

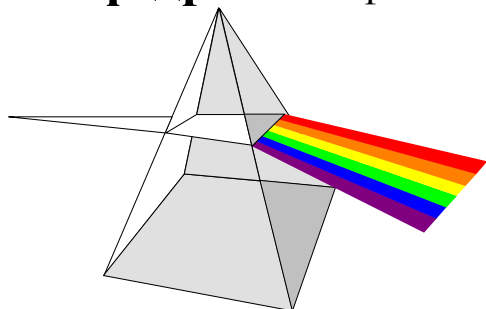
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
УЗБЕКИСТАН

**Ташкентский государственный технический  
университет**

*имени Абу Райхана Беруни*

*Факультет Геологии и горного дела*

**Кафедра** «Геофизические методы поисков и разведки МПИ»



**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

по дисциплине

**РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА и ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА**

Ташкент 2000

Конспект лекций составлен на основании учебного плана и соответствующей рабочей программы для студентов БАКАЛАВРАТУРЫ.

Лекции по направлению 5 440 800 «Геология и разведка полезных ископаемых» бакалавриата высшего образования предназначены для студентов горно-геологических специальностей высших технических учебных заведений.

**Составитель:**

**А.Г.Антонец**

**СПИСОК  
встречающихся сокращений**

<b>АГСМ</b>	- аэрогамма-спектрометрия
<b>БД-</b>	-блок детектирования
<b>ГГК</b>	- гамма-гамма-каротаж
<b>ГК</b>	- гамма-каротаж
<b>ГО</b>	- гамма-опробывание
<b>ГЭА</b>	- гамма-экспресс - анализ
<b>ИП</b>	- изомерный переход
<b>ИП *</b>	- измерительный пункт
<b>КИ-</b>	- контрольный источник
<b>КМ</b>	- контрольный маршрут
<b>МРМ</b>	- малая рудная модель
<b>МЭД</b>	- мощность экспозиционной дозы
<b>НАМ</b>	- наведенной активности метод
<b>НГМ</b>	- нейтронный гамма метод
<b>ННМ</b>	- нейтрон нейтронный метод
<b>ППД</b>	- полупроводниковый детектор
<b>ПРКИ</b>	- метод подземной регистрации космического излучени (мюонный метод )
<b>ПРН</b>	- природные радионуклиды
<b>РКМ</b>	- радиометрическая контрольная модель
<b>РКС</b>	- радиометрические контрольные станции
<b>РМ</b>	- рабочая модель
<b>РРМ</b>	- рентгенорадиометрический метод
<b>САН</b>	- съемка способом активного налета
<b>СО</b>	- стандартный образец
<b>СП</b>	- скважинный прибор
<b>ФЭУ</b>	- фотоэлектронный умножитель
<b>ЭТМ</b>	- эманационный трековый метод
<b>ЯГР</b>	- метод ядерного гамма-резонанса ( Мёссбауерский метод )

## ТЕМА 1.

### ЛЕКЦИЯ 1. ВВЕДЕНИЕ

#### (Общие положения науки и учебной дисциплины )

#### Основное содержание

##### дисциплины

Посвящено одному из важнейших разделов прикладной геофизики - ядерной разведке месторождений полезных ископаемых ( радиометрическая разведка + ядерно-физические методы исследований)

**Радиометрическая разведка и ядерная геофизика-** это методы поисков интересующих практику объектов, основанные на изучении и измерении радиационных полей естественного и искусственного ( наведенного, вызванного ) происхождения. Эти методы применяются не только на стадии поисков, но также при разведке и эксплуатации (добыче ) месторождений полезных ископаемых (различных видов). Методы и модификации отдельных методов и способов могут быть использованы не только при определении содержания химических элементов, но и определении ряда важных для практики физических свойств горных пород и других характеристик геологической среды

#### Роль и значение методов

##### Радиометрической разведки и ядерной геофизики при решении разнообразных задач

Роль методов «Радиометрии и ядерной геофизики» весьма существенна и очень важна.

Методы Радиометрии и ядерной геофизики способствовали применению высокоэффективных приемов поисков такого важного вида минерального сырья, как месторождения радиоактивных элементов. В последнее время методы радиометрии нашли широкое распространение при поисках многих видов полезных ископаемых таких как редкие (W, Mo, Li, Be, Ta, Nb, Zr и др.) редкоземельные (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Tu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm Yb Lu), рассеянные (Rb, Hg, Sc, Re, Se, Te, In, Cd), цветные (Cu, Zn, Pb, Ag, Dt, Ta, Nb) химические элементы.

Имеются примеры успешного использования различных методов, способов, вариантов и модификаций методов при поисках других видов полезных ископаемых (нефть, газ, алмазы, неметаллические минералы стройматериалы и др. ).

#### Основные направления и основной круг решаемых

##### задач

Методы радиометрической разведки и ядерной геофизики развиваются по следующим основным направлениям:

- а) поиски и разведка месторождений и рудопроявлений радиоактивных элементов;
- б) поисковые работы, направленные на обнаружение перспективных участков на различные виды полезных

ископаемых (редкие, редкоземельные и др. элементы), находящихся в генетической и пространственной связи с радиоэлементами;

- в) использование методов рудничной радиометрии на стадии эксплуатации месторождений радиоэлементов, определение качества добываемых руд (в т.ч. и в транспортных емкостях), учет возможных потерь при отработке месторождений;
- г) контроль разработки МПИ различных видов с помощью ядерно-геофизических методов;
- д) использование методов ядерной геофизики при определении вещественного состава пород и руд и определения отдельных параметров физических свойств различных составляющих геологической среды (минералы, горные породы, воды, газы и т.д.)
- д) применение ряда методов при геологическом картировании местности, глубинном изучении определенных территорий, литолого-петрографическом расчленении геологического разреза вдоль ствола пробуренных скважин и пройденных горных выработок

**Основные задачи ядерно-геофизической разведки (радиометрия + ядерная геофизика) связаны с поисками, разведкой и разработкой (добычей МПИ).**

**Главными задачами, решаемыми методами радиометрии и ядерной геофизики являются геологические и горно-технические задачи.**

При изучении и анализах решаются следующие задачи:

1. Поиски и разведка месторождений и рудопроявлений радиоактивных элементов, а также других видов полезных ископаемых;
2. Геологическое и геофизическое картирование местности, петрографо-литологическое расчленение разреза вдоль ствола пробуренных скважин (попутно, выявление пород и их корреляцию);
3. В буровых скважинах - определение пород-коллекторов, изучение их физических свойств (таких как: пористость, проницаемость, глинистость и пр.), определение технического состояния скважин;
4. Выявление и определение местоположения различных полезных ископаемых;
5. Определение типа пород, слагающих разрез скважин;
6. Подсчет запасов многих полезных ископаемых (прежде всего радиоактивных элементов).

**Место \*Радиометрической разведки и ядерной геофизики \*и связь их с различными науками и**

научными дисциплинами Ядерно-геофизическая разведка является составной частью прикладной (разведочной) геофизики.

Методы \*Радиометрии и ядерной геофизики\* находятся как и методы общей и разведочной геофизики на стыке самых разнообразных наук, вместе с которыми они развиваются и совершенствуются.

Так теория ядерной геофизики и радиометрии (как и прикладной геофизики) основана на физико-математических науках..

**Методика и аппаратура** базируются на различных методах исследований с широким привлечением достижений

( механики, электроники, автоматике, вычислительной техники, компьютерных технологий и коммуникационных сетей ).

**Методы радиометрии могут реализовываться в различных вариантах:**

а) **космическом ( спутниковом )** - в настоящее время преимущественно при решении научных и исследовательских задач;

б) **аэро- (воздушном )** - при быстром изучении и опoисковании больших по размерам территорий;

в) **пешеходном** - при поисках, разведке радиоэлементов ( и др. видов полезных ископаемых, находящихся в парагенетической связи с радионуклидами );

г) **скважинном** - при изучении геологических разрезов и выделении интересующих практику горизонтов;

д) в **поверхностных и подземных горных выработках ( рудничная радиометрия )** при оконтуривании отдельных рудных тел и извлечении добываемой руды;

е) в **лабораторных условиях** - при определении как точного содержания , так и вида радиоизотопов ;

ж) **специальные съемки ( подводная, подземная, в водах различного происхождения )**

**Ядерная геофизика реализуется в следующих вариантах:**

а) **выработочном** ( в наземных и подземных горных выработках );

б) в **скважинном ( скважинах наземного и подземного бурения )**;

в ) **наземном** ( пока относительно редкий вид работ );

г) как **средство определения содержания элементов в космическом пространстве и на космических объектах -телах ( Луна, Венера, Марс ... )**.

Достижения радиометрии и ядерной геофизики могут быть использованы в самых различных областях человеческой деятельности ( в науке, технике, производстве и т.д. ):

в военном деле, сельском хозяйстве, медицине, криминалистике, археологии, космологии, металлургии, энергетике, геоэкологии, ракето- и машиностроении, химии и химической технологии, сейсмологии ( при прогнозировании землетрясений ), водном хозяйстве и др.

**РАДИОМЕТРИЯ ( Радиометрическая разведка ) -**

*КОМПЛЕКС* полевых, лабораторных и скважинных методов поисков и разведки МПИ(месторождений полезных ископаемых), геологического картирования, изучения физических свойств горных

пород и руд, основанный на регистрации интенсивности и спектрального состава **ЕСТЕСТВЕННЫХ** радиоактивных элементов, входящих в состав геологических образований.

#### **ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА -**

**КОМПЛЕКС** полевых, лабораторных и скважинных методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, геологического картирования, изучения физических свойств пород и руд, контроля эксплуатации месторождений, основанный на **ОБЛУЧЕНИИ** исследуемых геологических объектов ионизирующим излучением искусственных и естественных источников, и регистрации вторичных излучений, возникающих в результате указанного облучения, использующий различия в ядерно-физических свойствах пород и руд различного элементного состава.

**РАДИОМЕТРИЯ и ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА** - составная часть **ГЕОФИЗИКИ**, науки изучающей **ПРОИСХОЖДЕНИЕ, СТРОЕНИЕ, ИНТЕНСИВНОСТЬ** различных физических полей **ЗЕМЛИ**, а также изучающей явления и процессы, происходящие в ней.

**РАЗВЕДОЧНАЯ ГЕОФИЗИКА** ( Геофизические методы исследований ) - раздел **ОБЩЕЙ ГЕОФИЗИКИ**.

Это методы исследований земной коры, поисков и разведки **МПИ** и решения других прикладных задач **ГЕОЛОГИИ** ( и его разделов ), основанные на изучении различных физических полей **ЗЕМЛИ** ( естественных или созданных искусственно ).

**ПРЕДМЕТ ИЗУЧЕНИЯ** - земная кора ( с верхней оболочкой ) до 10-15км.

**ТЕОРИЯ** разведочной геофизики основывается на физико-математических науках, привносящих в **ГЕОЛОГИЮ** бывшую ранее наукой описательной - элементы точных наук.

**МЕТОДИКА** и **АППАРАТУРА** базируются на различных физических методах исследований с широким привлечением **МЕХАНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ, АВТОМАТИКИ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**.

**МЕТОДЫ** и **СРЕДСТВА ИЗУЧЕНИЯ НЕДР ЗЕМЛИ** - являются физико-математическими.

### ***История развития радиометрической разведки***

*( Роль отечественных и зарубежных ученых в создании и развитии радиометрических и ядерно-физических методов ).*

*Радиометрическая разведка - является интенсивно развивающейся отраслью ядерной геологии*

История началась с момента, когда В. Рентген (1895 г.) открыл излучение (X-лучи) вызывавшие:

- a) почернение фотопластинки;
- b) флуоресценцию многих веществ.

X - лучи ( названные позднее рентгеновскими ) стали толчком открытия радиоактивности.

В феврале - марте 1896 года Анри Беккерель (1852-1908) изучая фосфоресценцию под действием "X-лучей" установил, что соли урана испускают излучение:

вызывающее почернение фотоэмульсии;  
способное разряжать электроскоп.

Обнаруженные А. Беккерелем "лучи" ( излучение) свободно проникают через тела, непрозрачные для видимого света.

Излучением заинтересовались М. Кюри (1867-1934) и П. Кюри (1859-1906) и Э. Резерфорд (1871-1937). С их именами связаны систематические исследования радиоактивности.

М. Кюри ( 12 июля 1898 г.) установила, что соединения Th испускают лучи Беккереля (это подтвердил независимо от неё Г. Шмидт)

П. и М. Кюри установили, что "урановая смолка" намного сильнее по радиоактивности солей урана. Ими открыты Полоний (Po) (18 июля 1898 г.) и Радий (Ra) (12 декабря 1898 г.)

В 1899 г. П. и М. Кюри установили химическое действие и окрашивание веществ радиоактивными излучениями.

В 1900 г. Э Резерфорд открыл эманации ( изотопы радона) и альфа- и бета-излучения.

В 1906 г. П. Виллар и А. Беккерель открыли гамма - излучение.

Рамзай и Траверс обнаружили He (гелий) в урановых и ториевых минералах, а А. Дебьерн в (AcU)- актиноуран ( $^{235}_{92}\text{U}$ ).

Э. Резерфорд и Ф. Содди создали теорию радиоактивных превращений, которая характеризуется следующими свойствами :

Радиоактивные элементы самопроизвольно превращаются в другие элементы;

Скорость распада постоянна;

Сопровождается  $\alpha$  и  $\beta$  распадом.

Э. Швейдлер (1905 г.) установил статистический характер радиоактивного распада ( превращений).

Кемпбелл (1906 г.) определил  $\beta$  активность K и Rb.

Ф. Содди (1910 г.) ввел понятие изотопии.

Ф. Астон (1919 г.) построил масс-спектрометр.

П.Кюри (1903 г.) совместно с Л. Лабордом установили:

радиоактивный распад  $\rightarrow$  тепло ( $Q_{\text{тепла}} \approx N_{\text{распадов}}$ ).

П.Кюри (1902 г.) высказал идею: определения геологического возраста объекта по радиоактивности "Эталон времени" за счет  $\lambda = \text{const}$ .

Э. Резерфорд, Б. Болтвуд (1904 г.) Возможность определения  $T_{1/2}$  природных объектов по накопленным продуктам распада Pb/U ( в минералах).

Р. Стретт (1908 г.) He/U не зависит от возраста минералов, а также установил повсеместное присутствие Ra в литосфере и биосфере. Его расчеты показали, что радий убывает с глубиной, при других вариантах температура в земной среде была бы иной.

*Д.Джולי (1907 г.) доказал радиоактивную природу плеохроических ореолов.*

*Идеи Джולי оказали сильное влияние на В. И. Вернадского, который с 1909 г. уделял радиоактивности большое внимание ( с его согласия организовано несколько экспедиций для поиска радиоактивного сырья в России).*

*Особая роль в поисках радиоэлементов принадлежит: К.А.Ненадкевичу, А.Е. Ферсману, В.И. Крыжановскому, Д.С. Белянкину, Л.А.Кулику.*

*В. И. Вернадский оценил роль радиоэлементов как важного энергетического сырья будущего . В Ленинграде 1922 г. создан Радиевый институт АН России ( при активном участии В. И. Вернадского), где были лаборатории:*

*а) абсолютного возраста ( Л.В. Комлев, И.Е. Старик и др.);*

*б) радиохимии и физики атомного ядра ( В.Г.Хлопин, Л.В.Мысовский и др.);*

*с) радиогеологии ( В.И.Баранов, Е.Г. Грачева, Е.С.Щепотьева, К.Г. Кунашова ( московский филиал), а также Л.М. Курбатов (МГРИ).*

*Сотрудник института Э.К. Герлинг разработал калий -аргоновый ( $K \rightarrow Ar$ ) метод определения абсолютного возраста геологических образований.*

*Первые радиометрические поиски начались в 20-х годах XX века под руководством Л.Н.Богоявленского ( проф. ЛГИ)*

*В 1922 г. А.П. Кириков предложил “Эманационный метод” (радоновый вариант). Исследования были проведены в Средней Азии ( в Ферганской области ).*

*Гамма - съемка, “Эманационный метод”, радиометрический анализ итупфов и порошковых проб, гамма-опробывание в коренном залегании и др. впервые были предложены в СССР и параллельно развивались в Германии.*

*В США их применение началось спустя 7-8 лет.*

*Развитие радиометрии связано главным образом с работами ЦНИГРИ:*

*а) Ленинград (А.П.Кириков, Г.В.Горшков, А.Г.Грамаков, Л.М.Курбатов.*

*б) Москва ( В.И.Баранов и др.).*

*Первый курс радиометрии (в мире) прочитал в 1923/24 годах проф. Л.Н.Богоявленский в Петербургском Горном институте.*

*Первая кафедра “Радиометрии” создана В.И. Барановым в 1930 г в МГРИ .*

*В 1933 г. был предложен гамма-картаж ( Г.В.Горшковым, Л.М. Курбатовым, В.А.Шпаком.)*

*Интенсивно развивается радиометрия, начиная с 1945 года.*

*Быстро совершенствуется:*

■ *аппаратура,*

■ *методика полевых и лабораторных работ,*

■ *внедряются высокопроизводительные аэро-, авто-, глубинные методы поисков радиоактивных руд,*

■ *открываются МПИ урановых руд и др.*

*Дальнейшее развитие радиометрических методов связано с именами: Г.Ф. Новиков(1921-1993), ( С-Петербург, С-ПГИ), А.Г.Ветров, С.С.Ленин, Ю.Н.Капков и др.*

