

# Радиометрия и ядерная геофизика

---

Лекция 8.

# В геологии явление радиоактивности используется в трех областях:

---

1. Радиоактивные элементы создают характерные излучения, измеряя которые удастся дистанционно картировать различные породы, а также искать радиоактивные руды - **радиометрия**
  2. По реакции горных пород на радиоактивное излучение удастся оценить другие физические свойства этих пород (например, плотность) и их химический состав **ядерная геофизика**
  3. Зная вещественный состав горных пород и законы радиоактивного распада, можно определить абсолютный возраст этих пород – **абсолютная геохронология**
-

# 8.1 Физические основы

---

- Атомы состоят из ядер и электронов, располагающихся вокруг ядер в виде слоев.
  - Ядра имеют положительный заряд, электроны – отрицательный. Атом в целом электрически нейтрален, поэтому суммарный заряд электронов и ядра – одинаковый по абсолютной величине.
  - Ядра состоят из положительно заряженных протонов ( $p$ ) и электрически нейтральных нейтронов ( $n$ ). Сумма масс протонов и нейтронов составляют *массу ядра* ( $A$ ).
  - *Заряд ядра* атома определяется суммарным зарядом протонов  $Z$ , который отвечает *атомному номеру элемента* в периодической системе Менделеева.
-

- 
- Химические свойства элементов определяются их атомным номером. При этом существуют элементы, у которых совпадает атомный номер, но различна атомная масса, поскольку их ядра содержат разное количество нейтронов. Такие элементы называют *изотопами*.
  - Например, для урана с атомным номером 92 существуют три изотопа с атомной массой 234, 235 и 238, для природного водорода известны два изотопа с массой 1 и 2.
-

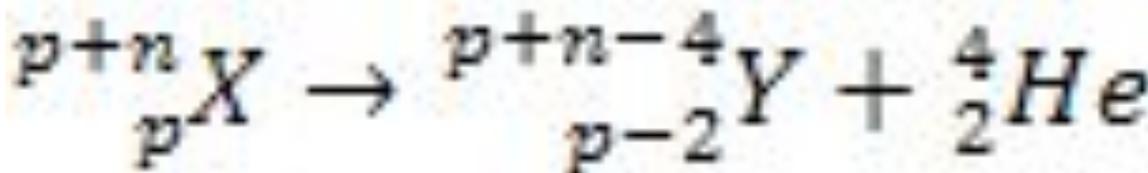
- 
- Радиоактивны все химические элементы с порядковым номером, большим 82 (начиная с висмута).
  - Многие более легкие элементы также имеют радиоактивные природные изотопы. Например, калий с атомным номером 19 состоит из трех изотопов, два из которых стабильны (39 и 41), а один (40) – радиоактивен, но, стабильных изотопов водорода и калия в природе неизмеримо больше, чем радиоактивных.
  - Легкий элемент технеций с атомным номером 43 вообще не имеет стабильных изотопов, но зато в природе известно более 20 (!) радиоактивных изотопов технеция.
-

- 
- Нестабильные элементы: в результате распада исходный элемент превращаются в другие.
  - Исходные элементы - *материнские*, образовавшиеся – *дочерние*.
  - Такие превращения называют радиоактивными, они происходят с некоторой вероятностью, присущей данному элементу.
  - При радиоактивном распаде происходит деление ядер, испускание или захват заряженных частиц и возникает коротковолновое электромагнитное излучение (гамма-излучение). Образуется два вида заряженных частиц: альфа-частицы (дважды ионизированные атомы гелия) и бета-частицы (электроны).
-

# 8.1.1 Реакции радиоактивного распада

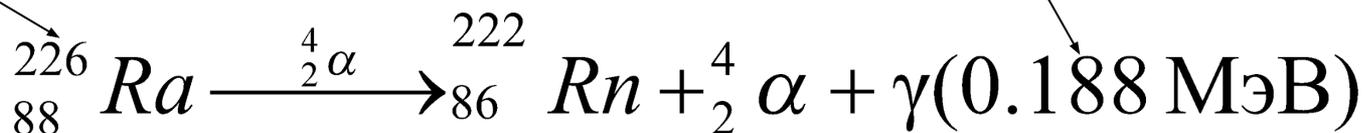
---

Альфа-распад:



Атомная масса

Энергия  $\gamma$ -кванта



Заряд (атомный номер)

Энергия

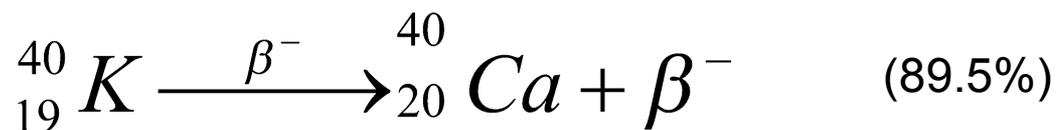
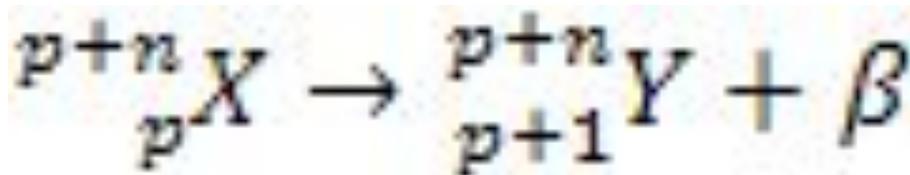
Частота

$$E = h\nu$$

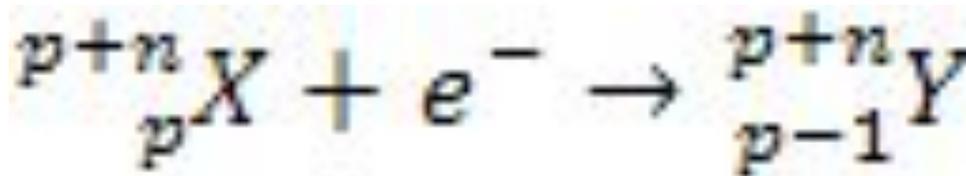
Постоянная Планка:  $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

