



ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Ядерная геофизика

объединяет физические методы поисков и разведки радиоактивных руд по их естественной радиоактивности (радиометрия) и поэлементного анализа горных пород путем изучения вызванной радиоактивности (ядерно-геофизические методы). Находясь на стыке между геофизикой и геохимией, она по своей сущности, методике и технике наблюдений относится к геофизическим методам, хотя решает некоторые геохимические задачи.

Преимущество ядерной геофизики

Ядерная геофизика отличается «близкодействием», т.е. малой глубинностью исследований (десятки см по породе) вследствие быстрого поглощения ядерных излучений окружающими породами и воздухом. Однако продукты радиоактивного распада способны мигрировать, образуя вокруг пород и руд газовые, водные и механические ореолы рассеяния, по которым можно судить о радиоактивности коренных пород.

Основные методы радиометрии

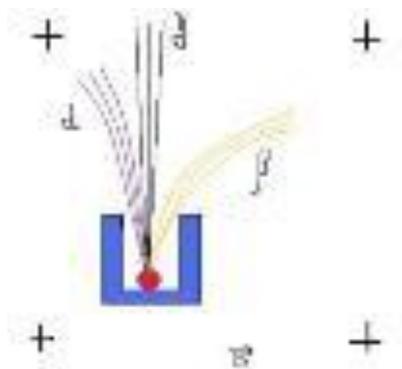
- гамма-съемка (ГС), предназначенная для изучения интенсивности гамма-излучения
- эманационная съемка (ЭС), при которой по естественному альфа-излучению почвенного воздуха определяют концентрацию в нем радиоактивного газа – радона

Назначение гамма-методов

Гамма-методы (ГМ) служат для поисков и разведки не только радиоактивных руд урана, радия, тория и других элементов, но и парагенетически или пространственно связанных с ними нерадиоактивных полезных ископаемых (редкоземельных, металлических, фосфатных и др.). С их помощью можно определять абсолютный возраст горных пород

Естественная радиоактивность

Самопроизвольный распад неустойчивых атомных ядер, спонтанно превращающихся в ядра других элементов и сопровождающийся испусканием альфа-, бета-частиц, гамма-квантов и другими процессами, называется естественной радиоактивностью.



Параметры радиоактивности

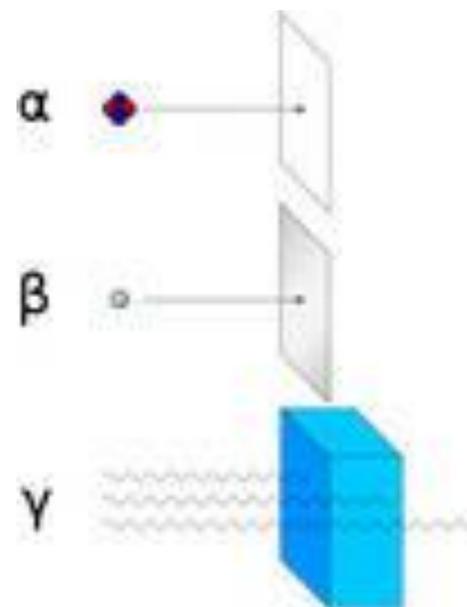
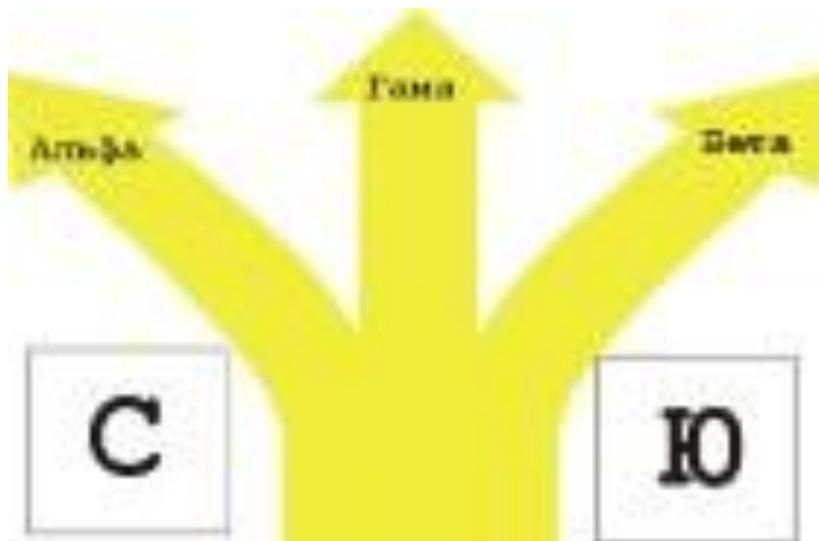
1. Период полураспада

Период полураспада ($T_{1/2}$), который у различных элементов изменяется в очень широких пределах – от 10^{-6} до 10^{10} лет. Для каждого элемента он является определенной и постоянной величиной и может служить его диагностическим признаком.

