

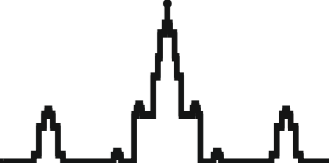
Радиоактивные катастрофы: история, причины и следствия



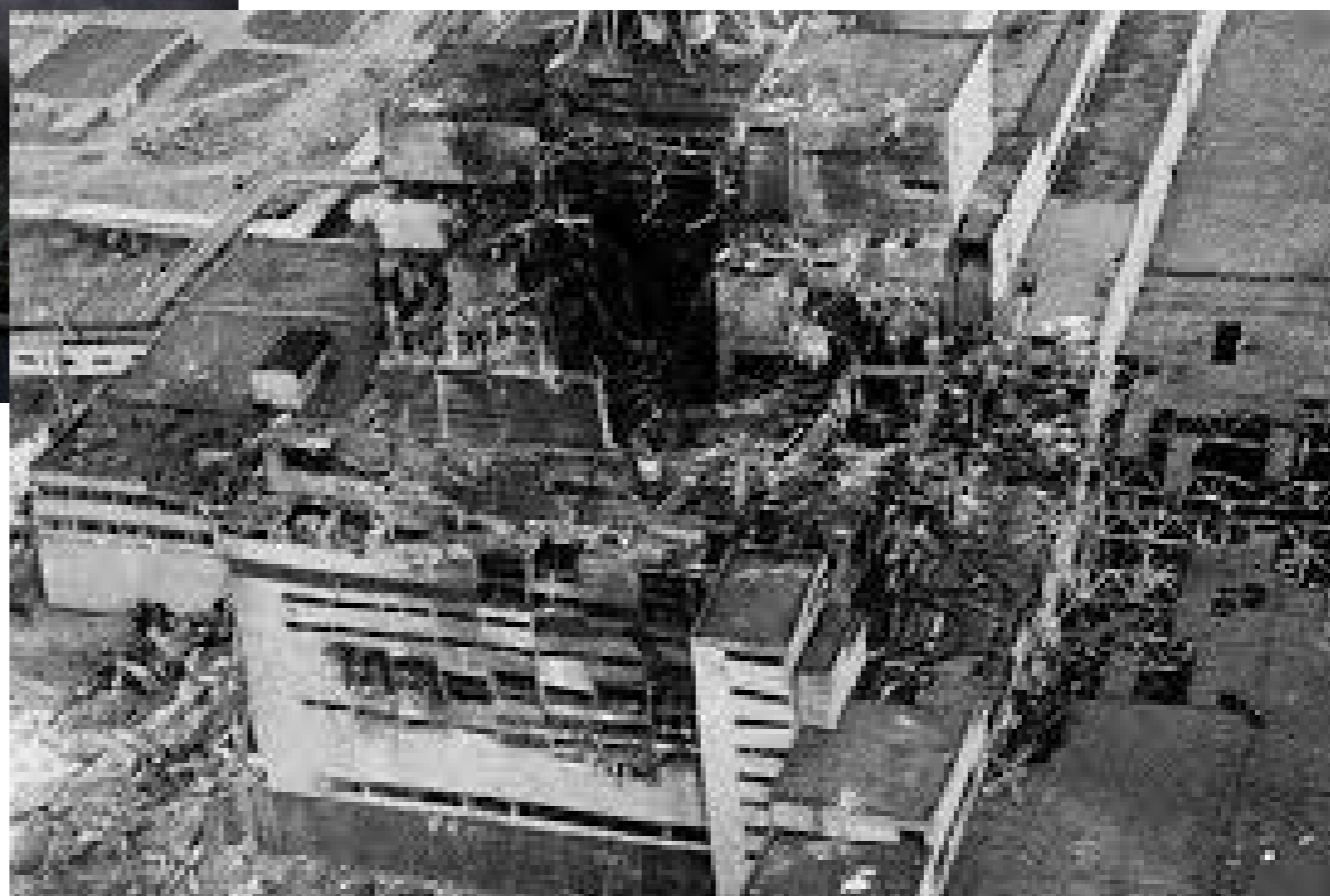
Петров Владимир Геннадиевич
к.х.н., доцент кафедры радиохимии
химического факультета МГУ,
заведующий лабораторией дозиметрии и
радиоактивности окружающей среды



Аварии, жертвы...



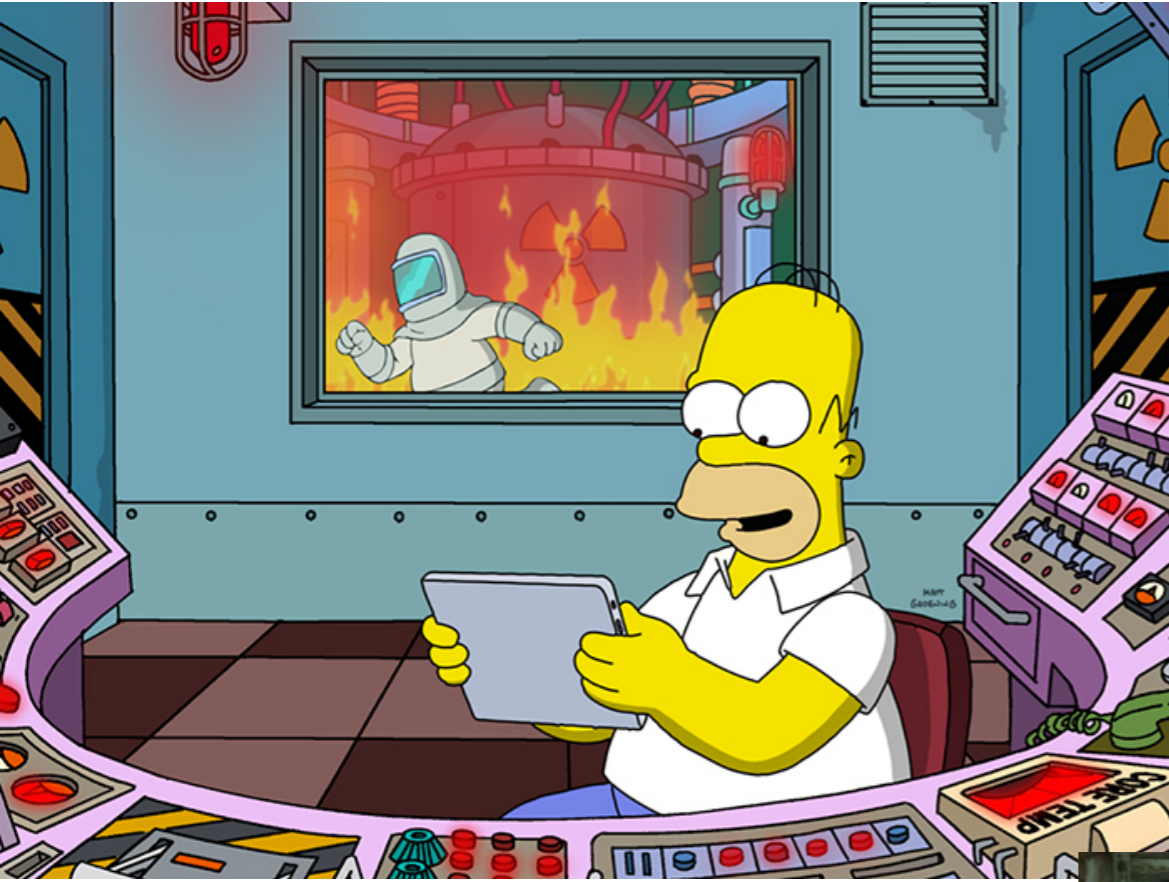
Фукусима



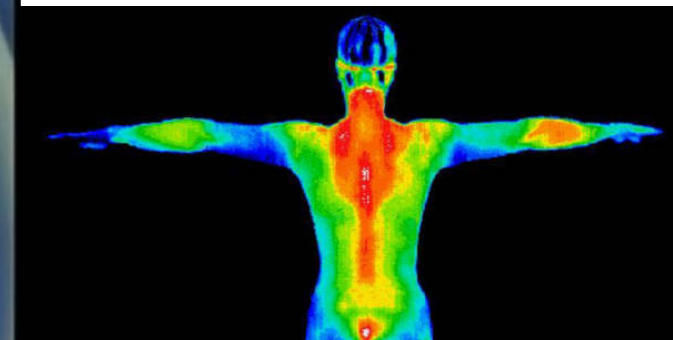
Чернобыль

ТриМайл Айленд,
ВУРС,..

Радиация в культуре



ОБЛУЧЕНИЕ? (радиация)



РАДИАЦИЯ?

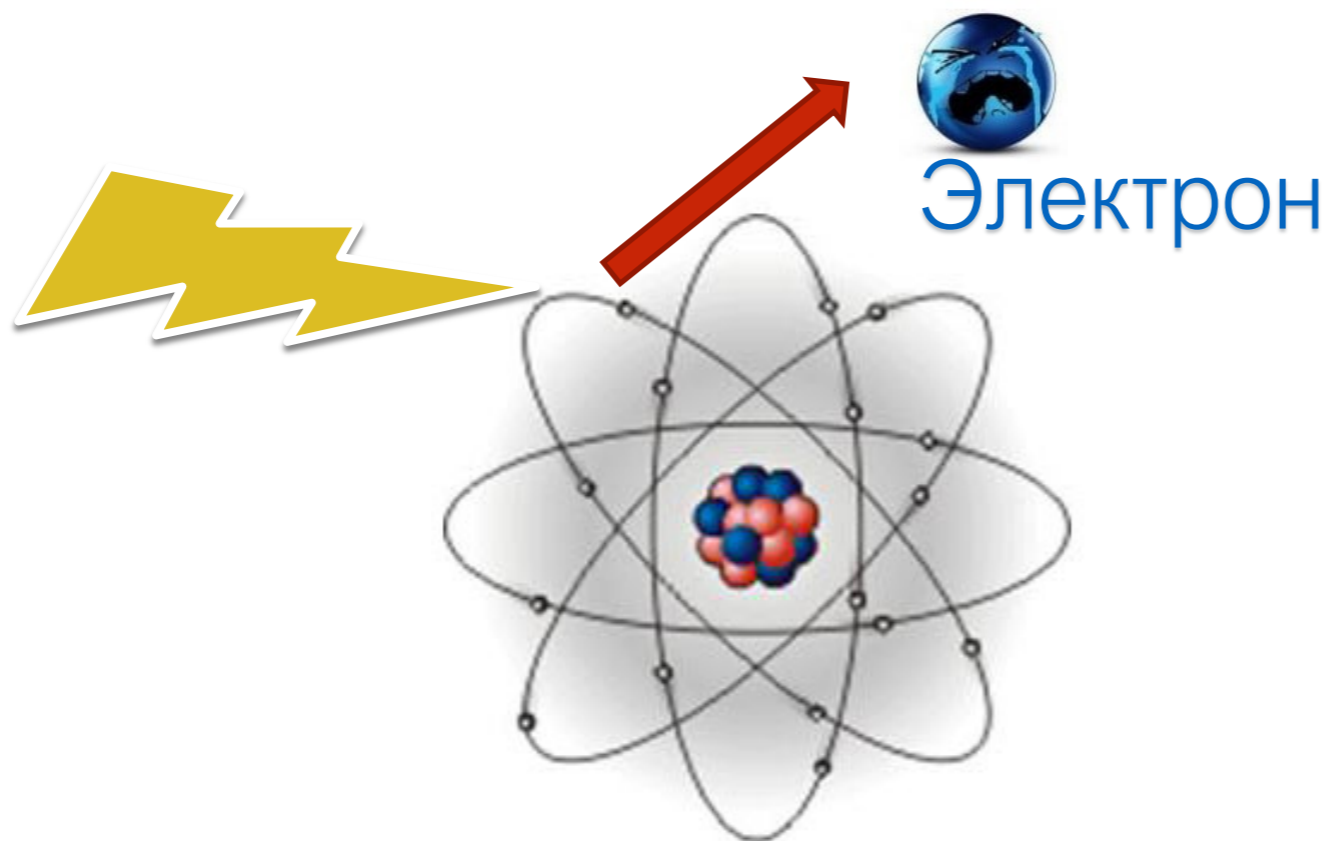
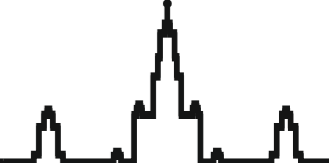
Микроволновка?

WiFi?

5G?

Тоже опасно?

Ионизирующее излучение!



- Жесткий УФ
- Альфа-
- Бета-
- Гамма-
- Рентген
- ...

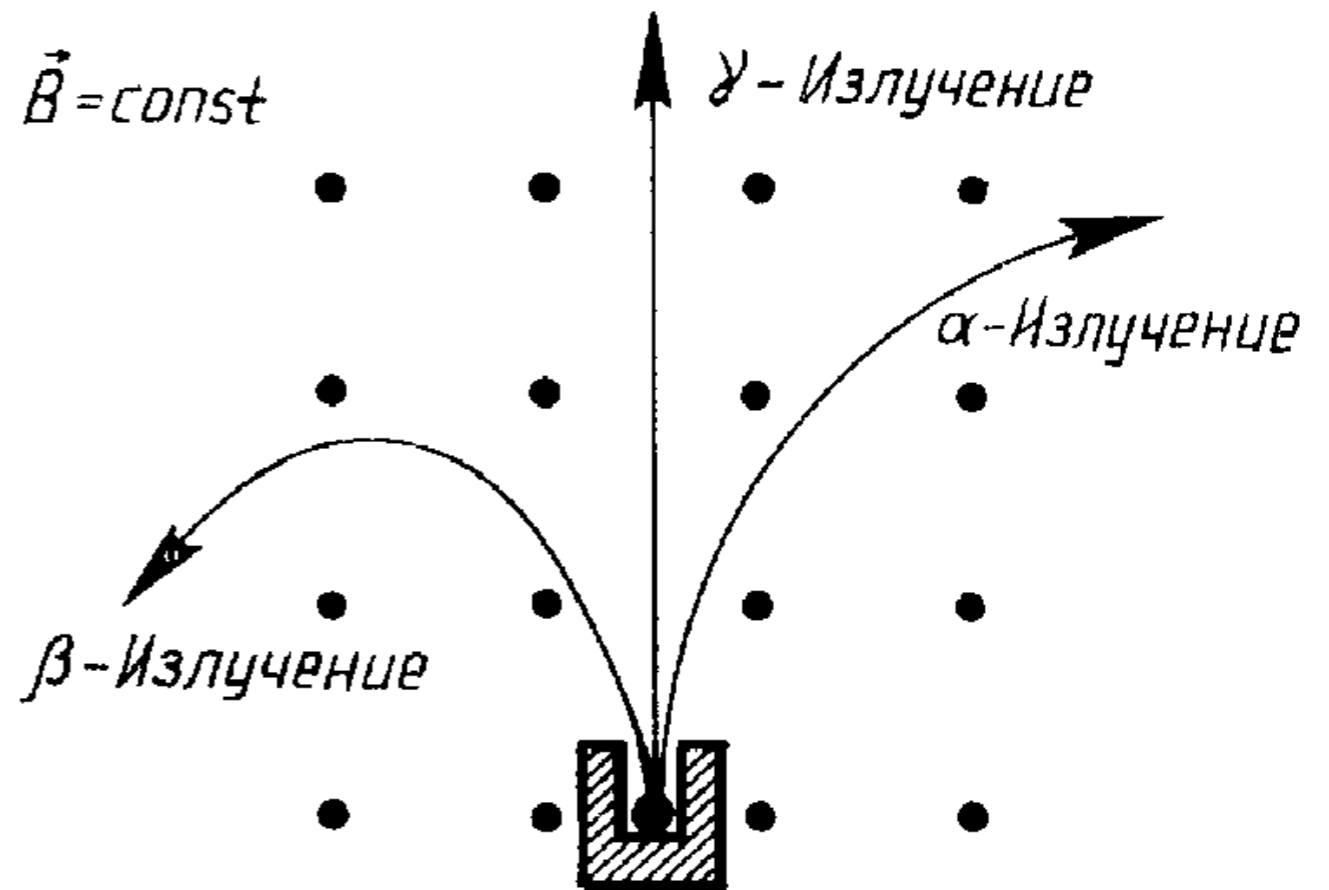


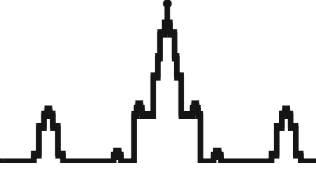
Что такое радиоактивность?