*( С-Петербург); А.С. Сердюкова (1921 г.), Л.В.Горбушина (1921 - 1978), В.В.Ларионов (1920 - 1972), Р.А. Резванов (все Москва).*

*В Узбекистане развитие методов поисков месторождений радиоэлементов связано с именами Ю.М.Голубковой ( САГУ, ТашГУ ) , А.А.Петренко, М.Э.Поярковой, Э.Ф.Уварова и др. ( ПГО\*Краснохолмскгеология\*), Н.Ф.Шевченко ( ТашПИ ), А.П.Корякина ( Краснохолмская ГРЭ, ТашПИ ).*

## ***История урановой геологии в странах СНГ***

*В 1913 г. В.И. Вернадский (1863 - 1945) направляет в Гос.Думу письмо, где обосновывает необходимость поисков МПИ радиоактивных руд в России.*



*В 1914 г. Академией наук России отпущены ассигнования на снаряжение экспедиции для этих целей - чем положено начало поисков урана в стране.*

*Первые поисковые работы начались в Средней Азии и Забайкалье. Затем продолжены на Урале, в Сибири и др. регионах. Серьезного применения уран не имел до 1938 г., пока О.Ган и Ф. Штрассман (Германия) не установили, что атомное ядро делится, выделяя при этом огромное количество энергии)*

*К началу 40-х годов XX века, было известно лишь несколько мелких месторождений радиоактивного сырья в районе Ферганы и др. регионах. Но необходимой базы для развития атомной промышленности, для решения вопросов энергетики и атомного оружия не было.*

*В апреле 1944 г. Комитет обороны (ГКО) обязал Комитет по делам Геологии организовать поиски месторождений урана в Средней Азии, Казахстане, Эстонии, Карелии и Восточной Сибири.*

*В августе 1945 г. был создан специальный комитет и организовано Первое Главное Управление при СНК СССР ( в 1953 г. преобразовано в Министерство среднего машиностроения.)*

*После событий в Хиросиме и Нагасаки ( Япония) в октябре 1945 г. в составе Геолкома СССР создается Первое Главное Геологоразведочное Управление, которому поручается организация и руководство в стране всеми поисково-оценочными работами на уран, чем положено начало крупномасштабных поисков урановых МПИ в России.*

*К решению урановой проблемы подключаются ведущие институты страны: ВСЕГЕИ, ВИМС, ВСЕГИНГЕО.*

*Перед институтом разведочной геофизики ( Ленинград ), ныне ВИРГ - "Рудгеофизика", ставится задача: обеспечить поисково-разведочные работы на уран экспрессными геофизическими методами.*

*Поиски промышленных урановых месторождений стали главной задачей геологов в тот период.*

*К 1948 г. созданы специализированные подразделения, партии, отряды, подчиненные Первому Главному Геологоразведочному Управлению ( ныне концерн "Геологоразведка")*

*С конца 40-х годов вся территория страны была охвачена централизованной системой геологических организаций, специализирующихся на поисках урана.*

*В 1945 г. начато строительство первенца урановой промышленности - Ленинадского горно-химического комбината.*

*После распада СССР в РФ осталось только одно горно-химическое объединение: Приаргуньское производственное горно-химическое объединение. Сырьевая база которого - запасы уранового сырья месторождения Стрельцовского рудного поля.*

*Целевая федеральная программа на 1995 -2010 гг." Уран России", предусматривает прогнозирование и поиски урановых МПИ с богатыми (1% и более) рудами в древних комплексах Балтийского и Алданского щитах.*

*В программе " Уран России" дано научное обоснование решения прироста запасов урана в объемах, позволяющих иметь подготовленные к промышленному освоению запасы на 30 - 35 лет. Она должна финансироваться из бюджета.*

*За последние годы за рубежом (Канада, Австралия) открыты месторождения с высокорентабельными богатыми урановыми рудами. Так месторождение Сигарлейк в Соскачеване ( Канада) считается самым крупным и высокосортным из когда-либо открытых.*

*Месторождение Набарик (Австралия) открыто на глубине 430 м. Подтвержденные запасы - 130000 т, при  $CU_3O_8=14\%$ .*

*При поисково-разведочных работах велика роль геофизических методов. На этапе прогнозно - поисковых работ их стоимость достигает 70 -80 %.*

*За последние годы активно разрабатываются новые геохимические методы поисков месторождений, базирующиеся на изучении наиболее информативных признаков рудных элементов, измеряемых на уровне почвенного горизонта. Спецификой методов является селективное выделение и накопление с применением мембранных технологий слабо закрепленных подвижных форм элементов в почвенном слое. С применением высокочувствительного масс-спектрометрического анализа и индуктивно связанной плазмы.*

*Разработан комплекс методов с измерением типичных газов индикаторов глубинного “дыхания“ Земли.(Rn, Hg, He, углеводороды). Глубинность метода достигает 400 -500 м.*

*Принятые меры сравнительно быстро дают положительные результаты: открыты и разведаны первые крупные месторождения урана в Криворожском бассейне, - оба месторождения “Первомайское” и “Желтореченское” немедленно введены в эксплуатацию.*

*После создания атомного оружия и использования атомной энергии в мирных целях страна нуждалась в высококачественном сырье для атомной промышленности. ( В природе известно более 150 ураносодержащих минералов).*

*Одним из крупнейших регионов по запасам урана стала Средняя Азия, где было открыто уникальное по запасам Учкудукское месторождение урана. Затем открыты месторождения Букинай, Сугралы и др.*

*К настоящему времени в этом регионе открыто 11 крупных и уникальных месторождений радиоактивного сырья.*

*Вторым по значимости рудным регионом стала Украина, где были открыты месторождения Мичуринское, Ватутинское, Центральное, Новоконстантиновское.*

*Крупные уранорудные провинции расположены в Северном и Центральном Казахстане, где сгруппированы 62 промышленных месторождения урана различных масштабов. ( 23 из них разведаны и переданы в эксплуатацию).*

*В России открыто уникальное Стрельцовское рудное поле, в пределах которого находится целый ряд крупных месторождений ( Антей, Тулукуевское, Октябрьское).*

*В кратчайшие сроки в этом регионе было создано Приаргуньское производственное горно-химическое объединение, которое ведет отработку этих месторождений. К настоящему времени здесь выявлено 20 промышленных месторождения урана.*

*Большие запасы урана были разведаны на территории Южной Якутии, в районе г. Алдан.*

*К концу 80-х годов совокупные запасы урана в 5 регионах: Украина, Средняя Азия, Казахстан, Восточная Сибирь, Южная Якутия обеспечили надежную минерально-сырьевую базу в стране. СССР занимал по добыче и запасам урана ведущее место в мире ( треть мировых запасов).*

### **ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

*После открытия явления искусственной радиоактивности ( в 1934 г. супругами И.Кюри и Ф.Жолио-Кюри ) с конца 30-х годов началось внедрение методов ядерной геофизики.*

*Так в США в 1938 г. был предложен нейтрон-нейтронный метод ( ННМ ).*

*В 1941 г. Б.Я.Понтекорво ( СССР ) предложил и осуществил в скважинах нейтронный гамма-метод ( НГК ).*

*Примерно в то же время разработан нейтронный активационный анализ ( Г. Хевеши, Х.Леви ).*

В дальнейшем число таких предложений быстро растет:

- \* ГНМ (гамма-нейтронный метод) в 1946г. (Б.С.Айдаркин, Г.В.Горшков, А.Г.Граммаков);
- \* метод рассеянного гамма-излучения (ГГМ) - Ф.Холленбах, 1947 г.);
- \* рентгенорадиометрический метод РРМ (Л.Рейфел, Р.Хемфрид);
- \* метод ядерно-гамма-резонанса (Мессбауерский метод) ЯГР (В.Н.Гольданский, А.В.Доленко и др.);
- \* импульсный нейтронный метод (Г.Н.Флёров, 1956г.).

Практическая реализация методов ядерной геофизики была осуществлена в 50-60гг.

В СССР эти методы разрабатывались:

- \* при изучении разрезов нефтяных и газовых скважин многочисленной группой исследователей, таких как :

Ф.А.Алексеев, О.А.Барсуков, Д.Ф.Беспалов, Ю.А.Гулин, В.Н.Дахнов, И.Г.Дядькин, Б.Г.Ерозолимский, В.М.Запорожец, Н.К.Кухаренко, Б.Б.Лапук, В.В.Ларионов), С.А.Кантор, А.Л.Поляченко, А.И.Холин и др.

- \* на рудных месторождениях такими исследователями как:

Ф.А.Алексеев, В.А.Арцыбашев, А.М.Блюменцев, Ю.П.Булашевич, Г.С.Возженников, Г.М.Воскобойников, Д.И.Лейпунская, В.А.Мейер, А.П.Очкур, И.И.Фельдман, Е.М.Филиппов, А.Л.Якубович, И.П.Кошелев и др.

В 70-80 гг. происходит дальнейшее совершенствование методов, создается новая более совершенная, с большими возможностями аппаратура, разрабатываются новые модификации известных методов, расширяются области применения.

В дальнем зарубежье в дальнейшее развитие методов большой вклад внесли такие исследователи как: Р.Алгер, Л.Аллен, Д.Камерон, Р.Колдуэлл, Д.Родс, Ч.Титл, Я.Чубек, А.Юманс и многие другие.

В Узбекистане работы по ядерной геофизике связаны с именами таких исследователей как В.Н.Балашев (САИГИМС -ИМП), Е.М.Лобанов, А.А.Хайдаров, Р.Л.Каипов(ИЯФ), Х.Н.Фатхутдинов, А.А.Юлдашев (институт \*Средазцветмет\*), Г.И.Аванесьянц (ГПП \*Кизилтепагеология\*) и др.

## ТЕМА 2

### ЛЕКЦИЯ 2. РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЗАКОНЫ РАДИОАКТИВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

**РАДИОАКТИВНОСТЬ** - способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в ядра с иными физическими и химическими свойствами

Все химические элементы, слагающие окружающий мир, в т.ч. и Землю характеризуются стабильными и радиоактивными свойствами.

Стабильные химические элементы под воздействием различных излучений и частиц могут стать радиоактивными.

Такой вид вызванной (или наведенной) радиоактивности называют - **искусственной радиоактивностью.**

Радиоактивность элементов, наблюдаемая в природе и возникающая в ядрах элементов (без прямого вмешательства человека) называется **естественной радиоактивностью.**

**Радиоактивные превращения** всегда сопровождаются выделением значительного количества энергии и поэтому в естественных условиях радиоактивность является необратимым процессом.

**Радиоактивными элементами** называются такие, ядра атомов которых с течением времени претерпевают самопроизвольный распад и превращаются в атомы других элементов с иными физическими и химическими свойствами.

<u>( физические свойства:</u>	<u>химические свойства:</u>
* <i>оптические спектры;</i>	* <i>валентность;</i>
* <i>потенциалы ионизации;</i>	* <i>способность вступать в реакции</i>
* <i>радиусы атомов-ионов;</i>	* <i>с другими элементами;</i>
* <i>атомные объемы;</i>	* <i>состав соединений;</i>
* <i>температура плавления;</i>	* <i>свойства соединений</i> )
* <i>удельные веса</i>	

Это явление происходит с ядрами атомов, в которых число нейтронов ( $n_0^1$ ) значительно преобладает над числом протонов ( $p_1^1$ ) - это обстоятельство делает ядро малоустойчивым.

Так, например, в начале **таблицы Менделеева** отношение  $n/p \cong 1$ , а в конце  $n/p > 1.5$ . Значит неустойчивые ядра должны находиться в конце таблицы.

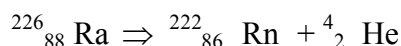
Это обстоятельство подтверждено фактом, что среди элементов с  $Z > 83$  (Bi) и массовым числом  $A = 208$  нет устойчивых ядер.

Неустойчивые ядра встречаются и среди изотопов элементов и в средней части таблицы (например,  $K^{40}$ ), но и в этих изотопах преобладает число ( $n_0^1$ ).

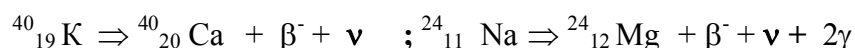
$\{ {}^{87}_{37}\text{Rb} \Rightarrow {}^{87}_{38}\text{Sr} + \beta^- , {}^{115}_{49}\text{In} \Rightarrow {}^{115}_{50}\text{Sn} + \beta^- ; {}^{124}_{50}\text{Sn} \Rightarrow {}^{124}_{52}\text{Te} + 2\beta^- , {}^{147}_{62}\text{Sm} \Rightarrow {}^{143}_{60}\text{Nd} + \alpha \}$ . Всего в природных условиях к настоящему времени известно более 60 природных радиоактивных изотопов, 43 из которых являются членами семейств  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{232}_{90}\text{Th}$ .

Для естественных радиоактивных элементов известны следующие виды радиоактивных превращений (термин \*распад\* считается не совсем точным определением данного физического явления природы):

**Альфа-превращение** сопровождается испусканием из ядра атома  $\alpha$ -частицы, которая представляет собой атом гелия ( $\text{He}^4_2$ ) без внешних электронов, т.е. ядро атома гелия с массой - 4 и порядковым номером 2. В результате испускания  $\alpha$ -частицы образуется новое ядро атома дочернего элемента. Ядро дочернего элемента имеет порядковый номер на две единицы, массовое число на четыре единицы меньше, чем у материнского элемента.



**Бета-превращение** представляет вид радиоактивного превращения, сопровождающийся испусканием ядром атома  $\beta$ -частицы (электрона или позитрона). При этом заряд ядра увеличивается на единицу (один нейтрон переходит в протон) и, следовательно, порядковый номер вновь образованного изотопа также увеличивается на единицу. Атомный вес остается без изменения.

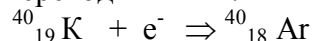


**Спонтанное деление ядра** - это вид радиоактивного превращения, сопровождающийся расщеплением ядра на два осколка примерно одинакового атомного веса и испусканием 2 - 3 нейтронов.



На принципе деления ядра основано использование актино - урана в качестве материала для атомных бомб и в качестве энергетического топлива в некоторых типах атомных электростанций.

**Электронный К-захват** - вид радиоактивного превращения, сущность которого состоит в том, что ядром атома захватывается электрон с ближайшей к ядра электронной К-оболочки. При К - захвате излучается нейтрино. Гамма - квант и квант мягкого рентгеновского излучения, образующийся в результате заполнения на К-оболочке вакантного места захваченного ядром К-электрона электроном с внешней оболочки. Из естественных радиоактивных элементов путем К-захвата распадается радиоактивный изотоп калия  $\text{K}^{40}$ . При этом атом  $\text{K}^{40}$  переходит в  $\text{Ar}^{40}$ .



**Гамма (электромагнитное) излучение**, сопутствующее радиоактивному распаду ядер атомов, не является самостоятельным видом излучения, приводящего к превращению ядра, а сопровождает излучение тех или иных заряженных частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$ , К-захват).

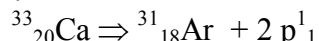
Возникновение  $\gamma$ -квантов при альфа-, бета-распаде обусловлено тем, что некоторые из дочерних (образовавшихся вследствие выброса  $\alpha$  или  $\beta$ -частицы) ядер оказываются в возбужденном состоянии и при переходе в нормальное состояние избыток энергии излучают в виде кванта электромагнитной энергии. При этом переход из возбужденного состояния может осуществляться через промежуточные уровни. Тогда такой переход после испускания частицы будет сопровождаться испусканием нескольких (двух и более квантов разных энергий).

Энергия гамма-кванта:

$$E_{\gamma} = h\nu$$

где  $h$  - постоянная Планка (равная  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж.с),  $\nu$ - частота колебаний электромагнитной волны.

**Испускание одного и двух протонов**, при котором масса и заряд уменьшается на одну или две единицы, (наблюдается лишь у определенной части искусственных радиоактивных изотопов) с исключительно большим дефицитом нейтронов и соответственно с избытком протонов:



**Изомерный переход (ИП)** - иногда к радиоактивному распаду относят переход некоторых ядер из метастабильного (относительно устойчивого возбужденного) состояния в основное (нормальное) с испусканием одного или нескольких  $\gamma$ -квантов.

При этом ядерного превращения (т.е. с изменением массы или заряда) не происходит. Однако закон уменьшения числа активных (т.е. метастабильных) ядер совпадает с законом радиоактивного распада, что позволяет отнести данный процесс к особому виду радиоактивности. Этот вид радиоактивного процесса в практике получил название *изомерного перехода*.

Возбужденное ядро-изомер некоторого элемента  ${}^a_b\text{X}$  принято обозначать  ${}^{am}_b\text{X}$ .

Изомеры обычно получают возбуждением ядер элементов при бомбардировке ядерными частицами или получают, как промежуточный продукт при распаде некоторых ядер.

Так при распаде, например,  $\text{UX}_1$  кроме изотопа  ${}^{234}\text{Pa}(\text{UZ})$  образуется его изомер  ${}^{234m}\text{Pa}(\text{UX}_2)$ , который имеет другой период полураспада.

*Обычно радиоактивный элемент распадается одним из перечисленных выше способов. Однако многие из них могут распадаться различными путями.*

*Так, например,  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  превращается в  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  (в 99% случаев), излучая  $\alpha$ -частицу с  $E_{\alpha} = 4,9$  МэВ.*

Однако наблюдается переход  $^{226}_{88}\text{Ra} \Rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn}$  с испусканием двух частиц:  $\alpha$ -частицы с  $E_{\alpha} = 4,7 \text{ МэВ}$  и  $\gamma$ -кванта с  $E_{\gamma} = 0,2 \text{ МэВ}$ .