---

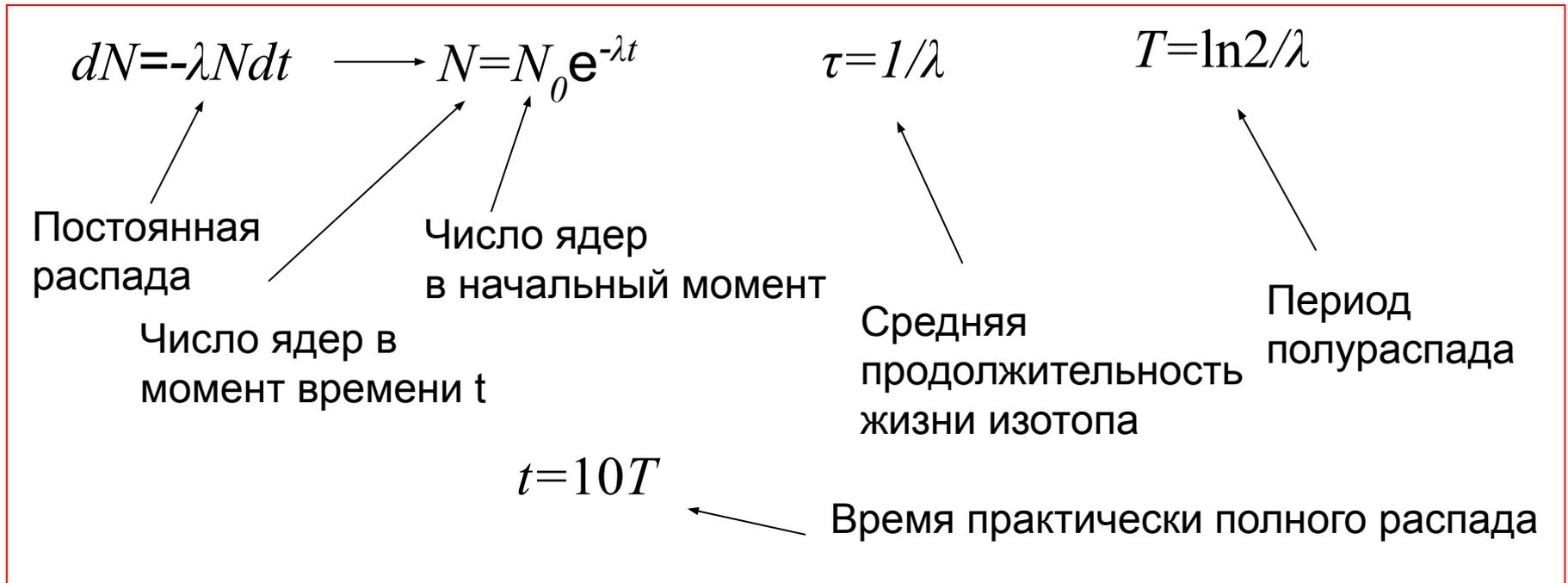
Бета-  
распад:

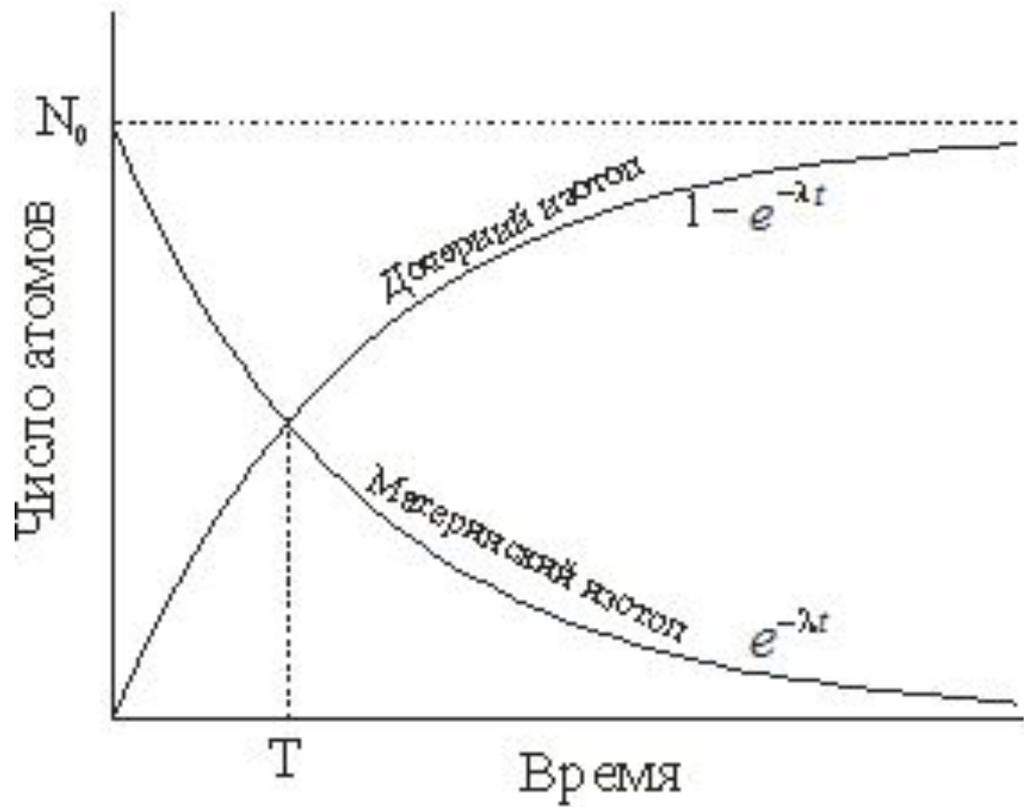


Захват  
электрона с  
K-орбиты  
(K-захват):



# 8.1.2 Закон радиоактивного распада (Резерфорд и Содди)





Число атомов материнского и дочернего изотопов в зависимости от времени

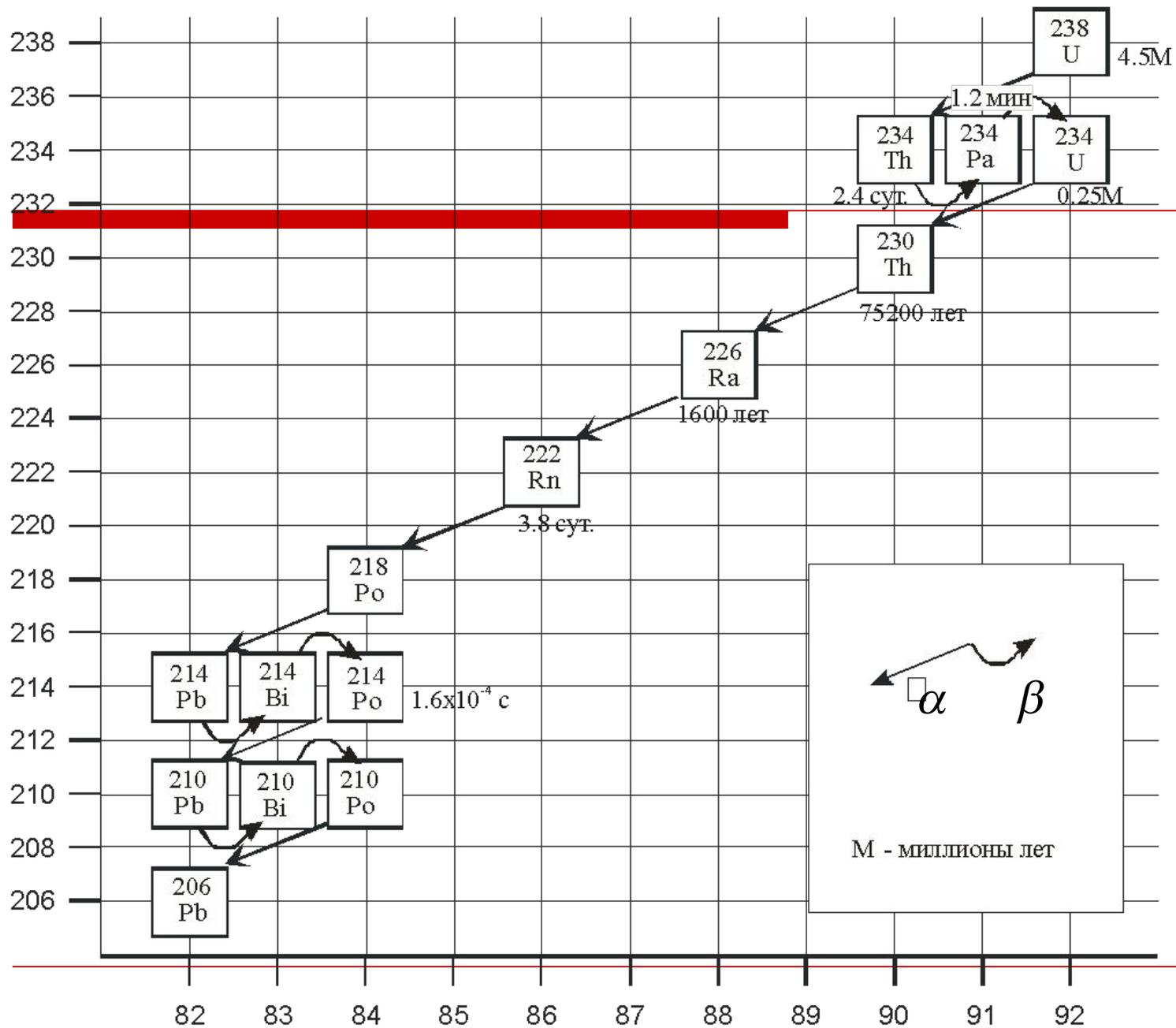
## 8.1.3 Источники естественной радиоактивности