Параметры радиоактивности

2. Состав естественных излучений.

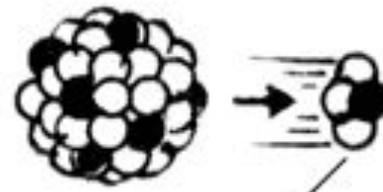
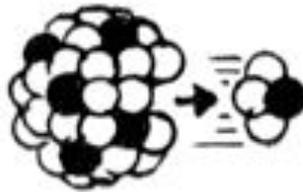
- Естественная радиоактивность состоит из альфа-, бета-, гамма-, нейтронных и других излучений.



Альфа-распад

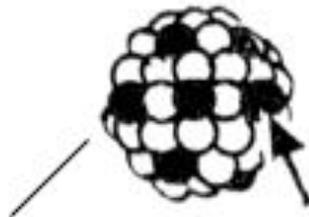


Ядро атома



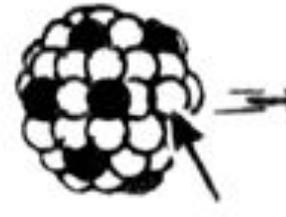
Альфа-частица

Бета-распад

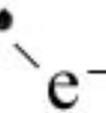


Ядро атома

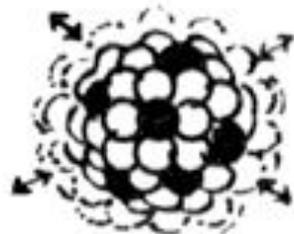
Нейтрон



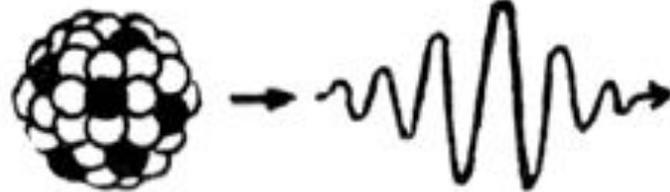
Протон



Гамма-излучение



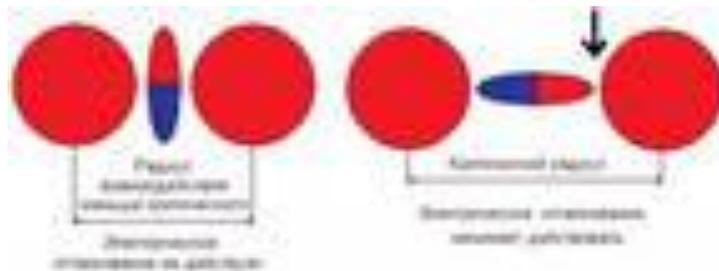
Возбуждённое ядро



Гамма-квант

Альфа-излучение (α)

- представляет собой поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия), энергия которых на длине пути около 10 см в воздухе и долей миллиметров в породе тратится на ионизацию и нагревание окружающей среды, поэтому проникающая способность у них очень мала.

