

# Обеспечение радиационной безопасности персонала при эксплуатации АЭС

## Лекция 4

### Современная система дозиметрических величин и ее практическое применение



# Содержание

Введение

4.1. Физические основы  
эквидозиметрических величин

4.2. Величины для оценки вероятности  
развития эффектов излучения

4.3. Величины для определения требований  
к состоянию радиационной безопасности

4.4. Величины для демонстрации  
соответствия условий использования  
источников требованиям обеспечения  
радиационной безопасности

Заключение



# Введение

**Цель защиты** – предотвращать возникновение детерминированных эффектов у отдельных лиц путем поддержания доз на уровне ниже соответствующего порога и обеспечивать, чтобы принимались все разумные меры с целью уменьшения возникновения стохастических эффектов у населения в настоящее время и в будущем.

**Цель безопасности** – обеспечить защиту отдельных лиц, общества и окружающей среды от нанесения им вреда путем создания и поддержания эффективных средств защиты против радиологических опасностей, связанных с источниками.

**Цель дозиметрии** – характеризовать условия облучения в терминах физических величин, необходимых для использования в оценках риска.



# 4.1. Физические основы эквидозиметрических величин

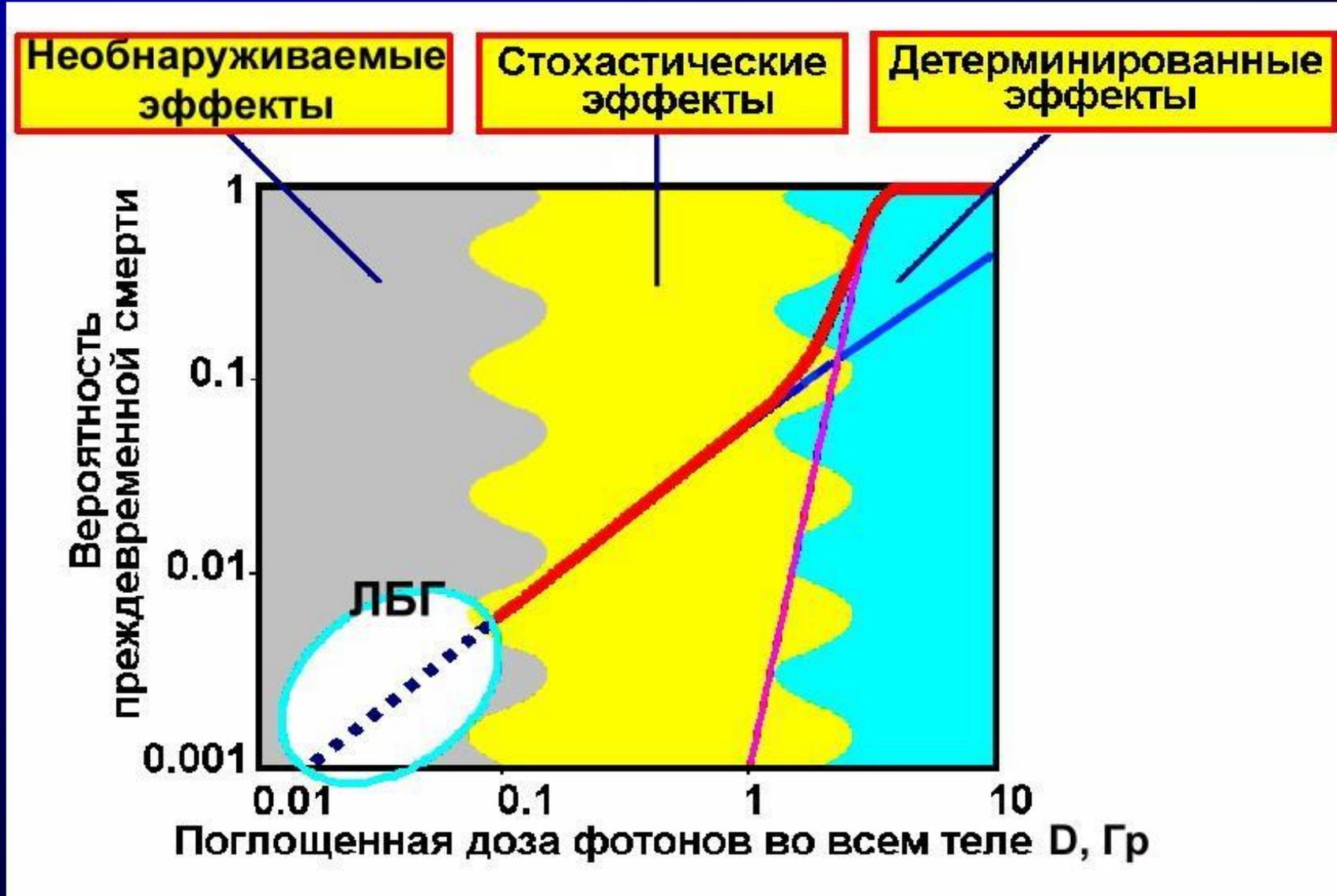


# Радиационный риск

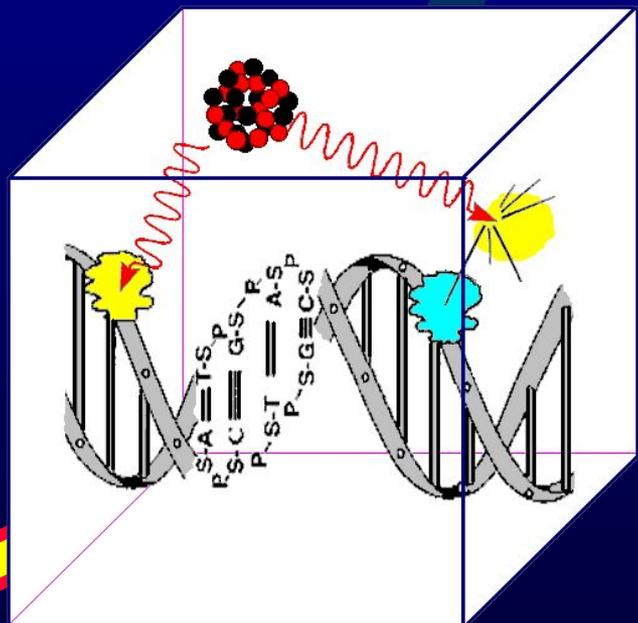
Риск – вероятность возникновения определенного эффекта.  
Рассматриваются следующие эффекты:

- детерминированные;
- стохастические (**регистрируемые**);
- стохастические (**необнаруживаемые**).