---

Табл. 6.1. Примеры радиоактивных превращений

Реакция распада	Период полураспада (лет)
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\ ^4\text{He}$	$4.47 \cdot 10^9$
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\ ^4\text{He}$	$1.40 \cdot 10^{10}$
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7\ ^4\text{He}$	$7.04 \cdot 10^8$
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}, ^{40}\text{Ca}$	$1.25 \cdot 10^9$

Атомная масса



Атомный номер

## 8.1.4 Радиоактивное равновесие

---

Рассмотрим материнский ( $T_1$ ) и дочерний ( $T_2$ ) элементы. Если материнский элемент – долгоживущий, то при  $t > 10T_2$  наступает радиоактивное равновесие:

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2$$

В ряду с долгоживущим родоначальником  $N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 \dots = N_k\lambda_k$

Примеры:

U ( $T=4.5 \cdot 10^9$  лет) и Ra ( $T=1600$  лет)

(время установления равновесия – 16000 лет)

Ra и Rn ( $T=3.8$  сут.)

(время установления равновесия – 38 сут.)

---

## 8.1.5 Единицы радиоактивности

---

- Активность – число распадов в единицу времени (Бк (Беккерель)=1/с), внесистемная единица – Ки (Кюри)= $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк, Удельные единицы активности относятся к единице массы, объема или поверхности (например, Бк/л)
  - Поглощенная доза: энергия(Дж)/массу(кг) = грей (Г)
  - Экспозиционная доза: Кл/кг Внесистемная единица – Рентген ( $R=2.58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг)
  - Мощности дозы – соответствующая доза деленная на единицу времени, например Р/час или А/кг
-

## 8.1.6 Взаимодействие излучения с веществом

---

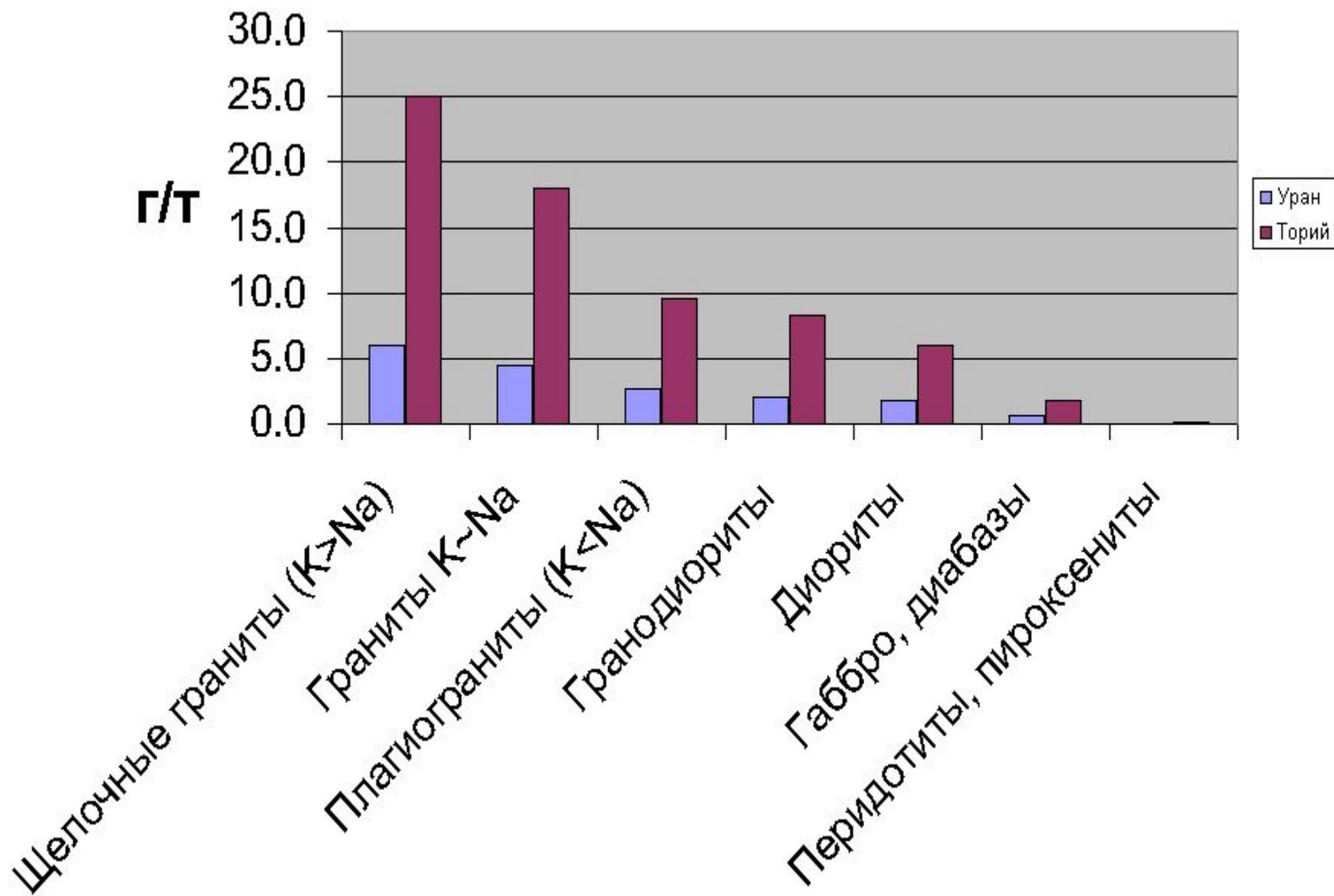
- Альфа-частицы: пробег в воздухе не более 11.5 см, прямолинейная траектория. Ионизируют вещество
  - Бета-частицы: пробег в воздухе до 13 м, криволинейная траектория. Ионизируют вещество, их торможение в электрическом поле ядра приводит к возникновению рентгеновского излучения
  - Гамма-излучение: обладает наибольшей проникающей способностью и энергией от 0.02 до 3 МэВ. Пробег в породе – десятки сантиметров, в воздухе – сотни метров
-