Некоторые радиоактивные элементы распадаются, образуя два или более новых элементов. Так, например, 12% атомов  $^{40}\text{K}$  испытывают К-захват и превращаются в атомы  $^{40}_{18}\text{Ar} + \gamma (E_{\gamma} = 1,46 \text{ МэВ})$ . Остальные 88%  $^{40}\text{K} \Rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + \beta$ .

Распад искусственных радиоактивных элементов, как правило, сопровождается испусканием электронов или позитронов и  $\gamma$ -квантов.

### ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА (ПРЕВРАЩЕНИЯ)

Распад радиоактивного ядра подчиняется определенному закону, сформулированному Э.Резерфордом и Ф.Содди в 1902г.

Физический смысл закона радиоактивного распада заключается в том, что распад отдельного атома есть явление случайное (т.е. подчиняется закону теории вероятностей).

Согласно этой теории число атомов ( $dN$ ) распадающихся за малый промежуток времени ( $dt$ ), пропорционально наличному числу атомов ( $N$ ).

$$dN = -\lambda N dt (*)$$

Знак минус (-) указывает, что имеет место убыль в числе атомов радиоактивного вещества.

$\lambda$  - постоянная распада. Она характеризует вероятность распада атома и показывает, какая часть общего числа атомов распадается за единицу времени.

$\lambda$  имеет размерность время<sup>-1</sup> (с<sup>-1</sup>, год<sup>-1</sup> и т.д.).

Интегрируя выражение с (\*) можно получить:

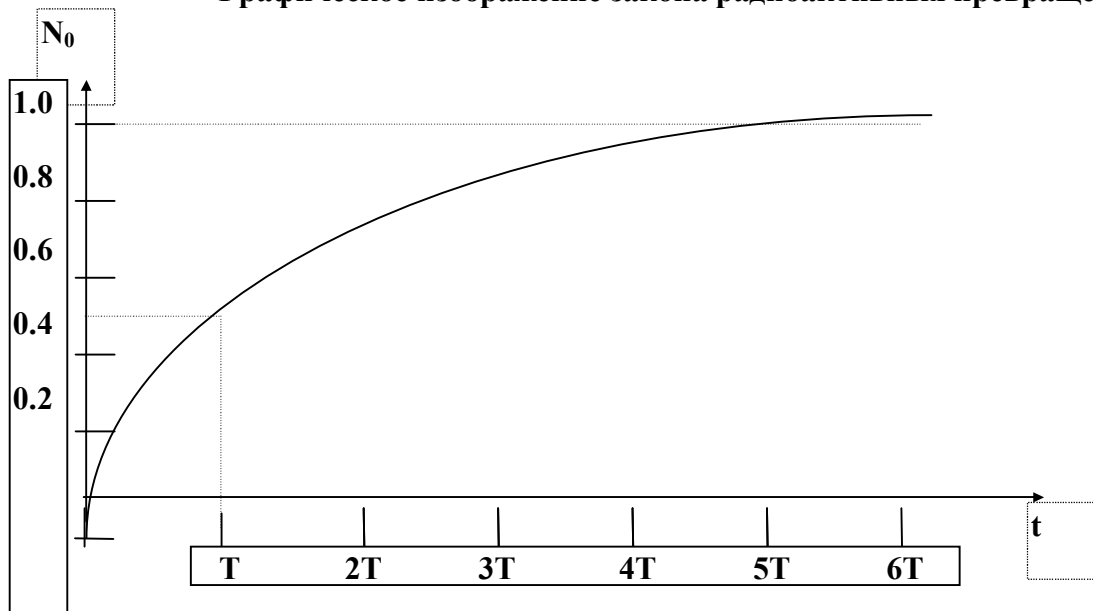
$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Графическое изображение закона радиоактивных превращений.



Скорость радиоактивного превращения (\*распада\*) характеризуется двумя **const**ами для данного изотопа {  $T_{1/2}$  и  $\tau$  }.

$T_{1/2}$  - **период полураспада**, т.е. промежуток времени в течении которого распадается половина атомов этого изотопа.

Подставив в формулу закона радиоактивного распада ( в интегральной форме )

$$t = T \quad \text{и} \quad N = \frac{N_0}{2} \quad \text{получим} \quad \frac{N_0}{2} = N_{0*} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\text{тогда} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$\tau$  ( **продолжительность жизни атомов** ) данного изотопа равна сумме времени существования всех атомов данного изотопа, деленного на число атомов.

Практически полный распад ( с точностью до 0,1% от начального количества атомов ) наступает за время  $t = 10 T_{1/2}$ .

### ЗАКОН НАКОПЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При распаде элементов из числа членов семейств естественных радиоактивных элементов, которые в свою очередь являются радиоактивными и подвергаются распаду.

Например. **Ra<sup>226</sup>**. В результате  $\alpha$ -распад из **Ra<sup>226</sup>** образуется **Rn<sup>222</sup>**, который в свою очередь распадается, образуя **RaA**.

Если взять чистый **Ra** ( раствор соли радия ), то количество распадающихся в единицу времени атомов **Ra<sup>226</sup>**, согласно **закону радиоактивного распада** будет:

$$-dN_{Ra} = \lambda_{Ra} N_{Ra} dt$$

Тогда количество накопившихся атомов радона будет равно числу распавшихся атомов радия за вычетом числа распавшихся атомов радона за это время, т.е.

$$\frac{dN_{Rn}}{dt} = \lambda_{Ra} N_{Ra} - \lambda_{Rn} N_{Rn} \quad (+)$$

Очевидно, что нарастание числа атомов радона будет происходить до тех пор, пока число распадающихся атомов радия не сравняется с числом распадающихся атомов радона за единицу времени, т.е.

$$\lambda_{Ra} N_{Ra} = \lambda_{Rn} N_{Rn} \quad \text{или} \quad \frac{N_{Ra}}{N_{Rn}} = \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Ra}} \quad (*)$$

Решая уравнение (+) с учетом соотношения (\*) можно получить выражение

$$N_{tRn} = N_{pRn} ( 1 - e^{-\lambda_{Rn} t} )$$

где  $N_{tRn}$  - число атомов радона, накопившихся за время (  $t$  )

$N_{pRn}$  - число атомов радона в состоянии равновесия с радием.

Состояние количественных отношений атомов первичного ( материнского ) и образовавшихся при распаде атомов ( дочернего ) элемента, выраженного выведенной формулой, носит название **радиоактивного равновесия**.

**Радиоактивное равновесие - соотношение между числом атомов материнского и дочерних радионуклидов радиоактивного семейства, при котором для каждого дочернего радионуклида число образующихся атомов равно числу распадающихся**

На практике рассматриваются два вида радиоактивного равновесия:

1. Если  $T_m \gg T_d$  и  $T_d$ , измеряется тысячами и более длительными периодами, то такое равновесие называется \* устойчивым\* или \* вековым\*.

**Устойчивое радиоактивное равновесие - состояние равновесия радиоактивного семейства, при котором материнский радионуклид имеет значительно больший период полураспада, чем дочерние**

При равновесии активность материнского изотопа равна активности дочернего изотопа в образце, т.е.  $A_m = A_d$ .

Математическое выражение состояния равновесия между материнским и дочерним веществами имеет вид  $\lambda_m N_m = \lambda_d N_d$ .

Так как в ряду радиоактивных элементов цепью последовательных превращений могут быть связаны многие элементы, условие равновесия в общем виде будет:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n$$

2. Если  $T_m \cong T_d$  и  $T_m$  измеряется минутами, часами и долями суток, то при столь малых периодах полураспада количество материнского вещества заметно изменяется в процессе измерения.

Если  $T_m > T_d$ , то после некоторого времени накопления  $N_d$  наступает равновесие между материнским и дочерним веществами, при котором отношение их количества стремится к величине  $N_d / N_m = \lambda_m / (\lambda_d - \lambda_m)$

Такое равновесие получило название \* подвижного\* равновесия.

**Подвижное радиоактивное равновесие - состояние равновесия радиоактивного семейства, при котором периоды полураспада материнского и дочерних радионуклидов соизмеримы**

**РАДИОАКТИВНОЕ РАВНОВЕСИЕ В УРАНОВОЙ РУДЕ** (или в горных породах) может быть нарушено за счет происходящих процессов выноса и привноса **U** или **Ra**.

Состояние радиоактивного равновесия между радием и ураном характеризуется коэффициентом радиоактивного равновесия:

$$K_{p.p.} = C_{Ra} / (C_U \cdot 3.4 \times 10^{-7})$$

где  $C_{Ra}$  - концентрация радия в кг/кг породы;

$C_U$  - концентрация урана в кг/кг породы;

$3.4 \times 10^{-7}$  - отношение  $C_{Ra} / C_U$  для равновесной породы.

Так как радий более подвижный изотоп, отношение равновесных концентраций всегда рассчитывается относительно урана.

Если  $K_{p.p.} = 1$ , то равновесие между ураном и радием не нарушено.

Если  $K_{p.p.} > 1$ , равновесие нарушено в сторону избытка радия по сравнению с тем количеством, которое должно бы быть в равновесии с имеющимся в руде (породе) ураном.

При  $K_{p.p.} < 1$  равновесие нарушено в сторону недостатка радия.

$K_{p.p.}$  иногда выражают в процентах, но это рекомендуется в редких случаях.

Принимая концентрацию урана за единицу, можно вычислить концентрацию изотопов урана. Техника вычисления та же, что и для определения концентрации равновесного радия.

Сравнивая измеренные для урановой руды или породы концентрации различных изотопов с вычисленными значениями концентраций для равновесного ряда, можно сделать выводы о процессах, происходящих в настоящее время или происходивших в недалеком прошлом.



Установлено, что в неизмененных первичных урановых рудах обычно наблюдается радиоактивное равновесие между всеми членами семейства урана.

В рудах, представленных вторичными минералами, а также в рудах многих осадочных месторождений радиоактивное равновесие между **U** и **Ra** и между **Ra** и **Rn** часто нарушено.

**В Th-х рудах** в природных условиях смещения равновесия между членами ряда не наблюдается.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

Долгое время определение возраста геологических образований проводилось **относительным способом - с использованием закона последовательности их напластования.**

**Последнее означало : в ненарушенной стратиграфической последовательности пластов самые древние породы лежат внизу, а молодые в верхах разреза.**

Ископаемые остатки ( фауны, флоры ) помогают определить относительный возраст осадочных образований.

Определение же **возраста ( T )** интрузивных пород, не имеющих фауны было затруднено.

Применение **радиоактивных методов** позволяет выразить возраст минералов и пород в абсолютных единицах ( **тысячи, млн., млрд. , лет** ).

**В основе радиоактивных методов лежит факт, что распад радиоэлементов протекает с постоянной и неизменной для данного изотопа скоростью**

Эти методы условно делятся; на **первичные и вторичные.**

**Первичные методы** основаны на вычислении времени по самому процессу радиоактивного распада.

**Вторичные методы** основаны на изучении **явлений**, возникающих в минералах под действием излучений от радиоэлементов, входящих в минерал.

{Из-за сложности осуществления - вторичные методы практически не применяются}

К числу первичных методов относятся:

- **свинцовый**
- **гелиевый**
- **аргоновый**
- **стронциевый**

С помощью этих методов можно определить возраст в диапазоне **млн., млрд., лет.**

**Свинцовый метод** является наиболее надежным и разработанным.

В его основе лежит процесс превращения **U, Th, AcU ( $U^{235}$ )** в радиогенный свинец.

Для определения ( **T** ) выбирают радиоактивные минералы с содержанием **U, Th > 1%** ( например, уранинит, монацит, ортит, циркон... )

Наиболее пригодные для **Pb** минералы хорошей сохранности ( например, в пегматитах и кварцевых жилах ). При **T < 200 млн.лет**

Согласно закону радиоактивного распада  $Q_U = Q_{U_0} \exp - \lambda_U t$

$$t = \frac{1}{\lambda_U} * \frac{Q_{PbU}}{Q_U}$$

так как содержание **Pb** и **U** определяется обычно методами химического анализа и выражается в (г), то в окончательной форме формула выглядит:

$$t = \frac{1}{\lambda_U} * \frac{Q_{PbU}}{Q_U} (\text{г}) \frac{238.07}{206} = \frac{1.55}{\lambda_U} * \frac{P_{PbU}}{P_U} (z)$$

При одновременном присутствии в минерале **U** и **Th**, последний выражают в виде эквивалента **U**, учитывая соотношение их активностей.

Тогда формула расчета может иметь вид:

$$t = \frac{P_{Pb}}{P_U \pm 0.36P_{Th}} * 7600 \text{млн, лет}$$

Эта формула не учитывает распада **актино-U** и уменьшение количества **U** и **Th** временем.

Для вычисления возраста древних минералов ( $t > 200$  млн.лет) следует произвести изотопные определения **Pb** и **U**.

Формулы для расчета по различным вариантам изотопных методов:

$$t_{PbU} = \frac{1}{0.43429\lambda_U} \lg\left[1 + \frac{1.155P_{PbU}}{P_U}\right]$$

$$t_{PbAcU} = \frac{1}{0.43429\lambda_{AcU}} \lg\left[1 + \frac{1.135P_{PbAcU}}{P_{AcU}}\right]$$

$$t = \frac{1}{0.43429\lambda_{Th}} \lg\left[1 + \frac{1.115P_{PbTh}}{P_{Th}}\right]$$

В случае изотопного анализа **Pb**, извлеченного из минерала, возраст (**t**) его можно рассчитывать из формулы без аналитического определения (**U**), т.к. современное отношение **AcU/ U** в минералах и горных породах одинаковы и равно 1/ 139.

$$\frac{P_{PbAcU}}{P_{PbU}} = \frac{1}{139} * \frac{e^{\lambda t} - 1}{e^{\lambda t} - 1}$$

Метод определения возраста по отношению изотопов **Pb** считается наиболее надежным.

### Гелиевый метод

Этот метод основан на определении соотношения между количествами накопившегося (**He**) и исходного изотопа (**U, Th, AcU**).

Минералы с большим содержанием радиоэлементов непригодны для определения их возраста гелиевым методом, т.к. скопление большого количества радиогенного **He** создает повышенное давление газа внутри минерала и (**He**) диффундирует из него в окружающую среду.

Наиболее пригодны кристаллы самородных металлов (**Fe, Cu, Pb**), также минералы хорошей сохранности из группы тантало-ниобатов и шлиховой магнетит.

Однако гелиевый метод дает заниженный возраст пород.

При отсутствии потери (**He**) возраст минералов рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{P_{He}}{P_U + 0.2P_{Th}} * 4.9 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

или

$$t = \frac{V_{He}(\text{мл})}{P_U(z) + 0,25P_{Th}(z)} * 8,8 \text{млн.лет}$$

### аргоновый метод

Основан на определении соотношения между количеством изотопа  $K^{40}$ , содержащегося в образце и количеством накопившегося из него  $Ar^{40}$ .

**Преимущество** аргонового метода в том, что ( $K$ ) в достаточном количестве входит в состав большинства горных пород.

Образцы из геохронологических исследований могут быть получены из:

**а) магматических, б) метаморфических, в) осадочных** пород

Наиболее пригодны слюды ( мусковит, биотит ).

Формула расчета имеет вид:

$$t = 4363 \lg \left( 9.474 \frac{Ar^{40}}{K^{40}} + 1 \right)$$

Так как различие в атомных весах  $Ar^{40}$  и  $K^{40}$ , то величина  $Ar^{40}$  и  $K^{40}$  выражают в весовых единицах( на единицу веса ). Определение концентрации элемента калия ( в % ) производится методами химического анализа. Содержание  $Ar^{40}$  определяется на масс-спектрометре или для нахождения концентрации элемента Ar используется активационный анализ.

**Стронциевый метод** определения абсолютного возраста древних минералов и пород на накоплении  $Sr^{87}$ , образующегося в минералах при распаде  $Rb^{87}$ .

Для определения возраста стронциевым методом пригодны такие минералы как ( лепидолит, биотит, мусковит, роговая обманка, монацит и др. - при хорошей сохранности образцов.

### Методы определения возраста молодых образований:

**а) радиевый метод** - основан на измерении изменения радия по длине керна глубоководного осадка.

Доказано, что изменение содержания  $Ra$  с глубиной является функцией времени и зависит от начальных количеств **урана, иония, радия**, заключенных в поверхностных частях осадка, т.е. в верхах керна.

Определив радиохимическим методом концентрации  $Ra_0$  в верхнем слое осадка и  $Ra_t$  в основании керна, можно рассчитать время накопления осадка определенной толщины:

$$t = \frac{1}{0.43429 \Lambda_{Ra}} \lg \frac{Ra_0}{Ra_t}$$

**б) радиоуглеродный** : возраст молодых образований, содержащих изотоп радиоактивного углерода  $C^{14}$  находится радиоуглеродным методом. Этот метод используется для нахождения возраста подземных вод.

Этим методом можно определять возраст до нескольких десятков тысяч лет.

Возраст образца вычисляется по формуле:

$$t = \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{I_0}{I_t}$$

где  $\lambda_c$  - константа распада  $C^{14}$ ,  $I_0$ ,  $I_t$  - удельная активность углерода, соответственно из современного и исследуемого( древнего) образцов.