Спонтанное изменение состава и/или энергетического состояния ядра

Для химика: превращение одного химического элемента в другой

- Альфа-распад
- Бета-распад
- Гамма-переход



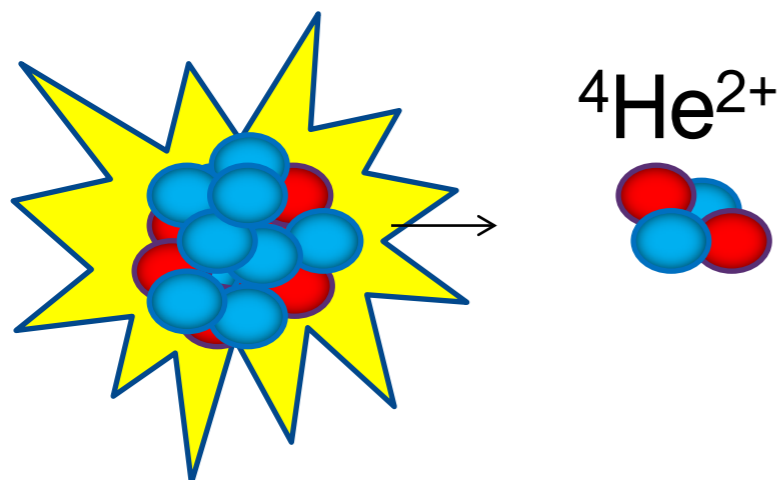


$E_{\alpha} \approx 4-8 \text{ МэВ}$

$E_{\beta^-} \approx 10-2300 \text{ кэВ}$

$E_{\gamma} \approx 1-4000 \text{ кэВ}$

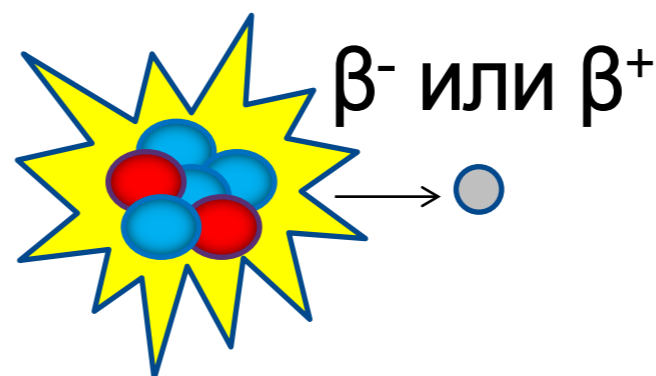
α



Характерен для более тяжёлых ядер, у которых много p и n

^{222}Rn

β

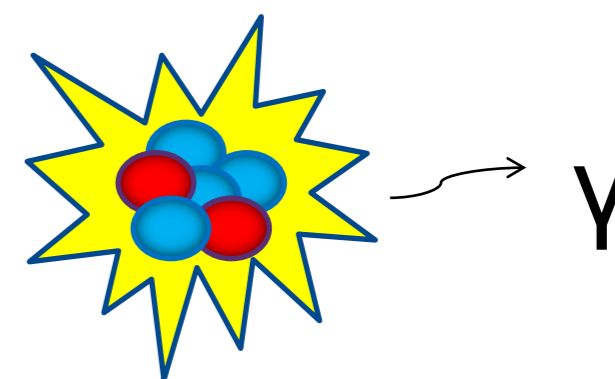


β^- (электрон) - превращение n
 β^+ (позитрон) - превращение p

$^{137}\text{Cs} - \beta^-$

$^{15}\text{O} - \beta^+$

γ



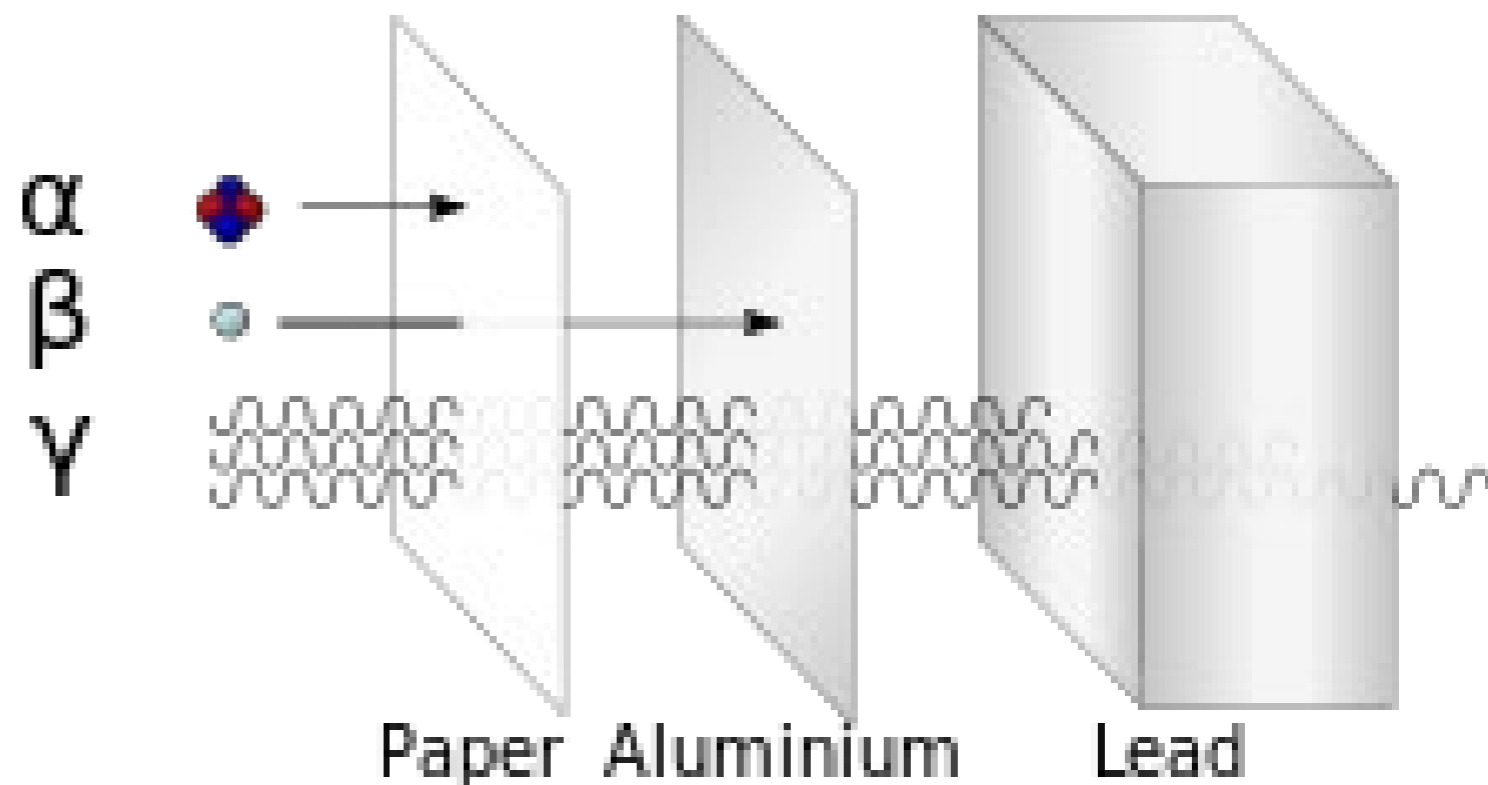
γ - электромагнитное излучение (сопровождает большинство распадов)

Если ядро обладает избыточной энергией
 В природе всё стремится к минимуму энергии => возбуждённое ядро стремится перейти в основное состояние с меньшей энергией
 Оно может сделать это, передав излишек энергии частице

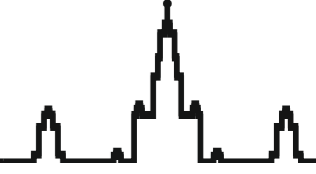
Пробег альфа-частицы – самый маленький (тяжёлая)

Пробег бета-частицы выше, поглощается слоем воды (~до 3 см)

Гамма-излучение – высокая проникающая способность

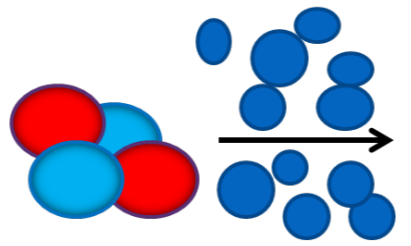


Если источник снаружи – альфа- и бета-излучатели практически не несут вреда



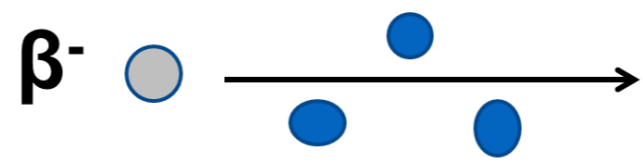
Если альфа- и бета-излучатели попадают **внутри** организма – они вносят основную дозовую нагрузку

Воздействие излучения на организм:
Ионизация и возбуждение молекул



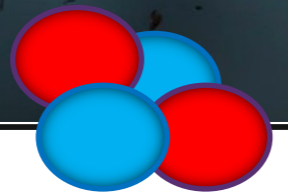
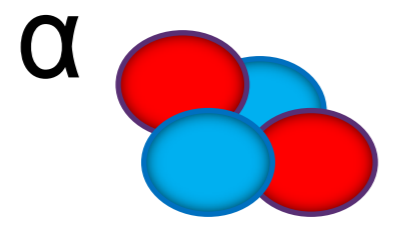
Ионизирует большое количество частиц, передаёт много энергии веществу, быстро останавливается

^{222}Rn

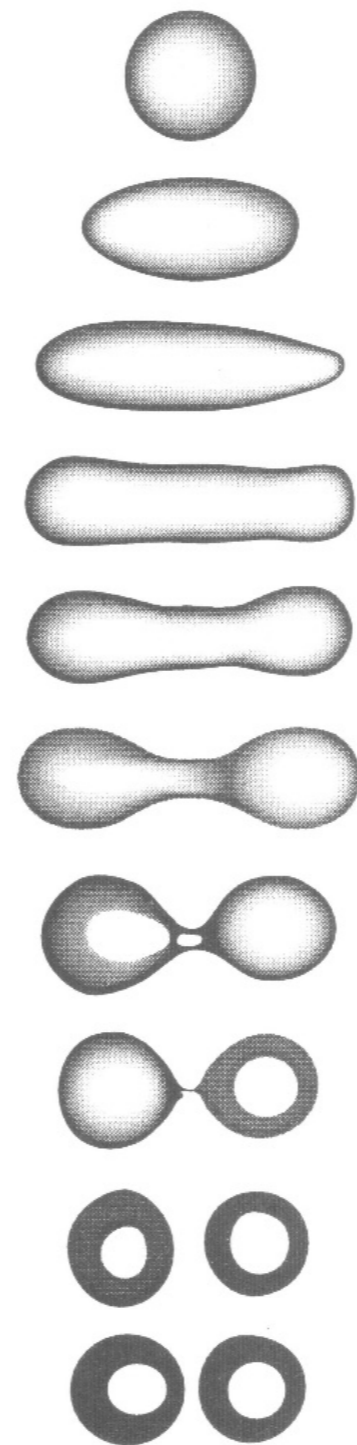
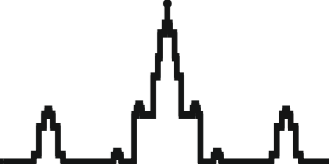