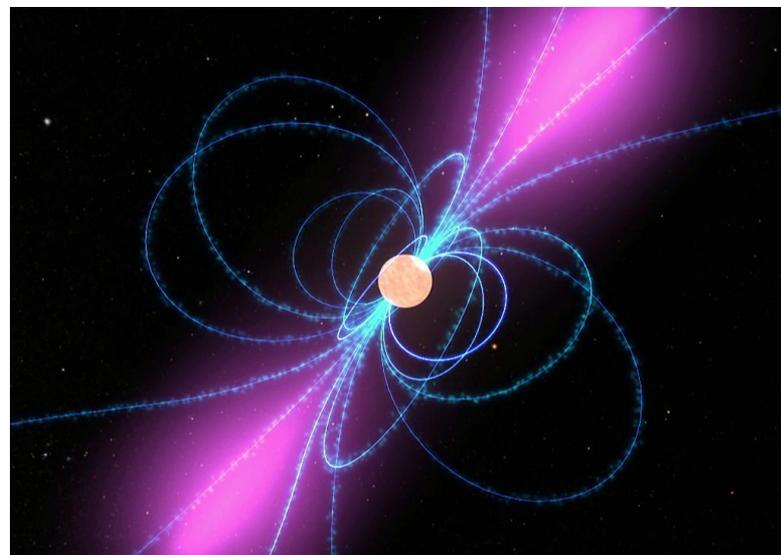
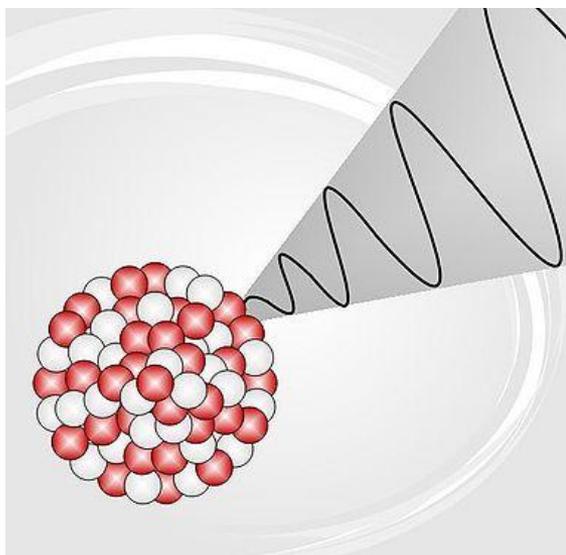


Бета-излучение (β)

- представляет собой поток электронов и позитронов, энергия которых тратится на ионизацию и возбуждение атомов окружающей среды. В результате они рассеиваются (это приводит к ослаблению их интенсивности) и поглощаются (теряют свою энергию) на длине пути, в 100 раз большей, чем альфа-излучение.

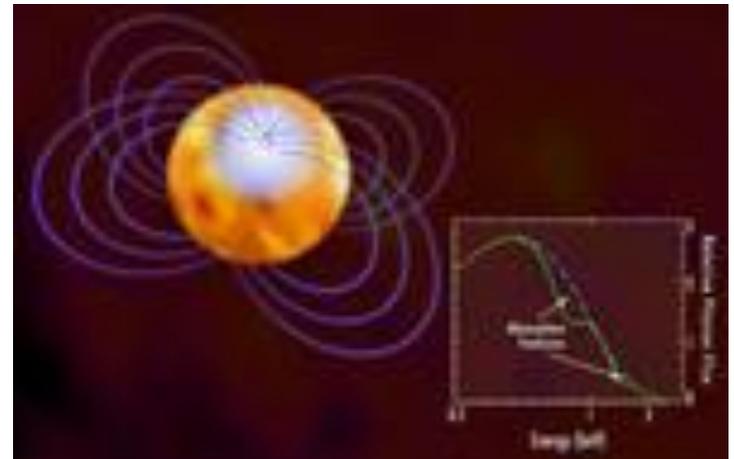
Гамма-кванты (γ)

- представляют собой поток электромагнитного излучения очень высокой частоты ($f > 10^{18}$ Гц). Хотя они также рассеиваются и поглощаются окружающей средой, но благодаря своей электрической нейтральности отличаются еще более высокой проникающей способностью (сотни метров в воздухе и до метра в горных породах).
- Кроме перечисленных излучений, радиоактивный распад может сопровождаться захватом некоторыми ядрами электронов из собственных оболочек атомов (K и L -захват) с возникновением мягкого и рентгеновского гамма-излучений, спонтанными излучениями ядер нейтронов и другими процессами.



Нейтронное излучение

- возникает при ядерных реакциях (например, в смеси полония и бериллия) или создается с помощью управляемых генераторов нейтронов, циклотронов и др. Из всех видов излучений нейтронное обладает наибольшей проникающей способностью. Однако нейтроны замедляются в процессе рассеяния, а затем поглощаются средой, т.е. захватываются ядрами атомов за время от микросекунд до миллисекунд. В свою очередь, захват сопровождается мгновенным испусканием гамма-квантов и других частиц.



Радиоактивность минералов

- Радиоактивность горных пород и руд тем выше, чем больше концентрация в них естественных радиоактивных элементов семейств урана, тория, а также калия-40. По радиоактивности (радиологическим свойствам) породообразующие минералы подразделяют на четыре группы.