### ТЕМА 3

### ЛЕКЦИЯ 3. РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ и их ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ с ВЕЩЕСТВОМ

Открытые А.Беккерелем и исследованные им, М. и П. Кюри, Э.Резерфордом и другими учеными новые для того времени излучения получили название **радиоактивных излучений**.

Современной научной терминологией эти излучения названы **ионизирующими**.

Этот термин отражает основное (главное) свойство излучений - взаимодействие их со средой (веществом) приводит к образованию электрических зарядов различных знаков (ионы, электроны, позитроны и т.д.).

Органы чувств человека практически не реагируют на ионизирующие излучения, возникающие при распаде естественных радиоактивных элементов). Это одна из главных причин позднего открытия радиоактивности, несмотря на повсеместность его распространения, как природного явления.

Доступным для наблюдения и измерения является не само излучение, а результат его взаимодействия с веществом среды, в которой это излучение распределяется.

Основными эффектами взаимодействия излучения с веществом являются:

- \* **фотохимическое воздействие излучения на светочувствительную эмульсию различных фотоматериалов;**
- \* **ионизация вещества, т.е. образование положительных и отрицательных ионов и частиц с массой равной электронам ;**
- \* **возбуждение люминесценции, т.е. свечение ряда веществ при попадании в них различных видов излучений;**
- \* **большая проникающая способность;**
- \* **выделение большого количества энергии, которая в конечном счете превращается в тепло;**
- \* **физиологическое действие, т.е. способность излучений воздействовать на живую ткань**

( в настоящее время известно не только вредное действие излучений, но и определены условия, при которых определены условия когда излучение является лечебным фактором ).

Основными видами излучений являются **альфа ( $\alpha$ ), бета- ( $\beta$ ), гамма- ( $\gamma$ ) излучения**.

#### Альфа-частицы

представляют собой мельчайшие природные образования, отклоняющиеся в электрических и магнитных полях.  **$\alpha$ - частица** имеет массу  **$m_{\alpha} = 4 \text{ а.е.м. } (6.64660 \times 10^{-24} \text{ г})$** ,  **$Q_{\alpha} = 9.6 \times 10^{-10} \text{ эл.ст.ед. } (3,204438 \times 10^{-19} \text{ Кл})$** , **скорость вылета альфа-частицы из ядра  $V_{\alpha} = 1/20 \text{ С}$**  ( скорости света ).

Проходя через вещество ( электронные оболочки ) альфа-частицы не испытывают отклонения.

Энергетическое воздействие  **$\alpha$ -частиц** на вещество:

- ионизация газа;
- вызывает свечение некоторых веществ;
- химические реакции;
- выделение тепла;
- почернение фотоэмульсии;
- разрушают живые ткани.

Путь, который проходит  **$\alpha$ -частица** в веществе называется **пробогом альфа-частицы**. Обычно обозначается ( R ).

Все  $\alpha$ -частицы ( от определенного радиоизотопа ) имеют одинаковую длину пробега(  $R = \text{const}$  ).

Величина  $R_\alpha$  есть функция плотности газа, и составляет  $R_\alpha$  величину равную  $R_\alpha = 1-10$  см.

$R_\alpha$  определяют от источника до экрана из  $ZnS ( Ag)$ .

Наблюдения У.Брегга показали, что ионизация  $\alpha$ -частицы изменяется с расстоянием от источника.

Полная ионизация  $\alpha$ -частицы пропорциональна  $E_\alpha$ .

Детальные исследования показали, что  $\alpha$ -излучение изотопа неоднородно и нередко образует так называемую тонкую структуру  $\alpha$ -излучения, которая связана с существованием различных уровней энергии ядра атома.

При испускании  $\alpha$ -частицы энергия её может соответствовать нормальному уровню ядра.

Возможно, что при  $\alpha$ -распаде часть энергии передается ядру, которое переходит на более высокий уровень энергии. Это избыток  $E_\alpha$ - излучается ядром в виде гамма-кванта (  $\gamma$ -кванта ).

У некоторых радиоизотопов наблюдаются **длиннопробежные  $\alpha$ -частицы** ( появление таких частиц объясняется существованием высоких уровней энергии атомного ядра).

При радиоактивном \*распаде\* ( превращении) ядро может оказаться в возбужденном состоянии {на более высоком уровне энергии }.

Если радиоизотоп (  $T_{1/2}$  - маленький ), то он может излучать  $\alpha$ -частицы за время пребывания в возбужденном состоянии.

Энергия возбуждения может быть передана  $\alpha$ -частице.

Длиннопробежные  $\alpha$ -частицы  $RaC' [ T=1.637 \times 10^{-4} \text{ c } ] \quad R_{\text{макс.}} = 11.47 \text{ см}$   
 $ThC' [ 2.9 \times 10^{-7} \text{ c } ] \quad R_{\text{макс.}} = 11.53 \text{ см}$

Г.Гейгер установил зависимость между определенными величинами

$$V^3 = Q ( R - X )$$

где  $V$  - скорость  $\alpha$ -частицы,  $Q$  - постоянная, равная  $1,07 \cdot 10^{27}$ ,  $R$  -длина пробега  $\alpha$ -частицы,  $X$ - расстояние от  $\alpha$ -источника.

Доказано, что **полная ионизация  $\alpha$ -частицы** пропорциональна длине пробега  $(R)^{2/3}$ .

**Полная ионизация от  $\alpha$ -частицы** выражается числом пар ионов  $K = K_0(R)^{2/3}$ .

Где  $K_0 = 6,25 \times 10^4$ .

Так , например, для  $RaC'$  (  $R = 6.7$  см ) -  $K = 2,2 \cdot 10^5$  пар ионов каждого знака.

Между пробегом  $\alpha$ -частицы в любом веществе (  $R$  ) и пробегом в воздухе (  $R_0$  ) существует соотношение Брегга-Климана:

$$R = \frac{3 \cdot 10^{-4} R_0}{\rho} \sqrt{A}$$

где  $A$ - атомный вес вещества,

$\rho$  - плотность ( в  $\text{г/см}^3$  ).

### Бета -частицы( $\beta$ )

( $\beta$ )- частицы - это поток электронов (  $e^-$  ) или позитронов (  $e^+$  )

Масса ( $\beta$ )- частицы  $m_{(\beta)} = 9.10977 \times 10^{-28} \text{ г}; ( m_\beta = 1/1840 \text{ а.е.м.} )$

заряд  $q_{(\beta)}$ - частицы =  $-1.602 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ .

Скорость бета-частиц  $\gg \gg$  скорости альфа-частиц, т.е.  $V_\beta = 0.94 C$ (скорость света ).

Замечено, что каждый радиоизотоп испускает совокупность  $\beta$ - частиц различной энергии, но  $E_{\beta\text{- частицы}} < E_{\text{макс}}$ .

Спектр  $\beta$ - частицы - непрерывный; только для некоторых радиоэлементов характерно наличие линейчатого спектра ( это связано: с вырыванием  $\gamma$ -квантами вторичных электронов с электронных орбит атома, известно в практике, как **явление внутренней конверсии** ), но это очень редкое явление.

**Непрерывность  $\beta$ - спектра** объясняется одновременным испусканием  $\beta$ - частицы и нейтрино ( $\nu$ ).

$E_{\text{сред. } \beta\text{- частицы}} = 1/3 E_{\text{макс.}} = 0,25 - 0,45 E_{\text{макс.}}$

Эмпирическое соотношение Сэрджента определяется выражением:

$\lambda$  (постоянная распада) =  $k E_{\text{макс.}}^5$ .

$\beta$ - частицы ( т.к.  $m_{\beta} = m_e$  ) взаимодействуют с электронами, и отклоняются от первоначального направления , т.е. рассеиваются.

Для  $\beta$ - частицы возможна встреча с ядрами атомов.

Эффективное сечение ( $\sigma_p$ ) рассеяния  $\beta$ - частицы ядром атома пропорционально  $Z^2$  , а рассеяние электронами пропорционально  $Z$ .

Поглощение  $\beta$ - излучения в веществе происходит по показательному закону :

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

где  $I_0$  - интенсивность первоначального излучения.

$\mu$  - коэффициент поглощения.

$d$  - толщина экрана.

Коэффициент  $\mu$  является переменным и уменьшается с увеличением  $E_{\beta}$  .

Удельная ионизация  $\beta$ -частиц намного меньше альфа-частиц.

$I_{\beta} = 50$  пар ионов/ см [  $E_{\beta} = 1-3$  МэВ ].

## ГАММА ( $\gamma$ ) - ИЗЛУЧЕНИЕ

( $\gamma$ )- излучение - кванты электромагнитного излучения с малой длиной волны ( $\lambda = n \cdot 10^{-11}$  см ).

Гамма- кванты излучаются ядрами, находящимися в возбужденном состоянии после испускания альфа- и бета -частиц.

Э.Резерфорд установил, что  $\gamma$ -кванты тождественны рентгеновским лучам.

Энергия  $\gamma$ -излучения равна  $E_{\gamma} = h \nu$

где  $h$  - постоянная Планка, и равная ( $h = 6,63 \times 10^{-27}$  эрг.с )

$h = 6,626176$  Дж.с или  $h = 4.136189 \times 10^{15}$  эВ.с

Спектр энергий ( одного вещества ) - линейчатый.

Опыты Э.Резерфорда показали, что а)  $\gamma$ -излучение состоит из монохроматических групп; б) эти группы  $\gamma$ -квантов испускаются при возбуждении в ядре, т.е. при вылете из него альфа- и бета частиц.

При других ядерных реакциях возможно возникновение возбужденного ядра, которое переходит в нормальное состояние посредством испускания  $\gamma$ -кванта (  $t = 10^{-11}$  с ).

Иногда возбужденное ядро может существовать более длительное время переходя в нормальное состояние по закону радиоактивного распада. Этот процесс получил название **изомерного перехода**.

**Ядерная изометрия** природных изомеров:

$UX_2$  и  $UZ$   $\Rightarrow$  изотопы протактиния (  $Pa^{234}_{91}$ ,  $Pa^{234}_{91}^*$  ). Они отличаются друг от друга  $\lambda$  ( скоростью распада ) и  $E_{\gamma}$  ( энергией излучения ).

Среди искусственных изотопов выделяют  $^{80}\text{Br}_{35}^m$  ( $T_{1/2} = 18$  мин) и  $^{80}\text{Br}_{35}^m$  ( $T_{1/2} = 4,4$  часа).

Тонкая структура  $\alpha$ -частиц объясняет существование в ядре различных возможных уровней энергии, переход между ними сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов соответствующей энергии.

Как и другое электромагнитное излучение  $\gamma$ -кванты испускаются и распространяются в виде отдельных квантов прямолинейно со скоростью света, т.е.

$$C = V_{\gamma}$$

**Энергия  $\gamma$ -квантов ( естественных радиоизотопов ) равна 0,05 - 3,2 МэВ**

**Взаимодействие  $\gamma$ -квантов** с веществом значительно сложнее, чем в случае заряженных частиц.

Основные процессы, которые происходят при прохождении  $\gamma$ -квантов:

1. **Явление фотоэффекта** - Этот процесс наблюдается при прохождении  $\gamma$ -квантов низкой энергии ( $E < 0.2-0.3$  МэВ) через вещество с большим ( $Z$ ) - например, свинец ( $\text{Pb}$ ) и характеризуется высоким коэффициентом поглощения. ( $\tau$ ). Обычно вся энергия гамма-кванта уходит на вырывание электронов с одной из оболочек атома.
2. **Эффект Комптона** - при прохождении  $\gamma$ -квантов более высоких энергий ( $E=0,2-0,3$  и более МэВ) через вещество с малым массовым числом (воздух, вода, силикатные породы). Часть энергии передается электрону, а остальная остается у  $\gamma$ -кванта, который распространяется дальше в веществе.
3. **Эффект образования пар ( $e^-$  и  $e^+$ ) ( $\chi$ )**. Если  $E_{\gamma} > 1.022$  МэВ, то  $\gamma$ -кванты проходя через тяжелые вещества (например  $\text{Pb}$ ) образуют вблизи ядра атома электрон-позитронную пару.
4. **Эффект Мессбауера** - явление заключающееся в том, что у некоторых элементов  $\gamma$ -кванты могут резонансно поглощаться их ядрами. Это эффект наблюдается при строго определенных энергиях для данного элемента.
5. **Релеевское рассеяние** - заключается в том, что  $\gamma$ -кванты рассеиваются на электронах атомов, не передавая им даже части энергии при соприкосновениях.
6. **Томсоновское рассеяние** - наблюдается на ядрах атомов, когда энергия  $\gamma$ -квантов практически не передается этим ядрам атомов. Ядерное томсоновское рассеяние на изолированных ядрах по сути аналогично томсоновскому рассеянию на свободных электронах. Ядерное томсоновское сечение пропорционально  $Z^4$  и не зависит от энергии  $\gamma$ -кванта; максимальные значения этого вида рассеяния отмечаются в области гигантского дипольного резонанса при энергиях от 5 до 23 МэВ в зависимости от атомного номера элемента.
7. **Дельбрюкское рассеяние** (или упругое рассеяние  $\gamma$ -кванты в кулоновском поле ядра) аналогично когерентному (рэлеевскому) рассеянию  $\gamma$ -квантов на атомных электронах.

Рассеяние  $\gamma$ -квантов происходит преимущественно вперед, а сечение этого вида рассеяния в зависимости от атомного номера элемента пропорционально значению  $(\alpha Z)^4 r_0^2$  [где  $\alpha = 1/137$  - постоянная тонкой структуры].

В интервале энергий 1-3 МэВ сечения рэлеевского, ядерного томсоновского и дельбрюкского рассеяния гамма-квантов сравнимы и составляют величину  $10^{-29} - 10^{-27}$  м<sup>2</sup>.

При прохождении  $\gamma$ -излучения через вещества интенсивность их убывает по показательному закону:

$$I_{\gamma} = I_0 \gamma e^{-\mu d}$$

где  $\mu$  - линейный коэффициент ослабления, слагающийся из коэффициентов поглощения и рассеяния.

$\mu = \tau + \sigma + \chi$  ( Коэффициент  $\mu$  возрастает с увеличением плотности вещества, в большинстве случаев ( $\frac{\mu}{\sigma} = \text{const}$ ) и изменяется по линейному закону ).

В отличие от заряженных частиц, имеющих в веществе ограниченную дальность распространения ( пробег ), дальность действия  $\gamma$ -излучения практически определяется интенсивностью первичного пучка и чувствительностью аппаратуры.

**Так толщина защитного слоя при работе с  $\gamma$ -излучением зависит от его интенсивности**

Действие  $\gamma$ -излучения определяется в основном вторичными электронами, т.к. их действие превышает действие самого  $\gamma$ -кванта.

В воздухе полное поглощение естественного  $\gamma$ - излучения происходит при 1300-1400 м.

## ТЕМА 4

### ЛЕКЦИЯ 4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ и ИСКУССТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ

#### Физические основы радиометрических методов поисков и разведки месторождений радиоактивных руд

#### Естественная радиоактивность. Радиоактивные ряды

**Радиометрические методы поисков и разведки месторождений радиоактивных руд основаны на физических процессах, связанных с естественной радиоактивностью - радиоактивным распадом элементов, находившихся в горных породах.**

Радиоактивный распад представляет собой самопроизвольное превращение ядер атомов некоторых элементов в ядра других элементов, сопровождающееся выделением энергий и испусканием альфа- и бета частиц и гамма - квантов.

*Излучения, связанные с потоком этих частиц, называют ионизирующими, так как их взаимодействие со средой приводит к образованию ионов - электрически заряженных частиц.*

Помимо естественной радиоактивности выделяют **искусственную радиоактивность**, которая создается путем облучения устойчивых атомных ядер потоками нейтронов, бомбардировкой протонами, альфа - частицами и т.п.

Свойства радионуклидов не зависят от способа их образования.

Существуют несколько видов радиоактивных превращений, главными из которых являются **альфа - и бета - распады**.



При **альфа - распаде** из ядра элемента вылетает альфа-частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов и представляющая собой положительно заряженное ядро атома гелия (с массовым числом 4 и зарядом +2) . Ядро нового элемента, образовавшегося в результате альфа распада, имеет порядковый номер (**Z**) на две единицы меньше, а массовое число (**A**) на четыре единицы меньше, чем у ядра исходного элемента.

При **бета-распаде** в ядре атома радионуклида один из нейтронов превращается в протон ( $n \rightarrow p + e^-$ ), { или, в редких случаях, протон превращается в нейтрон ( $p + e^- \rightarrow n$  } при этом из ядра вылетает электрон (или позитрон) . **При вылете электрона атомный номер ядра увеличивается на единицу, при вылете позитрона - уменьшается на единицу.**

При распаде радиоактивных ядер или при изменениях их энергетического состояния испускается **коротковолновое электромагнитное излучение**, называемое **гамма - излучением**. Оно обладает не только волновыми, но и корпускулярными свойствами, т.е. свойствами потока частиц. Энергия гамма-кванта равна разности энергий состояний ядра, между которыми происходит переход. Скорость распространения гамма-излучения равна скорости света.

Природные радионуклиды с порядковыми номерами от 81 (таллий) до 92 (уран) образуют три радиоактивных ряда (семейства) - урано-радиевый (**U-Ra**), ториевый (**Th**) и актино-урановый (актиниевый)(**AcU**) .