# Риск фатальных эффектов



# Концепция дозы излучения



**Ионизация**

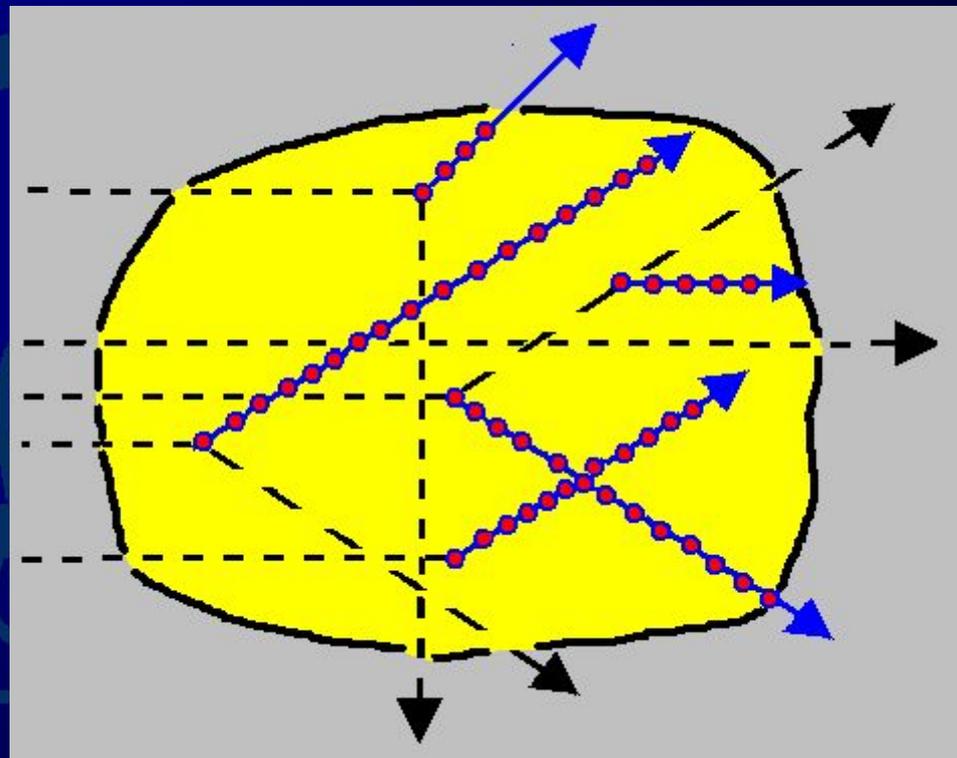
**Плотность  
передачи энергии**

**Эффект**



# Поглощенная доза в органе

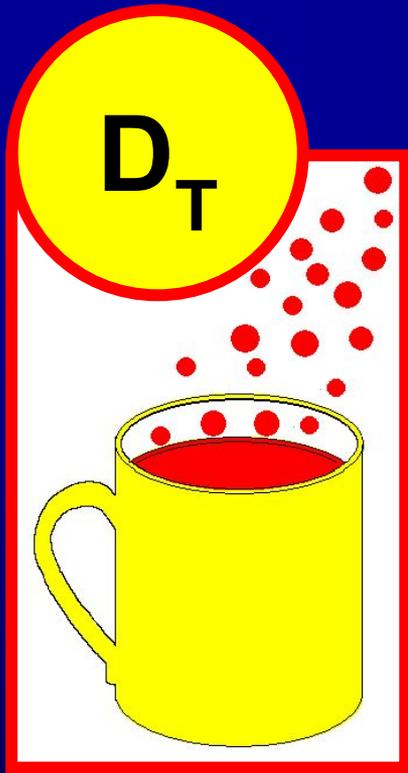
Средняя поглощенная доза в органе или ткани – физическая основа эквидозиметрических величин



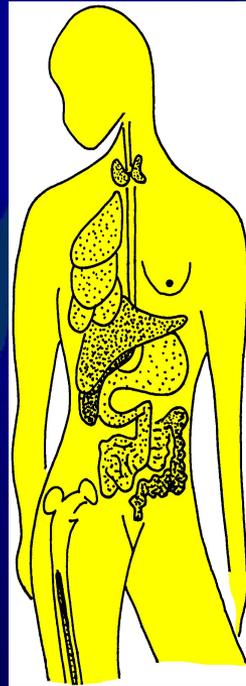
$$D_{T,R} = \frac{\epsilon_{T,R}}{m_T}$$

