

# Лекция 12. Радиоактивное загрязнение атмосферы

Учебные вопросы:

1. Природные радионуклиды в атмосфере.
2. Космогенные радионуклиды на примере бериллий -7;
3. Некосмические источники трития;
4. Примордеальный радионуклид -радон;
5. Искусственные радионуклиды в атмосфере.
  - испытания ядерного и термоядерного оружия;
  - механизмы выведения ИРН из атмосферы;
6. Аварии на ядерных объектах .

# Радионуклиды в атмосфере

- В атмосфере, помимо стабильных веществ, присутствуют также радионуклиды. Некоторые из них имеют природное происхождение (их называют естественными радионуклидами – ЕРН), но присутствуют также искусственные (техногенные) радионуклиды (далее ИРН).
- ЕРН, частично образуются в атмосфере под действием нейтронов и протонов. Частично они поступают в атмосферу с поверхности суши и мирового океана.
- Носителями основной части радионуклидов в атмосфере являются аэрозоли. Часть радионуклидов, содержащихся в атмосфере, представляют собой газы, такие как, тритий, радон, радиоактивные благородные газы.

# Природные радионуклиды в атмосфере

- ЕРН, в зависимости от их происхождения, принято относить либо к космогенным, либо к примордеальным.
- Космогенные радионуклиды в основном образуются в результате взаимодействия нейтронов и протонов, входящих в атмосферу из космоса, с атомами азота и кислорода.
- Примордеальные ЕРН выделяются в нее с подстилающей поверхности и при вулканических извержениях и дегазации недр Земли.
- Распределение ЕРН в атмосфере существенно зависит от высоты соответствующего слоя над земной поверхностью.

# Природные радионуклиды в атмосфере

Таблица 1. значения активности космогенных ЕРН в приземном слое земной атмосферы

Космогенные			
Радионуклид	Удельная активность мБк/м <sup>3</sup>	Радионуклид	Удельная активность мБк/м <sup>3</sup>
Тритий (3H)	10	Углерод (14C)	20.75
Бериллий (7Be)	0.7	Натрий (22Na)	3*10 <sup>-4</sup>

# Природные радионуклиды в атмосфере

Таблица 2. значения активности примордеальных ЕРН в приземном слое земной атмосферы

Примордеальные			
Радионуклид	Удельная активность мБк/м <sup>3</sup>	Радионуклид	Удельная активность мБк/м <sup>3</sup>
Свинец (210Pb)		Радон 222Rn	
Сев.полушарие, умеренные широты	0,5	Среднее	1,11 *10 <sup>5</sup>
над океаном	(0,0037-0,60)	США	3,5*10 <sup>5</sup>
над Тихим океаном	0,09	Европа	4,3*10 <sup>5</sup>
над Индийским океаном	0,31	Индия	3,7*10 <sup>5</sup>
над сушей	0,111	Северная Африка	0,5*10 <sup>5</sup>
Финляндия	0,26	надконтинентами	(1,85-31,5) *10 <sup>5</sup>
Германия	0,37	над Черным морем	3,7*10 <sup>5</sup>
Индия	0,67	океан, вдали от берега	0,037*10 <sup>5</sup>
США	0,78	океан, вблизи берега	0,37*10 <sup>5</sup>
Уран (238U)	1,3*10 <sup>5</sup>	Россия	(2,6-6,3) *10 <sup>5</sup>
Полоний (210Po)	0,04	Висмут (210Bi)	0,5
Сев. Полушарие, умер. Широты		Свинец (212Pb)	
Европа	0,02	Северная Африка	8
США	0,35	Индия	110
Торий (220Th )	0,0014-33,3) *10 <sup>5</sup>	США	105
над сушей		СССР	(90-120)