## 8.2 Распространенность радиоактивных элементов

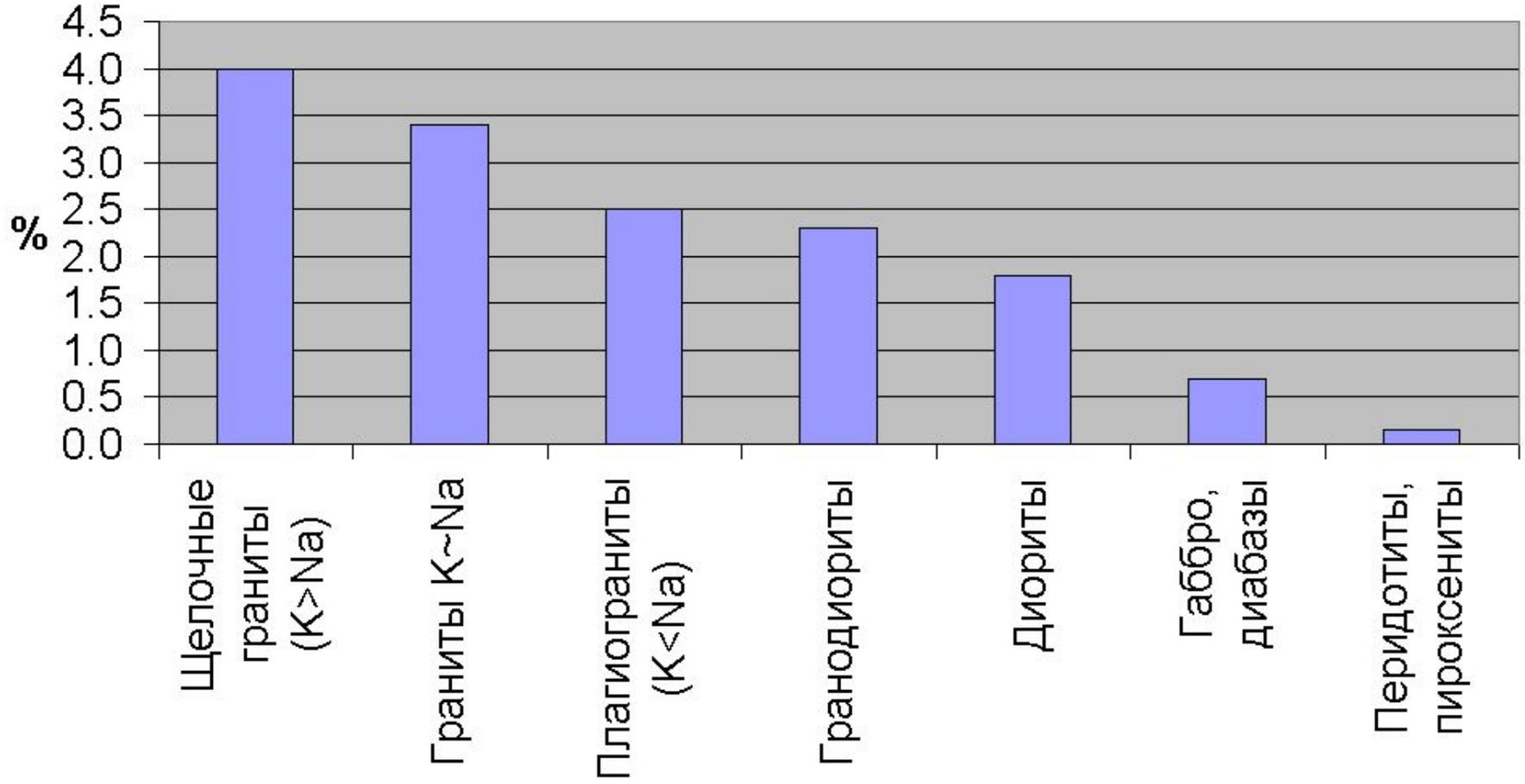
---

Среднее содержание в земной коре

- U-  $2.5 \times 10^{-4}$  %,
  - Th –  $13 \times 10^{-4}$  %
  - K – 2.5%
-



## Калий



# Некоторые тенденции миграции радиоактивных элементов

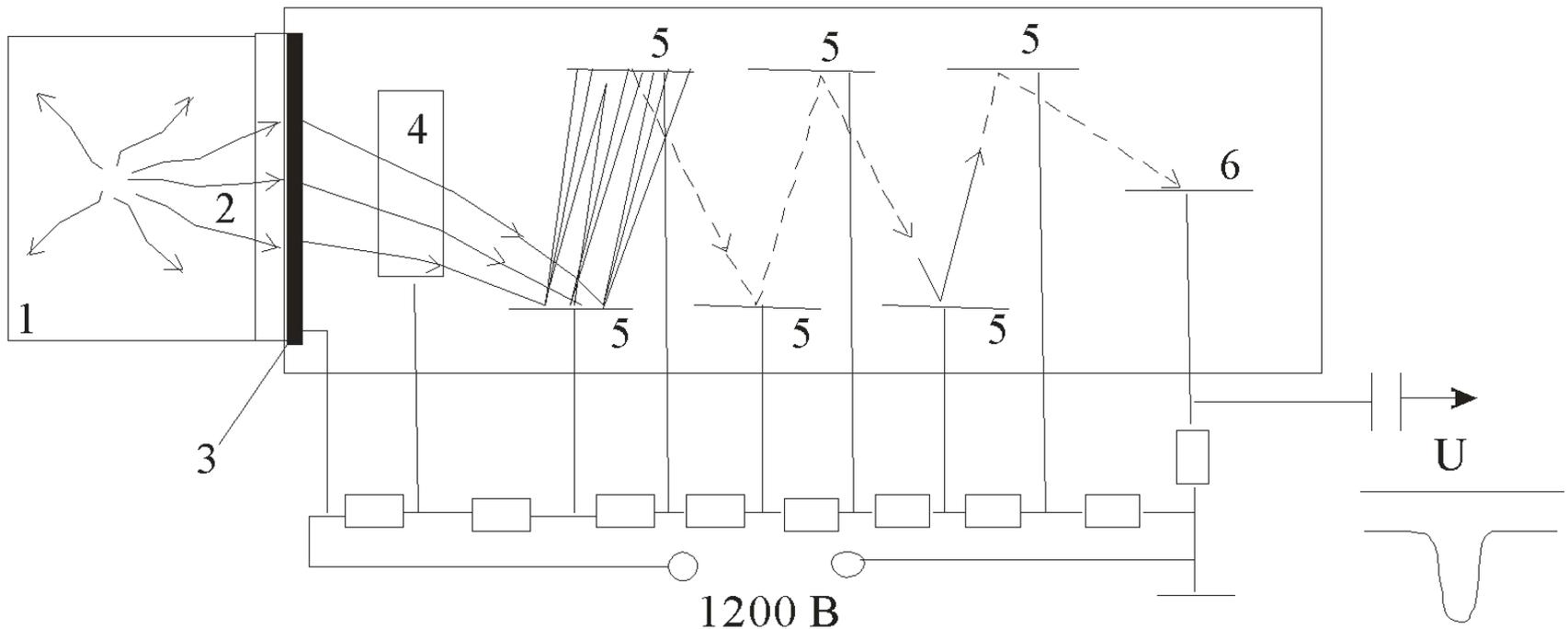
---

- Окисление U до валентности +6 (уранил-ион,  $\text{UO}_2^{2+}$ ) и переход в раствор (окислительные условия)
  - Восстановление U до валентности +4 и осаждение из раствора (восстановительные условия)
  - Миграция Th со взвешенными частицами
  - Сорбция U и Th на глинах
  - Ассоциация с цирконом, монацитом, глауконитом
  - Снижение концентрации со степенью регионального метаморфизма