- концентрация энергии, переданной ионизирующим излучением ткани органа

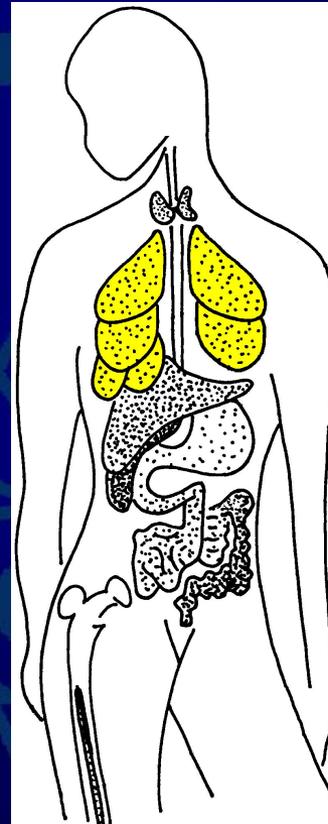
# Доза в органе



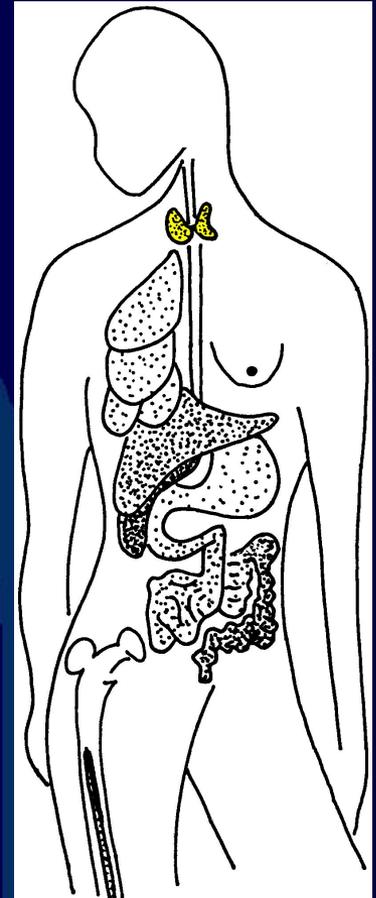
Доза в  
органе T



Все тело

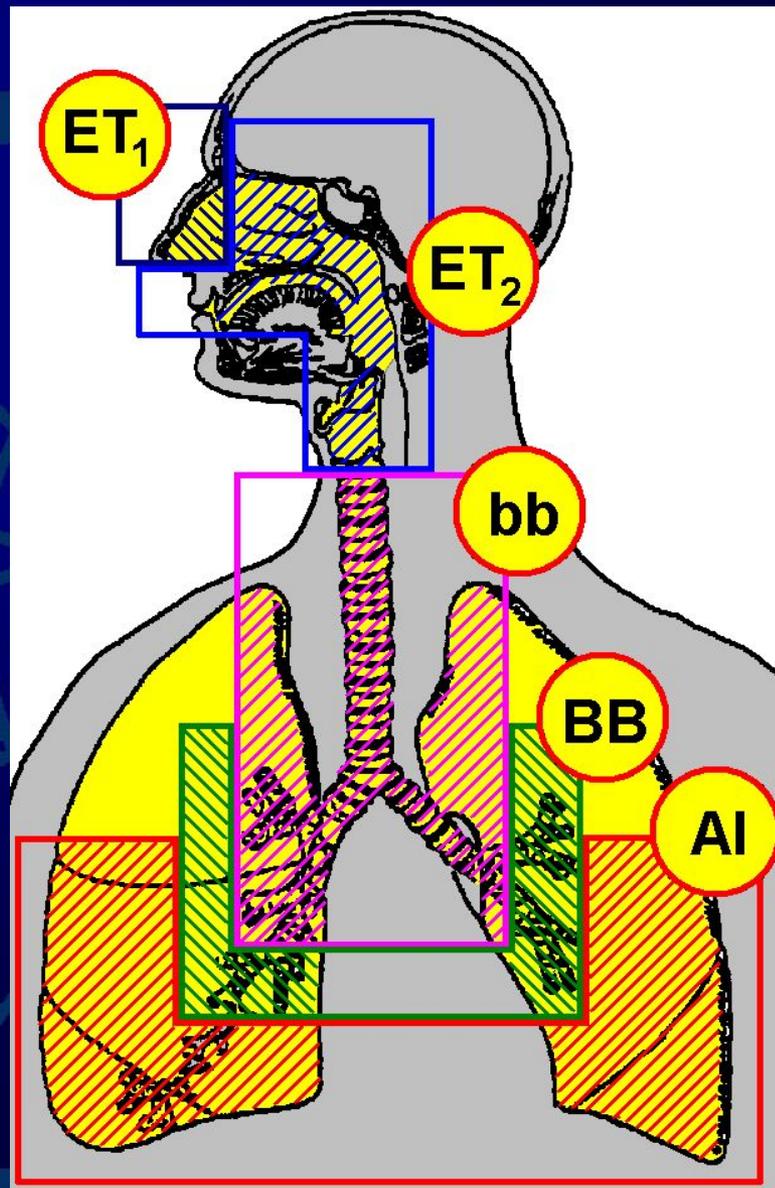
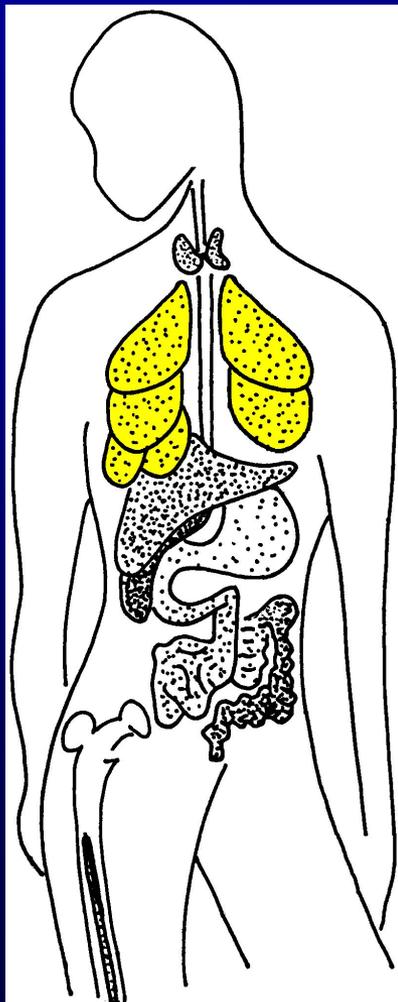


Органы  
дыхания

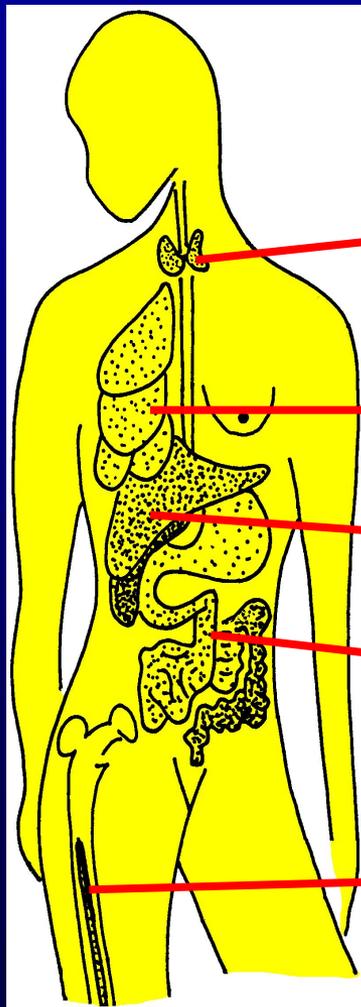


Щитовидная  
железа

# Органы дыхания



# Условный человек



Щитовидная железа

Легкое

Печень

Толстый  
кишечник

Красный  
костный  
мозг

Все тело

Масса органа, г

Взрослый	5 лет	1 год
20	3.4	1.8
1 200	300	150
1 800	570	330
370	120	50
1 170	340	150
73000	19000	10000