В этих рядах каждый радионуклид возникает из предыдущего и превращается в последующий до тех пор, пока не образуется устойчивый изотоп элемента.

**Распадающийся нуклид** называют **материнским**, а **вновь образующийся - дочерним**. Нуклид, с которого начинается ряд, называется **родоначальником ряда**.

Каким бы путем не распадался нуклид (изотоп), число атомных ядер, распавшихся в единицу времени, пропорционально числу имевшихся ядер. Это главный закон распада.

**Коэффициент пропорциональности**, показывающий насколько, быстро распадается изотоп, называется **постоянной распада ( $\lambda$ )**.

**Время, за которое количество радионуклида убывает наполовину, называется периодом полураспада ( $T_{1/2}$ )**.

Состояние, когда убыль дочернего вещества полностью компенсируется его образованием из исходного материнского называется **радиоактивным равновесием**.

Радиоактивное равновесие имеет важное значение при поисках и разведке месторождений радиоактивных руд, так как позволяет определять концентрацию одного радионуклида по результатам измерений другого.

Характеристики радионуклидов урано-радиевого (**U-Ra**) ряда приведены в таблице.

Характеристика радионуклидов урано-радиевого ряда			
Нуклид	Период полураспада $T$	Постоянная распада $\lambda, \text{с}^{-1}$	Вид излучения
Уран-238	$4,468 \cdot 10^9$ лет	$4,918 \cdot 10^{-18}$	$\alpha, \gamma$
Торий-234	24,10 сут	$3,328 \cdot 10^{-7}$	$\beta, \gamma$
Протактиний-234 (UX <sub>2</sub> )	1,18 мин	$9,788 \cdot 10^{-3}$	$\beta, \gamma$
Протактиний-234 (UZ)	6,7 ч	$2,873 \cdot 10^{-5}$	$\beta, \gamma$
Уран-234	$2,445 \cdot 10^5$ лет	$8,988 \cdot 10^{-14}$	$\alpha$
Торий-230	$7,7 \cdot 10^4$ лет	$2,854 \cdot 10^{-13}$	$\alpha, \gamma$
Радий-226	1617 лет	$1,373 \cdot 10^{-11}$	$\alpha, \gamma$
Радон-222	3,824 сут	$2,097 \cdot 10^{-6}$	$\alpha$
Полоний-218	3,05 мин	$3,787 \cdot 10^{-3}$	$\alpha$ (99,96 %), $\beta$ (0,04 %)
Свинец-214	26,8 мин	$4,310 \cdot 10^{-4}$	$\beta, \gamma$
Висмут-214	19,9 мин	$5,804 \cdot 10^{-4}$	$\alpha$ (0,02 %), $\beta$ (99,98 %)
Полоний-214	$1,64 \cdot 10^{-4}$ с	$4,226 \cdot 10^3$	$\alpha, \gamma$
Таллий-210	1,3 мин	$8,885 \cdot 10^{-3}$	$\beta$
Свинец-210	22,3 г	$9,854 \cdot 10^{-10}$	$\beta, \gamma$
Висмут-210	5,012 сут	$1,600 \cdot 10^{-6}$	$\beta$
Полоний-210	138,4 сут	$5,795 \cdot 10^{-8}$	$\alpha, \gamma$
Свинец-206	Устойчивый	—	—

Существует около 50 естественных радиоактивных элементов - природных радионуклидов, однако при поисках месторождений радиоактивных руд приходится чаще всего измерять концентрации и изучать поведение в основном четырех радионуклидов - **урана, радия, тория и калия.**

**Уран ( $U^{238}_{92}$ )** (порядковый номер 92, массовое число 238,07) - серебристый, блестящий металл, наиболее тяжелый из природных элементов, плотность 19,05 г/см<sup>3</sup>). Уран состоит из трех естественных радиоактивных изотопов - атомов элемента, занимающих одно место в периодической системе, но имеющих разные массовые числа, - урана-234, урана-235 и урана-238. Содержание этих изотопов в природе составляет

0,0067, 0,7204 и 99,2739 % соответственно. Уран-238 и уран-235 являются родоначальниками двух радиоактивных рядов и имеют периоды полураспада соответственно  $4,5 \cdot 10^9$  и  $7,1 \cdot 10^{10}$  лет.

Уран обладает большой химической активностью и встречается в четырех- и шестивалентной формах. Соединения четырехвалентного урана имеют черный, черно-коричневый и красно-бурый цвета, соединения шестивалентного урана имеют яркий зеленовато-желтый цвет.

**Радий ( $Ra^{226}_{88}$ )** (порядковый номер 88, массовое число 226) - мягкий металл серебристого цвета плотностью 5 г/см<sup>3</sup>. Встречается во всех урановых минералах.

В 1 г урана при условии радиоактивного равновесия содержится  $3,4 \cdot 10^{-7}$  г радия. Существует несколько изотопов радия. Наибольшее практическое значение имеет изотоп радий-226 с периодом полураспада 1617 лет.

**Торий ( $Th^{232}_{90}$ )** {порядковый номер 90, массовое число 232) - мягкий металл плотностью 11,5 г/см<sup>3</sup>. Торий-232 - родоначальник ториевого ряда - имеет период полураспада  $1,42 \cdot 10^{10}$  лет. Торий почти не подвержен влиянию окислительно-восстановительной среды, поэтому большинство соединений этого элемента плохо растворимы в воде.

**Калий ( $K^{40}_{19}$ )** - (порядковый номер 19, массовое число 39,09) - относится к группе щелочных металлов, имеет плотность 0,86 г/см<sup>3</sup>. Известны два стабильных изотопа калия с массовыми числами 39 {93,08 %} и 41 (6,91 %). Радиоактивным изотопом является калий-40. Калий - один из самых распространенных элементов в природе, он входит в состав главнейших породообразующих минералов.

## РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ в ПРИРОДЕ

Радиоактивные элементы в малых количествах присутствуют во всех природных веществах, составляющих **земную кору**, а также

**гидросферу, атмосферу, биосферу Земли.**

В начале XX в. В.И.Вернадский говорил о **\*всюдности\*** химических элементов на основе изучения радиоактивных элементов и их свойств.

### Радиоактивность горных пород

Главная масса радиоактивных элементов сосредоточена в магматических горных породах ( так на их долю падает **\* 95 % \*** всей массы земной коры ).

Замечено, что содержание радиоактивных элементов в магматических породах тем больше, чем больше там содержание (  $\text{SiO}_2$  ).

При переходе содержание их уменьшается::

**кислые  $\Rightarrow$  средние  $\Rightarrow$  основные  $\Rightarrow$  ультраосновные**

### Содержание радиоэлементов в магматических горных породах ( по А.П.Виноградову, с исправлениями )

Породы	U( $n \cdot 10^{-4}$ ),%	Ra ( $n \cdot 10^{-10}$ ),%	Th( $n \cdot 10^{-4}$ ),%	K, %	Si, %	Th/U
Кислые	3,5	1,2	18	3,34	32,3	5,1
Средние	1,8	0,6	7	2,31	26,0	3,9
Основные	0,5	0,27	3	0,83	24,4	6,0
Ультраосновные	0,003	0,01	0,005	0,03	19,0	1,7

Считая, что кора Земли на 2/3 состоит из кислых пород и только на 1/3 ( из основных и ультраосновных ) А.П.Виноградов установил **кларки радиоэлементов** ( в % от земной коры в целом ).

Так, например, для U -  $(2-4) \cdot 10^{-4} \%$ , Ra -  $1.2 \cdot 10^{-10} \%$ , Th -  $1.2 \cdot 10^{-3} \%$ .

Другие исследователи считают **\*земную кору\*** с гидросферой и атмосферой.

Но цифры оказались близкими для большинства элементов, т.к. массы их несопоставимы, т.е.  $M_{\text{атм.}}$  и  $M_{\text{гидр.}} \ll M_{\text{лит.}}$

Характерная черта геохимии ( U - Ra ) - неравномерность их содержаний в горных породах.

Содержание радиоактивных элементов в одних и тех же петрографических разностях ( одинаковые структура, текстура, минеральный состав ) значительно различается.

Так, например, радиоактивность гранитов Финляндии в 4-5 раз выше содержания радиоэлементов в гранитах Антарктиды.

Существует ( замечено ) правило: граниты ( розового и красного цветов ) более радиоактивны серых и темных разностей.

Отличительная разница содержаний ( U ) в одинаковых породах из разных регионов зависит от :

- \* различия состава магматических расплавов;
- \* геологических условий их формирования;
- \* от возраста образований.

Большое значение имеет форма нахождения радиоэлементов. Общеизвестно, что радиоэлементы присутствуют в породе в различном виде.

Одна из форм нахождения радиоактивных элементов  $\Rightarrow$  **минералы U.**

В расплаве, из которых формируются эти породы , содержание урана невелико. И поэтому неблагоприятны условия формирования самостоятельных минералов U.

В природе известно более 100 минералов U.

Наиболее распространенные минералы урана :

- \* уранинит  $UO_2$ ;
- \* торинит  $ThO_2$
- \* браннерит  $(U, Ca, Y, Ge)(Ti, Fe)_2O_6$
- \* ураноторит

менее распространены (пирохлор, бетафит, самарскит).

Пример, в граните Бавено (Итальянские Альпы) 10% радиоактивности падает на уранинит.

Другая форма нахождения  $U \Rightarrow$  **изоморфное** вхождение его во многие акцессорные минералы:

- \* монацит  $(Nd, La, Ge)PO_4$ ;
- \* ксенотим  $YPO_4$ ;
- \* ортит  $(Ge, Ca, Y)_2(Al, Fe^{3+})_3(SiO_4)_3OH$ ;
- \* торит  $(Th, U)SiO_4$ ;
- \* циркон  $ZrSiO_4$ ;
- \* пирохлор  $(Ca, Na)_2Nb_2O_6(OH, F)$

В акцессорных минералах  $U$  изоморфно замещает **Th, Zr, редкоземельные элементы**, возможно **Ca**.

Концентрация  $U$  в акцессорных минералах различна.

Отдельные исследователи считают  $U$  изоморфно входящий в акцессорные минералы **главной формой нахождения его в горных породах**.

В некоторых гранитных массивах с **акцессорными минералами** связано около 90% общего содержания  $U$  и  $Th$  в породе.

**Третья форма нахождения  $U \Rightarrow$  рассеянный  $U$ .**

Такой уран находится в адсорбированном состоянии на поверхности кристаллов и зерен минералов (скорее всего в виде группы уранила  $UO_2^{2+}$ ):

- \* в растворенном виде;
- \* в дефектах кристаллических структур минералов (также в виде группы уранила).

Среди породообразующих минералов  $U$  в цветных минералах (биотит, пироксены, амфиболы) **выше**, чем в полевых шпатах и кварце.

Однако в кварцево-полевшпатовой части гранитоидных пород находится в среднем 12-60% общего количества  $U$  в породе.

Например, в гранитоидах батолита с породообразующими минералами связано от 40 до 80%  $U$ , а с акцессорными от 60 до 20% соответственно.

В **эффузивных породах** главная часть  $U$  находится в стекловатой и микрокристаллической основной массе.

Общее содержание  $U$  в породе и соотношение между отдельными формами нахождения могут изменяться при:

- \* **постмагматических процессах,**
- \* **метаморфизме,**
- \* а также в результате **выветривания.**

**Постмагматические изменения:**

- \* **перераспределение  $U$  в горных породах;**
- \* **частичный вынос.**

**Торий** частично образует самостоятельные минералы (монацит, торит, ортит), частично он рассеян в виде атомов в кристаллической решетке других минералов. И образует изоморфные смеси с ними или присутствует в форме окислов или других соединений.

/ Причем размеры этих включений настолько малы, что в обычный микроскоп их невозможно заметить ).

**По геохимическим свойствам Th менее рассеян чем U, т.к. характер его рассеяния больше связан с механическим способом миграции и в меньшей степени с миграцией в водных растворах**

**Радий и все другие продукты распада (U) и Th присутствуют в горных породах в рассеянном состоянии.**

Соотношение отдельных изотопов в (магматических горных породах) более-менее постоянными.

Соотношение между элементами групп (U) и Ra, как правило, равновесное или близкое к нему.

Для отдельных образцов горных пород (особенно для U-руд) отношение (U/Th) нарушается вследствие того, что химические свойства этих элементов **существенно различны** (и поэтому они по-разному перемещаются с природными растворами).

Магматические породы характеризуются в среднем довольно постоянным отношением Th/U, но для отдельных массивов эти отношения иногда меняются.

**ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ** - на них падает 5% объема литосферы.

Однако осадочные породы залегают на 3/4 поверхности континентов и в них имеются большие по запасам месторождения (U).

Соотношения между наиболее распространенными горными породами:

**песчаники  $\Rightarrow$  глинистые породы  $\Rightarrow$  карбонатные породы = 3: 5 : 2.**

Максимальные содержания U в глинистых горных породах. Так для

\* глини Русской платформы U  $\Rightarrow 4,1 \cdot 10^{-4} \%$ ;

\* для горных пород Северной Америки U  $\Rightarrow 3,2 \cdot 10^{-4} \%$ .

Максимальные содержания U в глинистых отложениях ( $C_U = 100 \cdot 10^{-4} \%$  U и более). Пример, морские черные сланцы (в ряде случаев содержания достигают промышленных величин).

$C_U = 2,1 \cdot 10^{-4} \%$  для карбонатных пород Русской платформы.

Для песчаников  $C_U$  - (низкие)  $= \{ 0,3 - 1,2 \} \cdot 10^{-4} \%$  в Северной Америке.

Минимально ураноносны соли (например, галит)  $C_U = 1 \cdot 10^{-5} \%$ ;

$C_U$  (ангидриты, гипсы)  $= (1 - 8) \cdot 10^{-4} \%$ .

В осадочных породах могут встречаться повышенные концентрации, что приводит к образованию промышленных МПИ.

Для (U) характерна приуроченность к осадочным породам, обогащенным органическим веществом.

Формы нахождения (U) относительно плохо изучены, но известно что преобладает рассеянная форма нахождения по сравнению с минеральной.

Поведение U/Th резко различно в зоне осадконакопления. Наблюдаются сильные колебания U/Th.

В осадочных U-х МПИ тория почти нет. Минералы Th в природных водах растворяются очень слабо, поэтому при выветривании горных пород на земной поверхности происходит разделение U и Th.

#### **РАДИОАКТИВНОСТЬ ПОЧВ**

В результате выветривания и при участии растений и животных организмов на поверхности горных пород образуется почвенный слой.

По А.П.Виноградову намечается однообразие содержаний урана в почвах различных климатических зон.

Колебания  $n \cdot 10^{-8} \% \ll 2$  раз. Изменения ( $C_U$ ) в разрезе не велики. Встречается несколько большее содержание урана в верхних частях почв, особенно в аридных зонах.

В общем содержания ( $U, Ra, Th$ ) в почвах меньше, чем в породообразующих породах, а отношение  $U/Th$  во всех почвах (особенно в подзолистых и серых лесных) значительно выше, чем в горных породах их образовавших.

Это связано с тем, что  $U$  легче переходит в растворы и уносится из почвы.

**Растения и животные организмы** имеют в сотни раз меньшую радиоактивность

$U$  :

\* в растениях  $n \cdot 10^{-8} \%$

\* а радия  $n \cdot 10^{-12} \%$

Только в золе растений вблизи МПИ радиоактивных элементов  $n \cdot 10^{-2} \%$ .

В морских животных (моллюски, иглокожие и др.) содержится от  $4 \cdot 10^{-4} \%$  до  $2 \cdot 10^{-4} \%$  урана.

Высокое содержание урана в породах с органическим веществом связано с концентрацией после отмирания в продуктах распада.

#### РАДИОАКТИВНОСТЬ ВОД

В поверхностных и подземных водах нет равновесия между элементами  $Th$  и  $U-Ra$  ряда.

Обогащение природных вод газами обусловлено процессом эманирования.

Твердые радиоактивные элементы переходят в воды при растворении и выщелачивании.

В морской воде  $C_U = (0,3 - 3,7) \cdot 10^{-6}$  г/л.

Минимум концентраций урана - в водах проточных озер (северных широт).

Максимум в воде мелких озер засушливых степей, в районах развития пород с высоким кларком радионуклидов.

В реках  $C_U$  колеблется от  $3 \cdot 10^{-8}$  до  $n \cdot 10^{-5}$  г/л.

МПИ (урановые) имеют  $C_U$  до  $n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-4}$  г/л (мелкие реки, ручьи).

В подземных водах  $C_U$  колеблется в пределах  $1 \cdot 10^{-8} - 2$  г/л (кислые рудничные воды).

Содержание радиоэлементов часто зависит от времени года: так в весенне-летний период оно падает.

Радиоактивные воды делятся на группы:

радоновые, радиевые, радоно-радиевые,  $U-Rn - Ra$  воды гидротермальных МПИ;  $U - Ra$  воды осадочных МПИ.

**При отнесении вод к радиоактивным считается**

$C_{Rn} > 50$  эман;  $C_{Ra} > 1 \cdot 10^{-11}$  г/л;  $C_U > 3 \cdot 10^{-5}$  г/л

#### РАДИОАКТИВНОСТЬ АТМОСФЕРЫ

В воздухе всегда имеются  $Rn$  и  $Tn$  (в виде свободных атомов);  $Ap$  - немного из-за малого  $T_{1/2}$ .

Одновременно с  $Rn$  в воздухе присутствуют короткоживущие продукты их распада.