Радиоактивность минералов

- **1. Наибольшей радиоактивностью** отличаются минералы урана (первичные - уранит, настуран, вторичные - карбонаты, фосфаты, сульфаты уранила и др.), тория (торианит, торит, монацит и др.), а также находящиеся в рассеянном состоянии элементы семейства урана, тория и др.
- **2. Высокой радиоактивностью** характеризуются широко распространенные минералы, содержащие калий-40 (полевые шпаты, калийные соли).
- **3. Средней радиоактивностью** отличаются такие минералы, как магнетит, лимонит, сульфиды и др.
- **4. Низкой радиоактивностью** обладают кварц, кальцит, гипс, каменная соль и др. В этой классификации радиоактивность соседних групп возрастает примерно на порядок.

Радиоактивность горных пород, руд и вод

- **Радиоактивность горных пород** определяется, прежде всего, радиоактивностью породообразующих минералов. В зависимости от качественного и количественного состава минералов, условий образования, возраста и степени метаморфизма их радиоактивность изменяется в очень широких пределах

Аппаратура ядерной геофизики

- **Чувствительные элементы (детекторы)** служат для определения интенсивности и энергетического спектра ядерных излучений путем преобразования энергии радиоактивного излучения в электрическую энергию. В аппаратуре для ядерно-геофизических исследований в качестве чувствительных элементов используют ионизационные камеры, счетчики Гейгера – Мюллера, полупроводниковые детекторы, сцинтилляционные счетчики, термолюминесцентные кристаллы (рис. 1).

Аппаратура ядерной геофизики

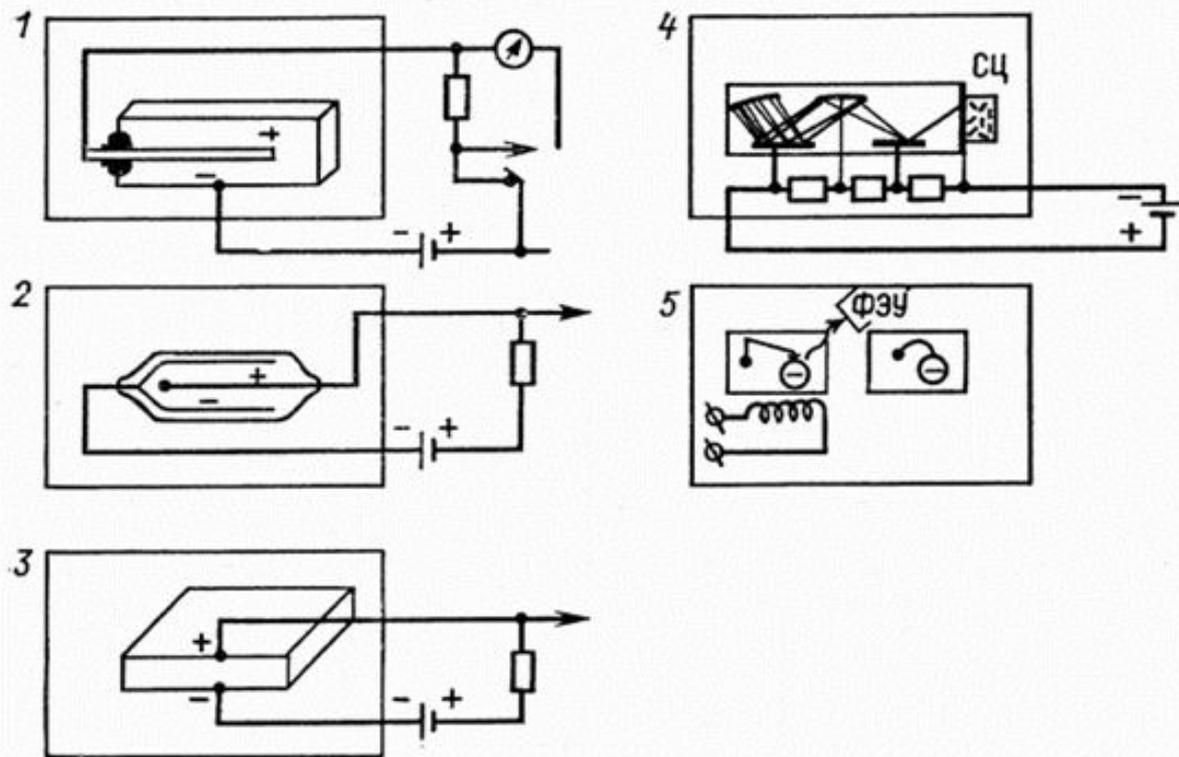
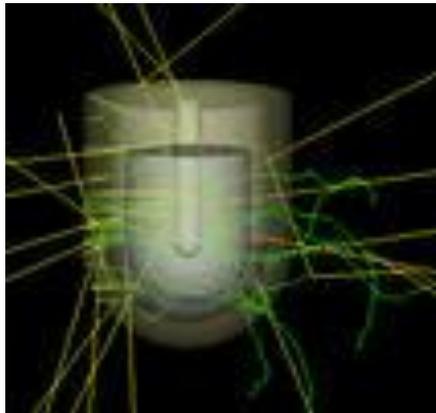