  - Высокая (U), средняя (K) и низкая (Th, Ra) подвижность в гипергенных условиях. Как следствие смещение равновесия между U и Ra.
-

## 8.3 Методы радиометрии и ядерной геофизики

---

## 8.3.1 Гамма-методы: как измерить гамма-излучение – сцинтилляционный детектор



1 – кристалл люминофора, 2 – вспышки, 3 – фотокатод, 4 – фокусирующая электронная линза, 5 – эмиттеры, 6 – анод

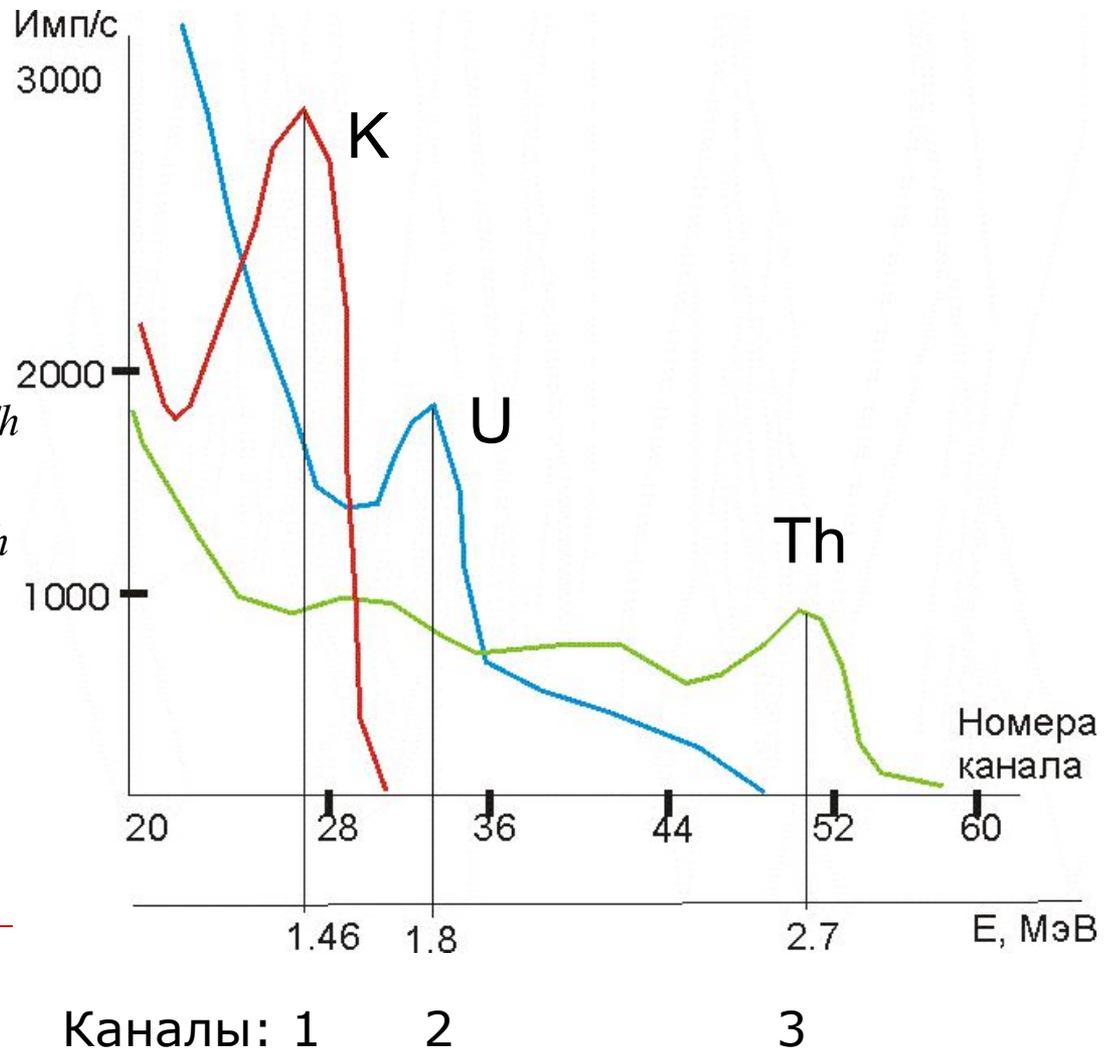
# Спектры гамма-излучения

$$N_1 = a_{1K}C_K + a_{1U}C_U + a_{1Th}C_{Th}$$

$$N_2 = a_{2K}C_K + a_{2U}C_U + a_{2Th}C_{Th}$$

$$N_3 = a_{3K}C_K + a_{3U}C_U + a_{3Th}C_{Th}$$

Коэффициенты  $a_{i,j}$   
- эталонирование



# Гамма методы

---

- Интегральный
  - Спектрометрический
-



## Интегральный

---

Радиационное  
обследование  
территории СПб  
ООО "Технотерра"