Передаёт меньше энергии

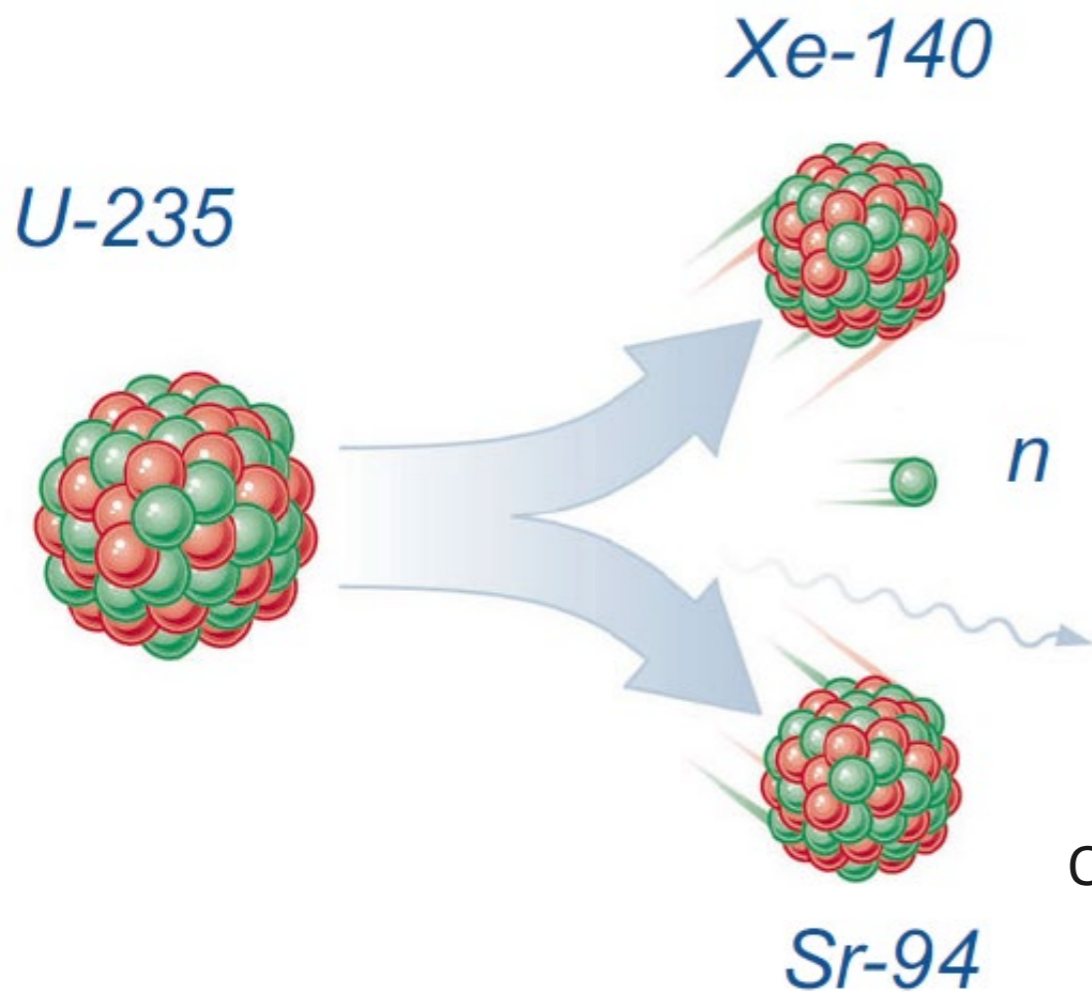
^3H , ^{40}K , ^{14}C



Деление ядра. Капля



Деление. Очень странное явление

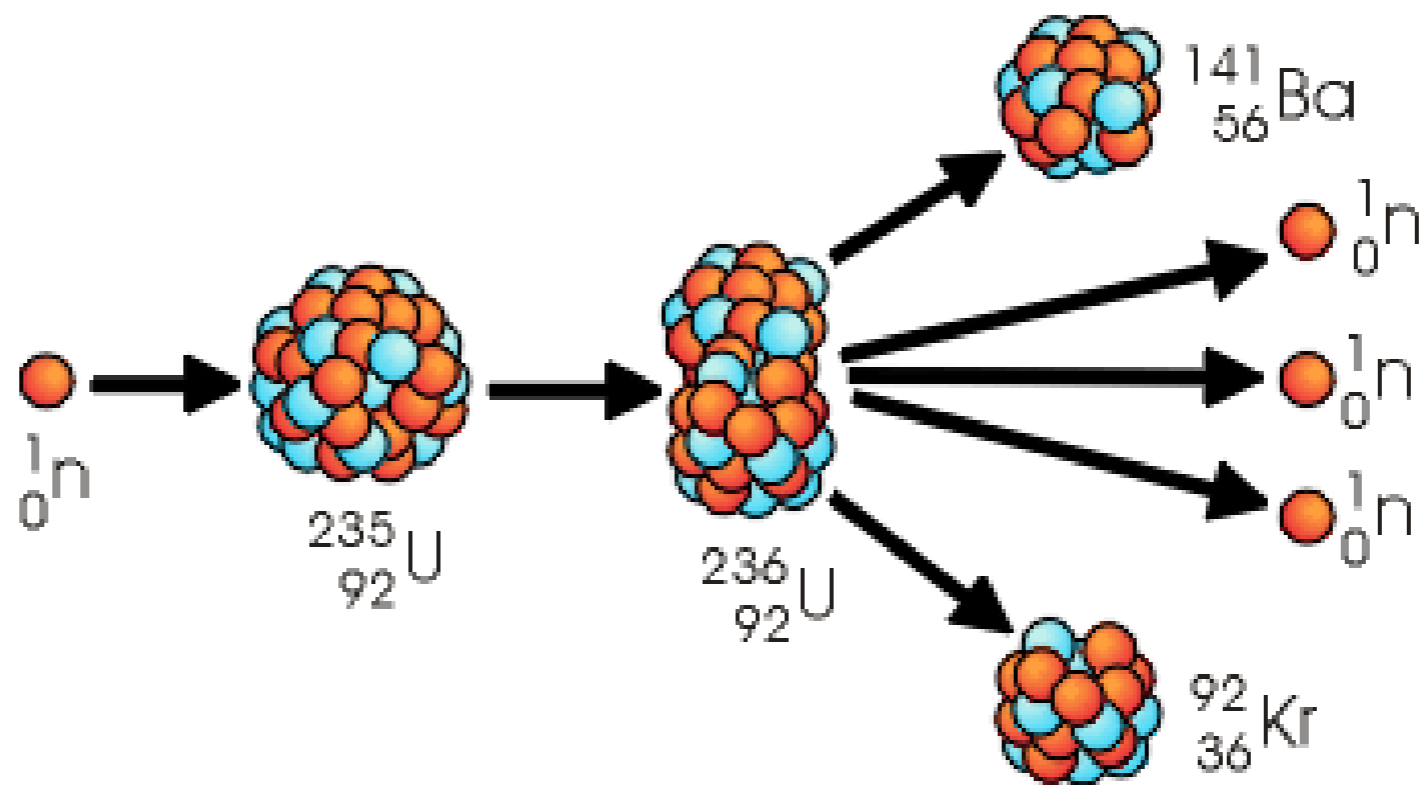
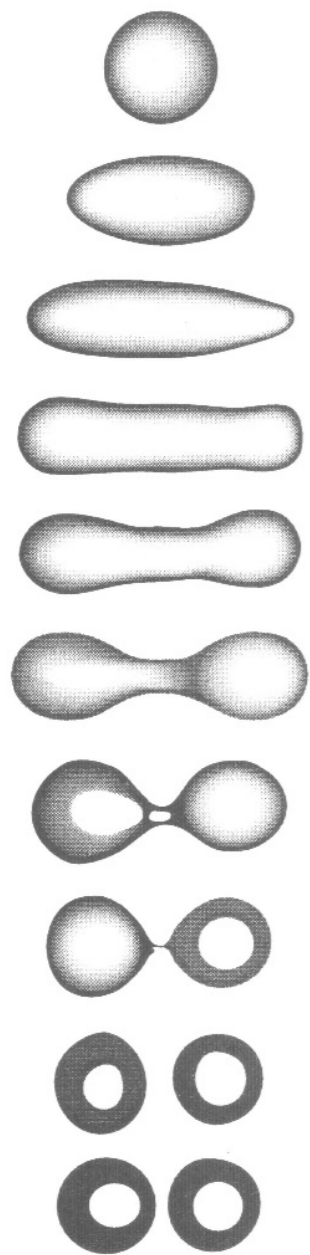


Отто Ган и Лиза Мейтнер в лаборатории
Института кайзера Вильгельма



Фриц Штрассман

Из урана образовывались не просто элементы, находящиеся рядом с ним, а из середины таблицы Менделеева!

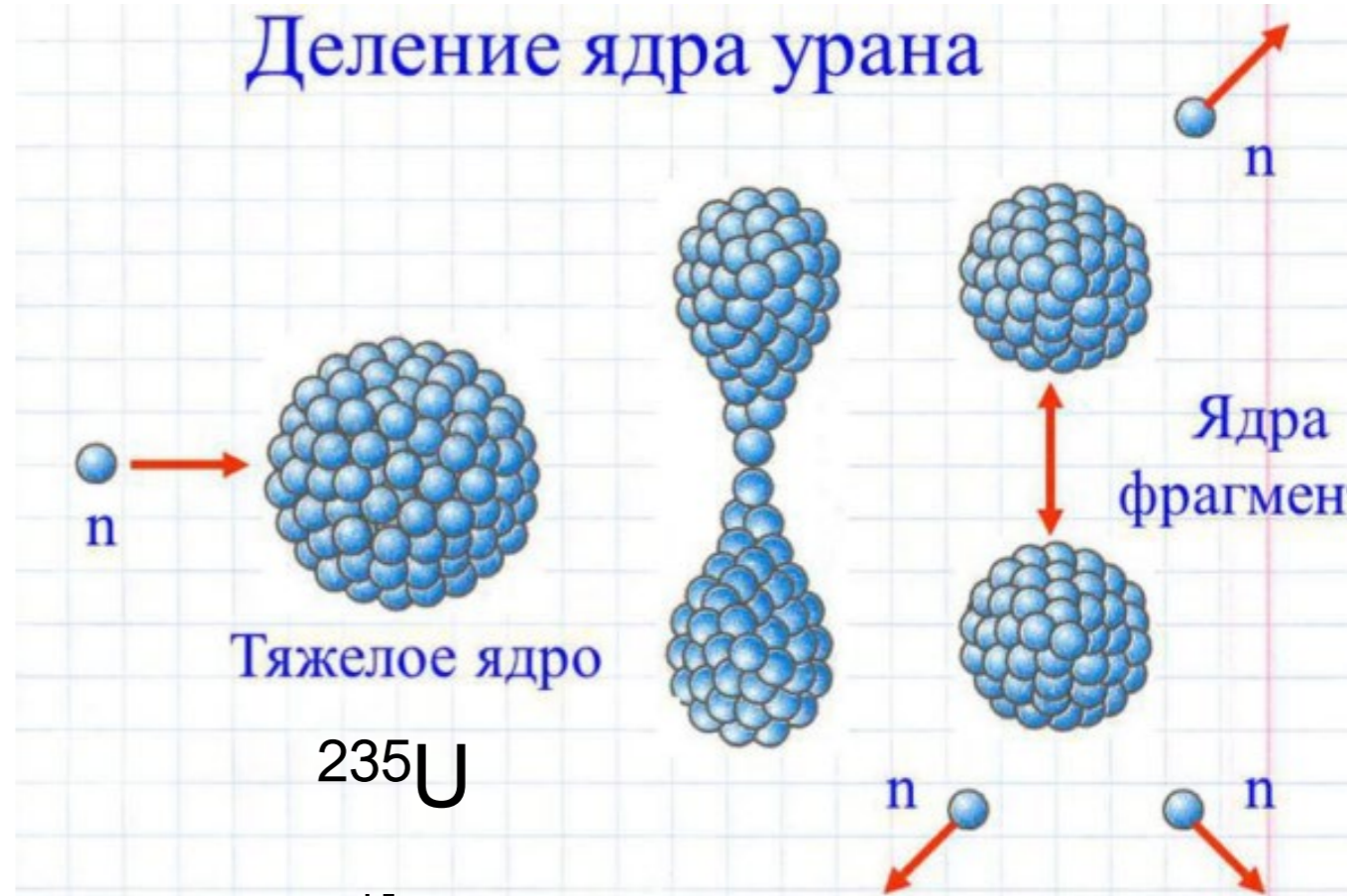


Энергия на распад ≈ 200 МэВ!

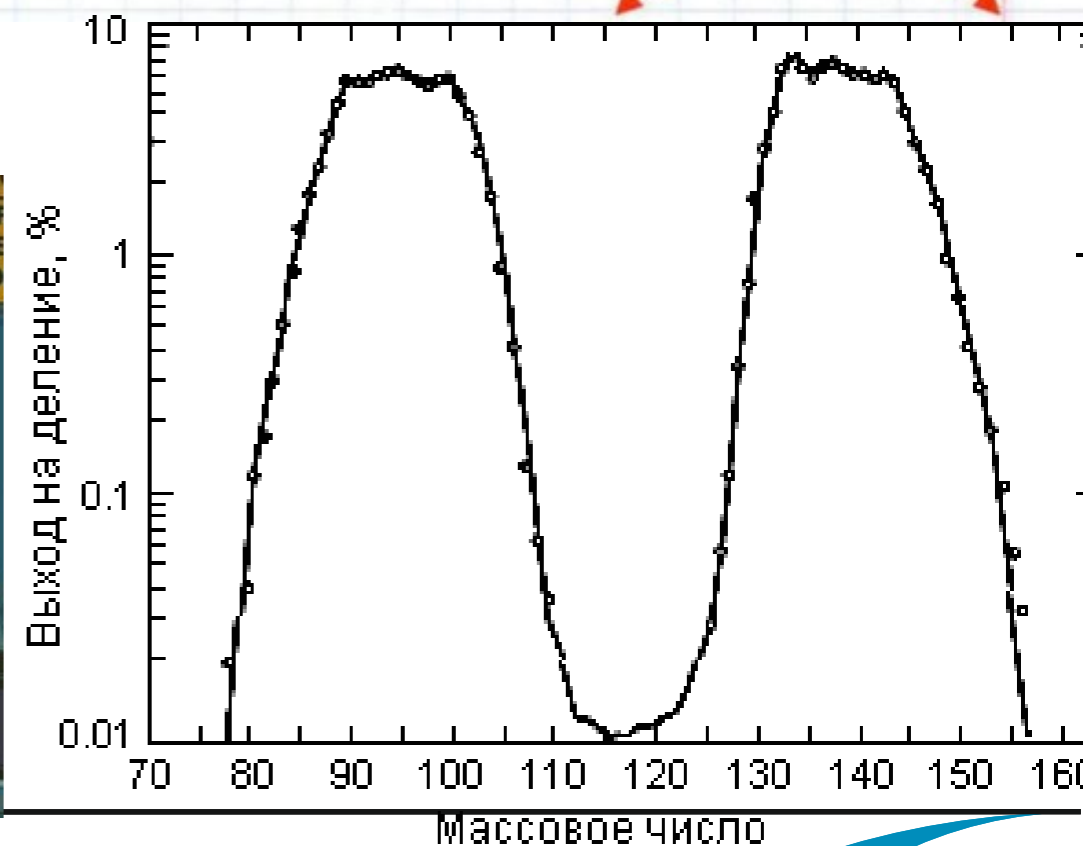
Деление урана

Нейтроны низких энергий налетают на ядро ^{235}U . Образуется составное ядро, которое распадается на 2 осколка с вылетом нейтронов. Выделяется энергия ≈ 203 МэВ (большая энергия)

Осколки распределяются неравномерно, есть 2 пика, на которые приходится в том числе ^{90}Sr и ^{137}Cs (их много в отработанном ядерном топливе)



Ошибка:
должен быть ^{238}U



Сравнение энерговыделения

Энергия на 1 кг топлива

^{235}U – $8.8 \cdot 10^{13}$ Дж \approx 1 ГВт·сут

Уголь \approx 10 кВт·сут

Газ \approx 20 кВт·сут



26 м³

Г – гига – 10^9

М – мега – 10^6

к – кило – 10^3



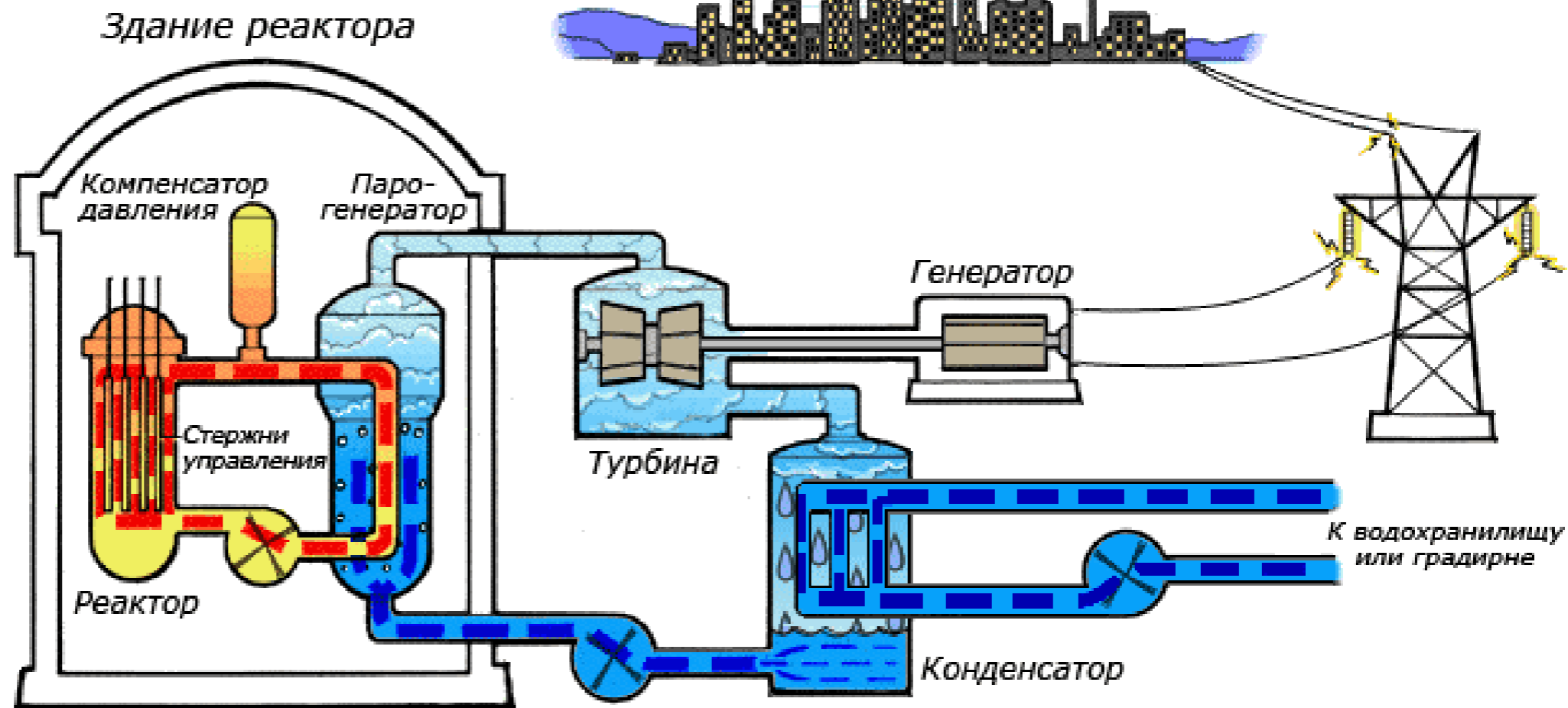
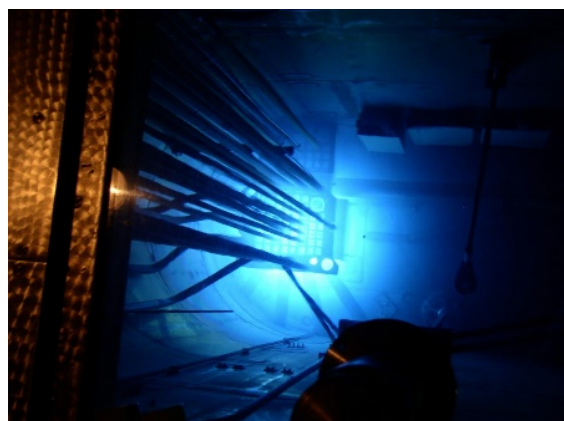
vs.

