

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.
-

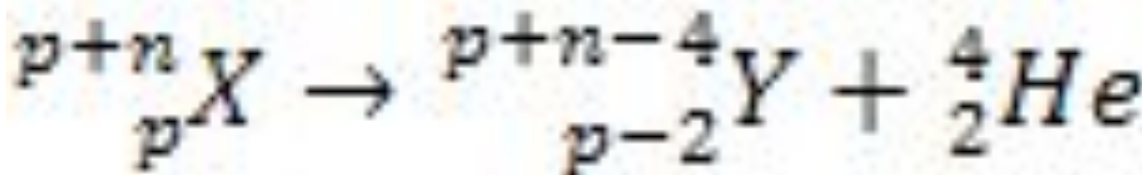
-
- Химические свойства элементов определяются их атомным номером. При этом существуют элементы, у которых совпадает атомный номер, но различна атомная масса, поскольку их ядра содержат разное количество нейтронов. Такие элементы называют *изотопами*.
 - Например, для урана с атомным номером 92 существуют 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).
-

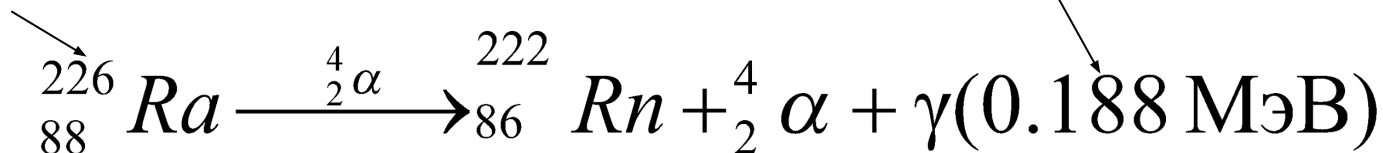
8.1.1 Реакции радиоактивного распада

Альфа-распад:



Атомная масса

Энергия γ -кванта



Заряд (атомный номер)

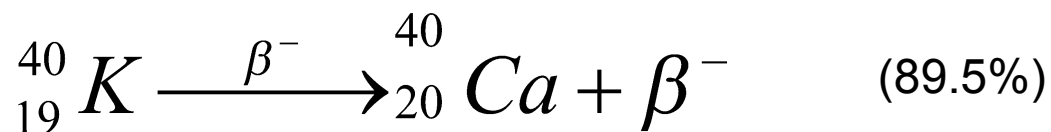
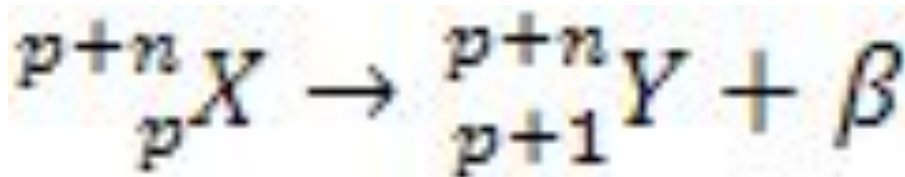
Энергия

Частота

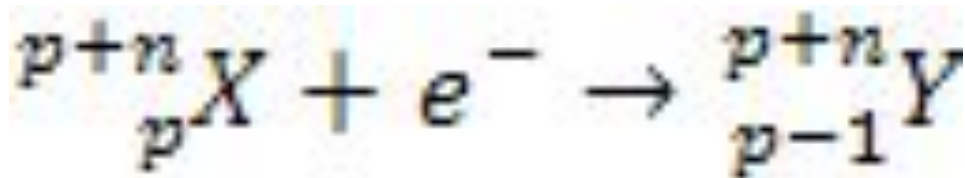
$$E = h\nu$$

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

Бета-
распад:

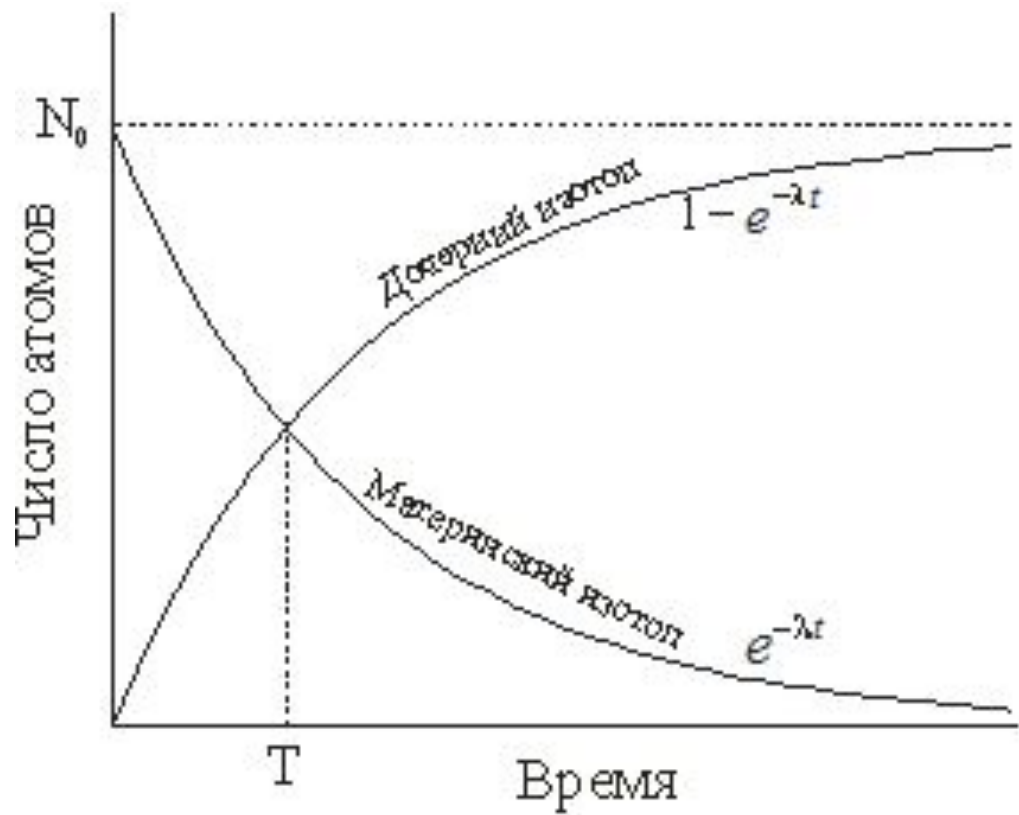


Захват
электрона с
K-орбиты
(K-захват):