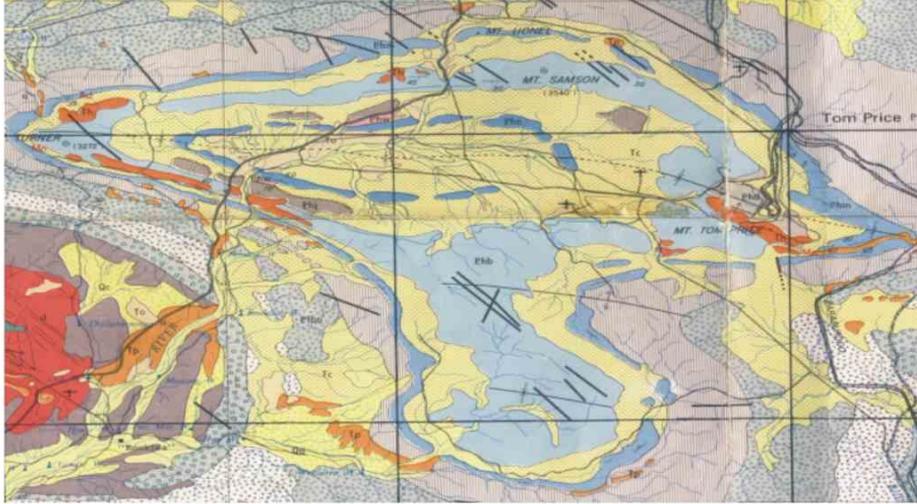
---



---

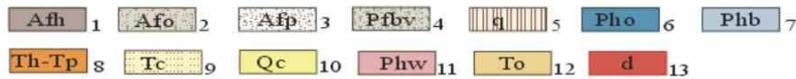
Аппаратура компании  
Aeroquest

---

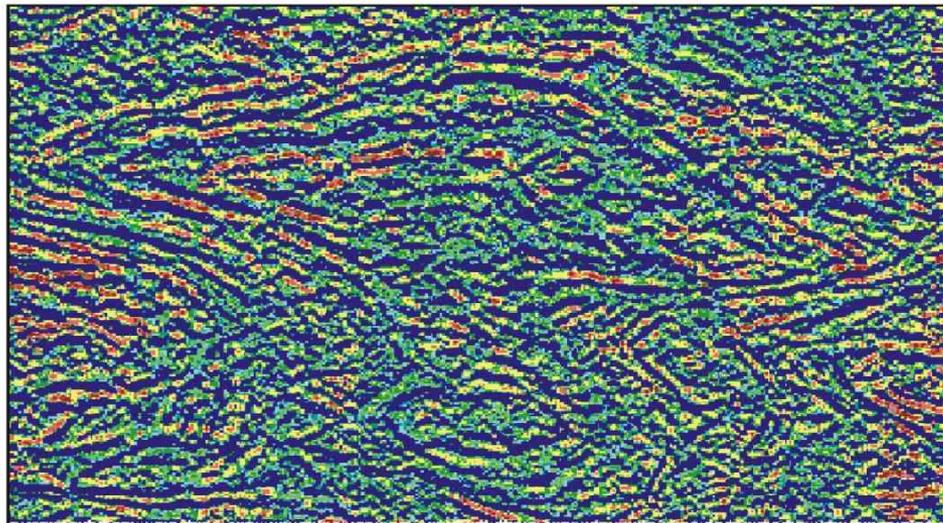


а.

Условные обозначения



1 - базальт, 2 - кремнистые сланцы, 3 - доломиты, 4 - черные сланцы, 5 - долериты, туффы, 6 - железистый аргиллит, 7 - джеспелиты, 8 - гематитовые руды, 9 - пески, галька, 10 - пески, 11 - риодациты, 12 - мелкозернистые граниты, 13 - гранодиориты.