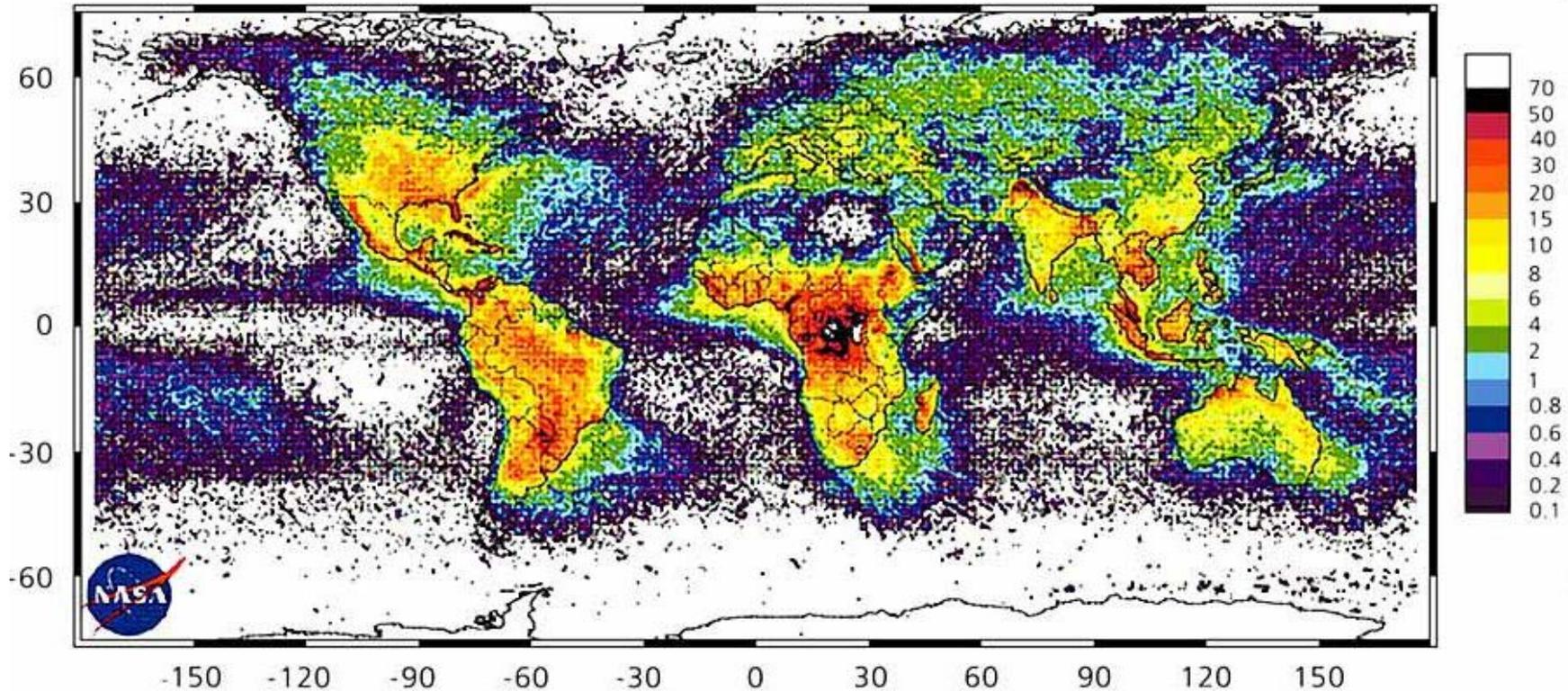
# Природные радионуклиды в атмосфере

- В приземном слое атмосферы среди космогенных радионуклидов наиболее активными являются  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$ , а среди премордиальных -  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Th}$ .
- При этом активность премордиальных радионуклидов здесь в среднем больше, чем активность космогенных радионуклидов, почти в 100 раз.
- Активность премордиальных ЕРН в приземном слое атмосферы определяется преимущественно его запыленностью, а также их содержанием в подстилающей поверхности и скоростью их эманации из нее.

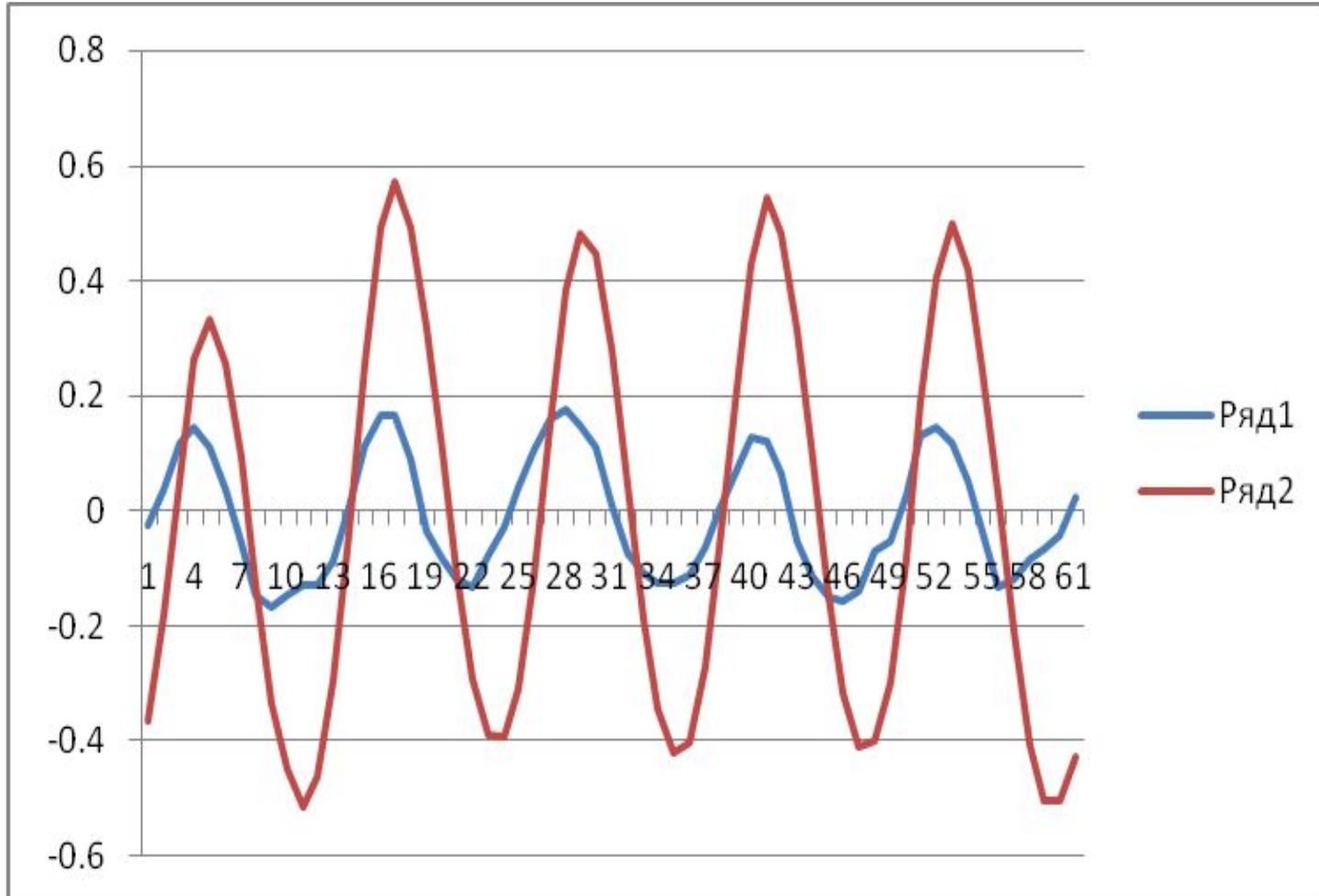
# Космогенные радионуклиды на примере $\text{Be}^7$