# Характеристики качества излучения

	Эффект	Излучение
$RBE_{T,R}$	Конкретный эффект в органе $T$ от действия излучения вида $R$	Испущенное источником
$w_R$	Любой стохастический эффект излучения вида $R$ в любом органе	Испущенное источником
$Q_R(L)$	Зависимость « $w_R$ — качество излучения»	Действующее в точке



**4.2. Величины  
для оценки вероятности  
развития эффектов излучения**



# Опыт реагирования на аварии

**AN ELECTRON ACCELERATOR ACCIDENT IN HANOI, VIET NAM**

**The Radiological Accident in Samut Prakarn**

**The Radiological Accident in Soreq**

**THE CRITICALITY ACCIDENT IN SAROU**

**The Radiological Accident in Cochabamba**

**THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN THE REPROCESSING PLANT AT TOMSK**

**The Radiological Accident in Yanango**

**The Radiological Accident in Goiânia**

**INVESTIGATION OF AN ACCIDENTAL EXPOSURE OF RADIOTHERAPY PATIENTS IN PANAMA**

**The Radiological Accident in Lilo**

**The Radiological Accident in Tammiku**

**The Radiological Accident in Istanbul**

**THE RADIOLOGICAL ACCIDENT AT THE IRRADIATION FACILITY IN NESVIZH**

**Accidental Overexposure of Radiotherapy Patients in San José, Costa Rica**

**The Radiological Accident in Gilan**

**THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN SAN SALVADOR**

**Report of a Team of Experts, 26 May-1 June 2001**

**IAEA**  
International Atomic Energy Agency

Vapour-gas phase
Nitric acid, 1.3 m <sup>3</sup>
Organics
Product 401a 4 m <sup>3</sup> beta active solution of Nb, Tc, Zr
Pu and U
Product 106 16.5 m <sup>3</sup> Pu and U

# Риск развития детерминированных эффектов

$$P_{T,R} = 1 - \exp\left[-V_T \left\{ \Delta, D_{T,R}(t), RBE_{T,R} \right\}\right]$$

Определяется

- длительностью облучения,  $\Delta$ ;
- историей облучения, представленной зависимостью мощности дозы  $D_{T,R}$  облучения органа-мишени от времени  $t$

Для оценки риска недостаточно информации о накопленной дозе

# ОБЭ - взвешенная доза

**Величина:** ОБЭ – взвешенная доза,  $AD_T$

**Назначение:** оценка развития детерминированных эффектов при облучении органа T

**Определение:** ОБЭ – взвешенная доза – произведение дозы в органе на коэффициент ОБЭ излучения

$$AD_T = \sum_R D_{T,R} \times RBE_{T,R}$$

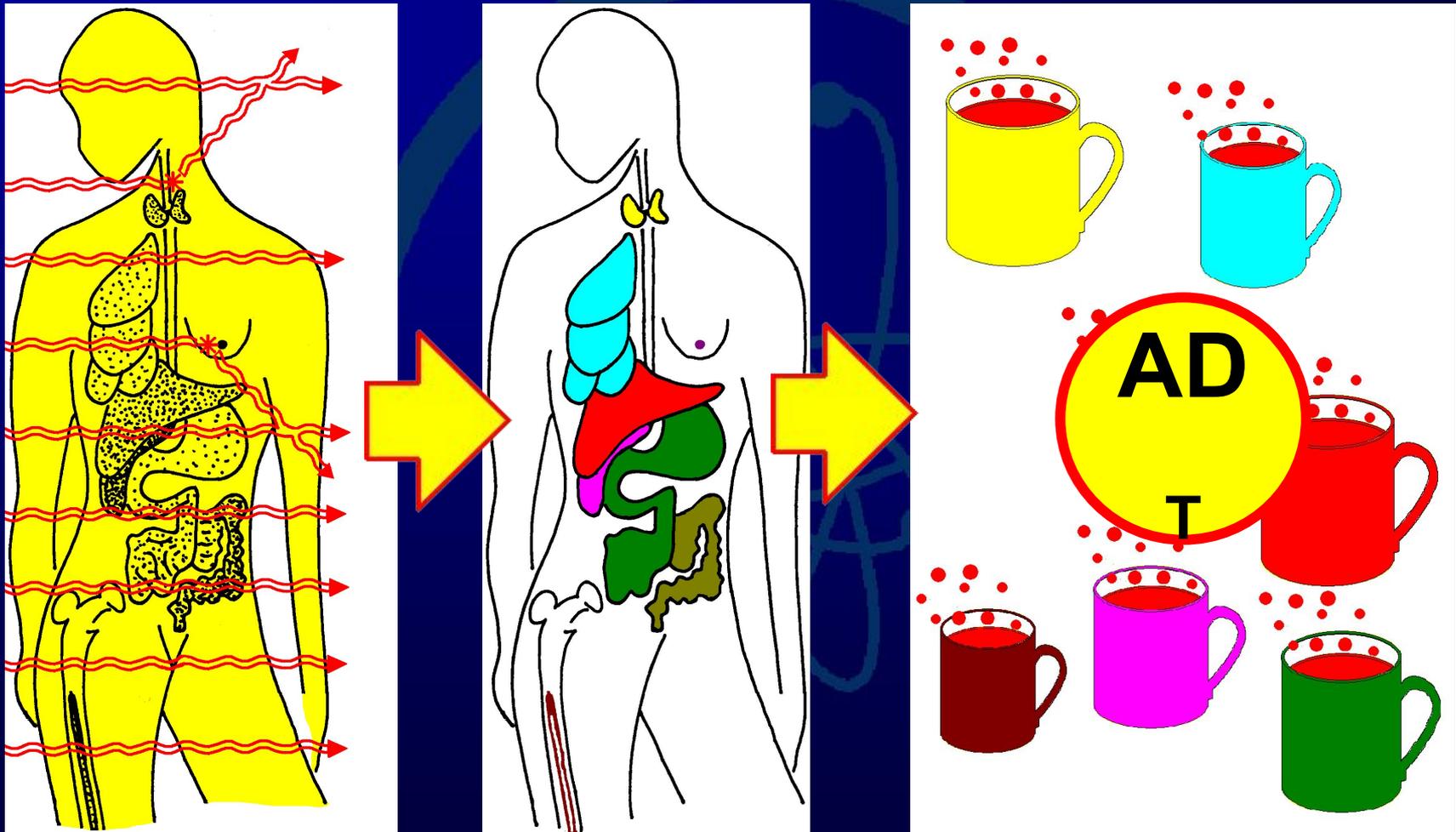
**Единица:** *грэй-эквивалент (Гр-эке)*



# Коэффициент относительной биологической эффективности

Эффект: орган	Облучение	$RBE_{T,R}$
Пневмония: альвеолярный отдел органов дыхания	Фотоны	1
	Нейтроны	3
	Внутреннее: бета-	1
	Внутреннее: альфа-	7
Кишечный синдром: тонкий/ толстый кишечник	Фотоны	1
	Нейтроны	3
	Внутреннее: бета-	1
	Внутреннее: альфа-	0