8.1.2 Закон радиоактивного распада (Резерфорд и Содди)





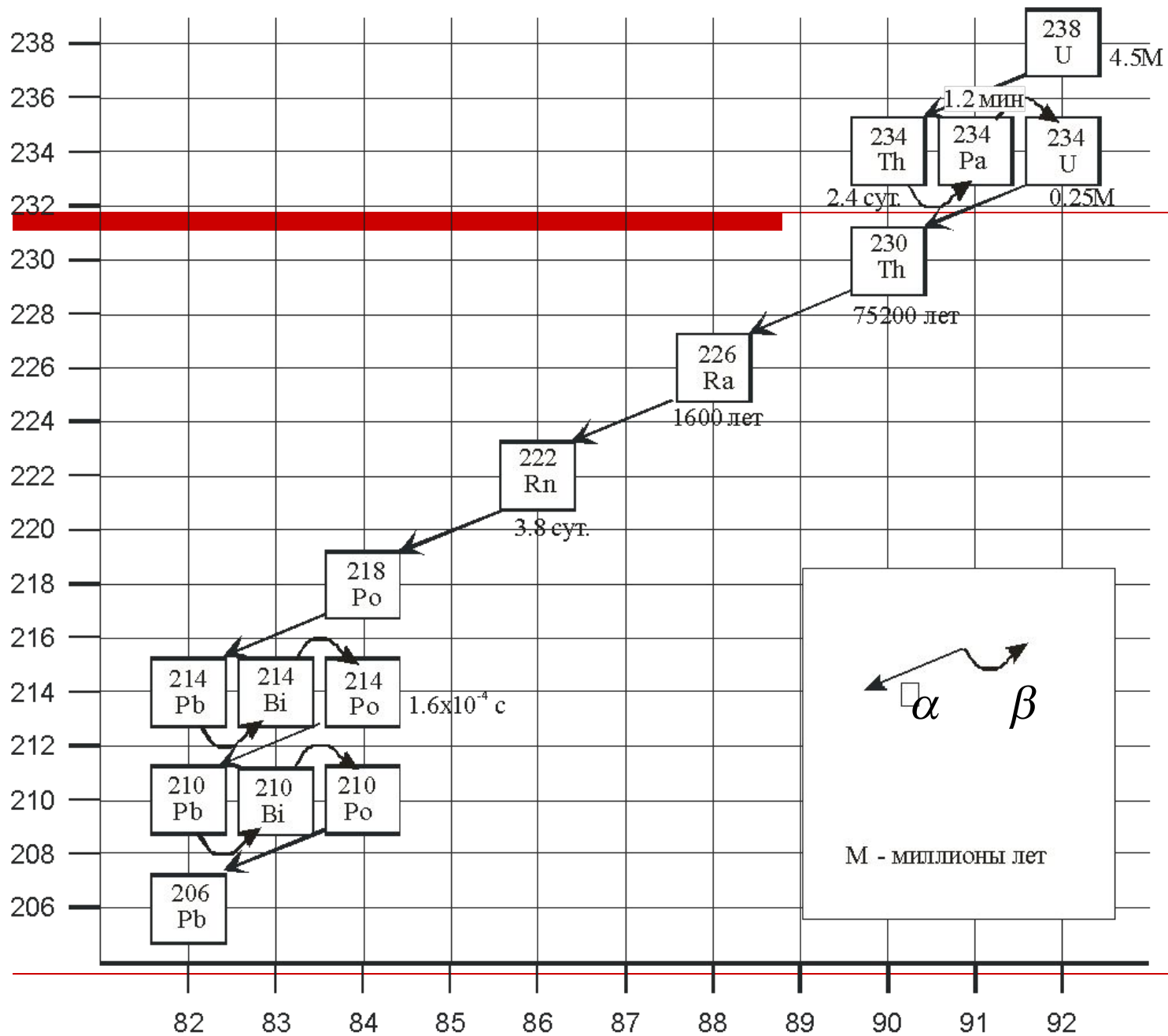
Число атомов материнского и дочернего изотопов в зависимости от времени