- Источник  $\text{Be}^7$  - ядерные реакции:
- $\text{N}^{14}(\text{n}, 3\text{p}, 5\text{n})\text{Be}^7$ ,
- $\text{N}^{14}(\text{p}, 4\text{p}4\text{n})\text{Be}^7$ ,
- $\text{O}^{16}(\text{p}, 5\text{p}5\text{n})\text{Be}^7$

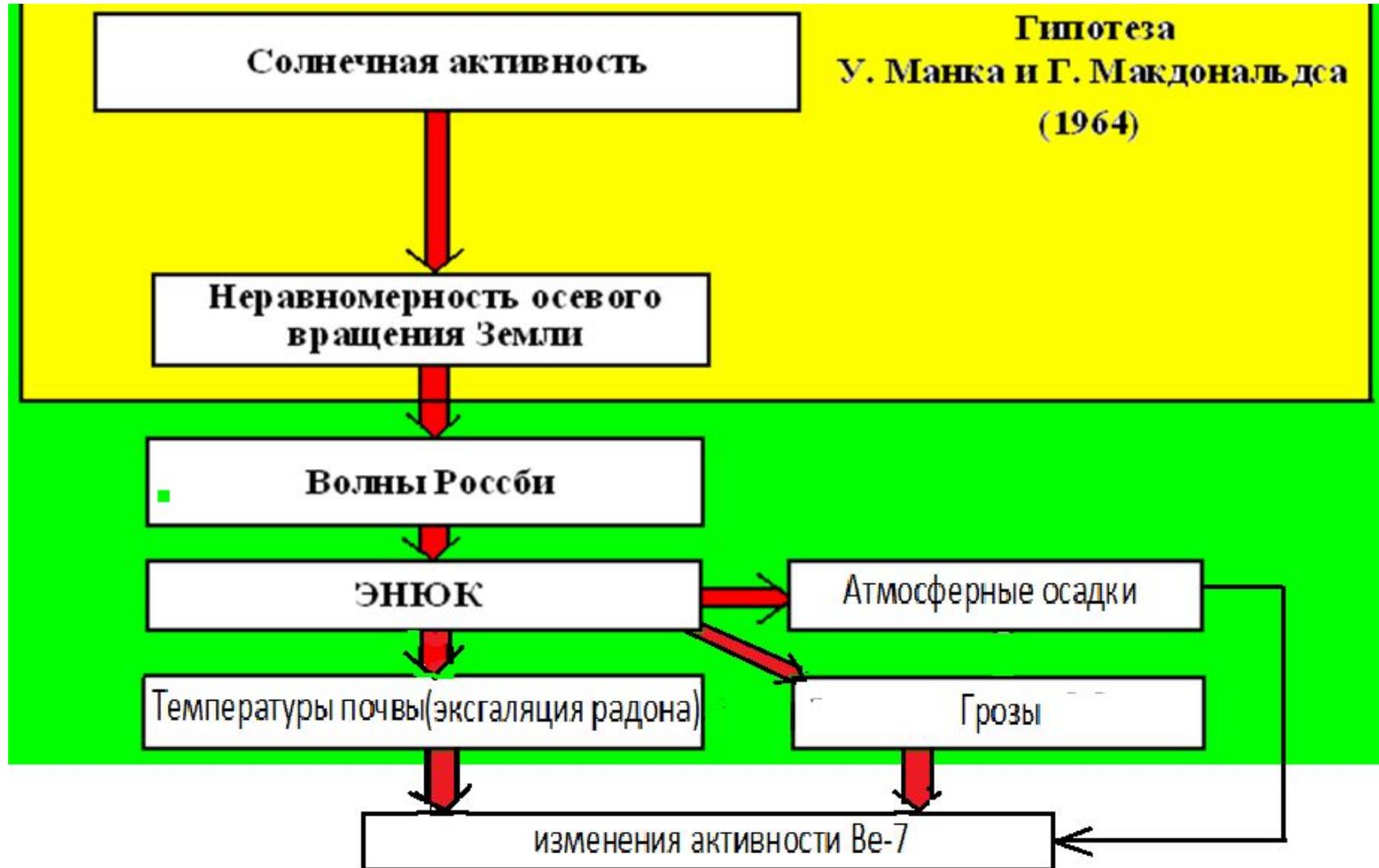
# Распределение интенсивности гроз ( по результатам оптических наблюдений ИСЗ ОТД и LIS)



