формиращ радиационната обстановка след ядрена авария.
- Той е **чист бета излъчващ изотоп**, с висока енергия на бета частиците (средно 1 MeV).
- Има **период на полуразпад 28.6 години**.
- Разпадният му продукт е **итрий-91 (Y^{91})**, с период на полуразпад 58 дни.
- Отлага се в **скелета**.
- **Отделя се главно чрез бъбреците и храносмилателния тракт, но и чрез млякото.**



Фиг. 8 Поглед от сателит върху Чернобил – 1986 г.





Фиг. 9 Поглед от сателит върху Чернобил – 1992 г.





Земеделските райони около Чернобил изглеждат като колаж от тъмно-червено (растящи култури) и бяло (високо изпъкнали оголени участъци)

Фиг. 10 Поглед от сателит върху Чернобил – 1986 г.

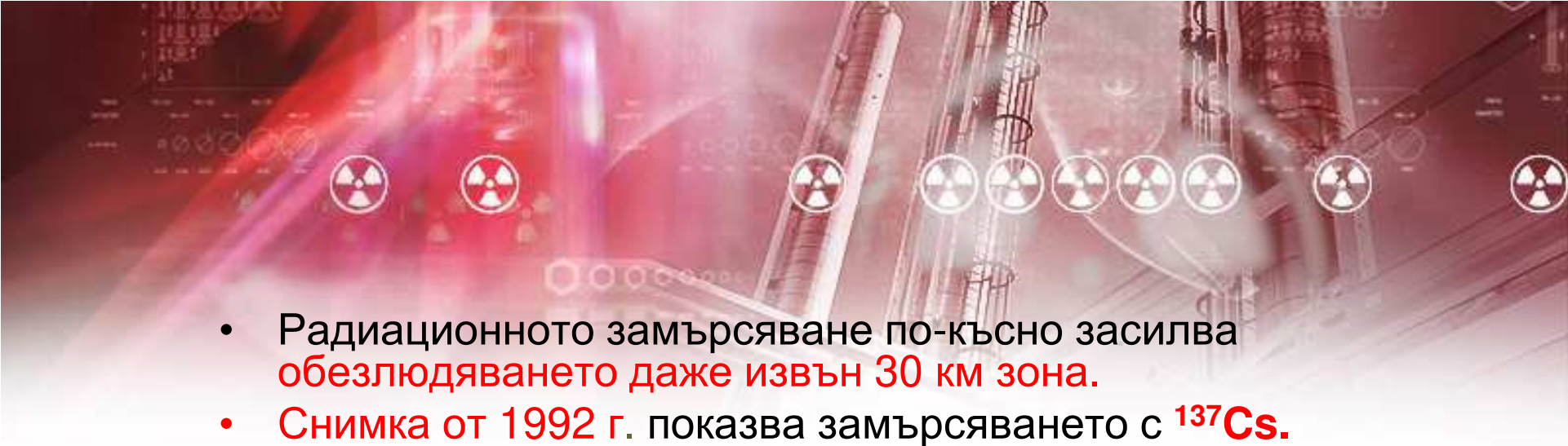


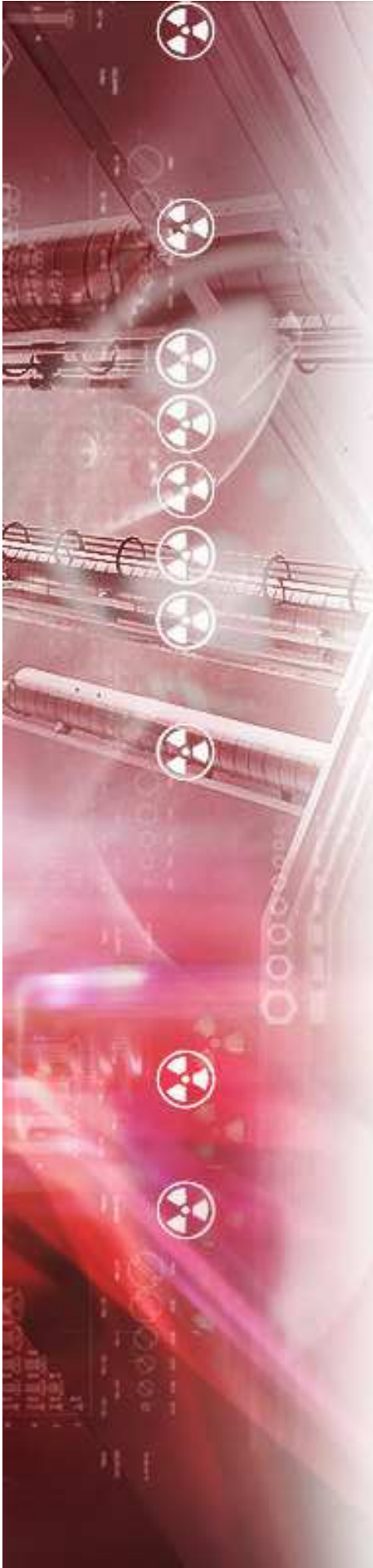


Фиг. 11 Поглед от сателит върху Чернобил – 1992 г.

През 1992 г. много от тези полета изглеждат **равни, жълто-кафяво-зелени**, което показва **естествена вегетация**. Когато реакторът още е бил в пламъци, всички жители в **30 км зона** са евакуирани, в т.ч. и: **Припят** (45 хил. жители през 1986 г.), **Чернобил** (12 хил. жители) и **96 села** (46 хил. жители общо). До 1992 г. тази област остава почти **напълно безлюдна**.