Источник эманаций - горные породы и почвы, содержащие радионуклиды.

Количество эманаций зависит от степени эксхалации (выделения) их из почв.

$C_{Rn}$  (вне рудников) =  $(1 - 14) \cdot 10^{-13}$  Ку / ( $m^2 \cdot c$ ) и зависит от совокупности метеорологических условий.:

\*  $C_{Rn} = (0.1 - 5.0) \cdot 10^{-13}$  кюри/л;

\*  $C_{Th} = (4 - 9) \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-15}$  кюри/л;

В атмосфере есть еще  $C^{14}$  ( $T_{1/2} = 5600$  лет);  $H^3$  ( $T_{1/2} = 12$  лет).

Так  $C^{14}O_2$  поглощается при дыхании.

После атомных взрывов имеются \* осколки \* - продукты деления U и Pu.

## РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ

В практике ядерных и радиометрических исследований широко распространено такое понятие как **радиоактивные ряды (или) семейства** радиоактивных элементов.

**РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА - совокупность естественных или искусственных радиоактивных нуклидов, связанных цепочкой радиоактивных превращений.**

Родоначалники трех естественных радиоактивных рядов -  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{232}_{90}\text{Th}$ ,  $^{235}_{92}\text{U}$ ,  
U,

Родоначалник искусственного радиоактивного ряда  $^{237}_{93}\text{Np}$ .

Распад (превращение) этих семейств имеет много общих свойств:

1. родоначалники имеют большие  $A$  и  $T_{1/2}$  [ $^{238}_{92}\text{U}$  -  $4.47 \cdot 10^9$  лет;  $^{235}_{92}\text{U}$  -  $7,04 \cdot 10^8$  лет ;  $^{232}_{90}\text{Th}$  -  $1,40 \cdot 10^{10}$  лет];
2. **распад** идет в сторону образования легких элементов;
3. так в первой половине ряда преваляют  $\alpha$ -излучатели, а во второй -  $\beta$ -излучатели;
4. в середине рядов образуются радиоактивные газ (эманации)  $^{222}_{86}\text{Rn}$ ,  $^{220}_{86}\text{Tn}$ ,  $^{219}_{85}\text{An}$ ;
5. за эманациями идут группы короткоживущих элементов, т.е. распадающихся почти одновременно;
6. конечный продукт распада - стабильные изотопы свинца.

## Свойства ионизирующих излучений методы их регистрации

**Основные свойства ионизирующих излучений - большая проникающая способность, ионизация вещества, возбуждение люминесценции, фотохимическое воздействие на эмульсию фотопластинки и физиологическое действие.**

**Эти свойства в той или иной степени используют при поисках месторождений урана, проведении медицинских и экологических исследований, изучении плотности горных пород и т.п.**

Ионизирующие излучения способны распространяться на многие десятки метров от радиоактивного объекта.

Проникающая способность излучений зависит от их вида, энергии и плотности вещества, в котором они распространяются.

Так, дальность пробега альфа - частиц в горных породах измеряется десятками микрон, в воздухе - первыми сантиметрами.

Бета-частицы проникают в горных породах на расстояние до 1 см, а в воздухе распространяются на несколько метров от источника излучения.

Гамма-излучение обладает наибольшей проникающей способностью. Для полного его поглощения требуется слой горных пород мощностью 60 см. В 10 раз уменьшает интенсивность гамма-излучения слой свинца толщиной 4 см. В воздухе гамма-излучение распространяется на десятки метров, что позволяет проводить аэропоиски радиоактивных объектов,

Гамма-кванты, альфа- и бета-частицы, попадая на поверхность или внутрь некоторых веществ (сцинтилляторов), вызывают в них вспышки видимого света. Это явление называется сцинтилляцией. Оно широко используется в современных приборах (радиометрах, спектрометрах, эманометрах).

Радиоактивное излучение, проходя через слой вещества, находящегося в твердой, жидкой и газообразной фазах, производит ионизирующее действие.

Ионизация зависит от вида частиц, их энергии, свойств вещества. Наибольшей ионизирующей способностью обладают альфа-частицы, наименьшей - гамма-кванты.

Ионизирующие свойства излучений широко используются в некоторых типах радиометрической аппаратуры, в частности, в газоразрядных детекторах, ионизационных камерах, лабораторной аппаратуре.

**Существует несколько методов регистрации и измерения ионизирующих излучений, главными из которых является ионизационный, сцинтилляционный, трековый, фотографический.**

Все эти методы основаны на описанных выше свойствах излучений.

**Ионизационный метод** основан на измерениях среднего ионизационного тока, создаваемого в специальных камерах или газоразрядных детекторах при прохождении через них потока гамма-квантов или отдельных частиц.

**Сцинтилляционный метод** основан на измерении числа вспышек видимого света, возникающих в веществе сцинтилляционных детекторах (кристаллы йодистого натрия и цезия, активированные таллием, натрием и другими элементами, покрытия из сернистого цинка, активированного серебром и т.п.) под воздействием ионизирующих излучений.

**Трековый метод** использует свойства альфа-частиц оставлять углубления на поверхности некоторых материалов, в частности, фотопленок. Следы этих углублений (треки) могут быть обнаружены и зафиксированы без применения радиометрической аппаратуры.

**Фотографический метод** используется при излучениях большой мощности дозы ионизирующих излучений. Метод основан на изменении оптической плотности светочувствительных материалов под воздействием излучений. Его применяют для изучения распределения радиоактивных минералов в образцах горных пород.

Указанные методы положены в основу работы всех радиометрических приборов: радиометров, гамма-спектрометров, эманометров.

На практике наибольшее распространение получили ионизационные и сцинтилляционные типы детекторов.

В группе **ионизационных детекторов** в зависимости от режима работы (т.е. величины поданного потенциала \*напряжения\*) выделяются следующие типы детекторов: **ионизационные камеры** (импульсные и интегральные), **пропорциональные счетчики, газонаполненные счетчики** (счетчики Гейгера-Мюллера).

Долгое время счетчики Гейгера-Мюллера были основным типом детекторов в полевой измерительной радиометрической и дозиметрической аппаратуре.

Счетчик представляет собой цилиндрический конденсатор. Внутренним электродом (анодом) его является металлическая нить, натянутая по оси цилиндра. Цилиндр - это или стеклянный баллон, покрытый изнутри металлизированным слоем, или металлический цилиндрический баллон (катод).



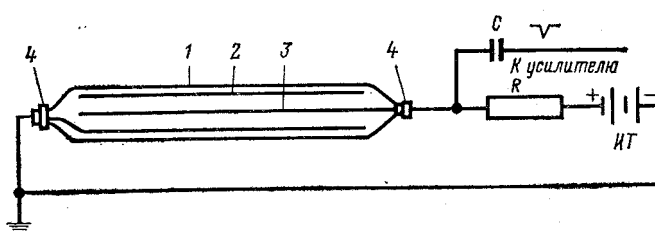
Нить и цилиндр изолированы друг от друга. Цилиндр герметичный, заполнен определенным инертным газом при низком давлении.

Обычно на нить подается плюс питающего напряжения, а корпус заземляется.

Проникающие в рабочий объем  $\alpha$ -,  $\beta$ - частицы и  $\gamma$ -кванты вызывают ионизацию газа заполнителя и как следствие разряд - прохождение тока между анодом и катодом счетчика.

Разряд может вызываться как непосредственно ионизацией самого газа, так и электронами, образующимися при комптоновском или фотоэлектрическом взаимодействии кванта с материалом катода.

В результате ионизации между анодом и катодом счетчика проходит импульс тока, который вызывает изменение потенциала системы и тем самым создает импульс напряжения на резисторе (сопротивлении) нагрузки. Этот импульс снимается с резистора нагрузки и подается в усилительно-измерительную схему.



**Рис. 4.1 . Устройство и схема включения газоразрядного счетчика.**  
1 - баллон; 2 - катод; 3 - анод; 4 - электрические выводы катода и анода;  
C - емкость; R - резистор; ИТ - источник постоянного тока

Наиболее распространенным в последнее время типом детектора для радиометрических и ядерно-физических исследований является **сцинтилляционный счетчик**.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой прибор, состоящий из люминофора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

В качестве люминофора в радиометрических приборах используются кристаллы йодистого натрия с добавками (активатора) таллия **NaI (Tl)**.

Принцип работы такого детектора сводится к следующему. Гамма-квант (или ядерные частицы:  $\alpha$ -,  $\beta$ - частицы), попадая на люминофор взаимодействуют с атомами вещества люминофора, производя их ионизацию и возбуждение. Количество возбужденных атомов пропорционально энергии возбуждающей частицы. Переход возбужденных атомов в устойчивое состояние сопровождается испусканием фотонов. Так как возбужденными оказываются не один, а несколько атомов, то их переход в устойчивое состояние сопровождается испусканием многих фотонов - световой вспышкой. Интенсивность световой вспышки тем больше, чем больше энергия регистрируемой частицы. Фотоны, попадая на фотокатод, вследствие фотоэлектрического поглощения их атомами материала фотокатода выбивают из него электроны.

Фотоэлектроны попадая в ФЭУ умножаются ( $N = 10^8$  раз), и на коллектор (анод ФЭУ) приходит лавина электронов.

Заряд, перенесенный электронами на анод, создает на выходе ФЭУ импульс электрического напряжения.

Величина этого импульса пропорциональна количеству фотоэлектронов, выбитых из фотокатода, следовательно, пропорциональна энергии частицы, попавшей в объем люминофора.

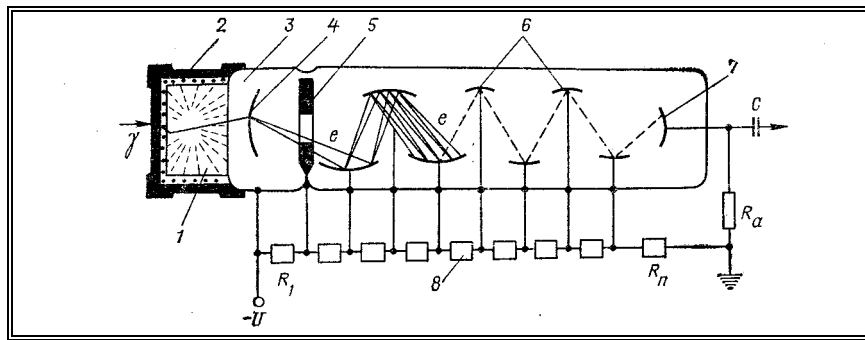


Рис 4.2 Устройство и схема включения сцинтилляционного счетчика  
 1 - сцинтиллятор; 2 - отражатель; 3 - ФЭУ; 4 - фотокатод; 5 - фокусирующий динод 6 - диноды; 7 - анод; 8 - делитель напряжения ;C - емкость;  
 R - анодная нагрузка

В последние годы в практике лабораторных и даже полевых видов исследований некоторое распространение получили полупроводниковые детекторы ППД).

Полупроводниковые детекторы  $\gamma$ -излучения (ППД) представляют собой полупроводниковые диоды, на которые подается обратное напряжение, в результате чего в цепи диода проходит слабый обратный ток.

Чувствительной к гамма-излучению областью является зона, находящаяся между n и p-слоями диода. При попадании ионизирующей частицы в чувствительную область детектора происходит выделение электронов и образование дырок, устремляющихся под действием электрического поля к противоположно заряженным электродам детектора.

Возникающий при этом во внешней цепи электрический импульс благодаря малым размерам детектора и большой подвижности электронов характеризуется быстрым ( $10^{-7}$  -  $10^{-6}$  с) нарастанием фронта и амплитудой, пропорциональной заряду, освобождающемуся в детекторе, т.е. энергии, потерянной частицей при прохождении через детектор.

К достоинствам ППД следует отнести лучшее, чем у сцинтилляционных и газоразрядных детекторов, энергетическое разрешение.

К достоинствам ППД относятся также: экономичность питания, компактность, нечувствительность к магнитному полю.

Недостатки ППД - необходимость глубокого охлаждения и высокие требования к усилителям.

Однако специалисты предсказывают этим детекторам большое будущее.

## ЯДЕРНОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

### Типы аппаратуры. Основной принцип действия. Основные узлы приборов.

Ядерно-геофизическую аппаратуру, применяемую при поисках и разведке полезных ископаемых, геологическом картировании, контроле радиационной обстановки, определении ряда физических свойств и вещественного состава горных пород и руд условно можно разделить на следующие основные типы:

\* **радиометры** - приборы, измеряющие интегральную ( суммарную ) МЭД гамма-излучения; а также для измерения интенсивности других видов излучения ( $\alpha$ ,  $\beta$ , рентгеновское );

\* **спектрометры** - приборы, предназначенные для регистрации излучений ( $\alpha$ -, $\beta$ - и преимущественно  $\gamma$ -) в определенных энергетических интервалах (\* рабочих каналах \*), что позволяет определять концентрации природных радионуклидов (U, K, Th) и других радиоизотопов в коренном залегании пород, и порою вещества в другом агрегатном состоянии ( жидком, газообразном );

\* **эманометры** ( $\alpha$ -радиометры), предназначенные для измерения концентраций радиоактивных газов (эманаций): **Rn, Tn, An**;

\* **дозиметры** - приборы, предназначенные для определения радиационной обстановки на измеряемой территории, а также определения величины доз излучения, которые могут получить находящиеся там люди, а также животные и др. организмы;

\* **анализаторы** - приборы, используемые преимущественно в ядерной геофизике и предназначенные для регистрации преимущественно рассеянного гамма-излучения, искусственной радиоактивности, потока нейтронов, а также оказываемого ими действия (наведенная активность). В зависимости от их прямого назначения анализаторы могут носить специальные названия (влагомеры, плотномеры, дефектоскопы, концентрометры и т.д.)

По условиям применения радиометрические приборы подразделяются:

а) **лабораторные**, б) **полевые**

**Полевые приборы** подразделяются на (воздушные или аэро-, автомобильные, скважинные, рудничные (предназначенные для работ в поверхностных и в подземных горных выработках)).

Принцип работы большинства ядерно-геофизических приборов основан на явлениях, связанных с ионизацией твердых, жидких, газообразных сред под действием  $\alpha$ -,  $\beta$ -  $\gamma$ -излучений, а также потока нейтронов и рентгеновского излучения.

Несмотря на большое разнообразие типов и видов радиометрической и другой аппаратуры (дозиметры, анализаторы) - все приборы содержат несколько общих основных устройств (блоков, узлов): блоки детектирования, блок преобразования электрических сигналов, измерительные устройства, выходной блок, блок питания.

**Блок детектирования** преобразует энергию ионизирующего излучения в электрические сигналы (которые могут быть дискретными или аналоговыми).

Дискретный сигнал соответствует взаимодействию отдельной частицы или  $\gamma$ -кванта с веществом детектора.

Аналоговый (или интегральный) сигнал характеризует общее количество  $\gamma$ -квантов в единицу времени.

Основная часть входного блока - сцинтилляционные (кристаллические, пластмассовые) или полупроводниковые детекторы. Газонаполненные детекторы получившие наибольшее распространение в прошлые годы, постепенно утрачивают свое первоначальное значение.

Обычно этот узел прибора представляет собой выносной блок, соединенный с пультом управления гибким кабелем (в т.ч. и многожильным).

**Блок преобразования электрических сигналов** (обычно состоит из усилителя, дискриминатора, нормализатора) предназначен для усиления сигналов (по току, напряжению, мощности), для выделения из общего количества сигналов на выходе детектора и передачи для дальнейшей обработке и анализа только тех сигналов, амплитуда которых лежит в\* заранее заданном диапазоне\* значений.

В этом блоке происходит усиление, формирование и анализ входных сигналов,

Блок преобразования включает дискриминаторы импульсов (амплитудно-пороговые и дифференциальные), нормализаторы (формирующие каскады), узлы временных совпадений и антисовпадений и другие устройства.

**Измерительные устройства** (ЭМС, цифровые регистраторы и т.д.) предназначены для измерения количества импульсов, отбираемых в блоке преобразования сигналов по амплитуде, форме и времени поступления.

**Выходной блок -регистратор** преобразует электрические сигналы в показания, удобные для наблюдения и обработки. В современной аппаратуре используются одноканальные и многоканальные дискретные и аналоговые регистраторы.

К дискретным относятся цифровые измерители скорости счета и счетчики импульсов; в некоторых приборах используется дополнительный дискретный регистратор в виде специального телефона ( звукового индикатора ), по изменению тона звука в котором отмечаются поступающие в него электрические импульсы ( сигналы ).

Аналоговый регистратор показывает среднюю скорость следования импульсов. Результат измерений выражается числом делений шкалы индикаторного прибора или записью на диаграммной ленте.

**Блоки питания** , снабжающие всю схему прибора электроэнергией, представляют собой в зависимости от типа аппаратуры электрохимические элементы для переносных приборов, аккумуляторы или бортовую сеть ( для аэро-, авто- и каротажных радиометров и спектрометров ) и промышленную сеть ( для каротажных и лабораторных установок ).

Высокое напряжение для питания детекторов создается отдельным узлом, называемым высоковольтным преобразователем , включающим генератор, выпрямитель, фильтр и стабилизатор.

Современные ядерно-геофизические приборы включают также большое количество специальных электрических устройств, важнейшими из которых являются устройство стабилизации, таймерное и счетно-решающее устройство ( устройства обработки информации ).

**Устройство стабилизации** масштаба энергетической шкалы применяется в гамма-спектрометрах и концентрометрах с целью сведения к минимуму нестабильности амплитуды анализируемых импульсов.