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
-

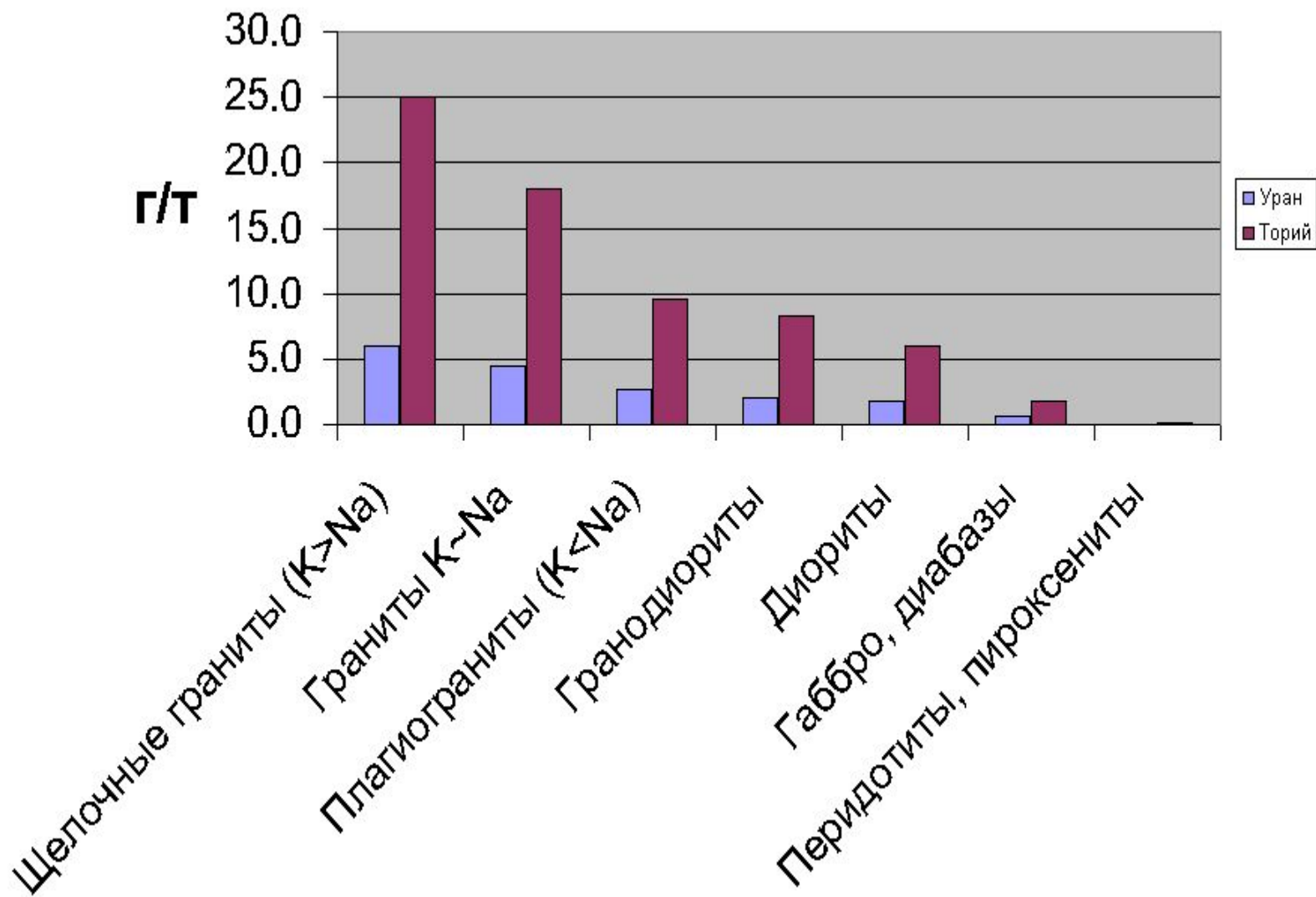
8.1.6 Взаимодействие излучения с веществом

- 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
-

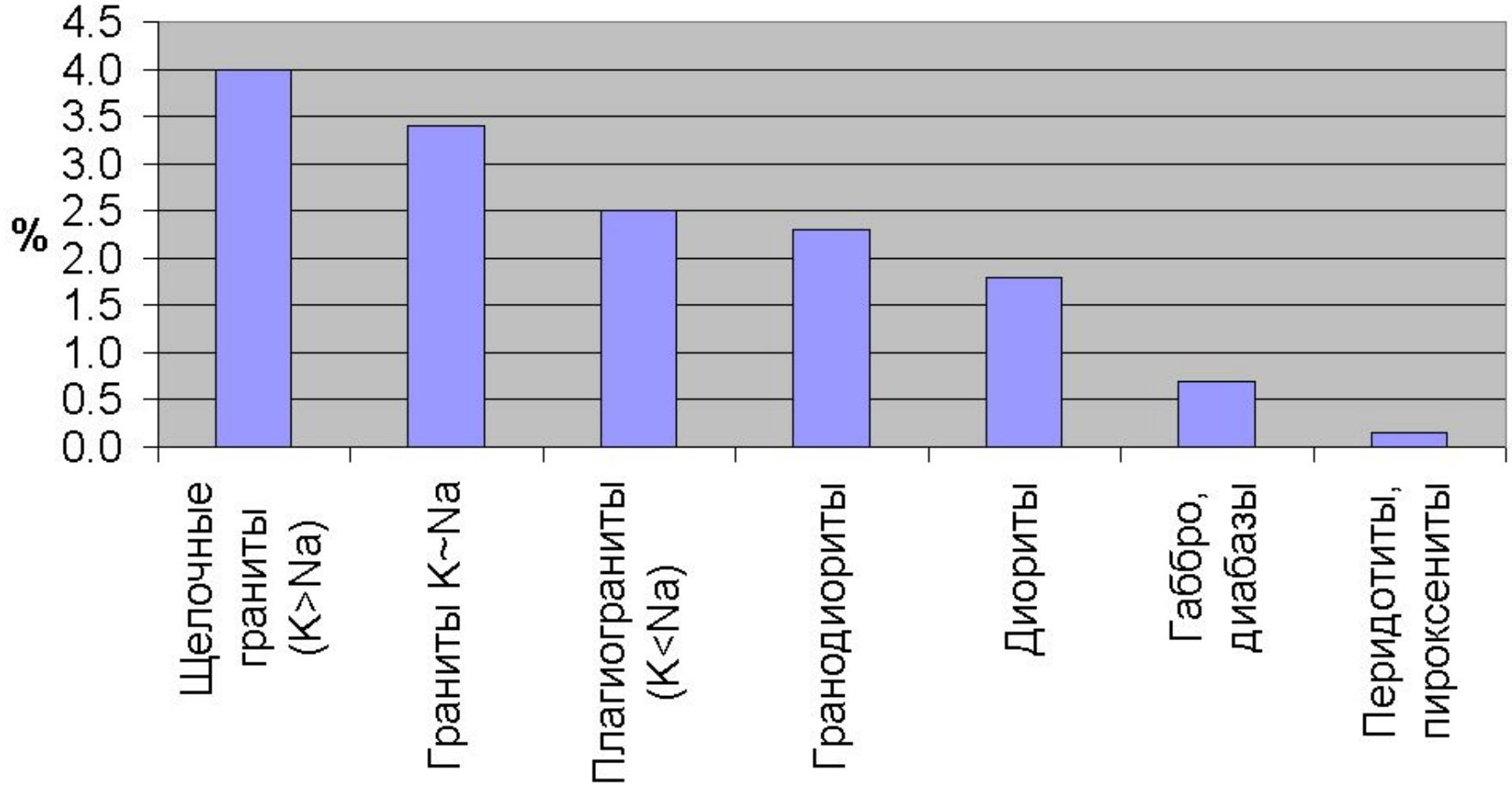
8.2 Распространенность радиоактивных элементов