- 
- Радиационното замърсяване по-късно засилва **обезлюдяването** даже **извън 30 км зона**.
 - **Снимка от 1992 г.** показва замърсяването с **^{137}Cs** .
 - Районите, с **$> 40 \text{ Ci/km}^2$** са почти напълно **безлюдни**, но напускането на местата с **$15\text{-}40 \text{ Ci/km}^2$** е силно **вариабилно**.
 - **Общо >120 хил. души** от **213 села и градове**, са преместени извън замърсените области.
 - Радиацията засегна **дивите растения и животни** около Чернобил: Боровите **гори** скоро **умират**. Раждат се животни с **три глави**. Намалява броят на дивите животни.
 - В следващите години **краткоживеещите** изотопи се разпадат, а **дългоживеещите** проникват дълбоко в почвата. Дивите животни се завръщат, поради липсата на хора. Популациите нарастват, въпреки **извънредно високата честота на мутации**, причинени от замърсяването на хранителната верига от едни от най-високите **фонови нива на радиация в света**.



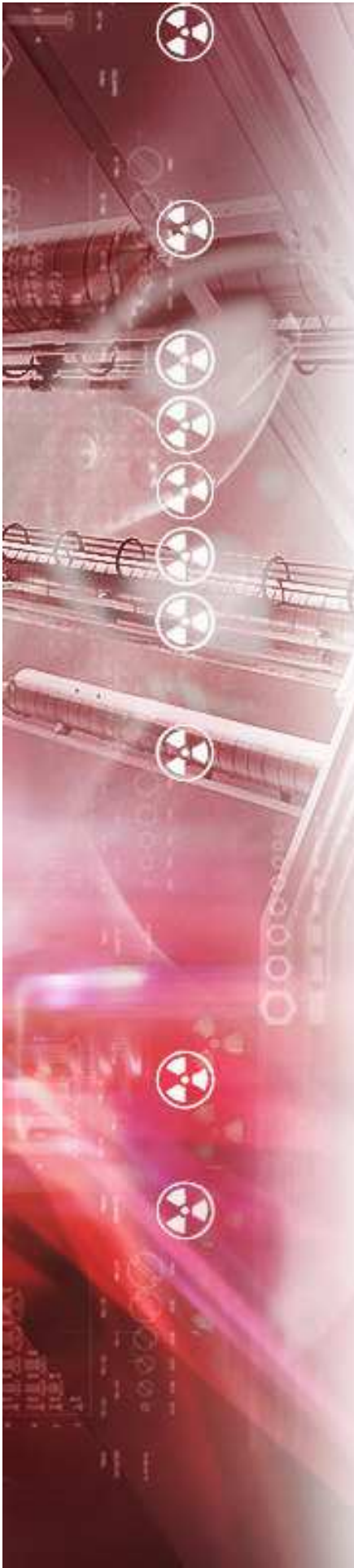














Последици от аварията в АЕЦ Чернобил върху птици

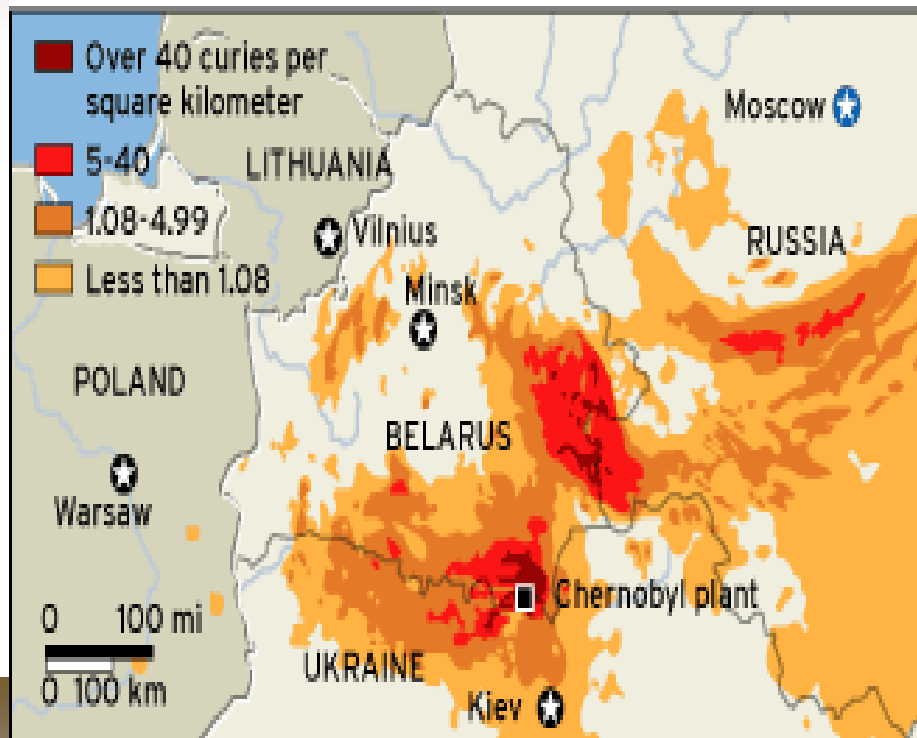
Фиг. 14 Преди аварията

Фиг. 15 След аварията



Фиг. 12 и 13 Замърсявания на почвата с ^{137}Cs – 1986 и 1992 г.

■ CESIUM-137 SOIL DEPOSITION (1986)



SOURCE: Swiss Agency for Development and Cooperation

AP