Устройство стабилизации основано на использовании контрольного сигнала известной и стабильной амплитуды, так называемого реперного сигнала. В качестве реперного сигнала используется ионизирующее излучение радионуклидов с моноэнергетическим  $\gamma$ -излучением. Реперами обычно служат искусственные радионуклиды: Cs-137, Zn-65, Co-60, Am-241 и др.

**Таймерные устройства ( таймеры )** используются для автоматического задания продолжительности измерения экспозиции.

Они управляют ключевыми устройствами, пропускающими сигналы на время экспозиции в измерительные устройства.

**Счетно-решающие устройства** ( устройства обработки информации ) служат для автоматических вычислений концентраций ПРН в соответствии с заданной программой.

## ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

При радиометрических исследованиях и обработке результатов измерений в настоящее время используют единицы СИ. Ранее в практике работ и технической литературе применяли внесистемные единицы.

**Активность радионуклида** оценивают числом распадов в единицу времени.

**Основной единицей активности является беккерель (Бк):**  
**1 Бк=1р/ с или ( с<sup>-1</sup> ), т.е. за одну секунду в источнике происходит один акт распада.**

Применявшаяся ранее единица активности называлась кюри (Ки) . Один кюри эквивалентен активности одного грамма радия, 1 Бк=2,7х10<sup>-11</sup> Ки,

1 Ки=3,7 ° 10<sup>10</sup> Бк.

**Объемную или удельную активность** измеряют в беккерелях на кубический метр (Бк/м<sup>3</sup>) или в беккерелях на литр (Бк/л).

Раньше применялась единица удельной активности эман (э): 1э=3,7 Бк/л=10<sup>-10</sup> Ки/л.

**Экспозиционная доза ионизирующего излучения** измеряется в кулонах на килограмм (Кл/кг). 1 Кл/кг равен дозе излучения, при которой сумма электрических зарядов ионов одного знака, созданных в облученном воздухе массой 1 кг, равна одному кулону.

Ранее применялась единица экспозиционной дозы - рентген (Р).  
 $1Р=2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг,  $\sim$  Кл/кг=3,38 ° 10<sup>3</sup> Р.

Наиболее часто при поисках и разведке радиоактивных руд используют понятие "**Мощность экспозиционной дозы (МЭД)**".

МЭД - это экспозиционная доза, отнесенная к единице времени, за которое получена эта доза.

**Единицей мощности дозы** является ампер на килограмм (А/кг).

При мощности дозы 1 А/кг за 1 с экспозиционная доза возрастает на 1 Кл/кг.

Внесистемная единица МЭД ионизирующего излучения - рентген в секунду или ее производная - микрорентген в час (мкР/ч);

1 пА/кг=13,95 мкР/ч, 1 мкР/ч=0,0717 пА/кг, 1 мкР/ч=2,78 ° 10<sup>-10</sup> Р/с.

В **дозиметрии** при изучении влияния ионизирующих излучений на организм человека используют понятия поглощенная доза и эквивалентная поглощенная доза. **Единица поглощенной дозы - грей (Гр)**.

**Один грей равен одному джоулю, поглощенному в килограмме вещества:  
1 Гр=1 Дж/кг.**

Единицей эквивалентной дозы, введенной для оценки опасности облучения, является Зиверт (Зв), равный одному грею, деленному на коэффициент качества, который зависит от вида излучений.

### **Коэффициенты качества Q при хроническом облучении тела человека**

<b>Вид излучения</b>	<b>параметр Q</b>
Гамма и рентгеновское	1
бета-излучение	1
альфа (α)	10
Протонное (p)	10
Нейтронное (тепловое, медленное, резонансное)	3
Нейтронное (промежуточное)	6-9
Нейтронное (быстрое)	10-7
Тяжелые ядра отдачи	20

**Зиверт заменил внесистемную единицу эквивалентной поглощенной дозы - бэр (биологический эквивалент рентгена);**

Переход от единиц рад и бэр к единицам СИ может быть выполнен по соотношению:

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад/ Q} = 100 \text{ бэр.}$$

## ТЕМА 5 ЛЕКЦИЯ 5. ГАММА - МЕТОДЫ

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ и ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫЕ ГАММА-ПОЛЯ

Полевые радиометрические методы базируются на изучении  $\gamma$ -полей, создаваемых естественными радиоактивными элементами.

**Для физического обоснования методов используют результаты расчетов  $\gamma$ -полей различных по форме и размерам излучающих тел.**

На их основе решают методические задачи, оценивают глубинность методов, а также вырабатывают и обосновывают требования, предъявляемые к измерительной аппаратуре

Расчеты полей составляют основу для количественной интерпретации результатов, при которой определяют размеры рудных тел простейшей формы и концентрацию в них радиоактивных элементов.

Гамма-методы ядерной геофизики основаны на изучении  $\gamma$ -полей искусственных радионуклидов.

При этом, как правило, имеют дело с полями, создаваемыми точечными источниками  $\gamma$ -излучения, прошедшего через образец или слой горной породы.

**Точечным источником любого вида излучения считают источник малой величины, поглощением излучения внутри которого можно пренебречь.**

Такому условию удовлетворяют и образцовые источники радия, применяемые для градуировки полевых  $\gamma$ -радиометров.

МЭД  $\gamma$ -излучения точечного источника, содержащего  $m$  ( мг ) радиоактивного вещества на расстоянии  $r$  ( в м ) от него, характеризуется уравнением :

$$I_{\gamma} = \frac{K_{\gamma} m}{r^2} (e^{-\mu r})$$

где  $K_{\gamma}$  - гамма постоянная точечного источника излучения, содержащего 1 мг радиоактивного вещества, численно равная мощности экспозиционной дозы ( пА/кг ) на расстоянии 1м от него;

$\mu$ - линейный коэффициент поглощения  $\gamma$ -излучения воздухом ( в м<sup>-1</sup> ).

Установлено, что точечный источник, содержащий 1мг Ra в равновесии с продуктами последующих его превращений, помещенный в платиновый фильтр толщиной 0,5 мм, на расстоянии 1м  $\gamma$ -излучение МЭД которого соответствует 60,5 пА/кг.

**В полевых гамма-методах** имеют не с точечными источниками, а с излучателями, имеющими значительные размеры ( массивы горных пород, пластовые и жильные выходы, ореолы рассеяния рудных тел и т.д. )

Объемные или протяженные радиоактивные тела создают  $\gamma$ -излучение широкого пучка. В этом случае МЭД  $\gamma$ -излучения в точке наблюдений определяется проникшим через поглощающую среду излучением бесконечного множества точечных источников, а также рассеянными в результате комптоновского эффекта  $\gamma$ -квантами, источником которых может быть любая точка излучающего вещества.

Комптоновское рассеяние  $\gamma$ -квантов в породах приводит к изменению спектра  $\gamma$ -излучения : он становится непрерывным с преобладанием  $\gamma$ -квантов малых энергий и на него накладываются отдельные линии первичного излучения.

Такой спектр называется **аппаратурным** и зависит от эффективности детектора.

МЭД  $\gamma$ -излучения от радиоактивных тел различных форм и размеров рассчитывают исходя из **принципа аддитивности**, основанного на суммировании излучения точечных (элементарных) источников по всему объему вещества  $dV$ , выделенного в однородной излучающей среде с плотностью  $\sigma$  (г/см<sup>3</sup>) и концентрацией радиоактивного элемента  $q$  (г/г), находящегося на расстоянии  $r$  (в м) от детектора.

$$dI_{\gamma} = \frac{K_{\gamma}}{r^2} q \sigma dV e^{-\mu r}$$

МЭД излучения  $I_0$  на поверхности бесконечного по всем направлениям излучающего полупространства, состоящего из множества элементарных источников, может быть рассчитана по формуле, получаемой после трехкратного интегрирования по всему полупространству.

$$I_0 = \frac{2\pi K_{\gamma} q \sigma}{\mu_{эфф.а}}$$

Эта формула справедлива для мощности излучающего слоя, равной или большей насыщенной (около 100 г/см<sup>2</sup>).

Поглощение  $\gamma$ -излучения протяженных источников (в отличие от точечных) не подчиняется экспоненциальному закону, а выражается более сложной функцией Кинга

$$I_{\gamma} = I_0 \Phi(\mu_{эфф.}, H)$$

где  $I_{\gamma}$  - мощность (МЭД) гамма-излучения после прохождения слоя поглощающей среды мощностью  $h$ ;

$\Phi$  - табулированная функция Кинга.

МЭД  $\gamma$ -излучения полу бесконечной излучающей среды, закрытой наносами мощностью  $h$ , может быть вычислена по формуле:

$$I_{\gamma} = [2\pi K_{\gamma} q \sigma / \mu_{1эфф.}] \Phi(\mu_{2эфф.}, h)$$

где  $\mu_{1эфф.}$ ,  $\mu_{2эфф.}$  - эффективные коэффициенты поглощения гамма-излучения соответственно в излучающей среде и наносах.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ПОИСКОВ РАДИОАКТИВНЫХ РУД

**При поисках радиоактивных руд применяют четыре вида методов: геологические, геофизические, геохимические и горно-буровые.**

Каждый из этих видов включает, в свою очередь, различные типы и модификации исследований.

**Геологические методы** являются основными, определяющими общее направление поисковых работ. Они базируются на изучении геологического строения района и включают геологическую съемку, поисковые маршруты, минералогическое изучение пород и руд и т.п.

**Геофизические методы** основаны на изучении естественных и искусственно созданных физических полей и определении физических свойств горных пород. Геофизические методы в основном направлены на поиски глубоко залегающих рудных тел или месторождений, перекрытых мощным слоем рыхлых отложений. Среди геофизических методов выделяют методы общей геофизики (электроразведку, магниторазведку, гравиразведку, сейсморазведку) и радиометрические методы, занимающие ведущее место при поисках месторождений радиоактивных руд.

**Радиометрические методы основаны на измерении интенсивности ионизирующих излучений .**

**С помощью методов общей геофизики решают вспомогательные задачи при поисках месторождений радиоактивных руд (определение мощности рыхлых отложений, выявление и прослеживание зон дробления, контактов пород и т.п.) .**

**Геохимические методы основаны на изучении распределения химических элементов и их изотопов в пробах, взятых из горных пород, воды, растительности и почвенного воздуха.**

**Горно-буровые методы применяют при детальном изучении перспективных участков и при разведке и эксплуатации месторождений. Основная цель горно-буровых работ - создание искусственных обнажений коренных пород. При небольшой мощности наносов используют поверхностные горные выработки (канавы, расчистки, шурфы) .**

**При мощности наносов более 10 м применяют разбуривание участков с помощью картировочных скважин по отдельным профилям или заранее разбитой сети.**

## **ВИДЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ**

**Радиометрические методы используют для поисков и разведки месторождений радиоактивных руд и других полезных ископаемых, радиогеохимического картирования и литологического расчленения пород.**

**Радиометрию применяют в комплексе с другими исследованиями на всех этапах поисковых и разведочных работ, начиная от мелкомасштабных, рекогносцировочных и кончая детальной разведкой месторождений урана.**

**Основной задачей радиометрических поисков является выявление радиоактивных ореолов, находящихся в твердой, жидкой и газообразной фазах и сопровождающих ураново-рудные проявления.**

**Существует несколько типов классификации радиометрических методов: по условиям применимости, по видам ионизирующих излучений, по способам транспортировки .**

**По условиям применимости методы разделяют на :**

**лабораторные, полевые (поисковые}, разведочные (рудничные) и скважинные.**

**По видам излучений различают альфа-, бета- и гамма - методы.**

**По способам транспортировки они могут быть воздушными, наземными, подземными и подводными.**

**Условно к радиометрическим методам относят и радиогеохимические съемки, связанные с отбором и анализом проб пород, воды и растительности и изучением распределения в них ПРН и их элементов-спутников.**

**Большинство указанных групп радиометрических методов в свою очередь разделяют на виды и модификации.**

**Например, к поисковым методам относят гамма-съемку и гамма-спектрометрию (в пешеходном, автомобильном и воздушном вариантах), эманионную съемку в экспрессном и экспозиционном вариантах, радиогеохимию (включающую литогеохимию, гидрогеохимию, биогеохимию, изотопно-свинцовый метод), гамма-каротаж поисковых скважин.**



К разведочным методам относят гамма-опробование в естественном залегании, радиометрическую документацию подземных горных выработок, экспресс-анализ горной массы и др.

## ПЕШЕХОДНАЯ ГАММА-СЪЕМКА (ГАММА-ПОИСКИ)

### Условия применения и виды гамма-съемок

Пешеходная гамма-съемка является наиболее экономичным, эффективным и простым методом поисков месторождений радиоактивных руд.

Этот вид радиометрических исследований выполняют на всех этапах геологоразведочных работ.

Несмотря на высокую чувствительность, позволяющую обнаруживать аномалии, превышающие фон на несколько микрорентген в час (мкР/ч) (0,2 - 0,4 пА/кг), глубинность метода невелика.

Она определяется малой проникающей способностью гамма - квантов.

Слой дальнепринесных лессовидных суглинков, например, мощностью 0,5 - 0,8 м - практически полностью экранирует гамма-излучение радиоактивного объекта. Однако в реальных условиях при наличии вторичных ореолов рассеяния, размытых в остаточных корках выветривания, гамма-съемкой могут выявляться рудные объекты, находящиеся на глубинах более 2-3 м. Закрытые элювиально-делювиальными отложениями мощностью до 2 - 3 м, участки с расчлененным рельефом и горные районы.

Суммарное интегральное гамма-излучение горных пород регистрируют с помощью переносных гамма-радиометров типа СРП-68-01 или СРП-88.

Мощность экспозиционной дозы измеряемого гамма-излучения зависит от концентрации в породах ПРН: урана, тория, продуктов их распада и калия, состава пород, условий измерений и применяемой аппаратуры.

При проведении гамма-съемки следует иметь в виду, что в урановом радиоактивном ряду практически все гамма-излучение (более 98 %) связано с радием и продуктами его распада (уран является альфа-излучателем), поэтому, "чисто урановые" объекты могут быть пропущены гамма-съемкой. Тем не менее, в большинстве случаев результаты гамма-съемки дают достаточно четкое представление о перспективах участка, а при работах на выходах коренных пород или в пределах площадей, закрытых маломощными щебенистыми корками выветривания, данные гамма-съемки аналогичны результатам более трудоемких радиометрических исследований (рис.5. 1) .

В зависимости от геологических задач, масштаба исследований, обнаженности пород, глубины залегания представительного для поисков горизонта применяют различные модификации гамма-съемки: маршрутную - по отдельным профилям или маршрутам (при мелко- и средне масштабных поисках); площадную - по сети (при детальном поисках и изучении ранее выявленных аномалий); шпуровую - по отдельным профилям или по сети (при мощности рыхлых отложений 1 - 2 м); радиометрическую документацию поверхностных горных выработок (канав, шурфов и т.п.) .

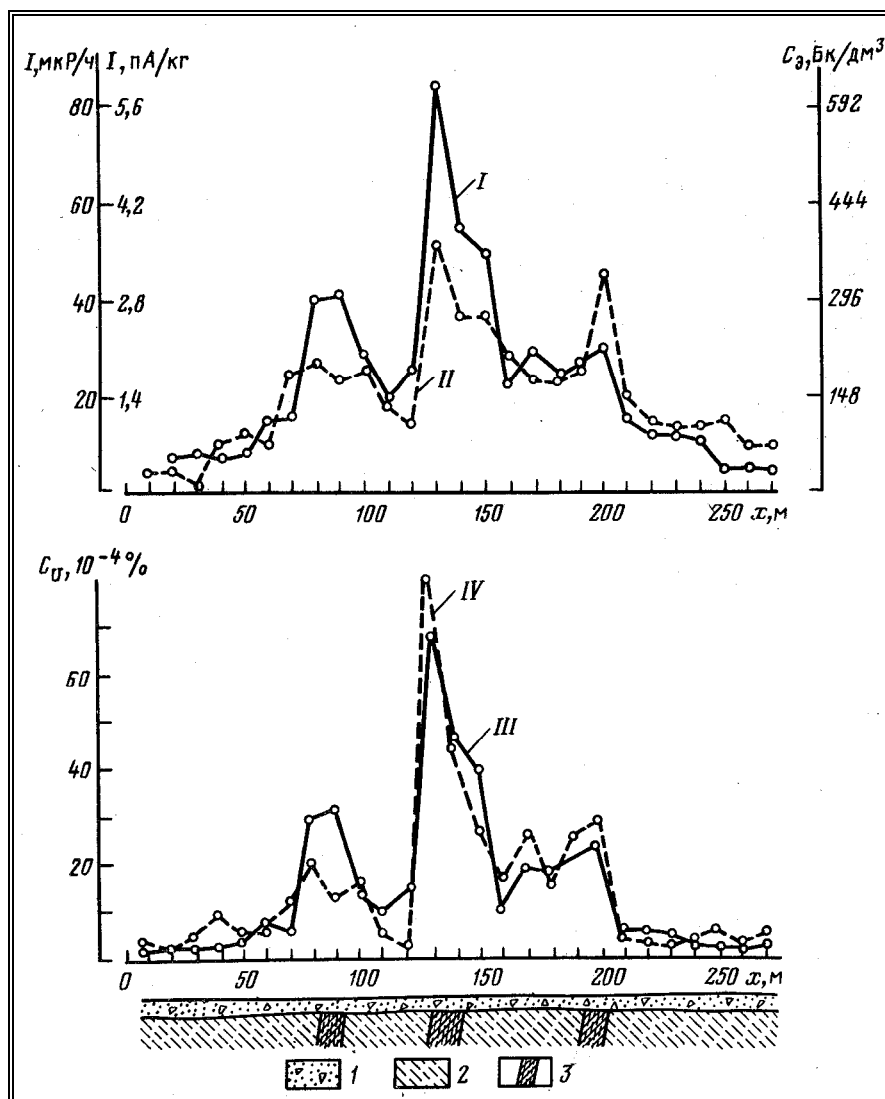


Рис.5. 1. Результаты гамма съемки (I), эманационной съемки (II), наземной (III) и шнуровой (IV) гамма-спектрометрии на участке развития малоэнергетических кор выветривания:

1 - щебенистая кора выветривания, 2 - гнейсы, 3 - рудные зоны;  $I$  - мощность экспозиционной дозы гамма-излучения,  $C_{эм}$  - концентрация эманации,  $C_u$  - концентрация урана

При решении поисковых и оценочных задач данные гамма-съемки служат для выделения участков с аномальной радиоактивностью пород, характеристики параметров выявленных аномалий (размеры, максимальные значения, контрастность и т.п.), определения геологической приуроченности аномалии, выявления аномальных интервалов для отбора проб на различные виды анализов, изучения нормального поля радиоактивности пород.