Среднее содержание в земной коре

- U- 2.5×10^{-4} %,
 - Th – 13×10^{-4} %
 - K – 2.5%
-



Калий

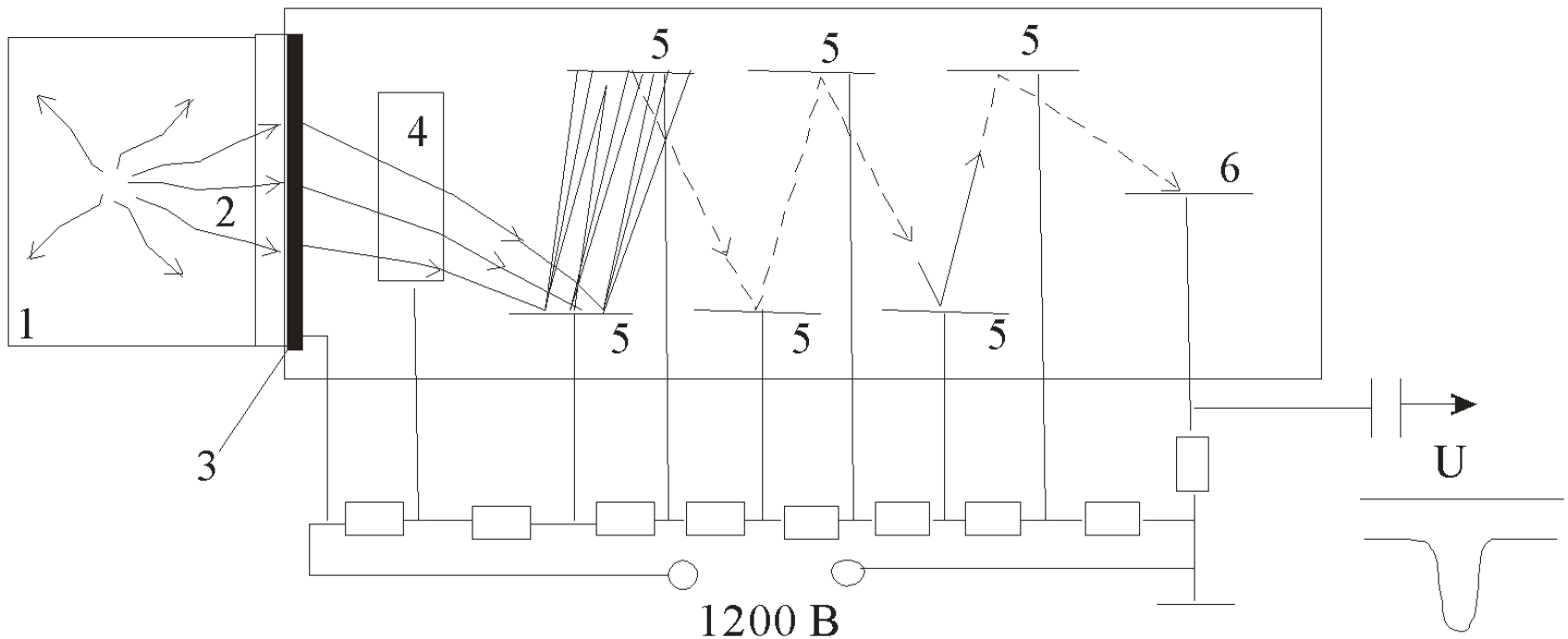


Некоторые тенденции миграции радиоактивных элементов

- Окисление U до валентности +6 (уранил-ион, 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