Рис. 1. Схемы чувствительных элементов (детекторов) для приборов, используемых при ядерно-геофизических наблюдениях: 1 – ионизационная камера; 2 – счетчик Гейгера–Мюллера; 3 – полупроводниковый кристалл; 4 – сцинтилляционный счетчик; 5 – термоллюминесцентный кристалл; СЦ – сцинтиллятор; ФЭУ – фотозлектронный умножитель

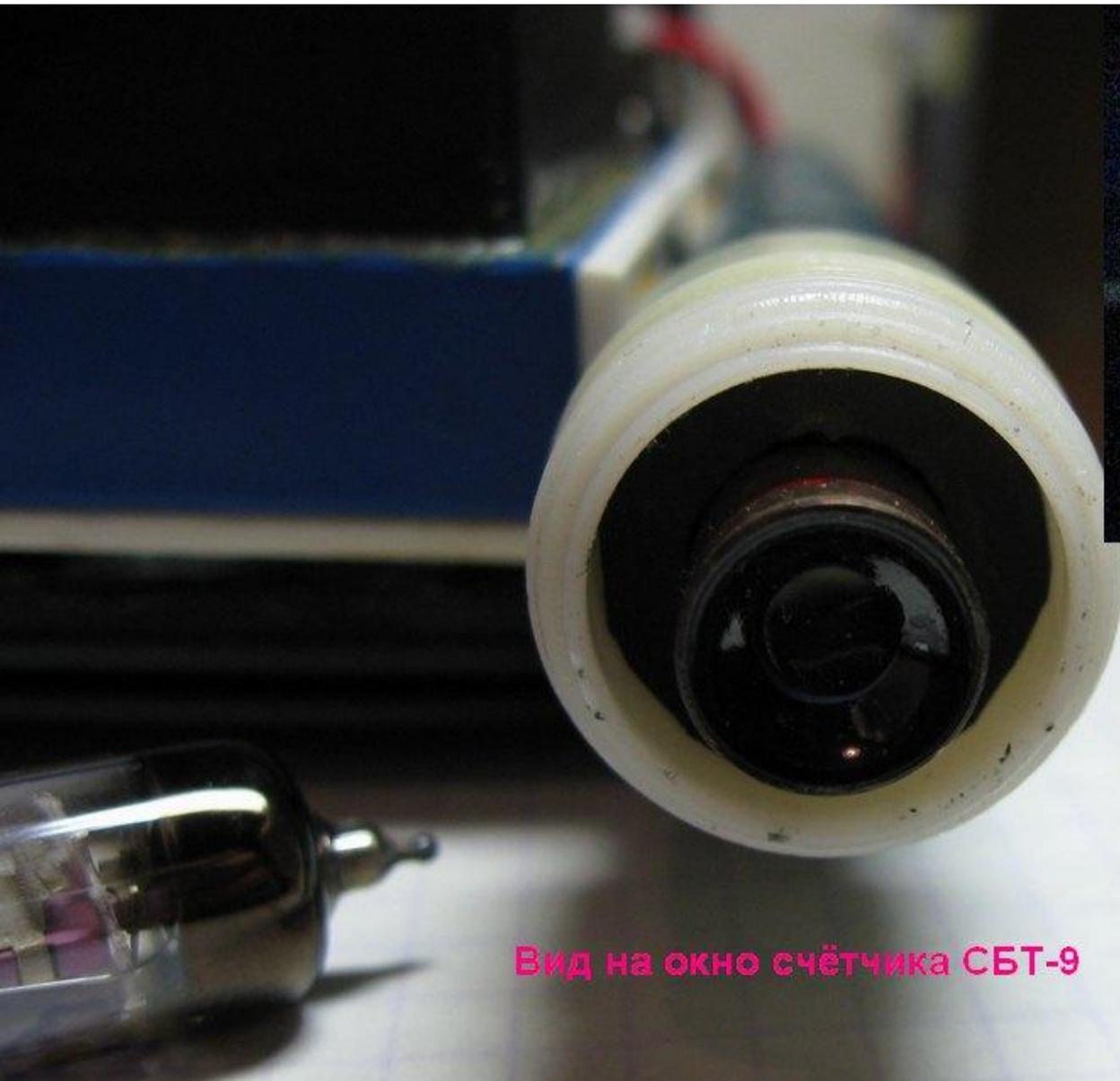
Аппаратура ядерной геофизики

- **В ионизационной камере** находятся газ и два электрода, к которым подводят напряжение в несколько сот вольт. Под действием альфа-, бета-лучей или вторичных заряженных частиц, возникающих при поглощении нейтронов, газ ионизируется, а получающиеся свободные электроны и ионы движутся к электродам. В результате в цепи возникает ток. Измеряя его или разность потенциалов, можно определить интенсивность излучений, вызывающих ионизацию.



Аппаратура ядерной геофизики