# Взаимнокорреляционные функции изменений индекса ЭНЮК и концентраций бериллия -7 в г. Гуаякль



# Упрощенная схема влияния неравномерности вращения Земли на изменений активности бериллия -7 в приземной атмосфере



# Природные радионуклиды в атмосфере

- **Радон**- радиоактивный химический элемент, который открыт Э. Резерфордом в 1899 г. и при нормальных условиях – одноатомный газ, без цвета и запаха, тяжелее воздуха. Атомный номер 86. Стабильных нуклидов не имеет. Радиус нейтрального атома 0,214 нм. Расположен в группе VIIA периодической системы (инертные газы), замыкает 6 период. Плотность 9,81 г/л, температура кипения  $-62^{\circ}\text{C}$ , температура плавления  $-71^{\circ}\text{C}$ . Растворимость в воде 460 мл/л, в органических растворителях, в жировой ткани человека растворимость радона выше, чем в воде.
- Радон легко адсорбируется активированным углем, с фтором образует соединения состава  $\text{RnF}_n$ , где  $n = 4, 6, 2$ .

# Природные радионуклиды в атмосфере

- Радон входит в состав радиоактивных рядов урана-238, урана -235 и тория-232. Ядра Rn постоянно возникают в природе при радиоактивном распаде материнских ядер.
- Наиболее устойчивый радионуклид радона  $^{222}\text{Rn}$ , период полураспада  $T_{1/2} = 3,8235$  суток.
- У  $\text{Rn-220}$  период полураспада  $T_{1/2} = 54,9$  с. Еще быстрее распадается  $\text{Rn-219}$ , для него  $T_{1/2} = 3,92$  с.
- Радионуклиды радона обуславливают более половины всей дозы радиации, которую в среднем получает организм человека от природных и техногенных радионуклидов окружающей среды.
- Распад ядер радона в легочной ткани вызывает микроожог. Если концентрация радона в воздухе значительна, то попадание его в легкие может вызвать онкологическое заболевание.
- ПДК радона в воздухе помещений  $100 \text{ Бк/м}^3$ . Предельно допустимое поступление Rn через органы дыхания  $146 \text{ МБк/год}$ . [1]

## Природные радионуклиды в атмосфере

- Содержание радона в земной коре  $7 \cdot 10^{-16}$  % по массе. Общее количество радона, единовременно существующего в атмосфере нашей планеты около 370 л при н. у.
- Общая активность радона в атмосфере оценивается в  $10^{18}$  Бк, из которых  $10^{16}$  Бк обусловлено эманированием радона из почвы. Некоторое количество радона поступает в атмосферу и при вулканической деятельности

# Природные радионуклиды в атмосфере

Таблица 2. Типичные скорости эксталяции радона

Материал поверхности	Скорость эманирования Бк/м <sup>2</sup> с	Материал поверхности	Скорость эманирования (Бк/м <sup>2</sup> с)
Скальные породы	$2 \cdot 10^{-4}$	Горные почвы	$8,21 \cdot 10^{-3}$
подзолистые почвы	$4,50 \cdot 10^{-5}$	почвы пустынь	$5-38 \cdot 10^{-5}$
Черноземы	$21-53 \cdot 10^{-5}$	Тектонические разломы	до $5,25 \cdot 10^{-2}$

# Природные радионуклиды в атмосфере

- Средняя скорость эксгаляции радона из глинистых почв  $1,6 \cdot 10^{-2}$  Бк/м<sup>2</sup>с.
- Активность радона в почвенном воздухе изменяется от  $2,6 \cdot 10^3$  до  $4,4 \cdot 10^4$  Бк/м<sup>3</sup>.
- Радон и продукты его распада поступают в атмосферу из растений, природных вод, в результате эксгаляции из стен домов, сжигания каменного угля и природного газа.
- Локальными источниками радона являются геотермальные станции, предприятия по добыче фосфатов и пр.
- Активность радона в атмосфере в одном и том же районе испытывает вариации в зависимости от погодных условий, времени суток и сезона, высоты над поверхностью земли.
- Содержание <sup>222</sup>Rn в приземном слое воздуха в условиях развитой воздушной конвекции  $\sim 9$  Бк/м<sup>3</sup>, а в устойчивой атмосфере 67 Бк/м<sup>3</sup>
- Активность радона в воздухе максимальна летом-осенью и минимальна зимой-весной.
- В суточных изменениях активности минимум наблюдается в послеполуденное время (12, 15 часов), а максимум – после полуночи (0, 6 часов) при расхождении максимума и минимума в 2 раза.