26 мл



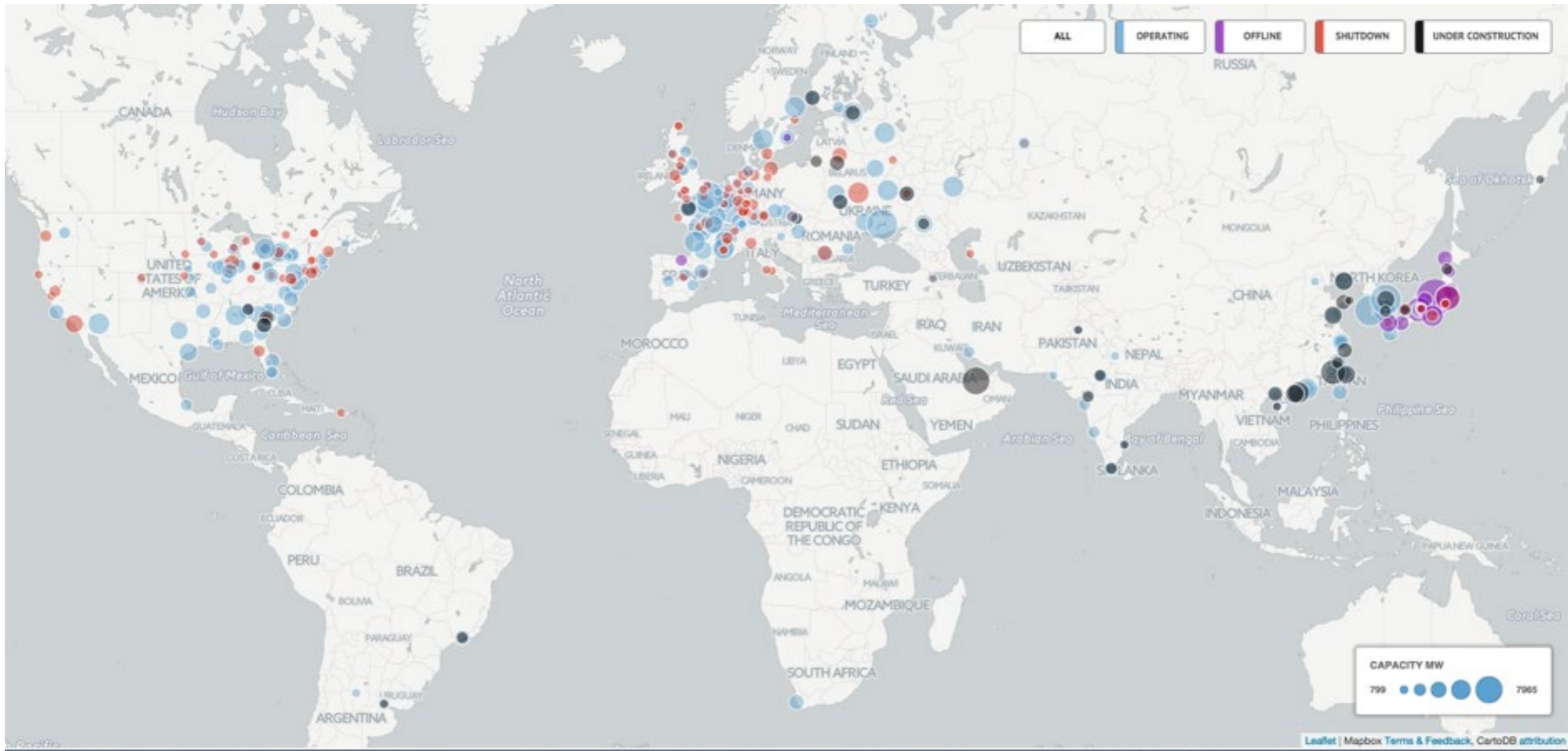
- Значительное снижение выбросов CO_2
- Снижение дозовых нагрузок населения по сравнению с угольными ТЭС
 - Устойчивая выработка электроэнергии
 - Более низкая удельная стоимость топлива
(уран – 5% от себестоимости электроэнергии; углеводороды – 75%)

Реактор



Ядерный реактор включает в себя активную зону, в которой содержится ядерное топливо и замедлитель нейтронов, отражатель нейтронов, теплоноситель для отвода тепла, системы управления цепной реакцией, защита реактора и его управление.

Где есть АЭС?



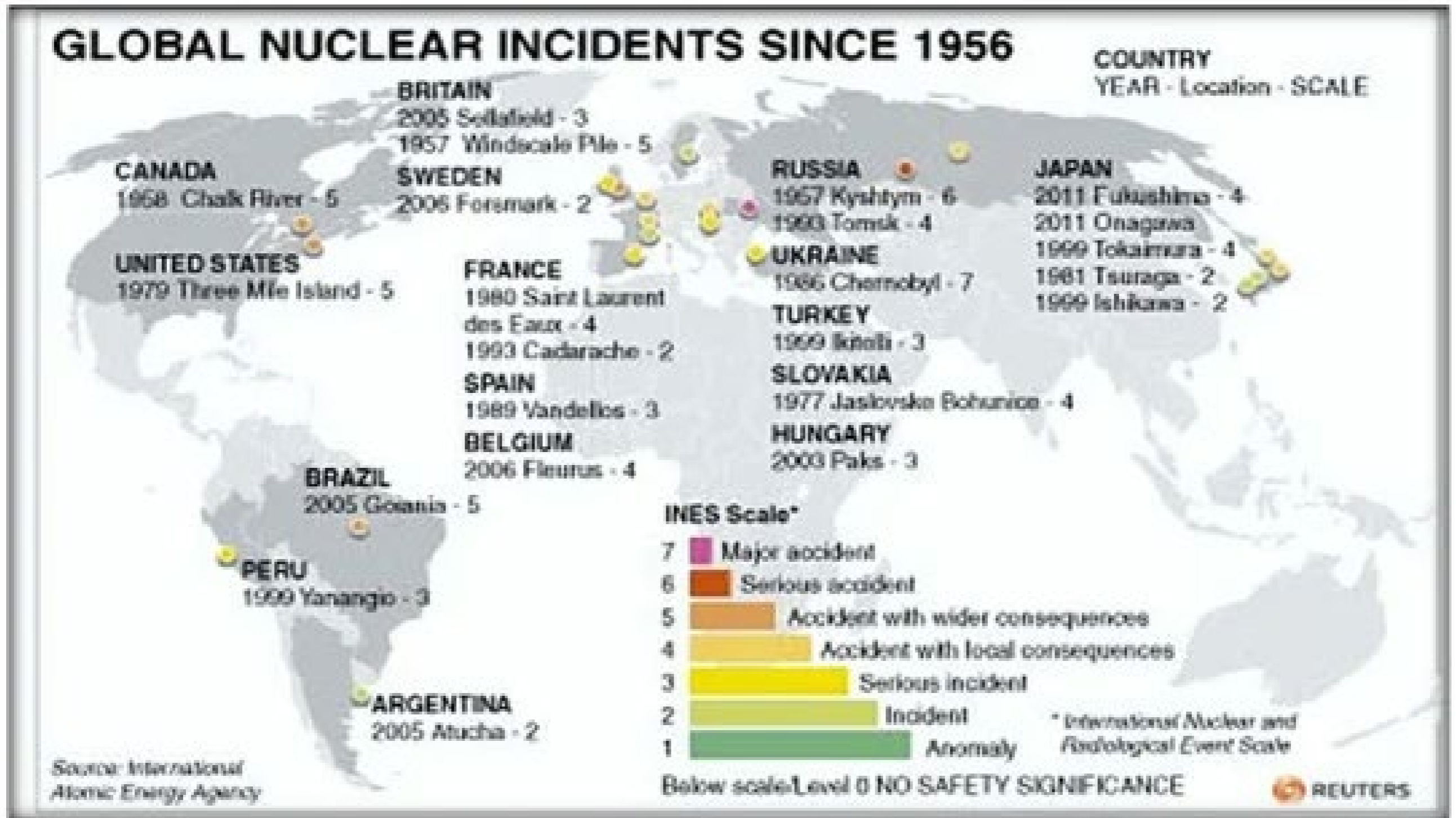
Что может пойти не так?

1. Самоподдерживающаяся цепная реакция (СЦР)
2. Химический взрыв или другое «рассеяние» радиоактивных веществ
3. Вскрытие источника

А где были аварии?

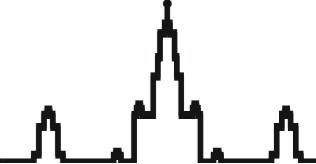
СССР, Япония...

А где были аварии?



<https://doi.org/10.3390/ijerph18178934>

Оценка последствий



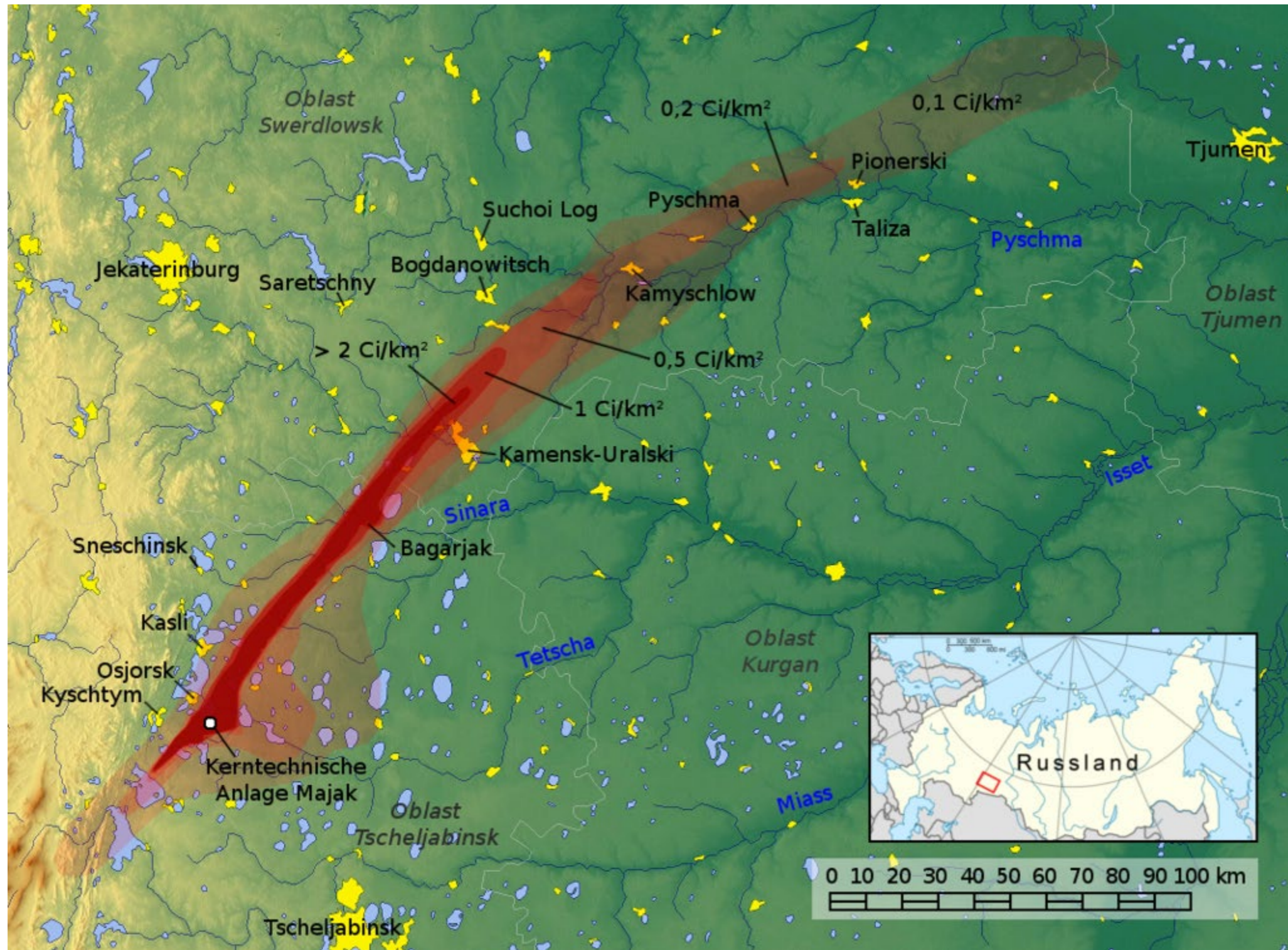
МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКАЛА ЯДЕРНЫХ СОБЫТИЙ (INES)



miraes.ru

Кыштымская авария (6)

29 сентября 1957 года на химкомбинате «Маяк»



Авария в Уиндскейле (5)

10 октября 1957, Великобритания



Авария на АЭС Три-Майл-Айленд (5)

28 марта 1979, США



Чернобыль (7)

Авария на Чернобыльской АЭС
(26 апреля 1986 г.)

Страшный образ в массовой культуре
мешает трезвой оценке.