- **В счетчиках Гейгера - Мюллера**, называемых также газоразрядными, в баллоне под пониженным давлением находится инертный газ (обычно аргон для измерения гамма-лучей или гелий для определения потока нейтронов) и два электрода под высоким напряжением (до 1000 В). При появлении хотя бы одной пары ионов возникает краткий разряд. При облучении баллона гамма-квантами возникают вторичные заряженные частицы (ионы и электроны) и в нем наблюдается система разрядов в виде импульсов тока, которые можно зафиксировать.

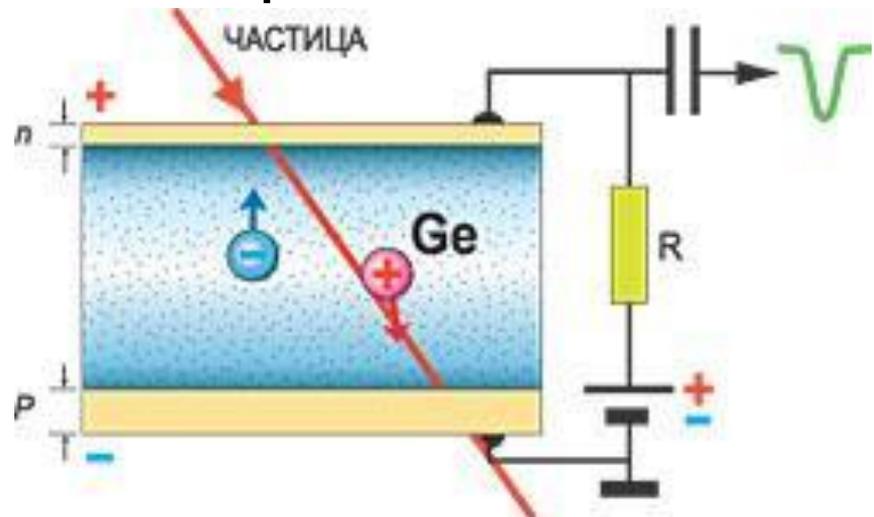


Так выглядит вспышка внутри счётчика
в момент регистрации частицы
(при дневном свете её не видно).

Вид на окно счётчика СБТ-9

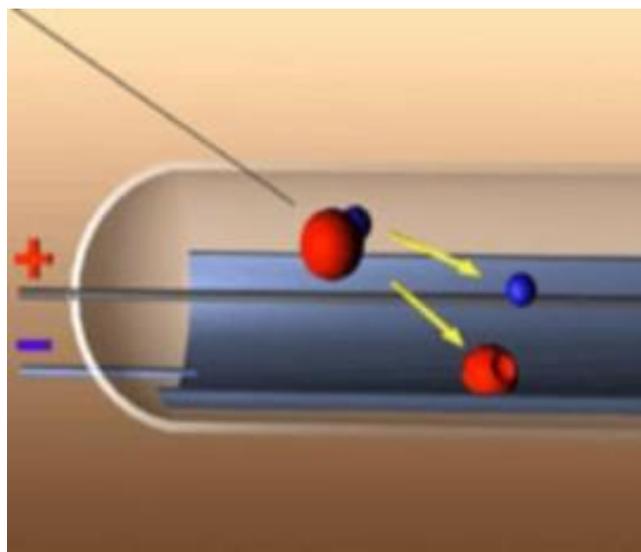
Аппаратура ядерной геофизики

- **Полупроводниковый детектор** – твердотельный аналог ионизационной камеры. Ионизирующие частицы, возникающие при облучении детектора, создают в полупроводнике электронно-дырочные пары, что при воздействии электрического напряжения приводит к возникновению тока.