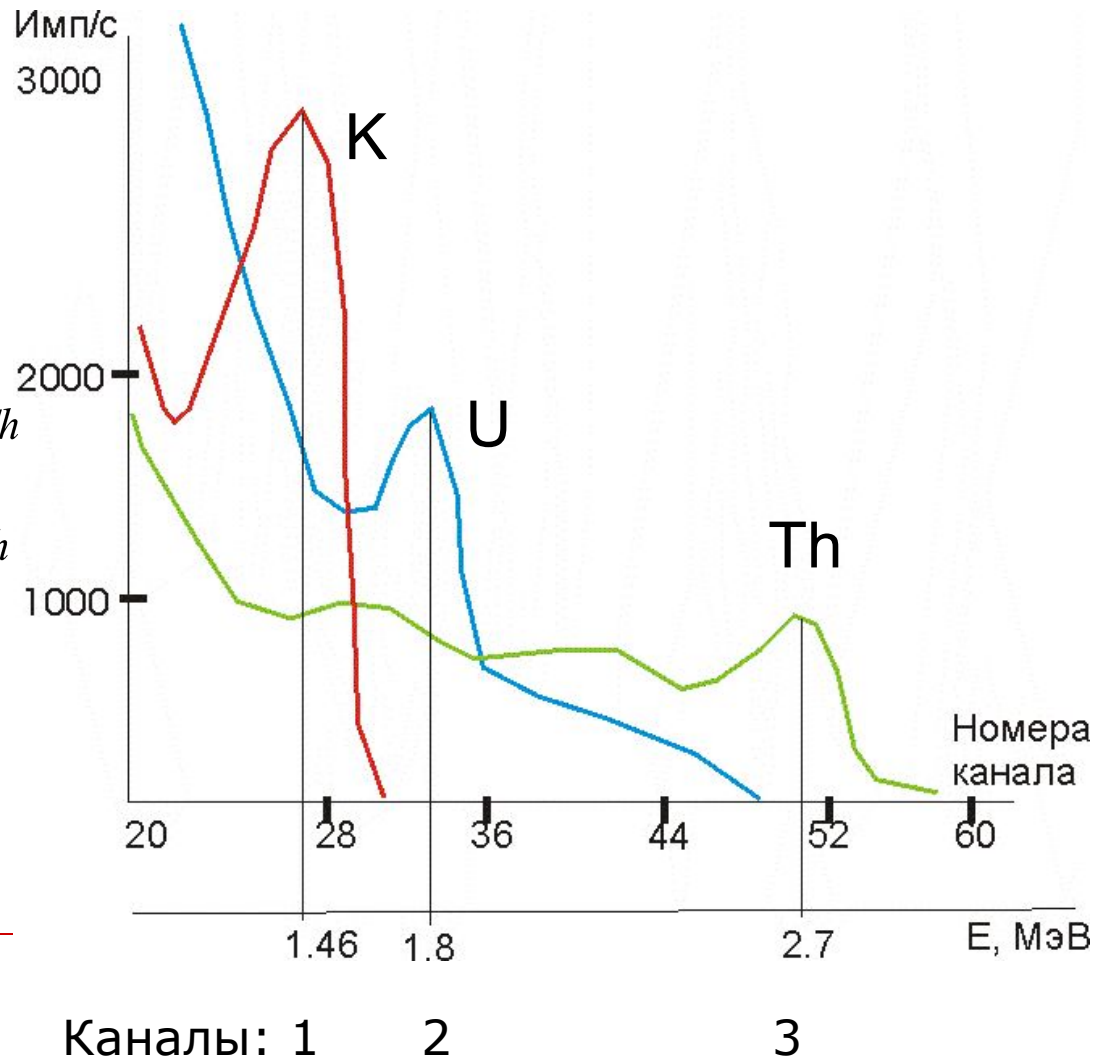
Спектры гамма-излучения

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

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

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

Коэффициенты $a_{i,j}$
- эталонирование



Гамма методы

- Интегральный
 - Спектрометрический
-

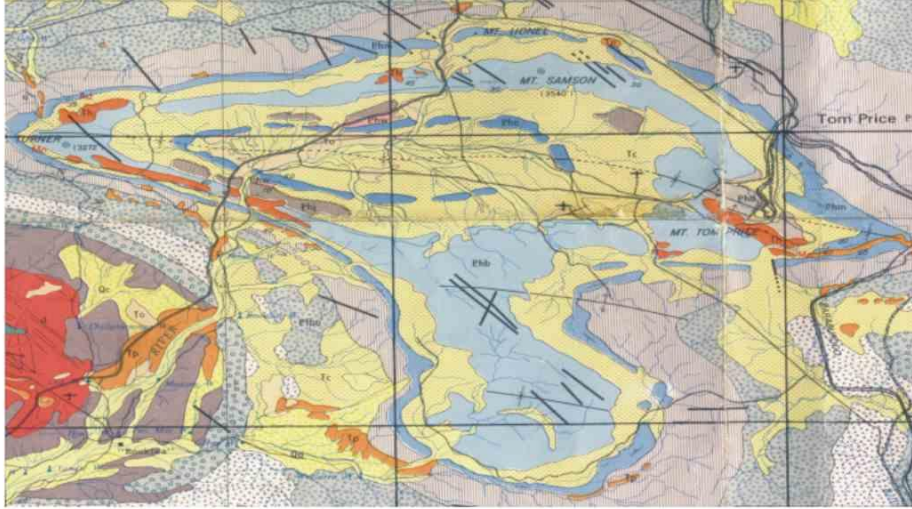


Интегральный

Радиационное
обследование
территории СПб
ООО "Технотерра"