# Оценивание детерминированных эффектов излучения



# Изучение смертности от радиогенного рака

- 47 лет наблюдения (1950-1997)
- Обнаружено: **9 335** фатальных твердых раков
- Ожидалось: **~8 895** фатальных твердых раков



- **~440 раков (5%)**  
**МОЖНО СВЯЗАТЬ С**  
**ДЕЙСТВИЕМ**  
**РАДИАЦИИ**

# Риск развития стохастических эффектов

$$P_{T,R}(g,s,t) = r_T(a,s) \times [1 + F_T(D_{T,R}, RBE_{T,R}) \zeta_T(t,g,s)]$$

- $r_T(a,s)$  – фоновая частота возникновения рака рассматриваемого типа  $T$  у людей возраста  $a$  и пола  $s$ , при этом  $a = t+g$ ;
- $F_T(D_{T,R}, RBE_{T,R})$  – функция, определяющая дозовую зависимость риска возникновения радиогенного рака при воздействии излучения вида  $R$ ;
- $\zeta_T(t,g,s)$  – функция, которая описывает влияние на частоту возникновения радиогенного рака фактора времени  $t$ , прошедшего после облучения, возраста человека  $g$  в момент облучения и его пола  $s$ .

# Эквивалентная доза

**Назначение:** оценить вероятность развития стохастического эффекта в результате облучения органа T

**Определение:** произведение средней поглощенной дозы облучения органа на взвешивающий коэффициент излучения:

$$H_T = \sum_{T,R} D_{T,R} \times W_R$$

**Единица:**

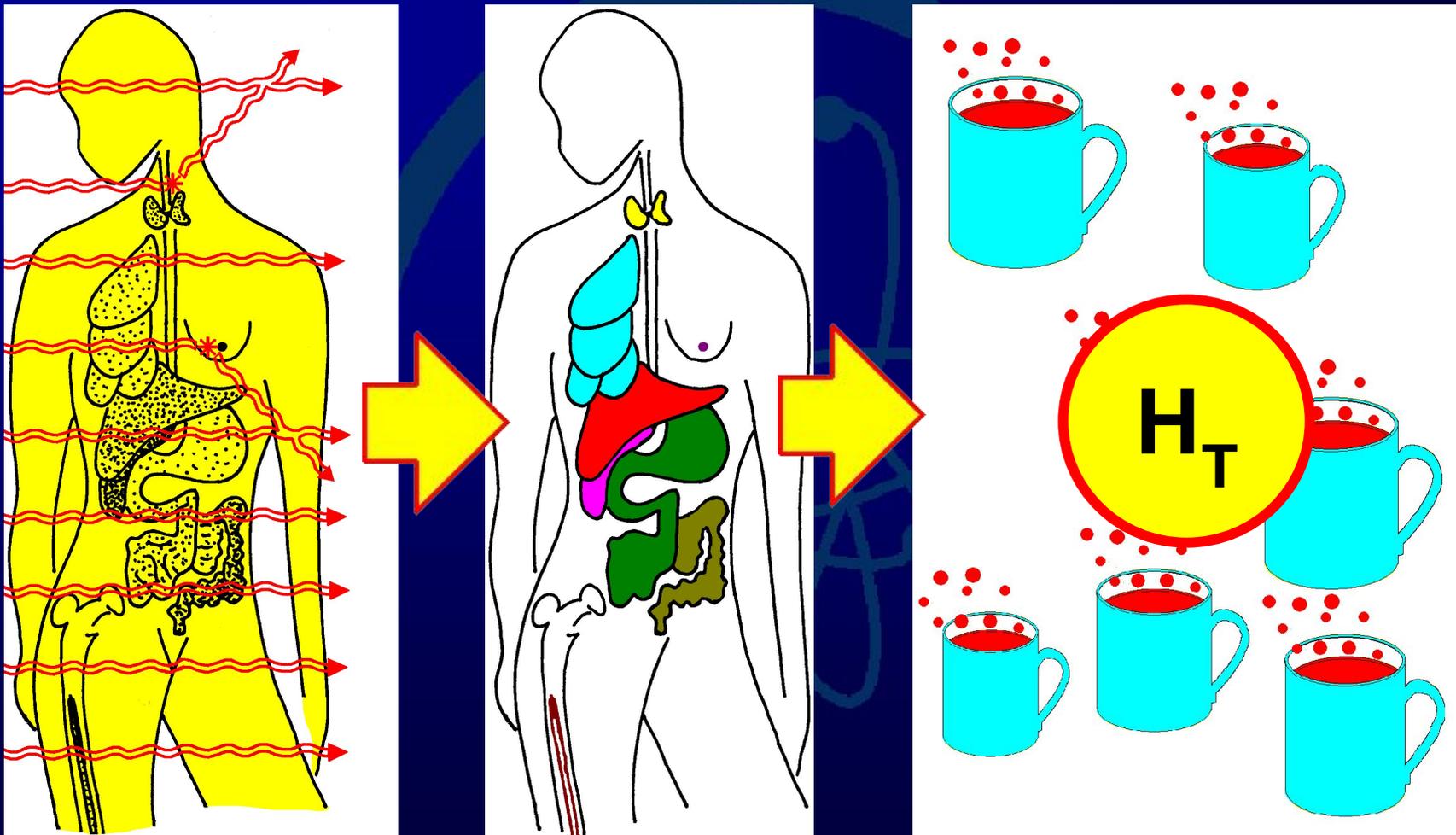


**зиверт (Зв)**

# Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения

Излучение	$w_R$	Излучение	$w_R$
Фотоны	1	Нейтроны	
Электроны и позитроны	1	$E_n < 10$ кэВ	5
		10 – 100 кэВ	10
Протоны	5	100 кэВ – 2 МэВ	20
Альфа- частицы	20	2 – 20 МэВ	10
		$E_n > 20$ МэВ	5