Аппаратура ядерной геофизики

- **Сцинтилляционный счетчик** состоит из сцинтиллятора (неорганические или органические кристаллы, жидкие и газообразные), способного под действием гамма-квантов испускать вспышки света. Кванты света, попадая на фотокатод фотоумножителя, выбивают из него электроны. За счет вторичной эмиссии и наличия ряда электродов, находящихся под все большим напряжением, в фотоумножителе возникает лавинообразный, увеличивающийся поток электронов. В результате на аноде собирается в 10^5 – 10^{10} раз больше электронов, чем было выбито из фотокатода, а в цепи возникает электрический ток.



Аппаратура ядерной геофизики

- **Термолюминесцентный кристалл** (например, LiF) обладает способностью под действием ионизации создавать свободные электроны, которые накапливаются за счет дефектов кристаллической решетки кристалла и могут долго храниться. Такой кристалл будет испускать свет, и на выходе фотоумножителя возникнет электрический ток, пропорциональный принятой ранее дозе облучения.

Радиометрические приборы.

- В данных приборах, кроме чувствительных элементов, имеются усилители, индикаторы (для визуального отсчета), регистраторы (для автоматической записи) интенсивности либо естественного гамма-излучения I_γ , либо концентрации эманаций радона (C_α), либо искусственно вызванных излучений $I_{\gamma\gamma}$, I_{pn} , $I_{p\gamma}$. Для определения энергетического спектра излучений в приборах устанавливают дискриминаторы и амплитудные анализаторы. С их помощью выделяют импульсы, соответствующие определенному диапазону энергий ионизирующих излучений. Далее сигналы подаются в нормализаторы, которые создают импульсы определенной амплитуды и формы для их измерения или регистрации.



Аэро- и авторадометры.

- Для воздушной и автомобильной гамма-съемок используют различные аэро- и авторадометры, отличающиеся быстродействием, т.е. малой инерционностью. Они состоят из набора сцинтилляционных счетчиков, а также блоков: усилительного, регистрирующего, питания. Набор сцинтилляционных счетчиков служит для повышения чувствительности при измерении радиоактивности. В усилительно-регистрирующих блоках смонтированы каналы, состоящие из усилителей, дискриминаторов, нормализаторов, регистрирующих устройств. Они предназначены для определения гамма-активности, разных энергетических спектров излучения, т.е. являются гамма-спектрометрами. Питание приборов осуществляется от бортовой сети самолета (вертолета) или аккумуляторов автомобиля.



Полевые радиометры.

- Для наземной (пешеходной) гамма-съемки используют разного рода полевые радиометры (СРП-68, СРП-88 и др.) со стрелочным индикатором на выходе. Кроме того, с помощью наушников можно осуществлять звуковую индикацию импульсов. Конструктивно прибор состоит из выносного зонда, пульта управления и питания от сухих анодных батарей.



Эманометр.

- Для изучения концентрации радона в подпочвенном воздухе используют эманометры. Серийно изготавливаемый эманометр (типа «Радон» и др.) состоит из сцинтилляционной камеры РГА-01, а также насоса и набора зондов, с помощью которого подпочвенный воздух отсасывается с глубины до 1 м. Чем больше концентрация радона в нем, тем больше альфа-частиц фиксирует счетчик. Прибор питается от сухих анодных батарей.



К методам радиометрии относятся

- воздушная, автомобильная, пешеходная, глубинная гамма-съемки, радиометрический анализ проб горных пород, эманационная съемка, а также методы опробования, предназначенные для оценки концентрации радиоактивных элементов в обнажениях и горных выработках. В горных выработках изучают также жесткую компоненту космического излучения.

Задачи, решаемые гамма-съемкой

- **Гамма- и спектрометрические съемки** используют не только для поисков и разведки радиоактивных руд, но и радиоактивных полезных ископаемых, парагенетически или пространственно связанных с ними. Например, к месторождениям редкоземельных элементов, боксита, олова, бериллия приурочено повышенное содержание тория; к месторождениям ниобия, тантала, вольфрама, молибдена - урана; к некоторым полиметаллическим месторождениям - калия.