Обесценивание также вредно

Сколько человек погибло в
результате воздействия
радиации:

50 человек (работники) и 9 детей
(рак щитовидной железы)

[Доклад МАГАТЭ 2005](#)

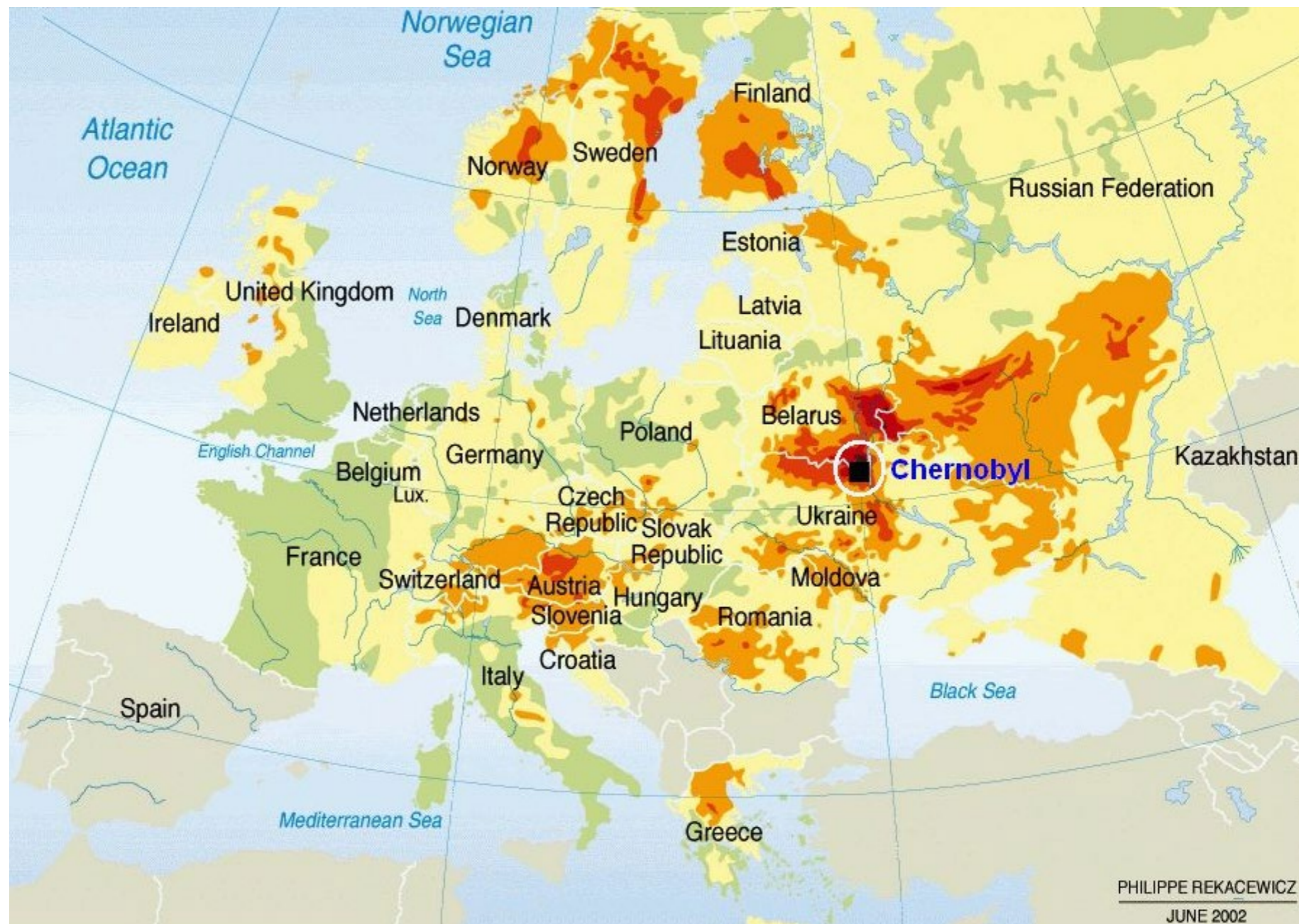
Онкология, вызванная воздействием радиации (рак щитовидной железы) и лейкемия:
~4000 смертей (предположительно!)

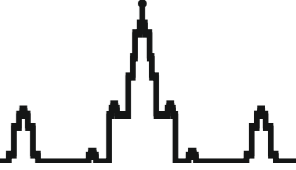
Откуда цифра 4000? Это $\approx 3\%$ от 600 000 людей, подвергшихся воздействию – оценка, а не точное количество:

1. Сложно оценить на фоне естественно возникающего рака
2. Улучшение методов диагностики



Обозначения килоБеккерелей (кБк) на 1 кв.метр





Не обнаруживается
увеличения мутантных особей
у исследованных видов в
условиях хронического
действия повышенного
уровня ионизирующего
излучения.

Более того –
численность
животных
увеличивается.

Авария на АЭС Фукусима (7)

(11 марта 2011 г.)

Причина аварии: нарушение системы охлаждения реактора

Сколько человек погибло в результате воздействия радиации:

0 – на 2015 г. [доклад МАГАТЭ и исследование ВОЗ](#)

174 человека получили дозы порядка 100 мЗв и 6 человек 250 мЗв

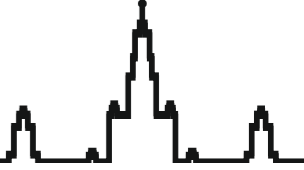
“The most important health effect is on **mental and social well-being**, related to the enormous impact of the earthquake, tsunami and nuclear accident, and the fear and stigma related to the perceived risk of exposure to ionizing radiation. Effects such as depression and post-traumatic stress symptoms have already been reported.”

Психологический фактор играет ключевую роль



Мешки с верхним слоем загрязнённой почвы

Основные радионуклиды: ^{131}I , ^{137}Cs



Чернобыль

Чисто антропогенные факторы

Взрыв ядерный

Все ушло через воздух

Тип реактора РБМК

Фукусима

В первую очередь, природный фактор, потом человеческий

Взрыв химические (водород)

Большая часть ушла через воздух, но значительные количества попали напрямую в океан

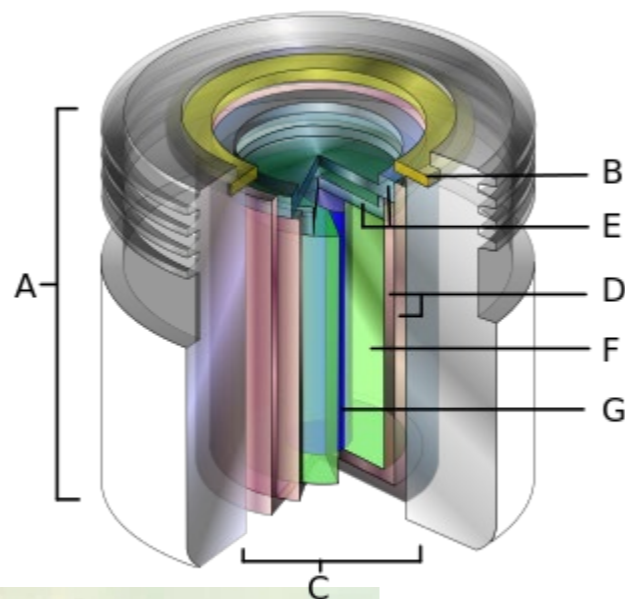
Тип реактора ВВР

- затонувшие АПЛ
- падение самолётов с ядерным оружием
- Падение искусственных спутников Земли
- Снаряды с обеднённым ураном (переработка облученного топлива)
- украденные источники

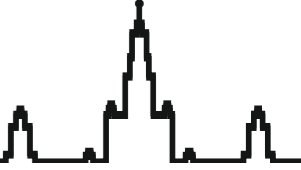


Заражение в Гоянии и потерянный источник в Краматорске

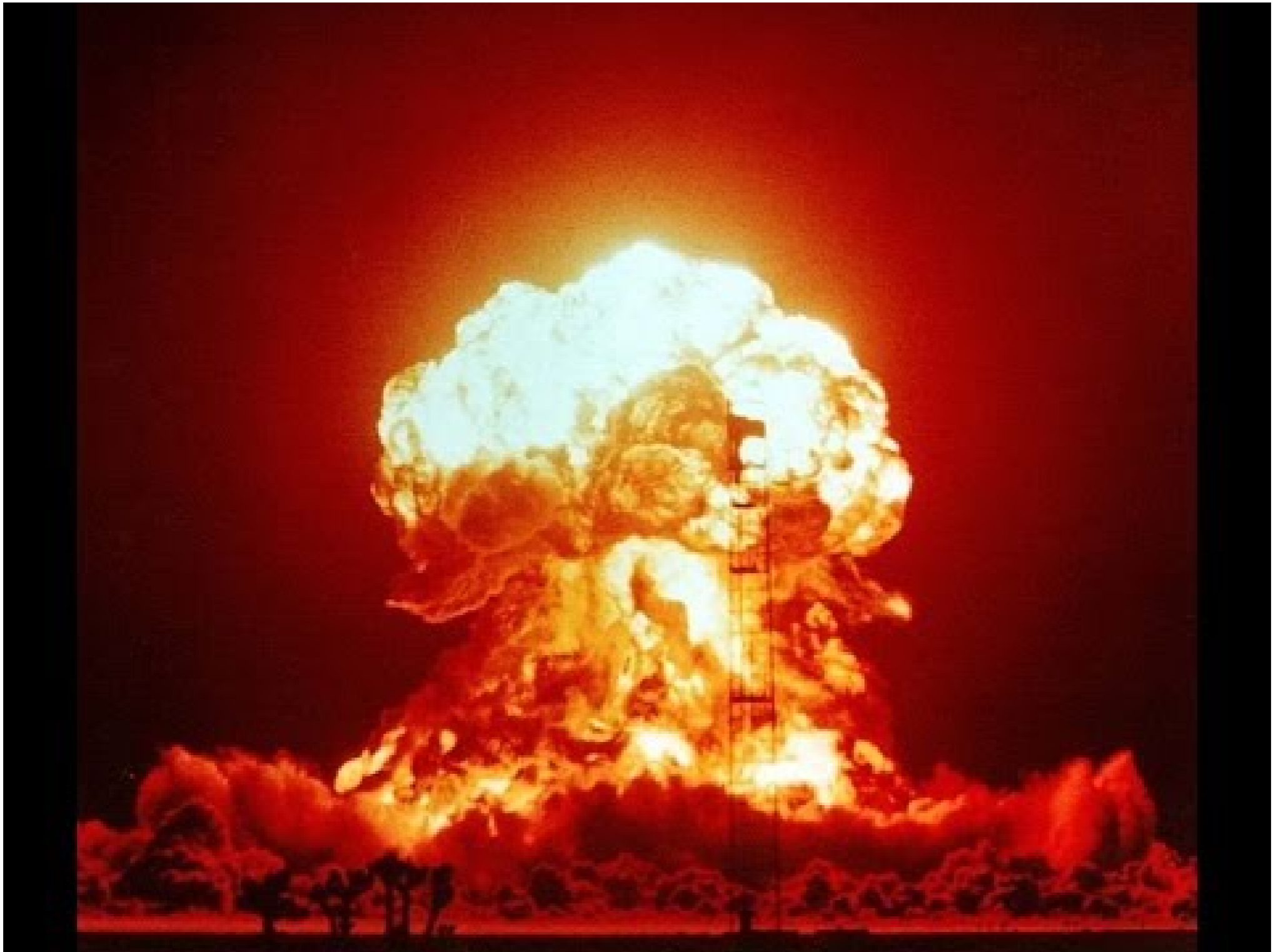
И там и там – источник на основе цезия-137



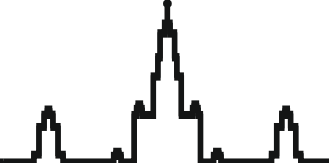

Самая большая катастрофа?



Самая большая катастрофа?



Взрывы с умыслом

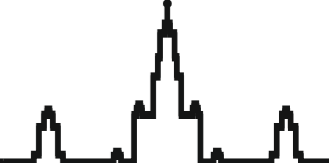


Как оценивать влияние ионизирующего излучения?

1000 выстрелов в минуту



Разница в энергиях частиц при радиоактивном распаде
100-1000-кратная



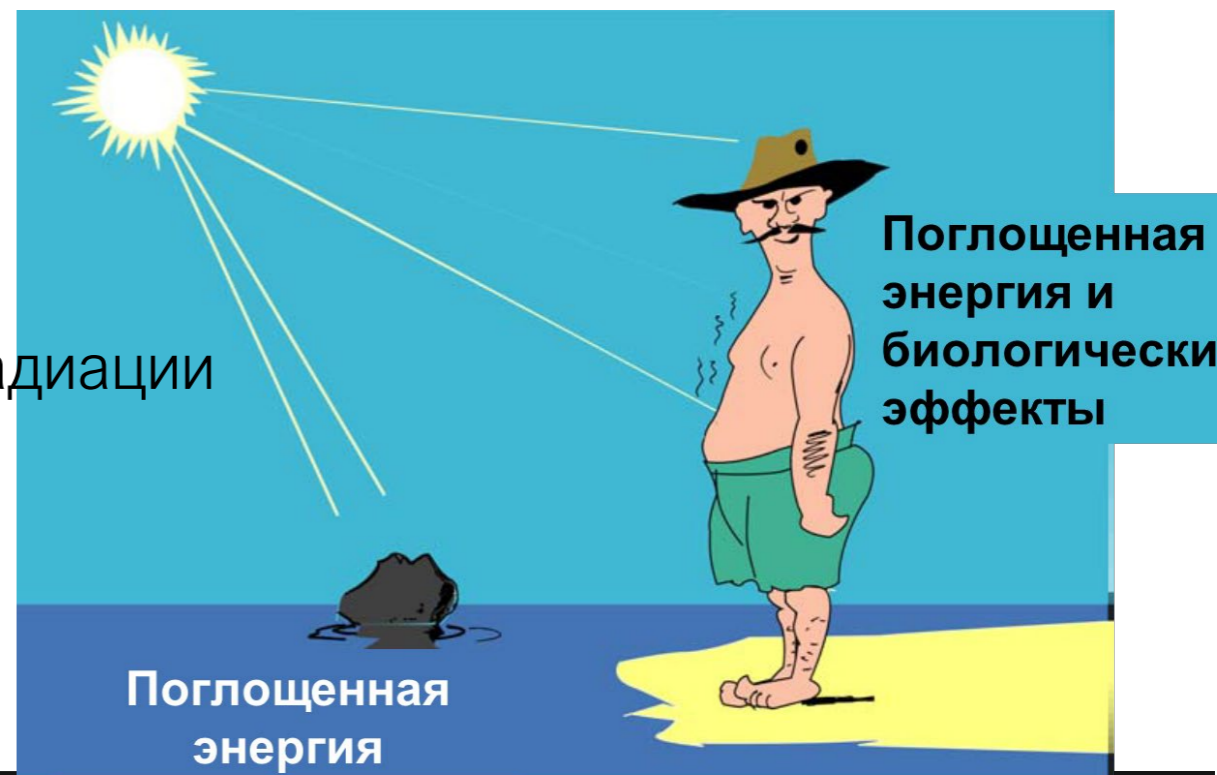
Единица измерения радиоактивности
[Беккерель] = Бк = [распад/с]

По сути – это **скорость** (интенсивность) распада – количество распавшихся ядер (в штуках) в единицу времени (секунда).