# Природные радионуклиды в атмосфере

Таблица 3. Зависимости средних значений активности  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Th}$  от высоты над земной поверхностью

Высота, м	$^{222}\text{Rn}$ , %	Высота, м	$^{222}\text{Rn}$ , %	Высота, м	$^{220}\text{Th}$ , %	Высота, м	$^{220}\text{Th}$ , %
0	100	1	95	0	100	5	70
10	87	100	69	10	50	25	20
1000	38			50	5		

# Природные радионуклиды в атмосфере

- Одним из наиболее активных космогенных радионуклидов является радиоактивный изотоп водорода – **тритий**, обладающий периодом полураспада 12.34 г..
- В среднем за секунду в атмосфере, в расчете на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности, образуется 1200 его атомов. Это происходит при захвате ядрами атомов водорода нейтронов, возникающих с участием космического излучения в верхних слоях атмосферы.
- Ликвидируется тритий при  $\beta$ -распаде, превращаясь в гелий.
- До начала атомного века непрерывное образование трития в атмосфере компенсировалось его естественным распадом, а его суммарная активность оставалась практически постоянной.
- В тот период соотношение между количествами атомов водорода и трития в гидросфере планеты составляло H:T = 1:10<sup>18</sup>, в 1 л воды в среднем содержалось 3,2·10<sup>-10</sup> г трития, в 1 л воздуха – 1,6·10<sup>-14</sup> г (при абсолютной влажности 10 мг/л). Такая концентрация трития в воде получила специальное название – «тритиевая единица» (ТЕ) [3].

# Природные радионуклиды в атмосфере

- С 1954 (начало испытаний термоядерных бомб) положение резко изменилось и в дождевой воде активность трития увеличилась в сотни -тысячи раз, поскольку к космогенному тритию прибавился также тритий искусственный.
- При каждом взрыве водородной бомбы мощностью 1 мегатонна (Мт) выделялось до 2 кг трития. Общая мощность воздушных взрывов составила за 1945–1962. 406 Мт, а наземных – 104 Мт. При этом общее количество трития, поступившее в биосферу в результате испытаний, составило сотни килограммов!

# Природные радионуклиды в атмосфере

- АЭС в штатном режиме за год в сумме выделяют в окружающую среду, несколько десятков килограммов этого вещества.
- В реакторах АЭС тритий образуется:
- -как продукт тройного деления ядер горючего -  $^{235}\text{U}$  (на 1 ГВт электрической мощности в реакторе образуется  $1,15 \times 10^{11}$  Бк/сут трития);
- -в результате поглощения нейтронов ядрами дейтерия, находящегося в теплоносителе- воде;
- -при захвате нейтронов ядрами В и Li, находящимися в теплоносителе - воде (при борном регулировании, коррекции водного режима - на АЭС с ВВЭР) и в стержнях регулирования;
- -в результате реакции  $^3\text{He}$  с нейтронами в газовом контуре (в газе, заполняющем графитовую кладку) АЭС с РБМК;
- - в результате реакций быстрых нейтронов с ядрами  $^{14}\text{N}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  и др., присутствующих в различных материалах, используемых в конструкции реактора.

# Природные радионуклиды в атмосфере

- На АЭС с ВВЭР с борным регулированием основной реакцией образования трития в теплоносителе является реакция поглощения ядром атома В нейтрона с выделением двух  $\alpha$  частиц.
- В отсутствие борного регулирования это реакция активизации дейтерия, ядро которого превращается в ядро трития, захватывая нейтрон и испуская  $\gamma$  квант.
- На АЭС с РБМК в теплоносителе тритий образуется в основном при упомянутой реакции. К тритию, образовавшемуся подобным образом в теплоносителе, добавляется тритий, возникающий при утечках из ТВЭЛов и стержней регулирования.
- Образующийся при описанных процессах тритий, частично выбрасывается в атмосферу через отводящие трубы энергоблоков АЭС, а частично сливается в их водоохладительные бассейны.

# Природные радионуклиды в атмосфере

- Тритий естественного и искусственного происхождения в атмосфере быстро окисляется, с образованием НТО, которая поступает на земную поверхность, как радиоактивная составляющая дождевой воды.
- НТО накапливается, в основном, в гидросфере.
- Попав в виде НТО в водные объекты, тритий способен замещать атомы водорода в любых, присутствующих в них органических соединениях и таким путем накапливаться в организмах фитопланктона и гидробионтов, потребляемых человеком при питании.
- Относительно малая часть радиоактивной воды НТО испаряется в атмосферу и участвует в образовании водных аэрозолей.
- При этом она способна попадать в дыхательные пути и легкие человека. Вследствие этого тритий оказывает воздействие на здоровье человека изнутри, проникнув в его организм через органы дыхания и пищеварения.