Аэрогамма-съёмка

- Одним из наиболее быстрых и экономичных методов радиометрии, применяемым обычно в комплексе с магниторазведкой, а иногда и с электроразведкой, является **аэрогамма-съёмка**. Для работ используют комплексные аэрогеофизические станции, в которых имеется аэрогамма-спектрометр для измерения интенсивности излучения разных энергий (обычно по урану, торию, калию-40).
- **Методика аэрогамма-съёмки** сводится к непрерывной регистрации естественного гамма-излучения разных энергий на высоте h .



Автогамма-съемка

- **Скоростной наземной гамма-съемкой**, выполняемой автоматически во время движения, **является автогамма-съемка**. Работы проводят с помощью автогамма-спектрометров (АГС-3, АГС-4). Чувствительность автогамма-съемки значительно выше, чем у аэрогамма-съемки, благодаря приближению станции к объекту исследования. С ее помощью проводят как детализацию аэрогамма-аномалий, так и их первичный поиск.
- **Методика автогамма-съемки** сводится к профильным и площадным наблюдениям на участках, доступных для автомашин высокой проходимости. Расстояние между профилями зависит от возможности проезда машин, масштаба съемки, предполагаемых размеров разведываемых объектов. Масштабы площадной автогамма-съемки изменяются от 1:2 000 до 1:10 000 при расстоянии между профилями соответственно от 20 до 100 м. Скорость съемки – 3 – 15 км/час.

Пешеходная (наземная) гамма-съемка

- Одним из основных поисковых и разведочных методов радиометрических исследований является **пешеходная съемка**. Ее проводят с помощью полевых радиометров и спектрометров (СРП-68, СП-88). Радиометры или спектрометры с помощью стандартных образцов (эталонов) гамма-излучения периодически градуируют. Это необходимо для определения цены деления шкал интегральной или спектральной радиоактивности. По данным градуировки можно определить мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (в мА/кг или мР/ч, $1 \text{ мР/ч} = 0,0717 \text{ мА/кг}$).
- **Радиометрические съемки** бывают как самостоятельными, выполняемыми при площадных исследованиях масштаба 1:10 000 и крупнее (при расстояниях между профилями меньше 100 м), так и попутными, проводимыми совместно с маршрутными геологическими съемками в масштабах 1:25 000 – 1:50 000. При попутных и поисковых работах гильзу выносного зонда полевого радиометра располагают на высоте 10 – 20 см

Эманационная съемка

- **Изучение содержания эманаций**, т.е. газообразных продуктов распада радиоактивных веществ в подпочвенном воздухе или в воздухе, заполняющем скважины и горные выработки, помещениях зданий называют эманационной съемкой. Наибольшим периодом полураспада из радиоактивных газов обладает радон (3,82 дня), поэтому эманационная съемка фактически является радоновой.

Эманационная съемка

- **Методика полевой эманационной съемки** сводится к отбору проб подпочвенного воздуха с глубины до 0,5 – 1 м и определению с помощью эманометра концентрации радона в нем. Для этого зонд эманометра погружают в почвенный слой, с помощью насоса в камеру закачивают подпочвенный воздух и измеряют концентрацию радона.
- **Эманационная съемка может быть маршрутной и площадной.** Масштабы работ изменяются от 1:2 000 до 1:10 000. Расстояния между профилями при площадной съемке изменяются соответственно от 20 до 100 м, а шаг – от 2 до 10 м. Детальную эманационную разведку проводят в виде площадной съемки по сети $(10 - 50) \times (1 - 5)$ м.
- **В результате эманационной съемки** строят графики и карты равных концентраций радона $C_{\text{э}}$ и на них выделяют аномалии – участки повышенного содержания радона.

Определение абсолютного возраста пород

- Для определения абсолютного возраста горных пород используют ядерную или изотопную геохронологию. В ее основе лежит вывод о постоянстве скорости радиоактивного распада во все геологические эпохи. Зная период полураспада и определив количество материнских и дочерних (N_m , и N_d) элементов тех или иных радиоактивных семейств в горной породе, определяют ее возраст $t_{абс}$

$$t_{абс} = 1,44T_{1/2м} \ln[1 + N_d / N_m].$$