# Характеристика облучения для оценивания стохастических эффектов



**4.3. Величины  
для определения требований к  
состоянию радиационной безопасности**



# Эффективная доза

**Назначение:** радиационное нормирование

**Определение:** произведение эквивалентных доз облучения органов и взвешивающих коэффициентов ткани :

$$E = \sum_T H_T \times w_T$$

**Единица:** *зиверт* (Зв)



# Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов

Ткань/Орган	$w_T$	Ткань/Орган	$w_T$
Гонады	0.20	Печень	0.05
Красный костный мозг	0.12	Пищевод	0.05
Толстый кишечник	0.12	Щитовидная железа	0.05
Легкое	0.12	Вся кожа	0.01
Молочная железа	0.05	Костные поверхности	0.01
Пузырь	0.05	Остальные	0.05
Желудок	0.12	<b>Всего</b>	<b>1.0</b>



# Коллективная эффективная доза

**Величина:** коллективная эффективная доза,  $S$

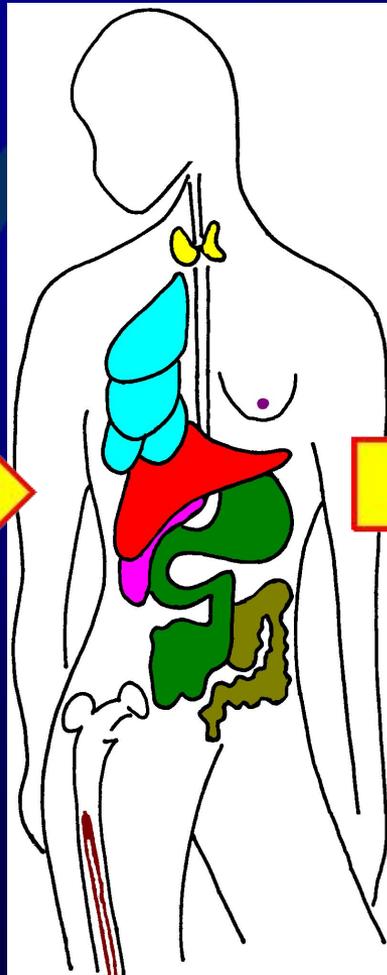
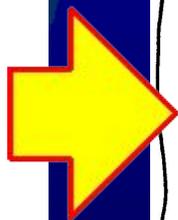
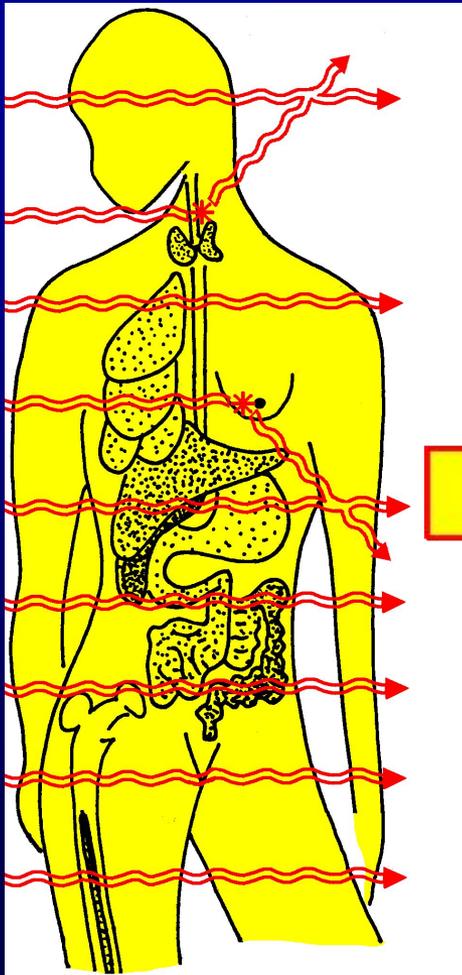
**Цель:** оценка коллективного ущерба в денежном выражении

**Определение:**

$$S = \sum_{i=1}^N E_i$$

**Единица:** *человеко-зиверт* (чел-Зв)

# Интегральная характеристика условий облучения



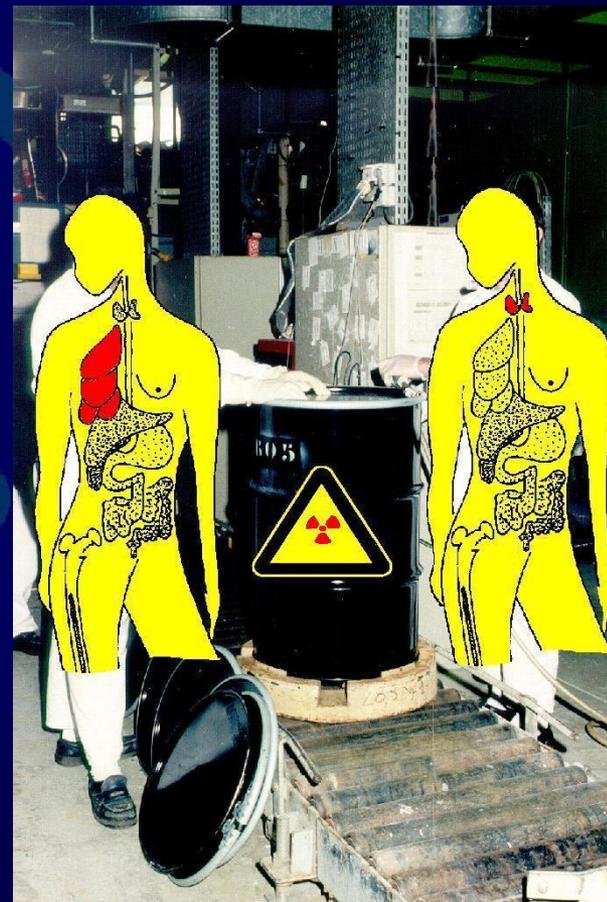
**4.4. Величины для демонстрации  
соответствия условий использования  
источников требованиям обеспечения  
радиационной безопасности**



# Определение индивидуальной дозы



Работнику  
приписывается  
величина дозы,  
которую  
получил бы  
«стандартный  
человек»,  
выполняющий  
ту же работу в  
тех же  
условиях.