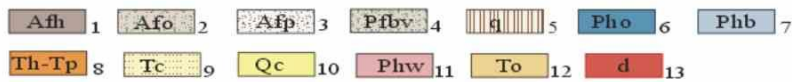


Аппаратура компании
Aeroquest

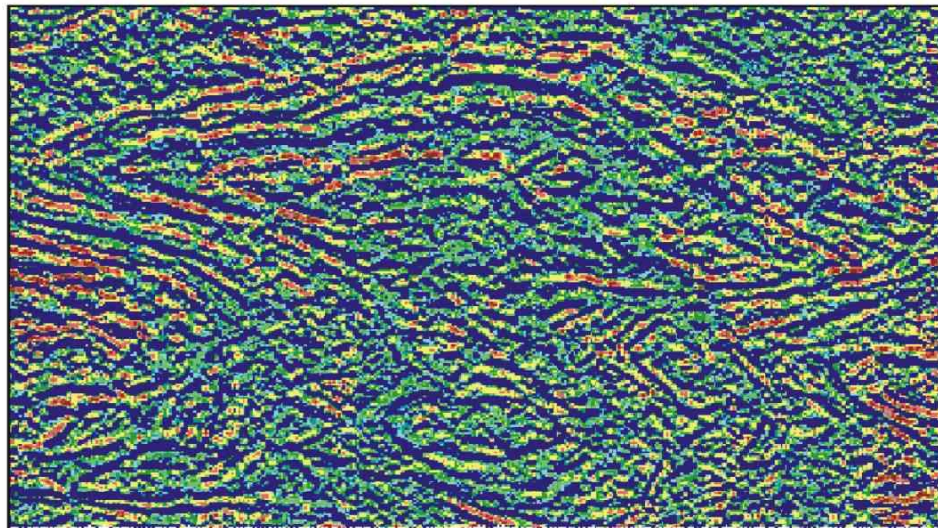


а.

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.