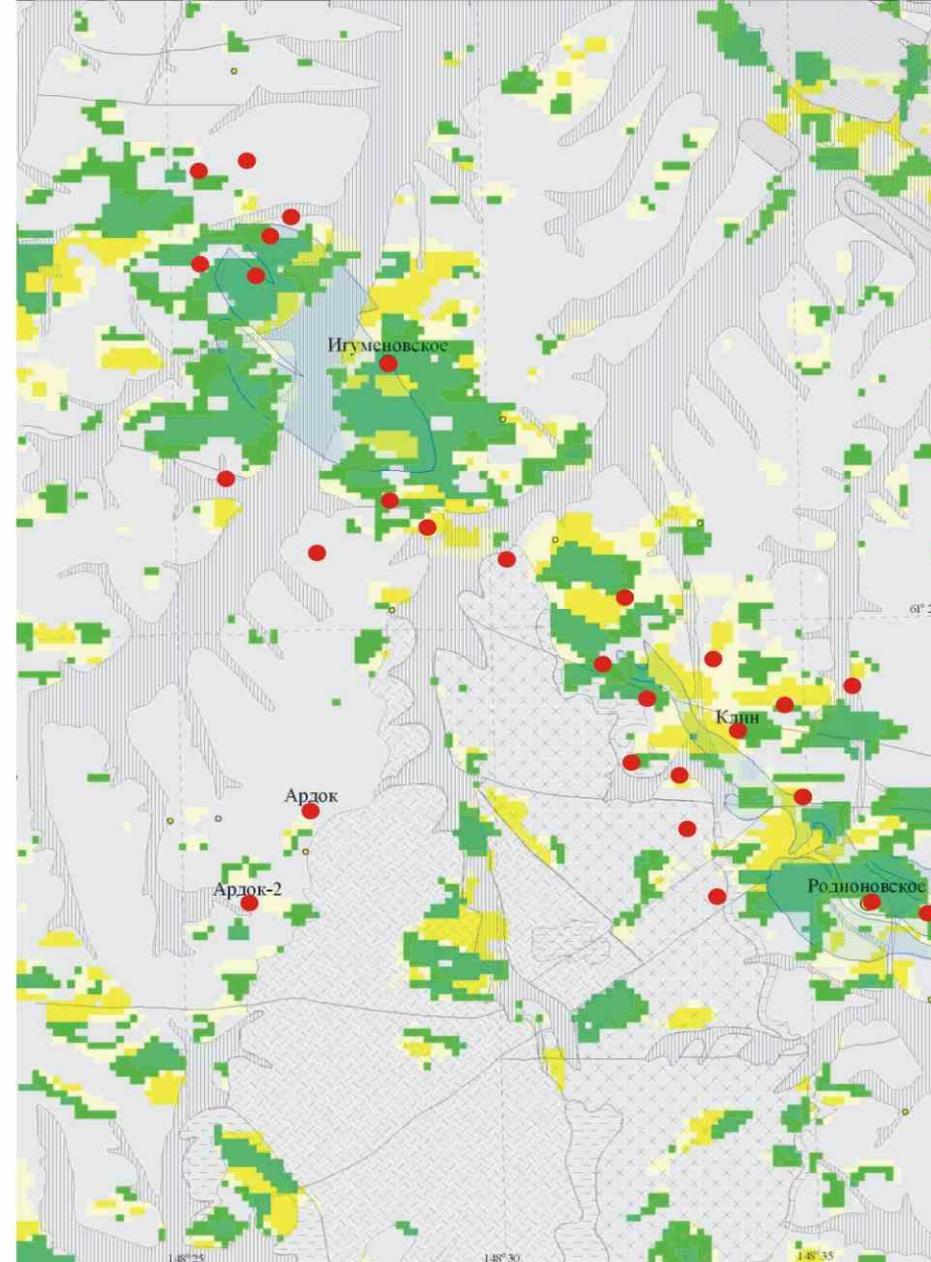


0 5 10 25 50 150 300 500 700 ИМПГ/с

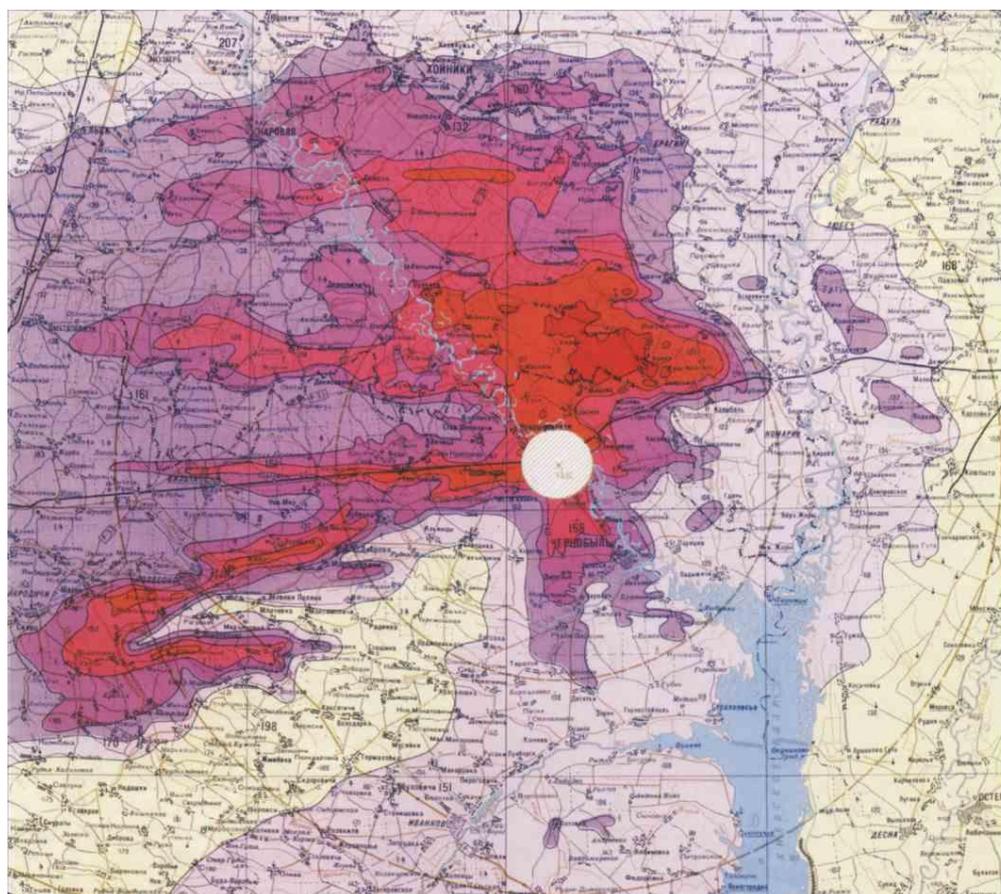
б.

0 10 км

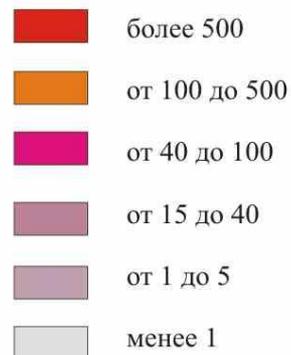
Аэро-гамма-съёмка:  
Крупная синклиальная складка (рис. 6.6а) включает выходящие на дневную поверхность маркирующие горизонты пород, имеющих повышенные содержания радиоактивных элементов. Маркирующие горизонты хорошо видны на карте гамма-поля. Отметим, что на карте представлена лишь остаточная (локальная) составляющая поля, подчеркивающая небольшие по размеру аномалии (По Е.И. Зубову).



Аэро-гамма-спектрометрия:  
Карта ореолов калиевой и уран-  
калиевой природы участка в  
Центрально-Калымском районе.  
В полосе ореолов северо-  
западного простирания  
расположены месторождения и  
рудопроявления золота (по Е.И.  
Зубову). Ореолы: 1 – калиевой  
природы, 2 – урановой  
природы; 3 – месторождения и  
рудопроявления золота  
(По Е.И. Зубову)



Плотность загрязнения  
местности Cs-137  
(Кюри/км<sup>2</sup>)



0 10 20 30 км

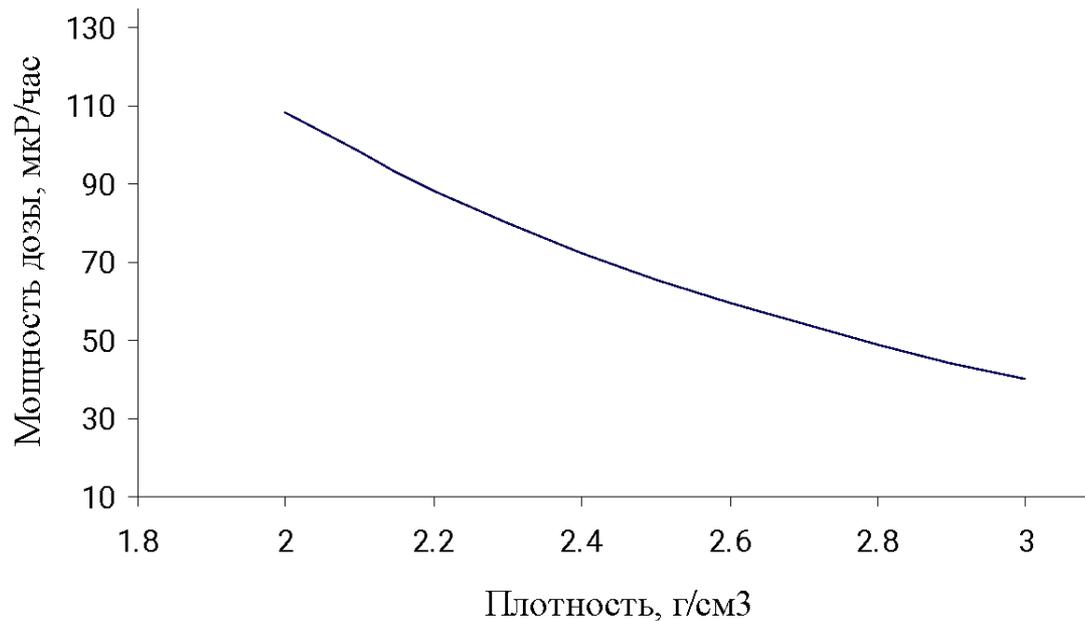
Карта поверхностного загрязнения цезием-137 по данным  
аэро-гамма-спектрометрической  
съемки в районе Чернобыльской аварии

## 8.3.2 Методы основанные на искусственном излучении

---

# Гамма-гамма метод

---



Ослабление гамма излучения в зависимости от плотности пород

---

# Нейтрон-гамма и нейтрон-нейтронный методы

---

- Облучение: горных пород нейтронами
  - Регистрация: либо, вторичного гамма-излучения возникающего при радиационном захвате нейтрона ядром вещества породы-метод НГК(нейтронный гамма-каротаж), либо потока нейтронов первичного излучения дошедших до детектора-методы ННК(нейтрон-нейтронный каротаж)
  - Результат: определение содержания водорода в породе, т.е. её влажности (пористости)
  - Возможность определения нефтенасыщенности породы
-

# Рентгено-радиометрический метод

---

- Облучение: потоком квантов электромагнитного ионизирующего излучения Облучение: потоком квантов электромагнитного ионизирующего излучения, испускаемым радиоизотопным источником или рентгеновской трубкой,
- Регистрация: характеристического флуоресцентного рентгеновского излучения, возбуждаемого в веществе
- Результат: содержание химических элементов в горной породе по интенсивности рентгеновского излучения.