# Демонстрация соответствия

Годовая эффективная доза  
соответствует сумме

- индивидуального эквивалента **дозы внешнего облучения за календарный год** и
- ожидаемой эффективной **дозы внутреннего облучения от поступления радионуклидов за тот же период:**

$$E \Leftrightarrow H_p(10) + I^{inh} \times e^{inh}(\tau) + I^{ing} \times e^{ing}(\tau)$$

# Величины радиологического мониторинга

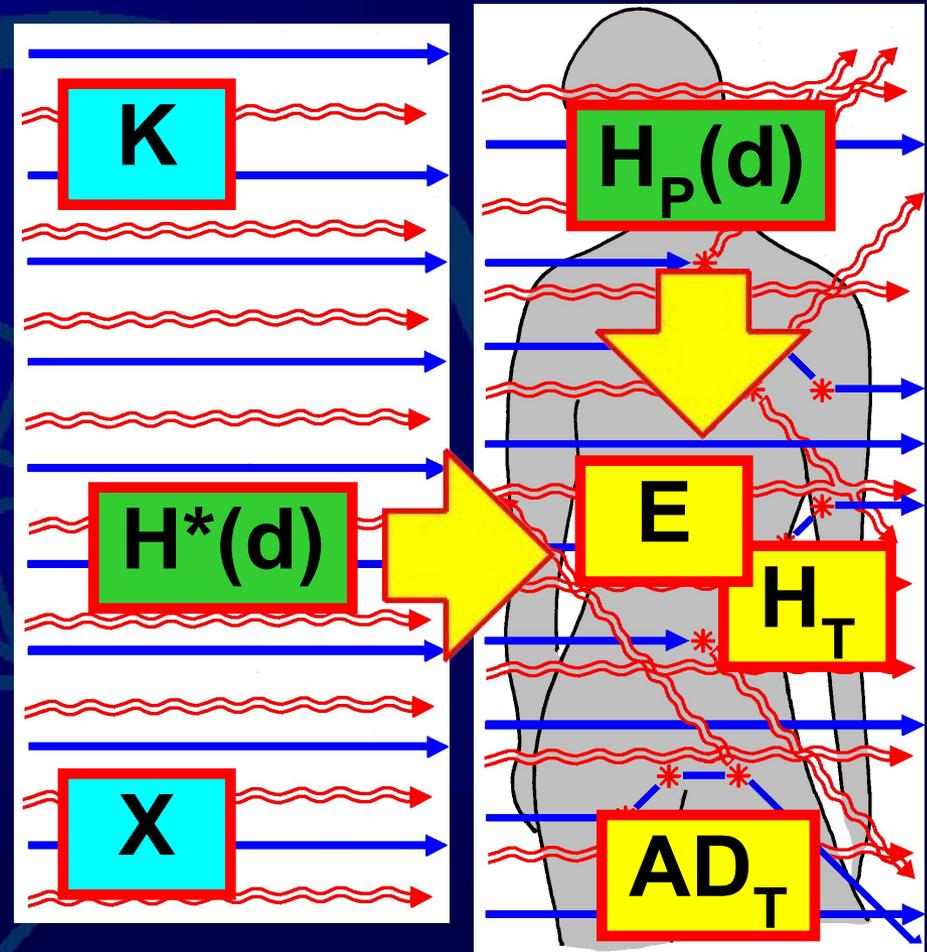
Операционные дозиметрические величины, используемые в мониторинге при нормальной эксплуатации источника излучения (в условиях малых доз):

- эквивалент дозы,  $H$ ;
- амбиентный эквивалент дозы,  $H^*(d)$ ;
- индивидуальный эквивалент дозы,  $H_p(d)$ .

# Тело человека в поле излучения

Тело облученного человека искажает поле ионизирующего излучения, падающего на него.

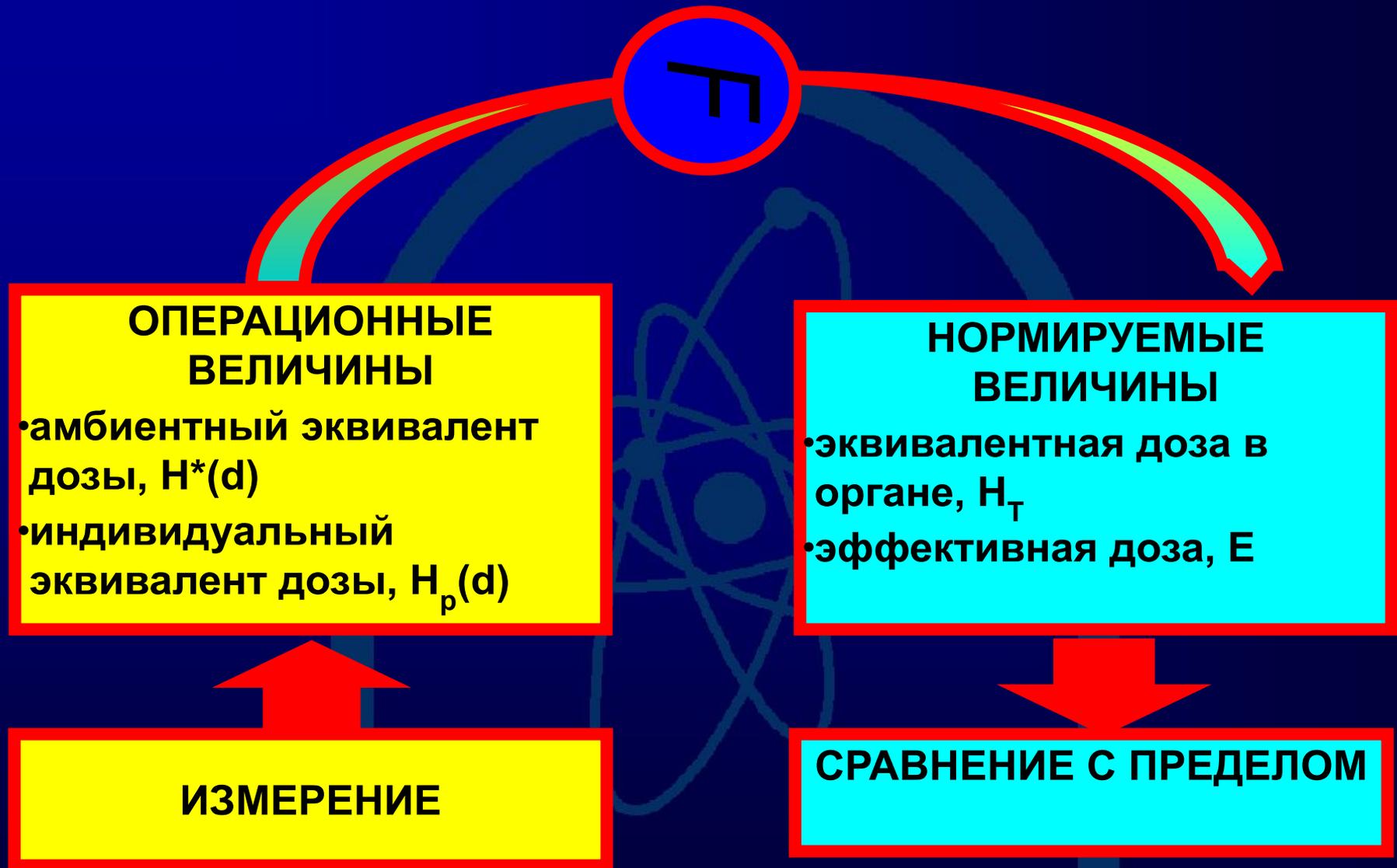
Первичное и искаженные поля излучения имеют различные дозиметрические характеристики.