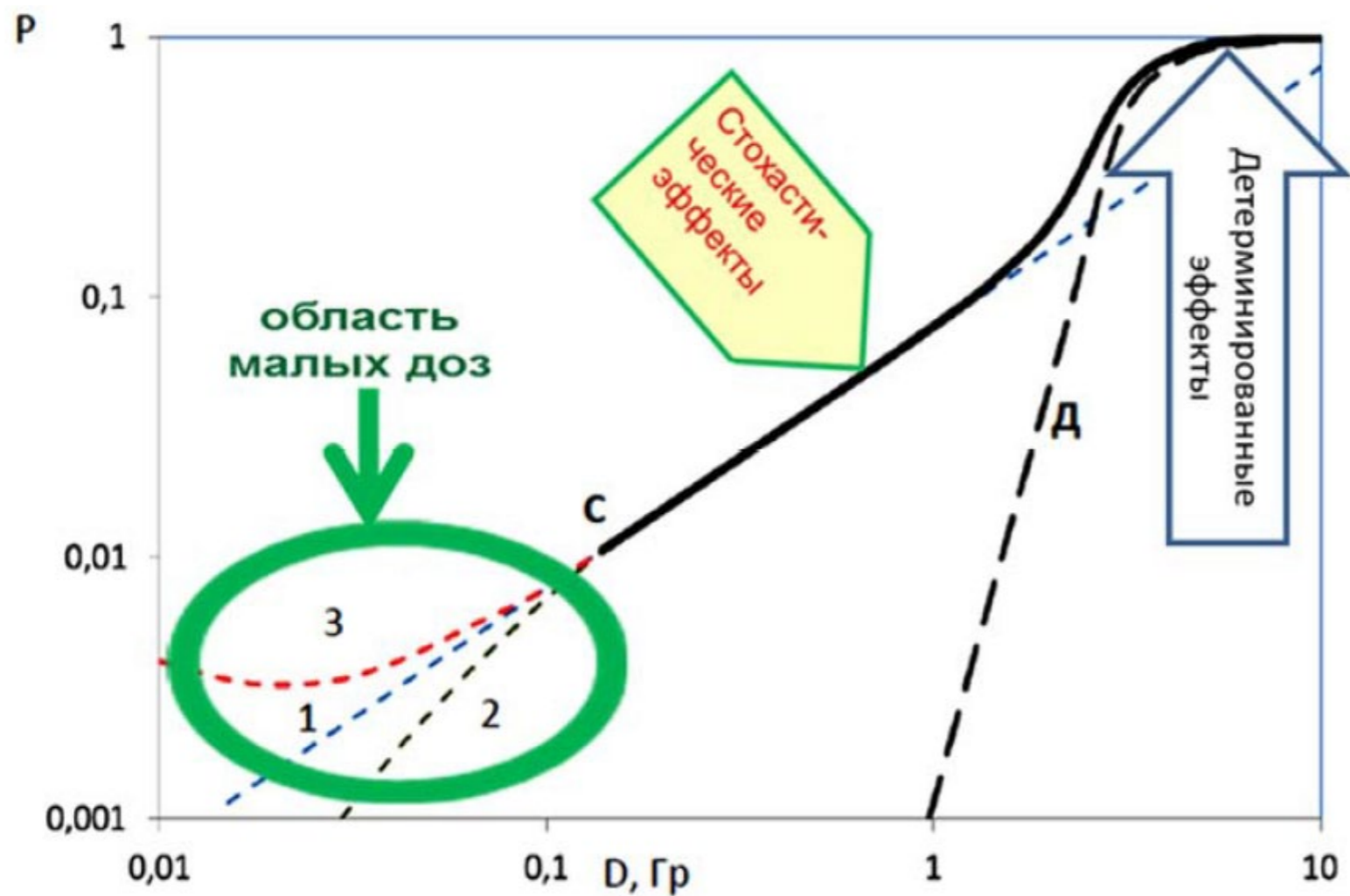
Единица измерения воздействия радиации на организм (эквивалентная доза)
[Зиверт] = Зв = [Дж/кг]

По сути – это **энергия**, переданная организму.

Корректно оценивать последствия воздействия радиации на человека именно в Зивертах, а не в Беккерелях.



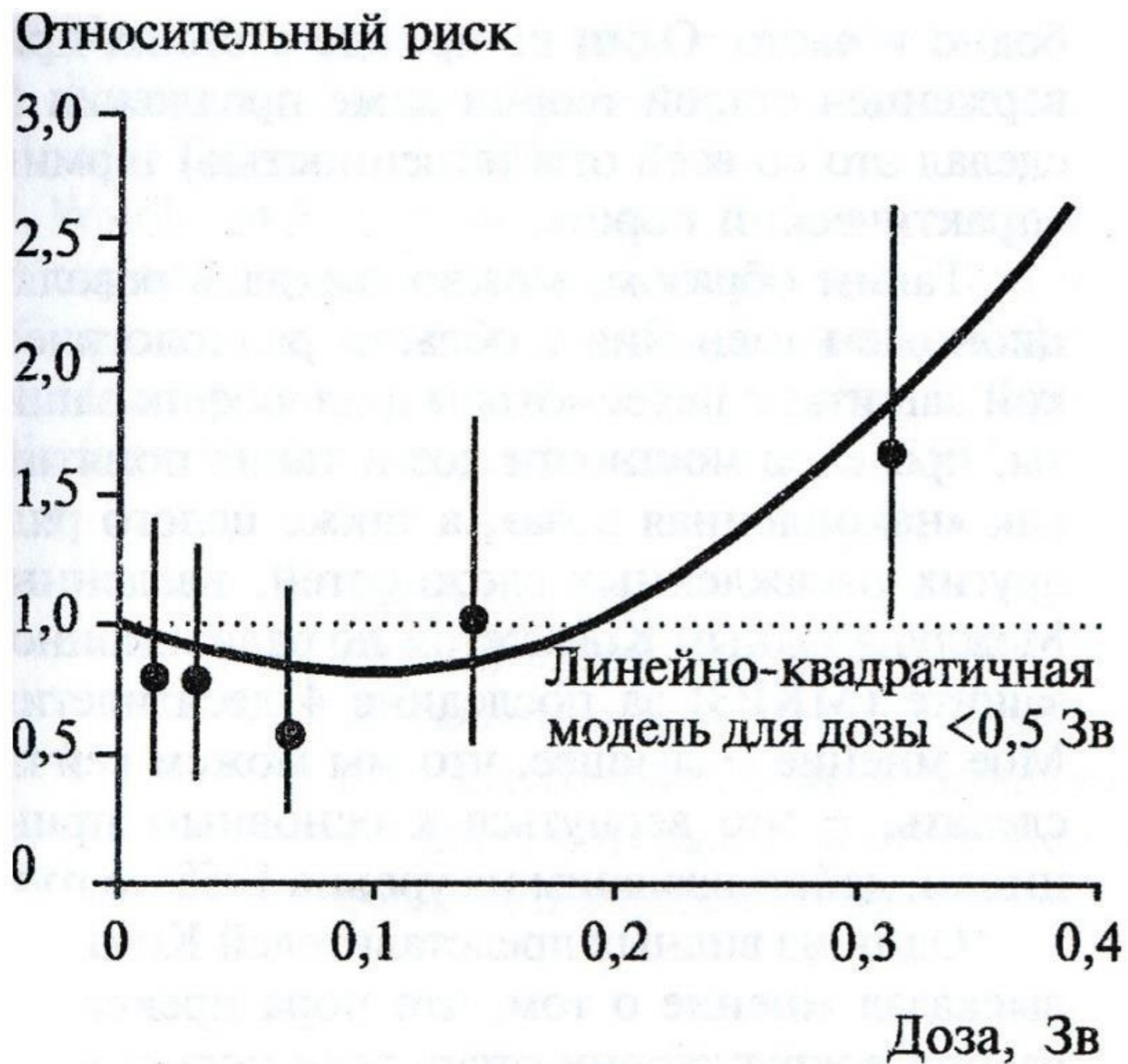
Зависимость «доза-эффект»



Радиобиологический парадокс

Откуда данные?

1 Гр = 1 Зв (для гамма- и бета-излучения)



Гормезис (от греч. *Hórmēsis* — быстрое движение, тремление) — стимулирующее действие умеренных доз стрессоров; стимуляция какой-либо системы организма внешними воздействиями, имеющими силу, недостаточную для проявления вредных факторов.

Медицина

Рентген зубов
0.02 мЗв за раз

Обследование
щитовидной железы
0.02 мЗв за раз

Рентген
грудной клетки
3 мЗв за раз

Флюорография
0,4 мЗв за раз

Комп.томография
2-30 мЗв за раз



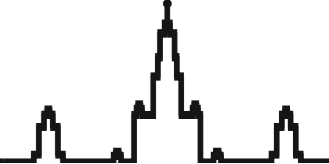
Нормы (в год!)

Допустимое воздействие
техногенных источников
для населения

1 мЗв(!) сверх природного фона.

Для работающих с радиоактивными в
еществами – 20 мЗв.

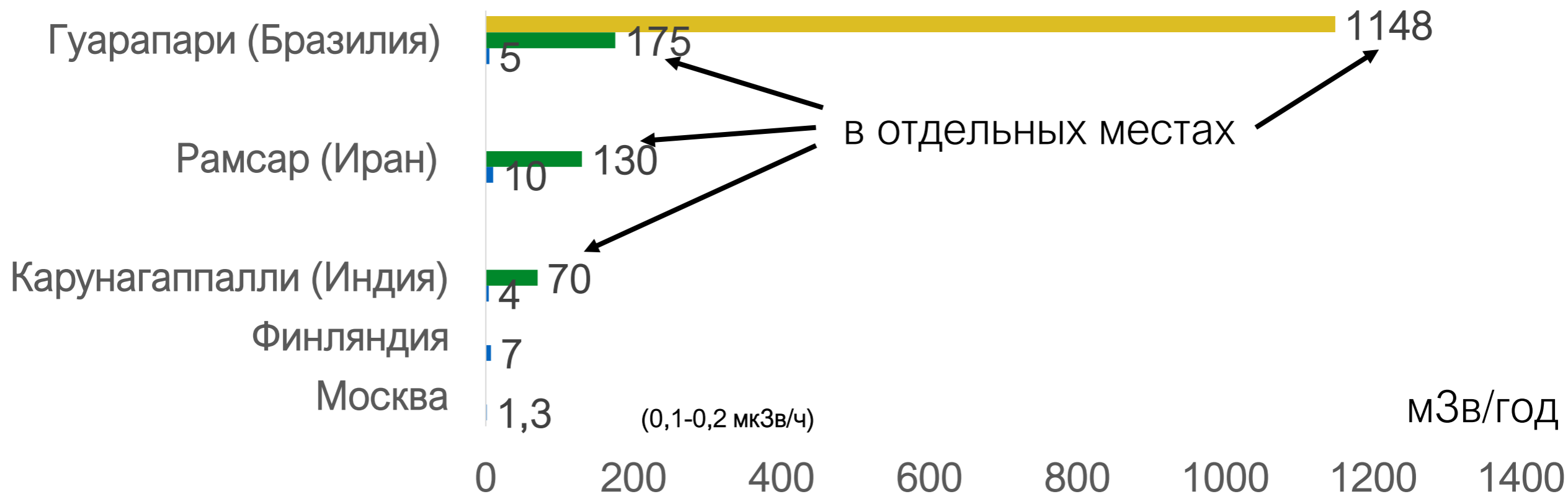
Естественный радиационный фон



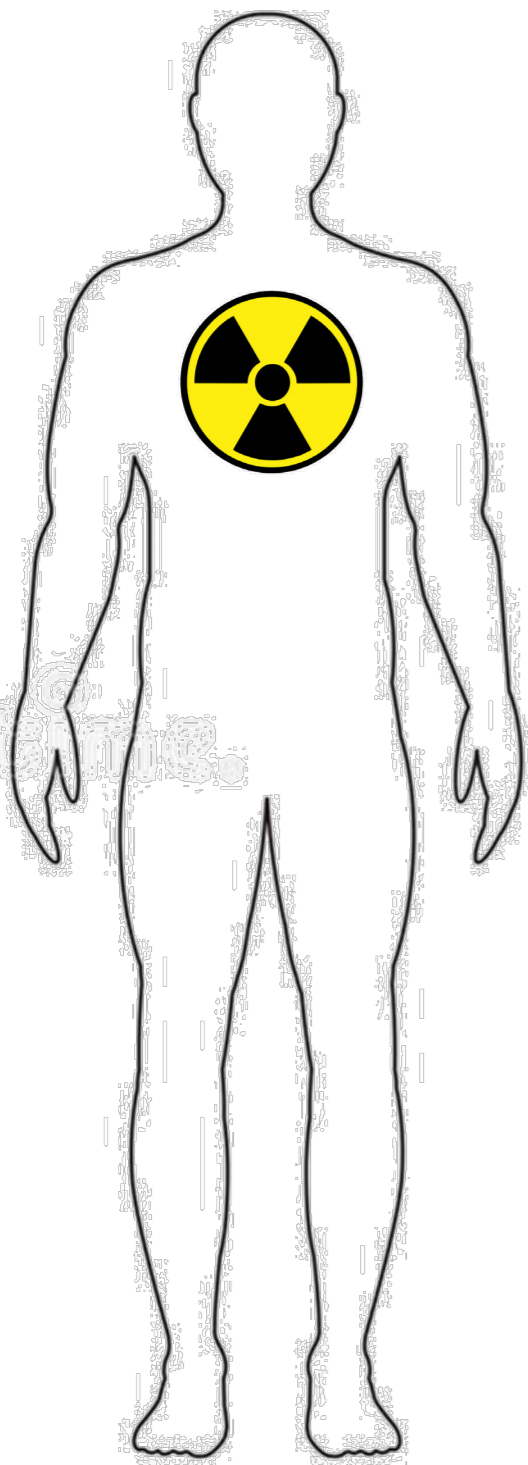
~2.4 мЗв/год

Равномерен ли он по всей планете?

НЕТ

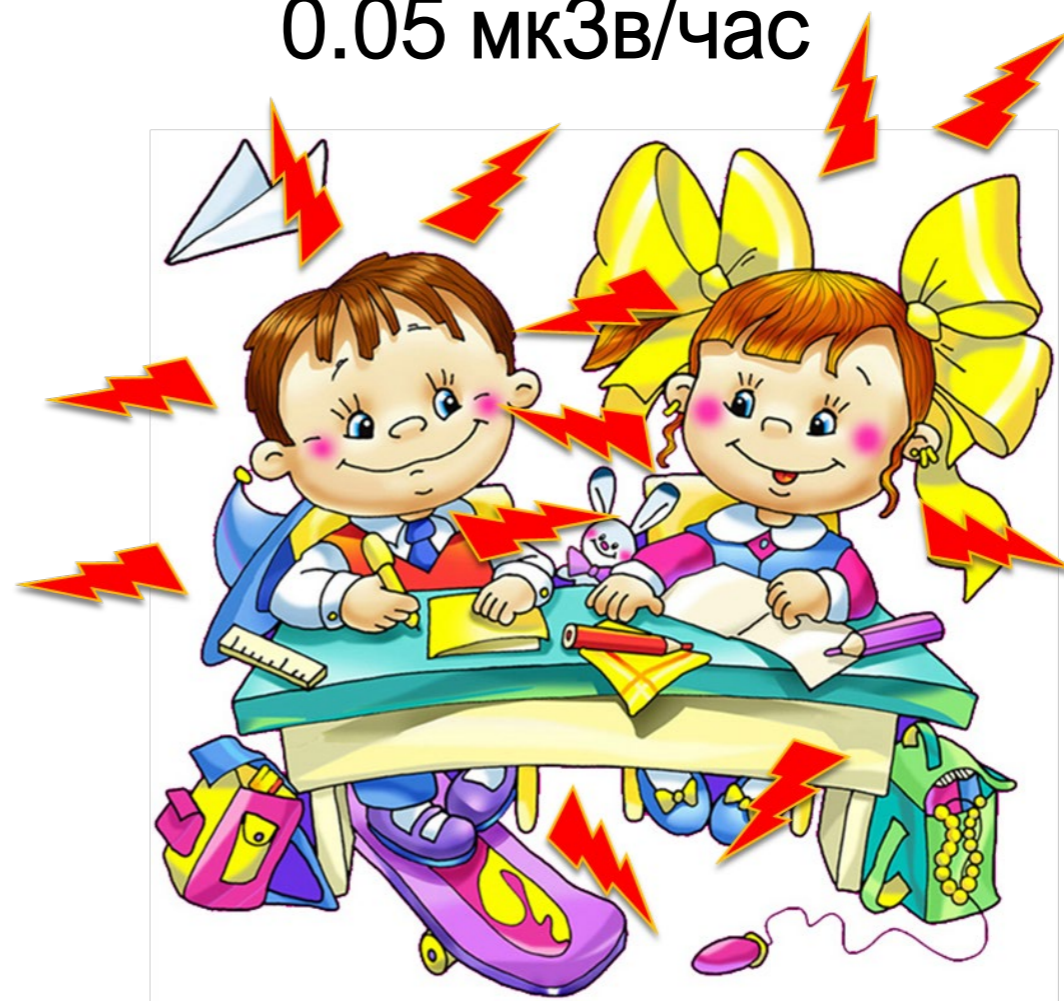


Радиоактивные вещества везде, даже в нас!