## 8.3.3 Эманационный метод

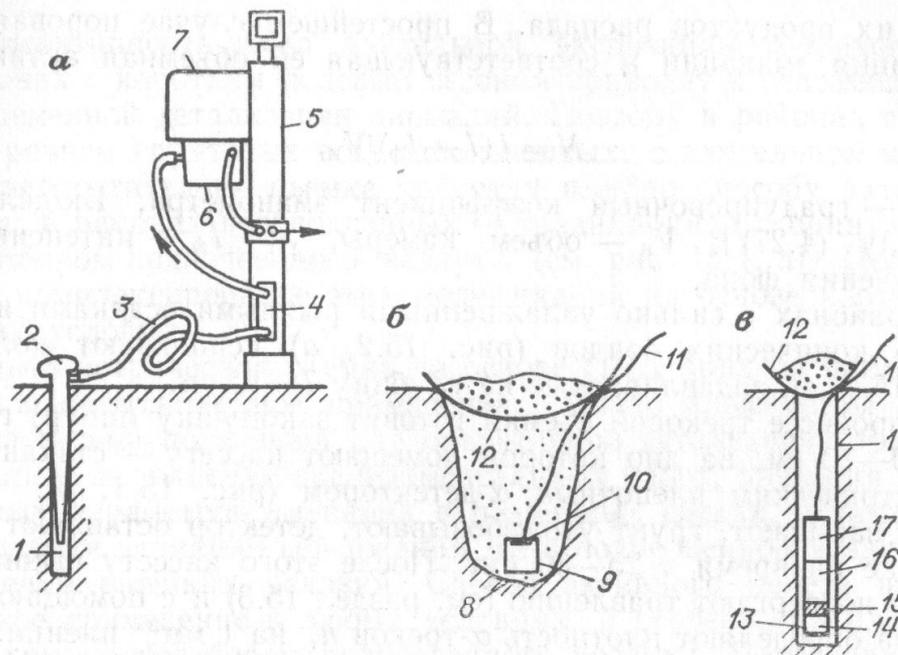
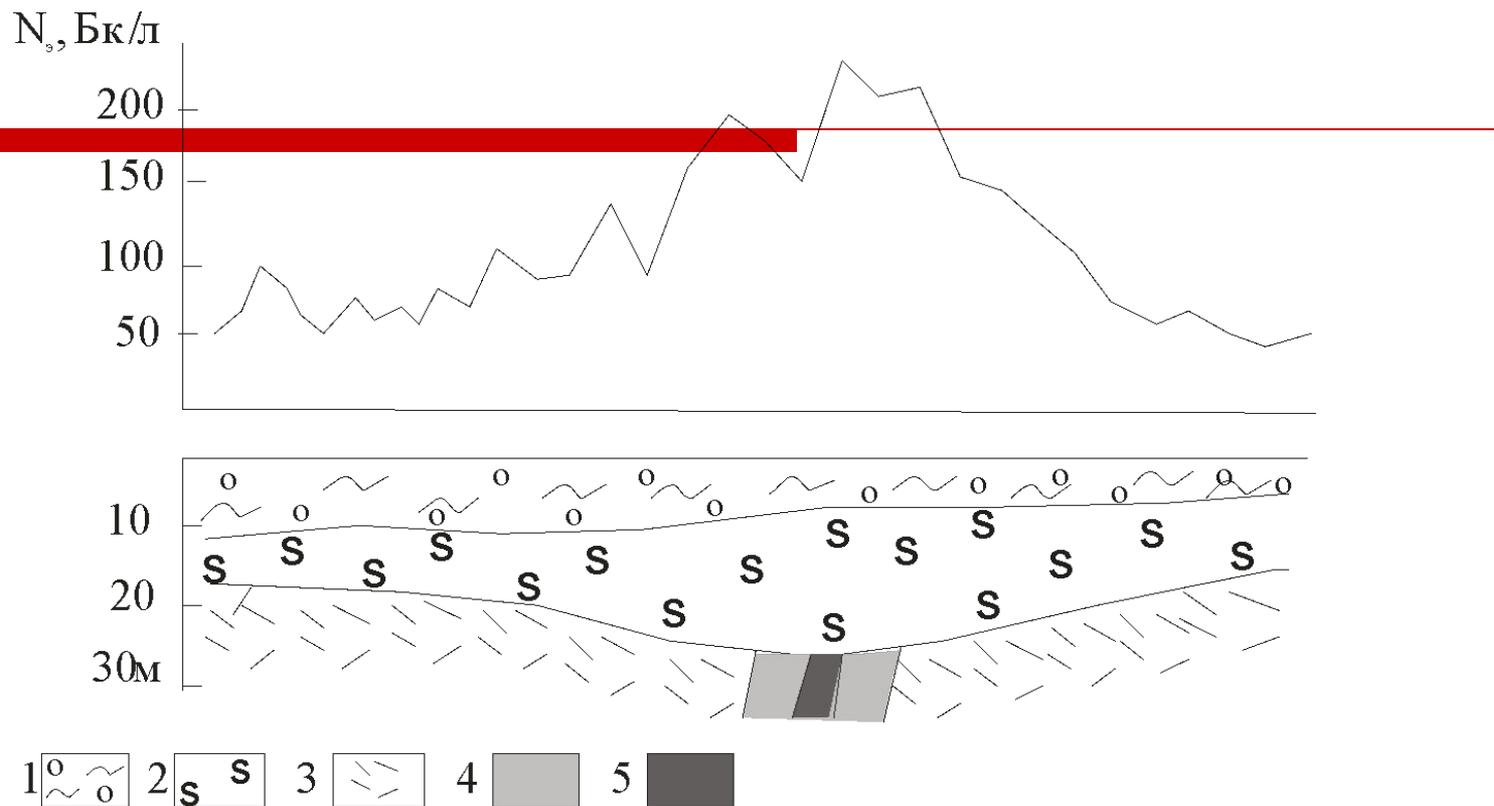


Рис. 15.1. Способы детектирования эманации в подпочвенном воздухе.

*a* — традиционный с принудительным отбором воздуха; *б* — трековый (ЭТМ) или активное налета (АН); *в* —  $\alpha$ -метрический.

1 — шпур; 2 — пробоотборник; 3 — резиновый шланг; 4 — пылеуловитель; 5 — держатель и насос; 6 — сцинтилляционная камера; 7 — устройство измерения; 8 — закопушка; 9 — кассета с пленочным детектором (ЭТМ) или с адсорбентом продуктов распада Rn (АН); 10 — пленочный детектор; 11 — капроновый шнур; 12 — крышка (рубероид или полиэтиленовая пленка); 13 — альфамер; 14 — эманационная (воздушная) камера; 15 — кремниевый ППД, 16 — электронный блок, 17 — пересчетное устройство.



Пример использования эманационной съемки при поисках урановых руд (по Г.Ф. Новикову)

1 – суглинок, 2 – кора выветривания, 3 – эффузивные породы, 4 – зона брекчирования, 5 – рудное тело.