Вакуум

Тело  
человека

# Контроль внешнего облучения



# Эквивалент дозы

**Величина:** эквивалент дозы, Н

**Цель:** оценка облучения человека в поле внешнего излучения в терминах измеряемых величин для радиологического мониторинга

**Определение**

$$H = \sum_R D_R \times Q_R$$

**Единица СИ:** зиверт (Зв)

# Коэффициент качества излучения

Коэффициент качества излучения определяется как функция от линейной передачи энергии  $L$  в жидкой воде

$Q(L)$	Диапазон ЛПЭ, кэВ/мкм в воде
1	$L \leq 10$
$0.32 \times L^{-2.2}$	$10 \leq L \leq 100$
$300/(L)^{1/2}$	$100 \leq L$

# Коэффициент ожидаемой эффективной дозы

**Назначение:** демонстрация соответствия требованиям обеспечения радиационной безопасности в случае внутреннего облучения

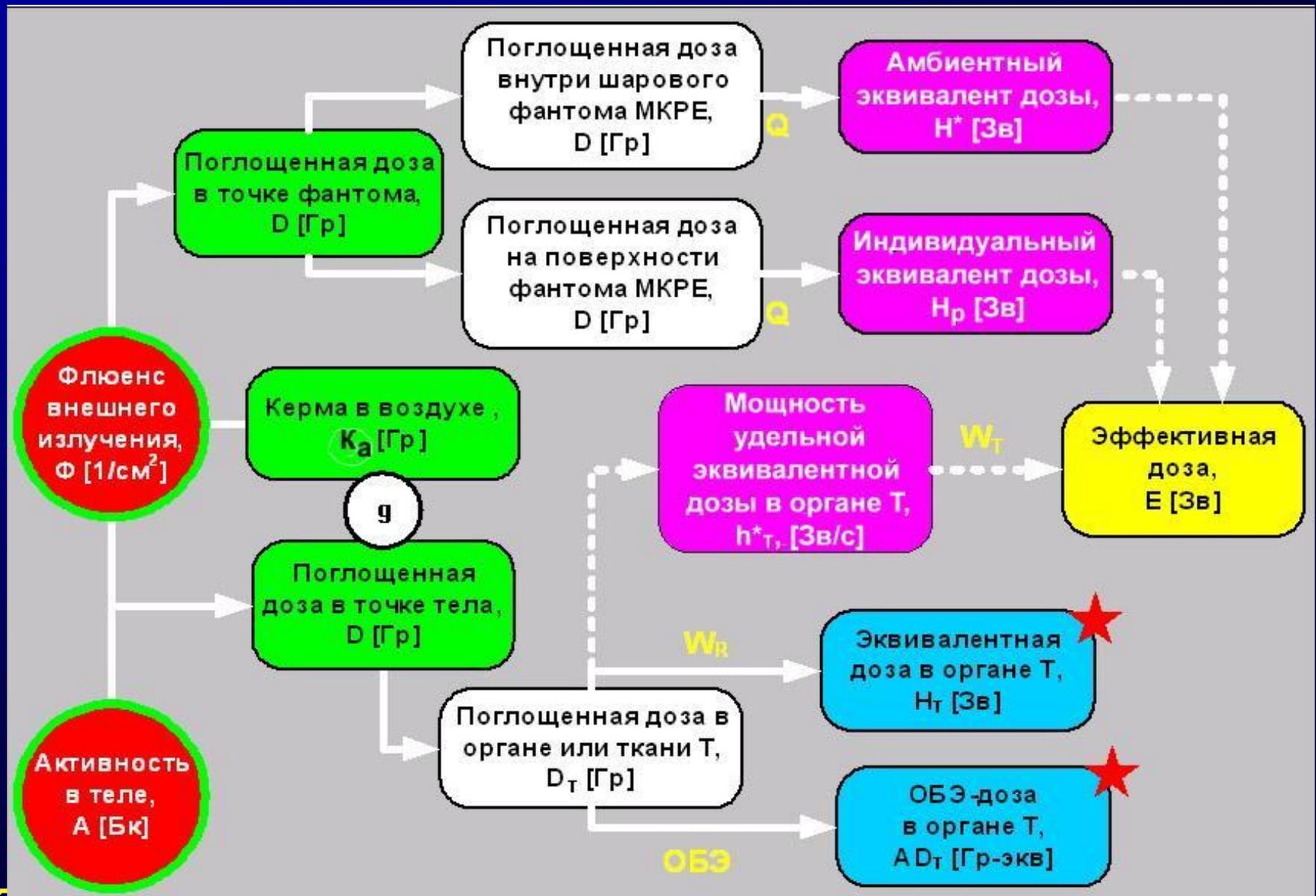
**Определение:** произведение временных интегралов мощностей эквивалентных доз облучения органов и  $w_T$  при поступлении 1 Бк:

$$e(\tau) = \sum_T w_T \times \int_0^\tau \dot{h}_T(t) dt$$

**Единица:** зиверт на беккерель (Зв/Бк)



# Система дозиметрических величин



# Заключение