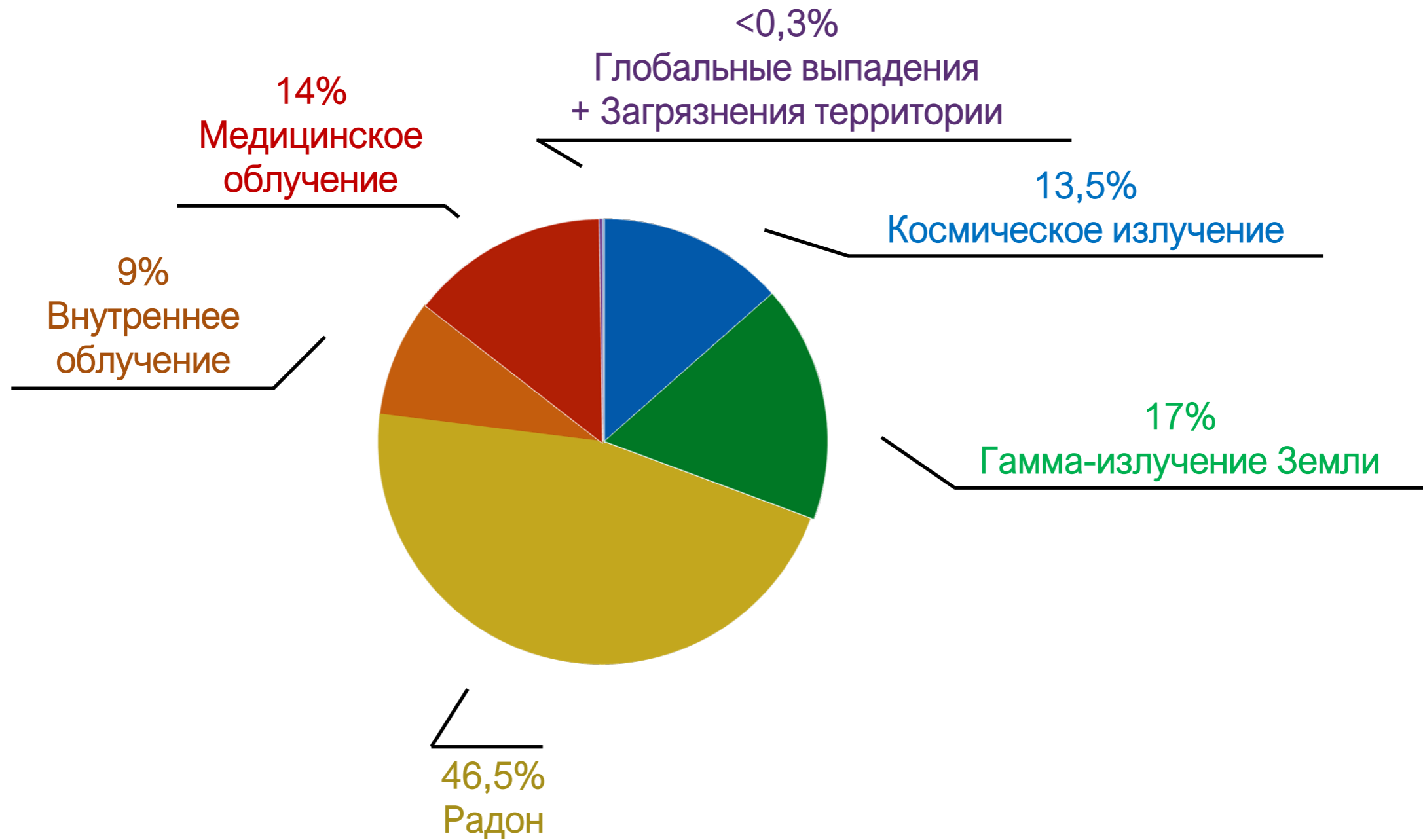


^{222}Rn , ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{40}K ,...

0.05 мкЗв/час



Вклад разных источников излучения



Риски смертности

От употребления алкоголя (мужчины, ср. за 2000–2007)

1×10^{-3}



Сильное загрязнение воздушной среды

$10^{-4} \text{—} 10^{-3}$



Проживание вблизи угольных ТЭС

$10^{-4} \text{—} 10^{-3}$

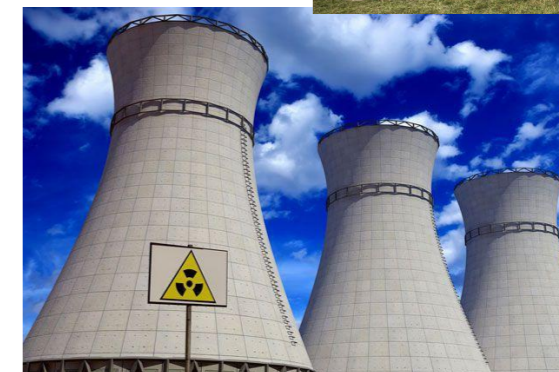
В зоне отселения Чернобыльской АЭС (Украина, Россия, Белоруссия)*

8×10^{-5}



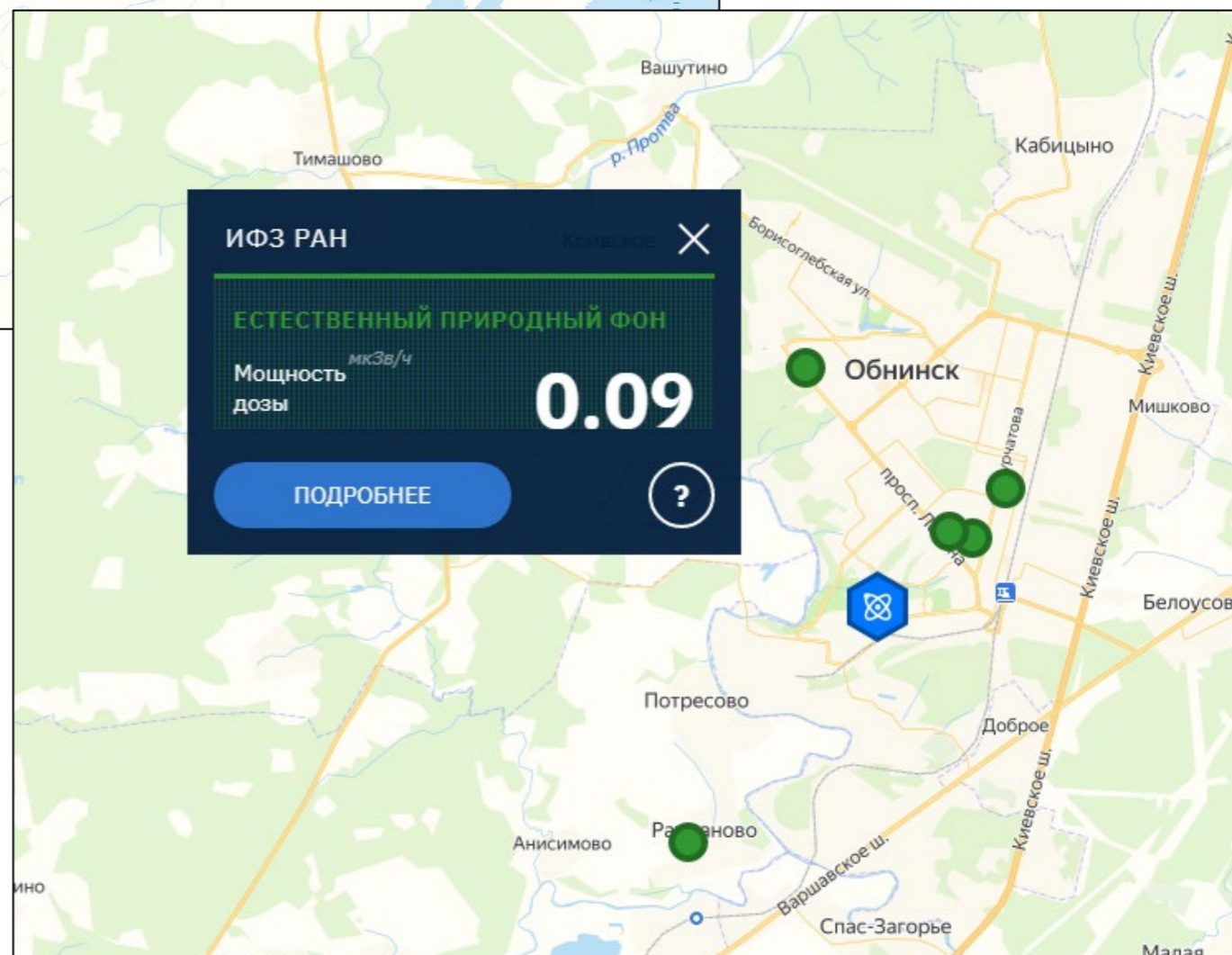
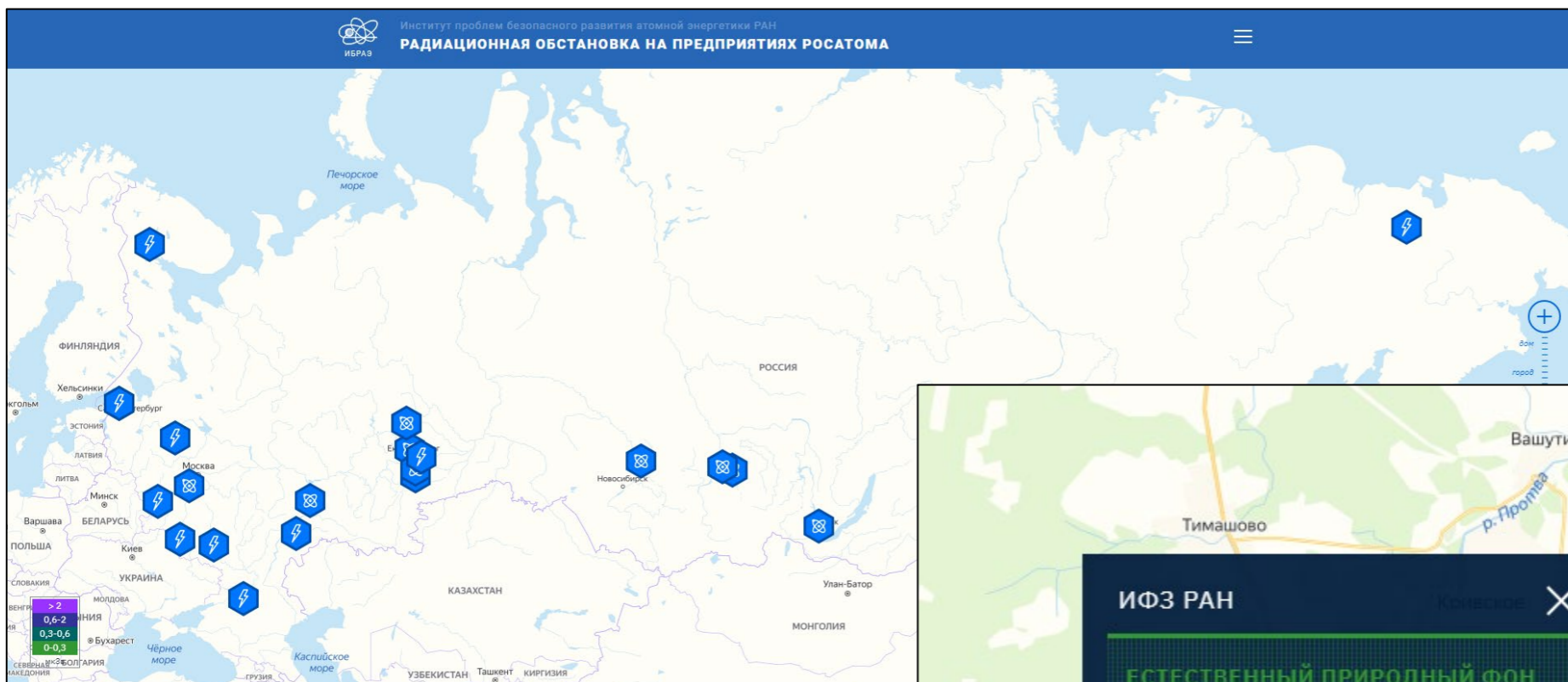
Проживание вблизи АЭС