## Искусственные радионуклиды в атмосфере

- ИРН поступают в атмосферу в основном при **испытаниях ядерного и термоядерного оружия**, выбросах, АЭС возникающих при штатных и аварийных режимах их эксплуатации, а также при утечках из хранилищ радиоактивных отходов.
- Главными их источниками являются ныне **испытания ядерного оружия**.

# Искусственные радионуклиды в атмосфере

Таблица 4. Характеристики экспериментальных ядерных взрывов, произведенных в атмосфере странами, владеющими ядерным оружием.

Страна	Период времени, годы	Количество взрывов	Суммарная мощность, Мт
США	1945-1962	193	138,2
СССР	1949-1962	142	357,5
Великобритания	1952-1962	21	16,7
Франция	1960-1974	45	11,9
КНР	1964-1980	22	20,7

# Искусственные радионуклиды в атмосфере

- При ядерных взрывах в основном образуются продукты реакции деления ядер, выход которых пропорционален мощности взрыва.
- Подобные радионуклиды разносятся преимущественно в тропосфере и удаляются из нее за несколько месяцев, в результате выпадения на земную поверхность радиоактивных осадков и при сухом осаждении.
- Как правило, период полуочищения атмосферы при этом составляет 20-40 суток.
- Основной вклад в наблюдаемую ныне активность ИРН в атмосфере вносят термоядерные взрывы 1963-1980 гг., проводившиеся в КНР на полигоне у озера Лобнор.
- Значительная часть продуктов этих взрывов достигала стратосферы и в ней разнеслась над всей планетой, достигая в том числе и территории Украины. Ныне они образуют до 2/3 общей активности выпадающих здесь атмосферных осадков

## Искусственные радионуклиды в атмосфере

- Существенные вклады в суммарную активность ИРН, поступающих в атмосферу при термоядерных взрывах, дают тритий и радиоуглерод. Эти радионуклиды в виде газов и в составе частиц аэрозолей выбрасываются в стратосферу, в которой разносятся над всей поверхностью планеты. До начала ядерных и термоядерных испытаний, в атмосфере ежегодно образовывалось  $3,7 \cdot 10^{16}$  Бк  $^3\text{H}$  и  $10^{15}$  Бк  $^{14}\text{C}$  космогенного происхождения, а в ходе их за 1954 – 1962 гг. в нее поступило  $2,4 \cdot 10^{20}$  Бк  $^3\text{H}$ ,  $2,2 \cdot 10^{17}$  Бк  $^{14}\text{C}$ .

## Искусственные радионуклиды в атмосфере

- В ходе упомянутых испытаний в атмосферу поступило также  $17,1 \cdot 10^{18}$  Бк других долгоживущих ИРН (в северном полушарии  $13,1 \cdot 10^{18}$  Бк, в южном полушарии  $4,1 \cdot 10^{18}$  Бк).
- В составе этих выбросов были  $^{89}\text{Sr}$  – 2,5 %;  $^{90}\text{Sr}$  – 3,5 %;  $^{95}\text{Zr}$  – 5,1 %;  $^{103}\text{Ru}$  – 5,2 %;  $^{106}\text{Ru}$  – 2,44 %;  $^{131}\text{I}$  – 2,9 %;  $^{134}\text{Cs}$  – 0,036 %;  $^{137}\text{Cs}$  – 5,57 %;  $^{140}\text{Ba}$  – 5,18 %;  $^{141}\text{Ce}$  – 4,58%;  $^{144}\text{Ce}$  – 4,69 %.
- За все время проведения ядерных взрывов (до 1990 г.) на земную поверхность выпало  $5,99 \cdot 10^{17}$  Бк  $^{90}\text{Sr}$  (из выброшенных в атмосферу  $6,04 \cdot 10^{17}$  Бк), а также  $9,6 \cdot 10^{17}$  Бк  $^{137}\text{Cs}$  ( из выброшенных –  $9,64 \cdot 10^{17}$  Бк).
- На 1982 г. в стратосфере еще циркулировало около  $1,8 \cdot 10^{15}$  Бк  $^{90}\text{Sr}$  и  $3,2 \cdot 10^{15}$  Бк  $^{137}\text{Cs}$ . Большая часть выпадений (~75 %) этих веществ приходится на северное полушарие.

# Искусственные радионуклиды в атмосфере

- **Существенным механизмом снижения активности ИРН и ЕРН в атмосфере являются различного рода их выпадения на земную поверхность.** Подобные выпадения подразделяются на локальные, выпадающие в пределах до 100 км от места взрыва, тропосферные и стратосферные.
- Тропосферные осадки выпадают на поверхность Земли на расстояниях многих сотен и тысяч километров от места взрыва. Среднее время пребывания тропосферных осадков в атмосфере составляет около 30 суток.
- Стратосферные выпадения включают, как правило, основную часть продуктов деления и обуславливают большую часть глобального радиоактивного загрязнения внешней среды продуктами деления.