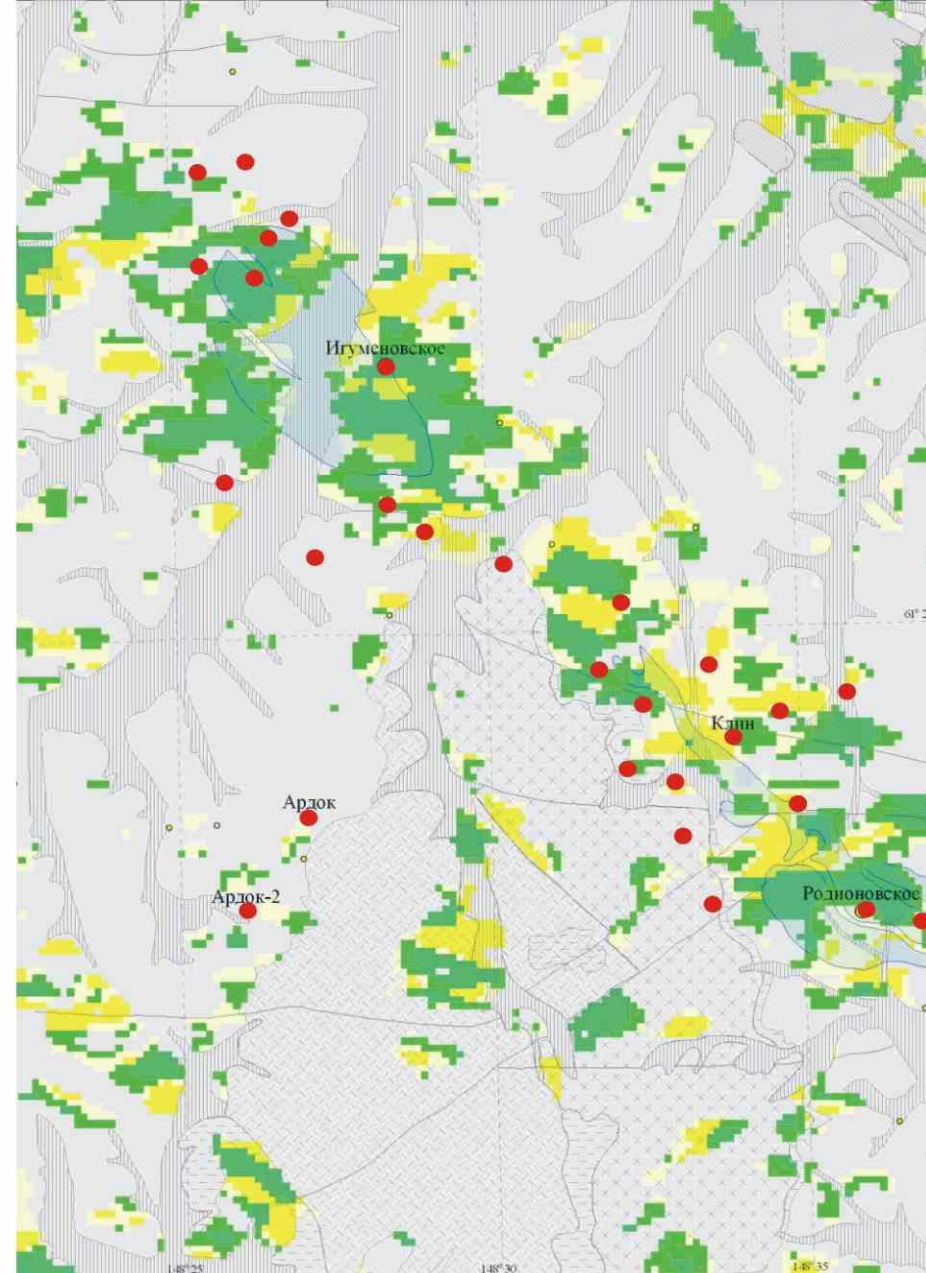


0 5 10 25 50 150 300 500 700 ИМПГ/с

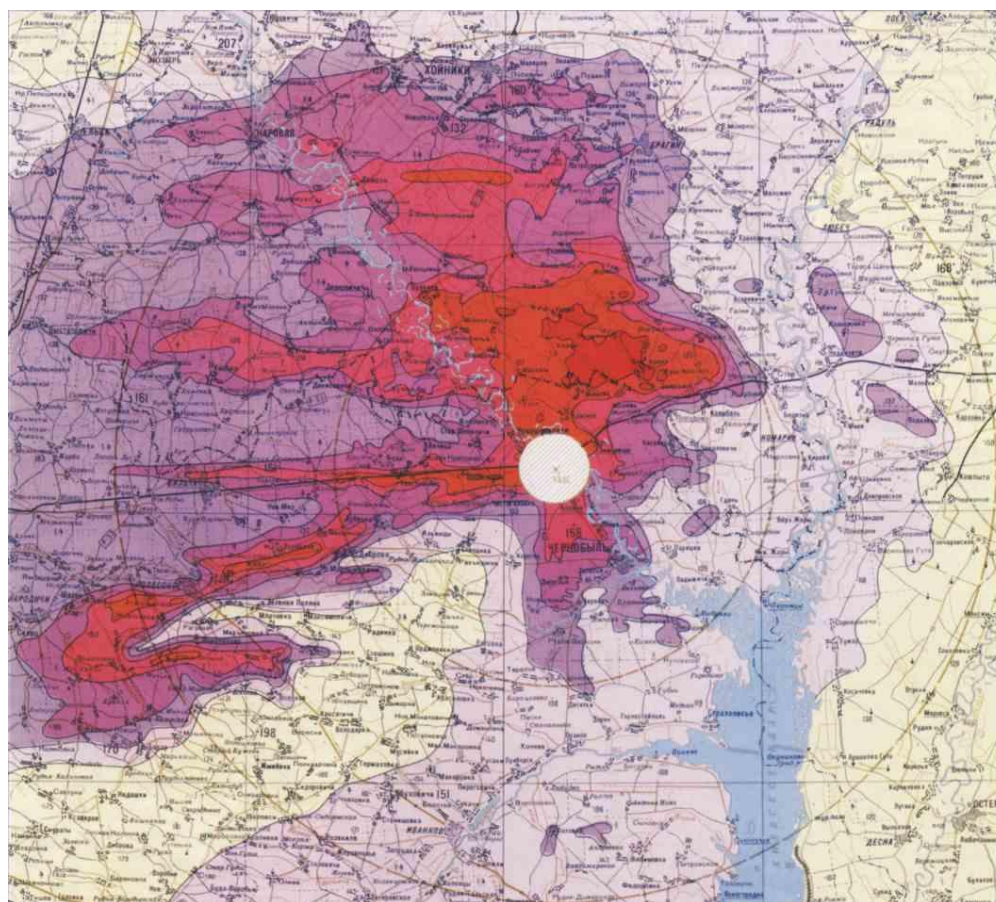
б.

0 10 км

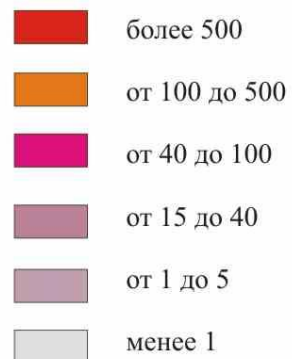
Аэро-гамма-съемка:
 Крупная синклиальная складка (рис. 6.6а) включает выходящие на дневную поверхность маркирующие горизонты пород, имеющих повышенные содержания радиоактивных элементов. Маркирующие горизонты хорошо видны на карте гамма-поля. Отметим, что на карте представлена лишь остаточная (локальная) 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/км²)