7×10^{-7}



Мониторинг

<https://www.russianatom.ru/>

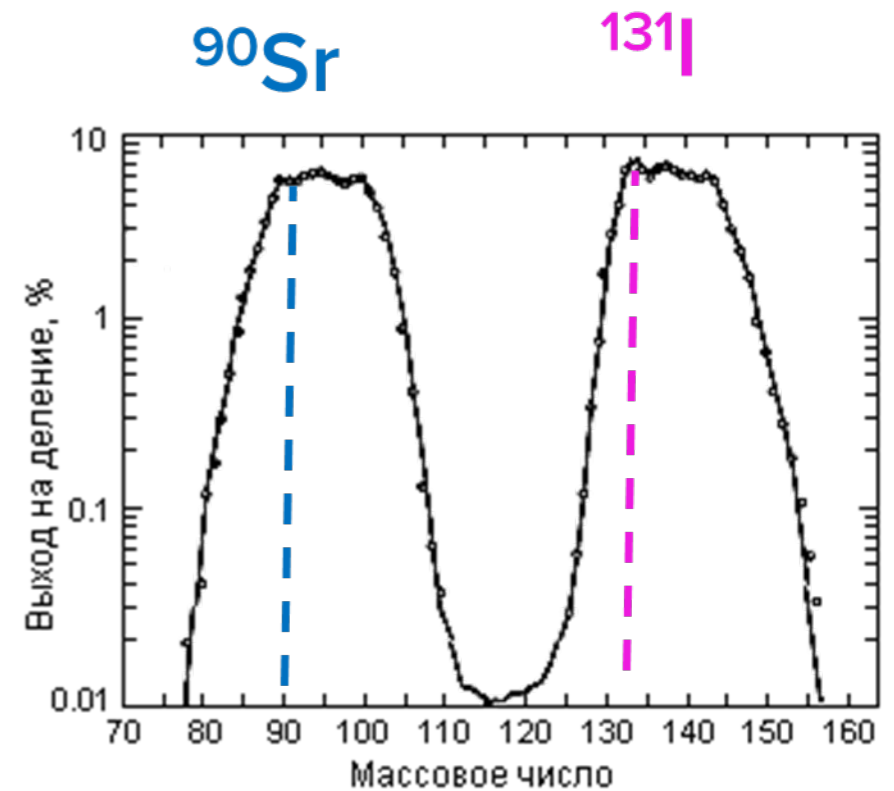


<http://radon.ru/>

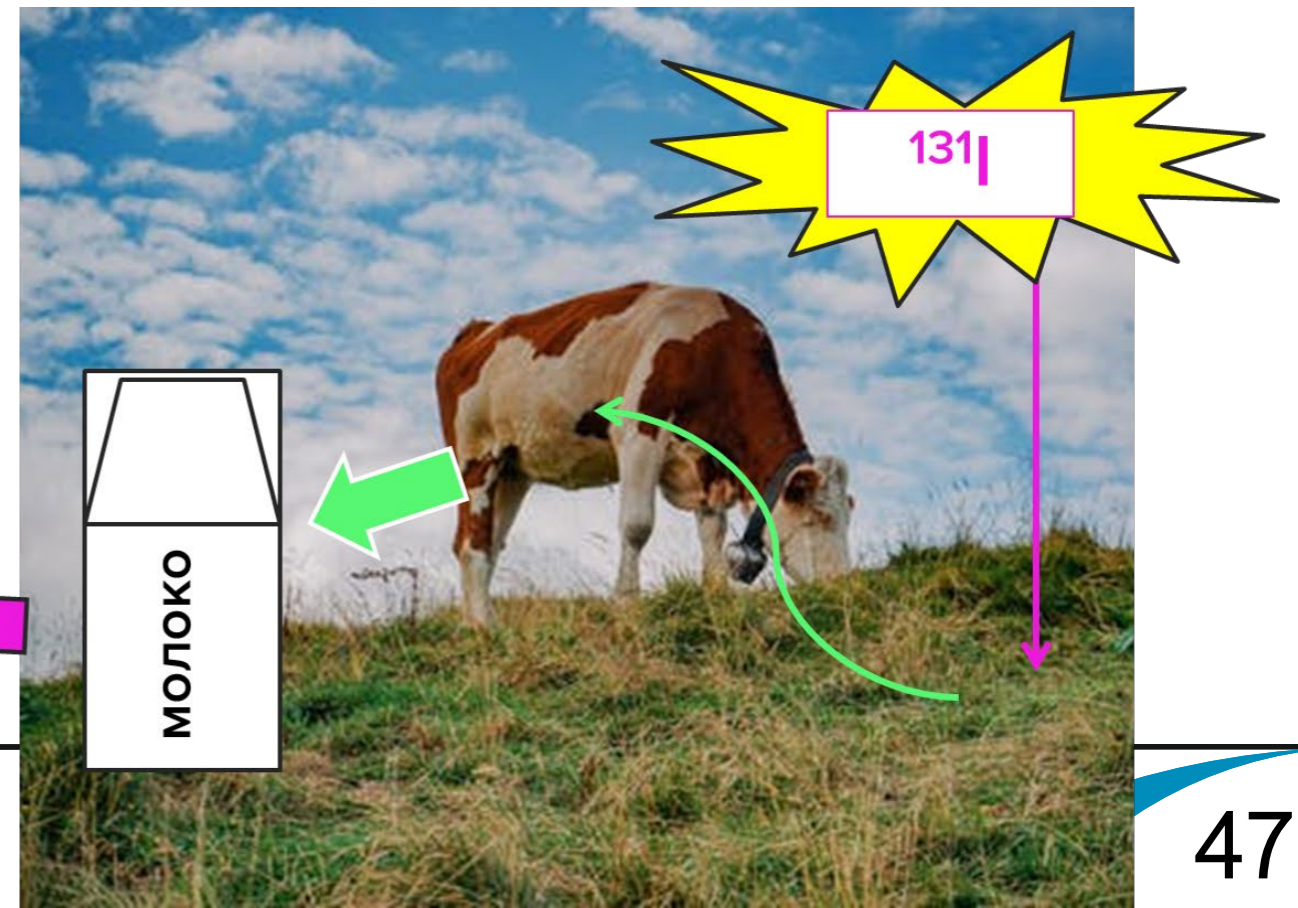
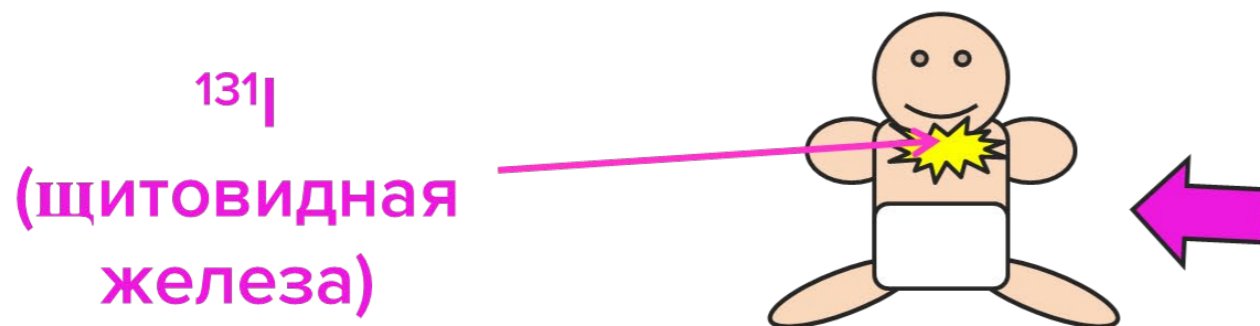
Рак щитовидной железы один из наименее опасных видов рака и хорошо поддается терапии: смертность 1 случай на 200 000 человек

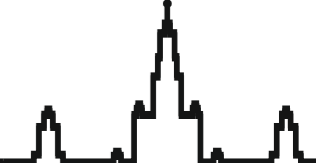
[2019 Alexandria D McDow](#)

Откуда ^{131}I :
 ^{131}I , попадая в организм, накапливается в щитовидной железе (биологические свойства йода как элемента)



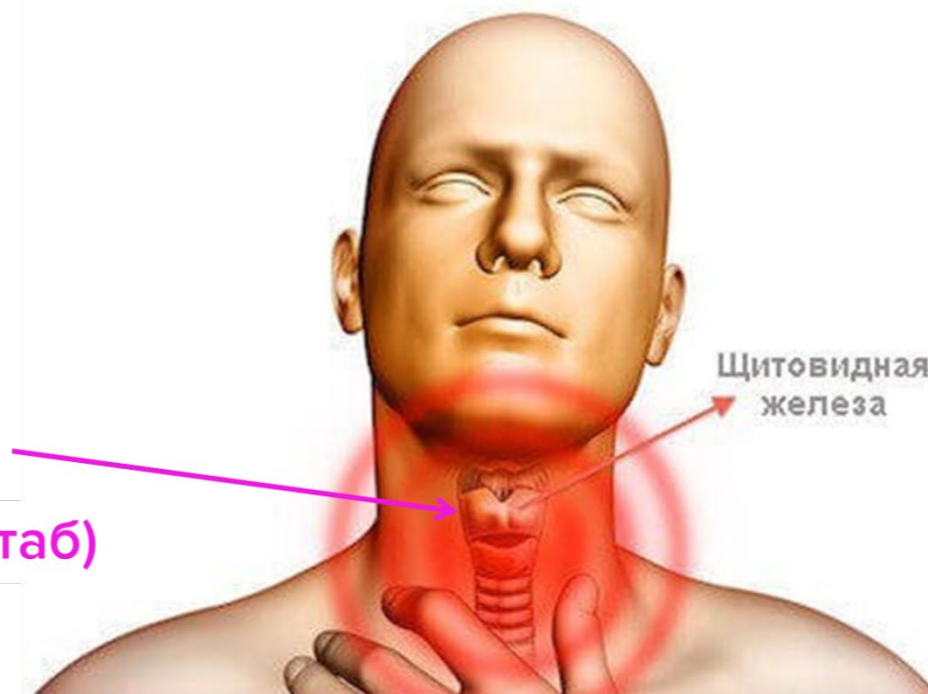
nuclphys.sinp.msu.ru





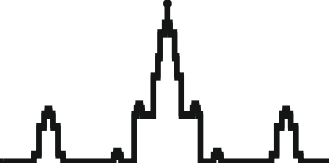

В случае радиоактивных выпадений ^{131}I предписывают принять иодид калия (стабильный йод) в строго определённой дозировке:

Эффект изотопного разбавления – снижение доли ^{131}I за счёт ^{127}I (небольшой избыток ^{127}I замещает ^{131}I)



Только если было указание!
В иных случаях – бесполезно и даже вредно!
Йод сам по себе не защищает от радиации

Парадокс: лечение рака щитовидной железы – внесение бóльшего количества ^{131}I => раковые клетки погибают под действием β -излучения

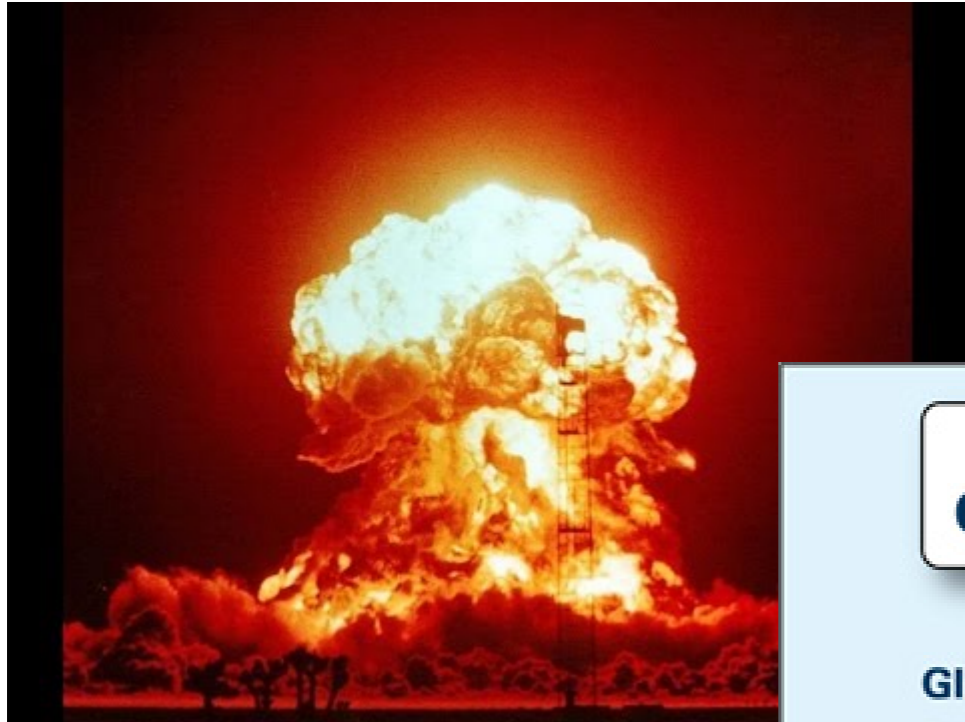


Общее количество жертв от радиации?

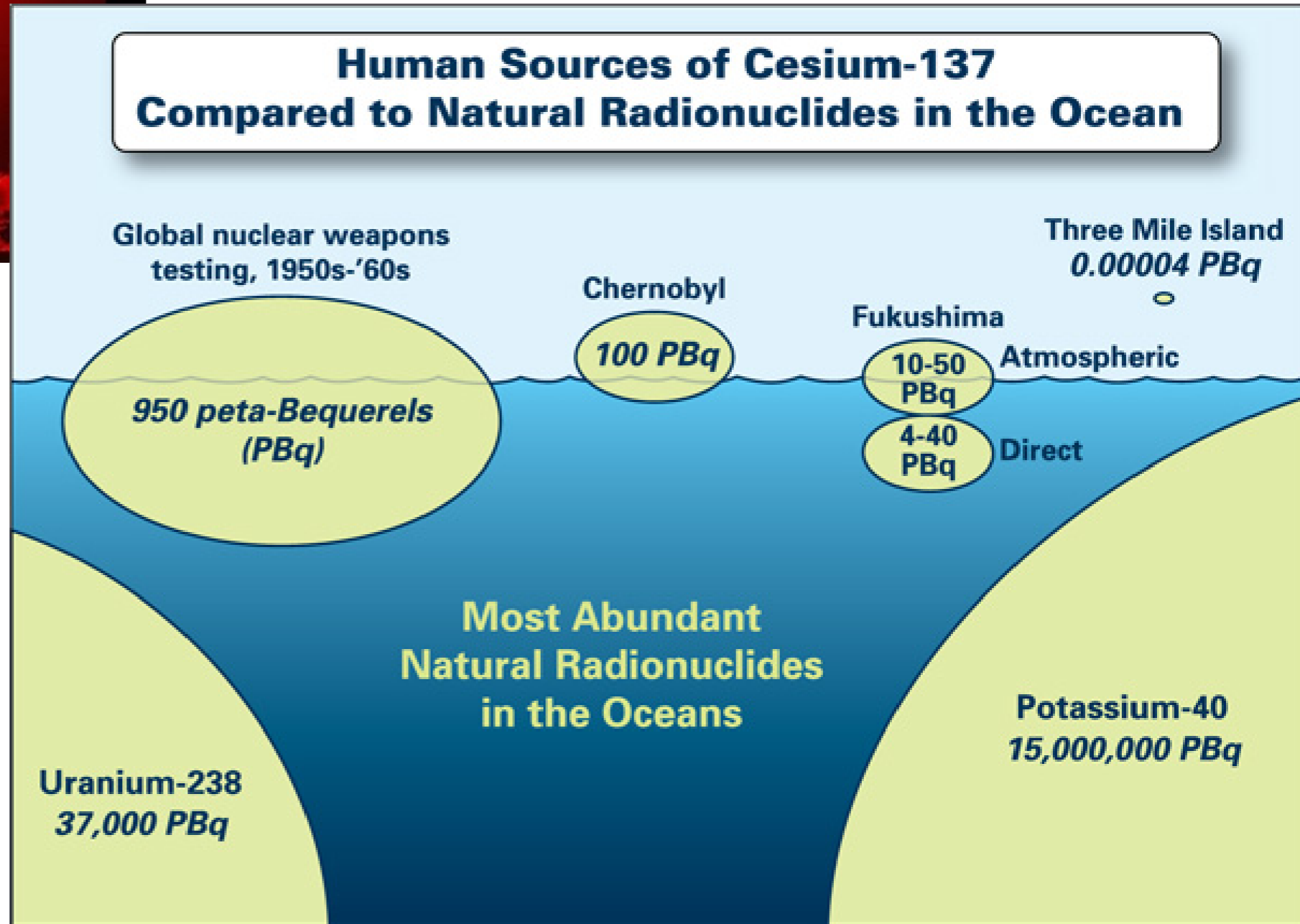
162

Отчет НКДАР ООН 2008 г.

Как сильно человек повлиял на природу?



П – пета – 10^{15}
Т – тера – 10^{12}
Г – гига – 10^9
М – мега – 10^6
К – кило – 10^3





Причины:

Прежде всего человек

Последствия:

Мы многое узнали и делаем ядерную энергетику безопаснее

Всё нужно применять с умом



Летальная доза = 200-250 г за раз



Летальная доза = 6-8 литров за раз

Спасибо за внимание!