## Искусственные радионуклиды в атмосфере

- Выпадения ИРН бывают с осадками и без них (сухие). Выпадения с осадками связаны с захватом радиоактивных аэрозолей при образовании облачных элементов ( $<0,1$  мкм) и прохождением дождевых капель от облаков к земной поверхности ( $>5$  мкм). Наличие в воздухе других частиц аэрозоля приводит к увеличению интенсивности выведения из атмосферы ИРН.
- Сухие выпадения происходят, как при наличии облачности, так и при ее отсутствии. При наличии облаков они представляют собой выпадающие из них атмосферные ядра конденсации. При отсутствии облаков выпадение происходит в форме осаждения частиц гравитационной фракции аэрозоля. В регионах с умеренным климатом, с осадками выпадает в  $\sim 9$  раз больше радиоактивных продуктов, чем без них. В регионах с аридным климатом сухие выпадения преобладают.

# Искусственные радионуклиды в атмосфере

- Активность ИРН в атмосферных осадках существенно зависит от времени года, поскольку на нее существенно влияют сезонные изменения в переносе масс воздуха из стратосферы в тропосферу.
- Весной она везде больше, а осенью – меньше, что обусловлено сезонными изменениями высоты тропопаузы.
- Ускоряют воздухообмен между стратосферой и тропосферой антициклонические процессы, а циклонические его замедляют (из-за образования соответственно нисходящих и восходящих потоков). Поэтому характеристикам потоков ИРН, выпадающих на земную поверхность свойственна существенная пространственно-временная изменчивость.

# Искусственные радионуклиды в атмосфере

- Скорость самоочищения атмосферы от ИРН, зависит также от размеров соответствующих частиц аэрозолей, их растворимости в воде, электрического заряда, характера радиоактивного распада, наличия других аэрозольных частиц в атмосфере (пыли, солей, жидкостей) и характера подстилающей земной поверхности
- Систематические наблюдения за концентрацией ИРН в атмосферных осадках проводятся глобальной сетью станций Всемирной метеорологической организации с 1961 г. На территории СССР эти наблюдения на станциях, входящих в сеть его Гидрометеослужбы, начались с июля 1969 г [5].
- Индивидуальная эквивалентная доза облучения вследствие проведения испытаний ядерного оружия в атмосфере составила 4,5 мЗв в СССР, а в среднем по земному шару — 3,8 мЗв, причем основной вклад (~2,6 мЗв) в указанные дозовые нагрузки вносит  $^{14}\text{C}$ , обладающий очень большим периодом полураспада.

# Аварии на ядерных объектах

- Одной из первых произошла авария на военном объекте в г. Кыштыме, расположенном в 100 км от города Челябинска 29 сентября 1957 г..
- В 16 ч 20 мин по местному времени произошел химический взрыв контейнера, содержащего 250 м<sup>3</sup> высокоактивных отходов от производства плутония.
- Взрыв был вызван возгоранием ацетат-нитратного концентрата, которое произошло в результате неполадок в системе охлаждения контейнера.
- При взрыве в атмосферу было выброшено  $7,4 \cdot 10^{17}$  Бк радиоактивных веществ. Большая часть продуктов выброса (~ 90 %) осела на поверхность земли вблизи места взрыва, однако наиболее мелкие частицы, содержащие примерно 10 % ИРН, образовали факел, вынесший их на высоту около 1 км.
- Радиоактивное облако перемещалось в направлении города Каменск-Уральский, образуя широкий след выпавших радионуклидов.
- Выпадение практически всего радиоактивного вещества из облака произошло в течение 11 ч вдоль трассы длиной около 300 км от Кыштыма, что привело к загрязнению площади, которая достигла более 20000 км<sup>2</sup> [10. 11].

# Аварии на ядерных объектах

- Первая авария на работающем ядерном реакторе, вызвавшая значительный выброс радиоактивного материала произошла 10 октября 1957 г. в Уиндскейле (Великобритания).
- Реактор, с графитовым замедлителем и воздушным охлаждением, был предназначен для производства оружейного плутония. Авария на нем явилась следствием перегрева части активной зоны.
- Из-за высокой температуры произошло окисление урана и затем возгорание графита, что затронуло 150 топливных каналов. Поскольку попытка погасить огонь с помощью  $\text{CO}_2$  не имела успеха, 11 октября внутрь зоны была подана вода, и в течение последующих суток активную зону удалось остудить.
- Выброс пара и радиоактивных продуктов в атмосферу продолжался в течение приблизительно 24 часов через сбросовую трубу высотой 125 м. В основном это были радиоактивный нуклид  $^{133}\text{Xe}$  ( $1,2 \cdot 10^{16}$  Бк) и летучие элементы  $^{131}\text{I}$  ( $7,4 \cdot 10^{14}$  Бк),  $^{137}\text{Cs}$  ( $2,2 \cdot 10^{13}$  Бк),  $^{10}\text{Po}$  ( $8,8 \cdot 10^{12}$  Бк),  $^{106}\text{Ru}$  ( $3 \cdot 10^{12}$  Бк),  $^{90}\text{Sr}$  ( $7 \cdot 10^{10}$  Бк),  $^{89}\text{Sr}$  ( $3 \cdot 10^{12}$  Бк),  $^{132}\text{Te}$  ( $4,4 \cdot 10^{14}$  Бк) и  $^{235}\text{Pu}$  ( $1,6 \cdot 10^9$  Бк) [11].
- Было также обнаружено небольшое количество частиц рассеянного оксида урана [12]. Радиоактивное облако после аварии двигалось в восточном направлении и было зафиксировано в Моле (Бельгия), во Франкфурте (Германия) и Суле (Норвегия).