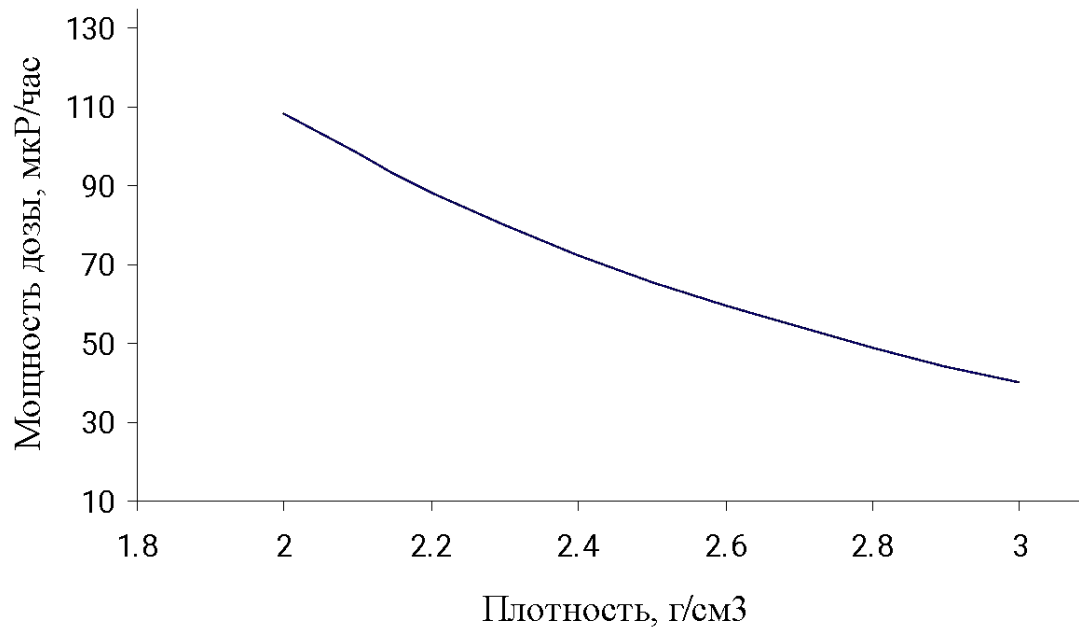


0 10 20 30 км

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

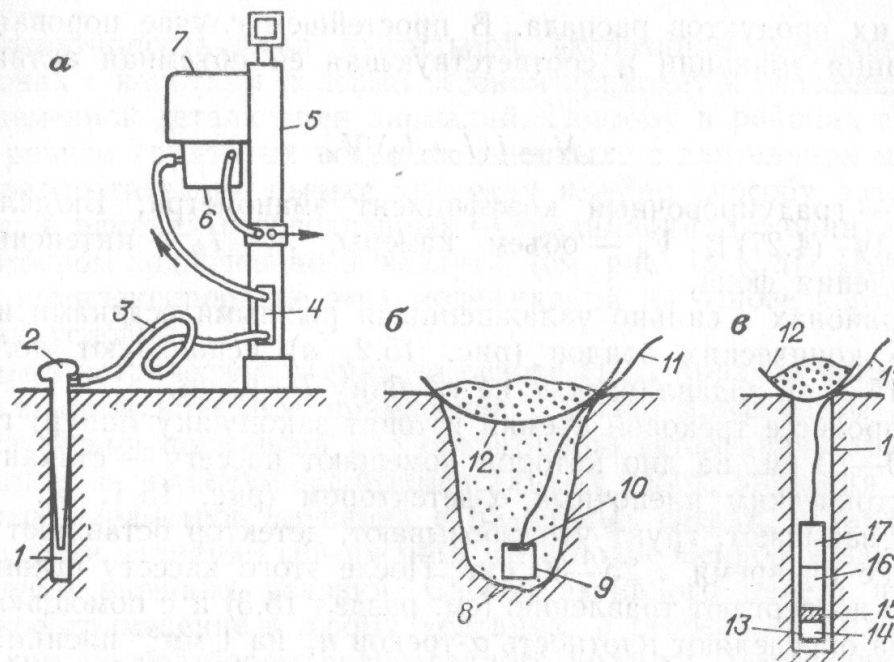
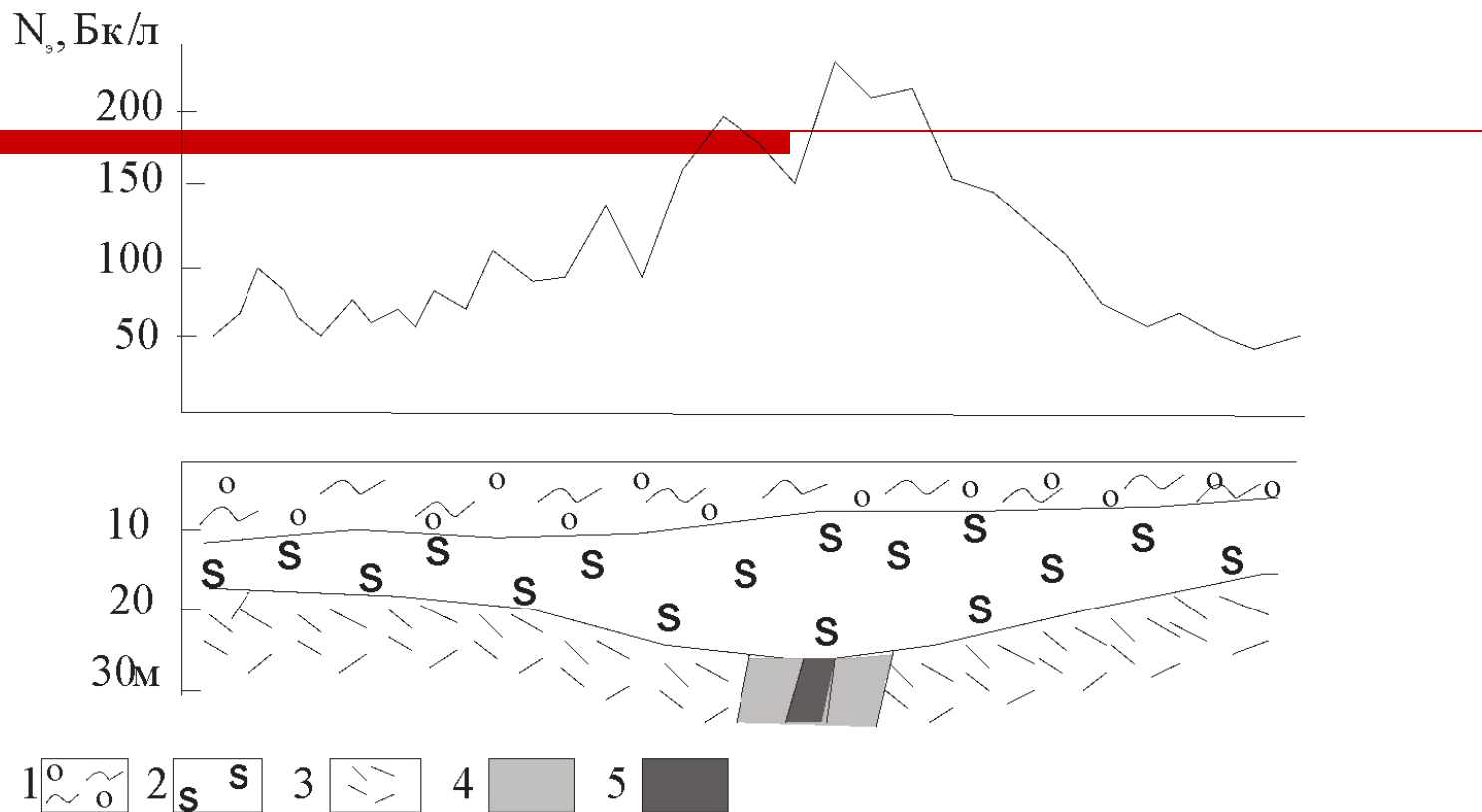


Рис. 15.1. Способы детектирования эманации в подпочвенном воздухе.

a — традиционный с принудительным отбором воздуха; *б* — трековый (ЭТМ) или активного налета (САН); *в* — α -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 (САН); 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.