# Аварии на ядерных объектах

- более серьезная авария произошла 28 марта 1979 г. на АЭС Тримайл-Айленд (шт. Пенсильвания, США, где функционировал реактор мощностью 900 МВт с водяным охлаждением под давлением. Авария на нем произошла из-за частичной потери охладителя, вызванной нарушениями в работе оборудования и ошибки оператора.
- Все началось со спонтанного отключения водяных насосов, подающих воду для парогенераторов, что привело к автоматическому отключению паровой турбины, генератора и реактора. Повышение температуры и давления в зоне реактора из-за тепловыделения, обусловленного распадом продуктов деления, вызвало автоматическое открытие перепускного клапана для сброса избыточного давления.
- В положенное время клапан закрылся, и давление воды в зоне стало падать. Это вызвало автоматическое включение трех резервных насосов по закачке охлаждающей воды. Однако два насоса из трех из-за того, что клапаны оставались нештатно закрытыми, воду в зону реактора не подавали, и количество воды в зоне по-прежнему уменьшалось. Тогда для обеспечения охлаждения системы автоматически включились нагнетающие насосы высокого давления, но операторы отключили их, не зная о продолжающемся вытекании воды через перепускной клапан сброса давления.
- В результате температура в зоне реактора достигла 2273 К, что привело к повреждению конструкции и плавлению 50 % топлива. Только через два часа после начала аварии было обнаружено, что перепускной клапан сброса давления открыт и вода из зоны стекает в резервную емкость, находящуюся во вспомогательном помещении.

# Аварии на ядерных объектах

- Наиболее серьезная ядерная авария в истории человечества произошла 26 апреля 1986 г. на реакторе четвертого блока Чернобыльской АЭС, расположенной на Украине [12, 13]. Она произошла на реакторе типа РБМК (реактор большой мощности канальный) с графитовым замедлителем и охлаждением обычной водой.
- Во время операции по снижению мощности реактора до требуемых 700–1000 МВт (с целью выяснения возможности получения энергии от турбогенератора в ограниченный период времени, в случае прекращения ее поступления от внешних источников) было допущено несколько грубых ошибок оператора.

# Аварии на ядерных объектах

- При отсутствии воды, которая является теплоносителем и поглотителем нейтронов (при выведенных контрольных стержнях), РБМК имеет положительный коэффициент размножения нейтронов. В результате, за 4 с мощность реактора в 100 раз превысила нормальную. Такое быстрое выделение энергии привело к разрушению твэлов, а последовавшие затем взрывы в зоне сдвинули плиту весом 1000 т, прикрывающую реактор, которая срезала все трубопроводы охлаждения и обнажила его активную зону. Взрывами в атмосферу был выброшен радиоактивный материал, состоящий из отработанного топлива, инертных газов, а также летучих изотопов иода, теллура и цезия. Из-за высокой температуры, произошло возгорание графита, и вместе с СО и СО<sub>2</sub>, в атмосферу продолжали улетучиваться радиоактивные продукты деления.
- Первичный выброс (ночью 26 апреля) распространялся на Запад на высоте несколько сот м. Днем 26 апреля конвективным потоком радиоактивное облако поднялось на высоту 2-3 км и выше, а факел выброса днем повернул на северо-запад и север. К 30 апреля завершили полный разворот ветра и до середины мая в большей или меньшей мере загрязнение от чернобыльских выпадений распространилось во всем Северном полушарии. Выпадения были крайне неравномерны (в зависимости от количества локально выпавших осадков). За исключением нескольких отдельных территорий, загрязнение от аварии ЧАЭС за пределами СССР было в целом низкое (дозы от этих загрязнений были ниже доз от

# Аварии на ядерных объектах

- За 10 суток с начала аварии в атмосферу, было выброшено  $2 \cdot 10^{18}$  Бк радиоактивного материала, состоящего из продуктов деления и трансурановых радионуклидов, что составляет 3–4 % активности, содержащейся в активной зоне реактора. Состав продуктов деления в выбросах был близок к их составу в топливе с преобладанием благородных газов и летучих радионуклидов.
- В атмосферу было выброшено примерно 20 % иода от находящегося в активной зоне ( $6,7 \cdot 10^{17}$  Бк иода),  $\sim 1,9 \cdot 10^{15}$  Бк  $^{134}\text{Cs}$ ,  $7 \cdot 10^{15}$  Бк  $^{137}\text{Cs}$  и 3 % редкоземельных элементов и актиноидов от содержащихся в зоне на момент аварии.
- Из рассеянной в атмосферу радиоактивности на месте осело 0,3–0,5 %, в пределах радиуса 20 км выпало 1,5–2 %, а остальное в виде радиоактивного облака достигло Сибири, Центральной Европы, Англии и Скандинавии, на территории которых наблюдалось самое высокое выпадение радиоактивности за пределами СССР (до  $1 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>2</sup>).