## Маршрутная гамма-съемка

Маршруты гамма-съемки обычно направляют вкрест простирания преобладающих геологических структур и зон тектонических нарушений с учетом рельефа местности и направления гидросети.

Маршрутную съемку выполняет бригада из двух человек: геолога и радиометриста (оператора).

Все измерения МЭД гамма-излучения производит радиометрист, геолог в это время ведет геологическую документацию. Плотность точек наблюдений по маршруту зависит от масштаба съемки и сложности геологического строения территории. В табл. приведена ориентировочная плотность радиометрических наблюдений при маршрутных поисках в зависимости от масштаба работ.

Плотность наблюдений при маршрутных поисках			Плотность наблюдений при площадной гамма-съемке в зависимости от масштаба исследований		
Масштабы работ	Расстояние между точками наблюдений, м	Плотность наблюдений на 1 км <sup>2</sup>	Масштабы исследований	Расстояние между профилями, м	Расстояние между точками измерений, м
1:200 000	50 – 100	10 – 20	1:50 000	500	50 – 20
1:100 000	20 – 50	50 – 70	1:25 000	250	20 – 10
1:50 000	10 – 50	100 – 150	1:10 000	100	10 – 5
			1:5 000	50	5
			1:2 000	20	5 – 2

Сгущение точек наблюдений по маршрутам производят на участках со сложным строением (чередование разновидностей пород, зоны гидротермальных изменений, зоны трещиноватости и дробления и т.п.) . На таких участках расстояния между точками наблюдений уменьшают в 2 раза. Направление маршрутов при мелкомасштабной гамма-съемке в районах со слабо расчлененным рельефом задают по компасу, расстояние

определяют шагами или ориентировочно по карте. В районах с резко расчлененным рельефом съемку проводят по сети криволинейных маршрутов - водоразделам, берегам рек и т.п.

Перед началом работ оператор получает задание и производственный инструктаж (в том числе, по технике безопасности), проверяет работоспособность и комплектность аппаратуры и оборудования.

При выполнении маршрута оператор-радиометрист прослушивает в телефон радиометра уровень скорости счета импульсов не только по линии маршрута (профиля), но и в полосе 50-100 м в сторону от него.

Особенно внимательно изучаются выходы коренных пород, горные выработки и их отвалы, осыпи, свалы, крупные валуны, зоны разломов и участки измененных пород.

При прослушивании уровня радиоактивности радиометрист медленно передвигается по маршруту со скоростью не более 1 - 2 км/ч, внимательно следя за изменением тональности звука в телефоне радиометра и держа блок детектирования (гильзу радиометра) на расстоянии 5-10 см от земной поверхности, и производит фиксированные измерения через определенные интервалы. Измерения выполняют, прислонив блок детектирования к поверхности пород.

В полевой журнал записывают усредненное показание прибора за время не менее 5 с.

При выявлении повышенных значений МЭД гамма-излучения, превышающих фон в 2 раза, маршрут прерывают, проверяют работоспособность радиометра рабочим источником и в случае его нормальной работы проводят повторные замеры на точках с повышенной гамма - активностью.

При подтверждении аномалии производят ее детализацию. При этом прежде всего измеряют МЭД гамма-излучения с шагом 5 - 10 м в обе стороны по направлению маршрута до уверенного выхода в нормальное поле. Подобные измерения проводят и по нескольким детализационным профилям, расположенным в 10 - 20 м справа и

слева от основного маршрута (профиля). В максимумах гамма-активности производят расчистку почвенного слоя геологическим молотком с последующим измерением интенсивности гамма-излучения в закопушках.

Закономерное возрастание с глубиной величины МЭД гамма-излучения по ряду соседних закопушек является одним из признаков перспективности аномалии.

Аномалии закрепляют на местности турами (пирамида из камней) и вехами; схему детализации заносят в полевой журнал. Работы по детализации аномалий радиометрист проводит под руководством геолога.

## **Площадная гамма-съемка**

**Площадную гамма-съемку (гамма-съемку по сети)** проводят при специализированных поисках урана и при детальном изучении выявленных аномальных участков. Масштаб съемки определяют на этапе проектирования работ. Плотность наблюдений при гамма-съемке по сети в зависимости от масштаба исследований приведена в табл. .

Все наземные измерения при проведении площадной гамма-съемки выполняют по предварительно разбитой на полуинструментальной основе топографической сети.

Отсчеты по стрелочному индикатору снимают при положении блока детектирования на поверхности пород в строго фиксированных точках. Методика полевых работ и детализация аномалий аналогичны таковым при маршрутной гамма-съемке.

Результаты площадной гамма-съемки ежедневно наносят на карты графиков.

## **Шпуровая гамма-съемка**

**Шпуровую гамма-съемку** проводят, как правило, на перспективных площадях, закрытых рыхлыми отложениями мощностью 1 - 2 м. В отдельных случаях, при наличии элювиально-делювиальных образований с развитыми вторичными ореолами рассеяния, шпуровые поиски проводят и при мощности наносов более 2 м.

Неблагоприятны для применения шпуровой съемки участки, закрытые осыпями, грубообломочными и ледниковыми (моренными) отложениями, мощным чехлом дальнепринесенных эоловых суглинков.

Шпуровую съемку выполняют прибором СРП-68-03( СРП-88 Н ) бригадой в составе оператора-радиометриста и рабочего. Шпуры готовят при помощи лома диаметром 40 мм или стальной трубы, один конец которой заострен. Оператор измеряет МЭД гамма-излучения на устье и забое шпура.

При опускании блока детектирования в шпур прослушивают скорость счета импульсов в телефон радиометра.

В шпурах с аномальными значениями МЭД гамма-излучения измерения выполняют в нескольких точках при подъеме блока детектирования.

Обнаружив аномалию, оператор должен убедиться в нормальной работе прибора и провести детализацию по схеме, аналогичной для пешеходной съемки.

## **Радиометрическая документация поверхностных горных выработок**

Радиометрическую документацию поверхностных горных выработок - канав, расчисток, шурфов - выполняют с помощью радиометров СРП-68-01 (СРП-88-01).

Обычно измерения проводят совместно с геологической документацией выработки. Фиксированным измерениям МЭД гамма-излучения предшествует прослушивание скорости счета импульсов в телефон радиометра при перемещении блока детектирования по стенкам и дну выработки.

При отсутствии аномальных значений МЭД гамма-излучения, фиксированные измерения проводят по сети 3 x 1 м, в пределах аномальных участков - по сети 0,2x0,2 м.

При четком литологическом или структурном контроле измерения выполняют по профилям с интервалом между точками 1 м в нормальном поле и 0,1 - 0,2 м в пределах аномалий. Измерения в общем случае проводят по одной стенке и полотну выработки (при исследовании канав, расчисток, карьеров) и по двум стенкам и полотну выработки - при выявлении аномалий.

При низких значениях МЭД гамма-излучения измерения проводят незранированным детектором. В горных выработках, вскрывших аномальные интервалы, применяют гамма-опробование со свинцовым экраном.

## ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

### Физические и геохимические основы гамма-спектрометрии.

#### Общие положения. Виды съемок

**Гамма-спектрометрические съемки** (пешеходные, автомобильные, воздушные, подводные и скважинные) позволяют определять концентрации природных радионуклидов: урана (по радию), тория и калия в различных средах - в горных породах, воде и воздухе.

**Гамма-спектрометрический метод** основан на различиях спектрального состава гамма-излучения урано-радиевого и ториевого рядов и калия.

Приборы, с помощью которых определяют концентрации ПРН, называются **спектрометрами** или **концентрометрами**.

Интенсивность гамма-излучения в любой точке пространства может быть представлена уравнением

$$I_{\gamma} = aC_u + bC_{Th} + cC_k$$

где  $C_u$  и  $C_{Th}$  - концентрации урана и тория,  $10^{-4}$  %;  $C_k$  - концентрация калия, %;  $a, b, c$  - коэффициенты, учитывающие вклад соответствующих ПРН в регистрируемую интенсивность гамма-излучения.

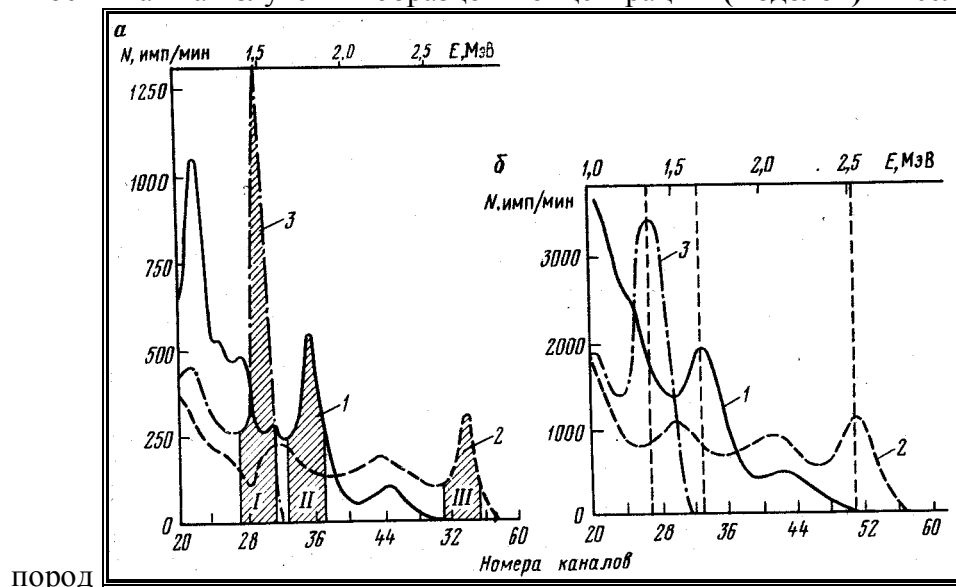
Такие уравнения могут быть получены путем измерений спектров гамма-излучения специальных образцов (моделей) урана, тория и калия с известными концентрациями этих ПРН.

На рис.5.2 приведены дифференциальные, т.е. последовательно измеренные через определенные интервалы энергий, спектры гамма-излучения урано-радиевой, ториевой и калиевой моделей с известными концентрациями этих ПРН. В приведенных спектрах отдельными отчетливыми максимумами выделяются спектральные линии 1,12; 1,76; 2,2 МэВ - на урановом образце, 1,46 МэВ - на калиевом и 2,62 МэВ - на ториевом образце.

Эти гамма-линии соответствуют не родоначальникам радиоактивных рядов - урану-238 и торию-232, а их короткоживущим продуктам распада - висмуту-214 и талию-208, гамма-линия 1,46 МэВ также соответствует не элементу калий-39, а

радионуклиду калий-40. Однако для большинства геолого-поисковых задач возможность определения концентраций "материнских" элементов по их короткоживущим продуктам оказывается вполне корректной, поэтому обычно говорят о гамма-спектрометрических определениях концентраций урана, тория и калия.

Концентрации ПРН в коренном залегании пород определяют сравнивая интенсивности гамма-излучения образцов концентраций (моделей) и исследуемых



**Рис.5.2. Аппаратурные спектры гамма-излучения урана (1) и тория (2) в равновесии с продуктами распада калия (3) при ширине энергетических интервалов 50 (а) и 200 кэВ (б): 1, 11, 111 - рабочие каналы**

в трех определенных интервалах спектра (рабочих окнах или рабочих каналах). Оптимальными границами рабочих окон при измерениях спектрометрами со сцинтилляционными детекторами являются следующие интервалы энергий: 1,35 - 1,55 МэВ, 1,65 - 1,85 МэВ, 2,5 - 2,8 МэВ.

Пример положения трех рабочих каналов для пешеходного гамма-спектрометра приведен на рис.5.2. По принадлежности основной гамма-линии к тому или иному ПРН первый интервал, включающий гамма-линию 1,46 МэВ, называется "калиевым", второй (1,76 МэВ) - "урановым", третий (2,62 МэВ) - "ториевым".

Концентрации урана и тория выражают в  $10^{-4}$  %, а калия - в % до  $10^{-1}$  %.

Например, концентрации урана, тория и калия 5,14 и 32, определенные с помощью спектрометра или концентрометра, в действительности равны  $5 \times 10^{-4}$  %,  $14 \times 10^{-1}$  % и 3,2 %.

Рассмотренные кратко физические основы полевой гамма-спектрометрии являются общими для всех ее модификаций (пешеходной, автомобильной, воздушной, скважинной).

**Много общего и в системе градуировки, контроля, работы, учета мешающих факторов и в направлении исследований.**

Геохимическими предпосылками применения полевой гамма-спектрометрии при поисках месторождений радиоактивных руд являются закономерное поведение урана, тория и калия в процессах магматической деятельности, рудообразования, осадконакопления, а также установленные радиогеохимические признаки урановых месторождений.

Широкий круг конкретных геолого-геохимических задач, решаемых гамма-спектрометрией в комплексе с другими геолого-геофизическими методами, можно условно объединить в два взаимосвязанных направления: обнаружение аномальных

концентраций ПРН, которые могут быть прямыми или косвенными признаками месторождений радиоактивных руд; изучение первичного распределения ПРН в горных породах с целью получения дополнительной информации о перспективах территории.

Первое направление характерно для крупномасштабных исследований и включает определение природы радиоактивных аномалий, изучение ореолов рассеяния рудных тел, картирование зон гидротермальных изменений.

Второе направление относится к мелкомасштабным работам, в процессе которых изучаются особенности распределения ПРН в горных породах.

**В настоящее время для решения этих задач применяется несколько модификаций полевой гамма-спектрометрии: а) пешеходная, б) интервальная, в) автомобильная, г) аэрогамма-спектрометрия, д) спектрометрический гамма-каротаж (СГК).**

**Полевые гамма-спектрометрические** исследования проводят в соответствии с проектом работ и геологическим заданием, в котором формулируют задачу поисков, определяют размеры площади, масштабы и объемы работ и модификации применяемых методов.

Для обеспечения воспроизводимости и достоверности результатов гамма-спектрометрических съемок ежедневно контролируют качество работы аппаратуры. Действенными способами контроля являются регулярные утренние и вечерние измерения контрольного источника или малой рудной модели, а также наблюдения по контрольным профилям.

Относительная средняя квадратическая погрешность наземных гамма-спектральных измерений не должна превышать ~15 % для средних и высоких концентраций ПРН и 30% для низких концентраций.

При проведении гамма-спектрометрической съемки следует иметь в виду, что во время дождя и в течение 3 ч после него работы должны быть остановлены в связи с временным увеличением концентраций урана за счет осаждения и распада висмута-214.

Материалы гамма-спектрометрии обрабатывают обычными приемами математической статистики, определяя основные параметры распределения концентраций ПРН: фоновые концентрации, их дисперсии, минимальные аномальные значения и т.п.

Основной итоговый документ пешеходных съемок - карты графиков концентраций ПРН или отдельные графики концентраций. Для авто- и аэрогамма-спектрометрических съемок итоговыми являются карты изоконцентраций ПРН и их отношений.

## **Пешеходная гамма-спектрометрия**

Пешеходную гамма-спектрометрию применяют практически на всех этапах геологоразведочных работ. Проведение этого вида съемки наиболее целесообразно на участках с мощностью наносов не более 1-1,5 м, хотя в ряде случаев пешеходную съемку можно успешно применять и на площадях, закрытых более мощным чехлом рыхлых отложений. Прежде всего, этим методом изучают природу выявленных гамма-съемкой или аэрогамма-спектрометрией локальных аномальных участков и разделяют их на три основных типа: урановые (U), урано-ториевые (U+Th) и аномалии не урановой природы. Сложность решения этой задачи связана с тем, что все три указанных типа аномалий часто тесно контактируют друг с другом в пределах

переменного гамма-поля (рис. 5.3), а актуальность обусловлена тем, что только 5 % из всех выявленных гамма-аномалий представляют непосредственный поисковый интерес.

При проведении пешеходной гамма-спектрометрии используют в основном гамма-концентратор РКП-305 (\*КАРАТ\*) и одноканальный гамма-спектрометр СП-4.

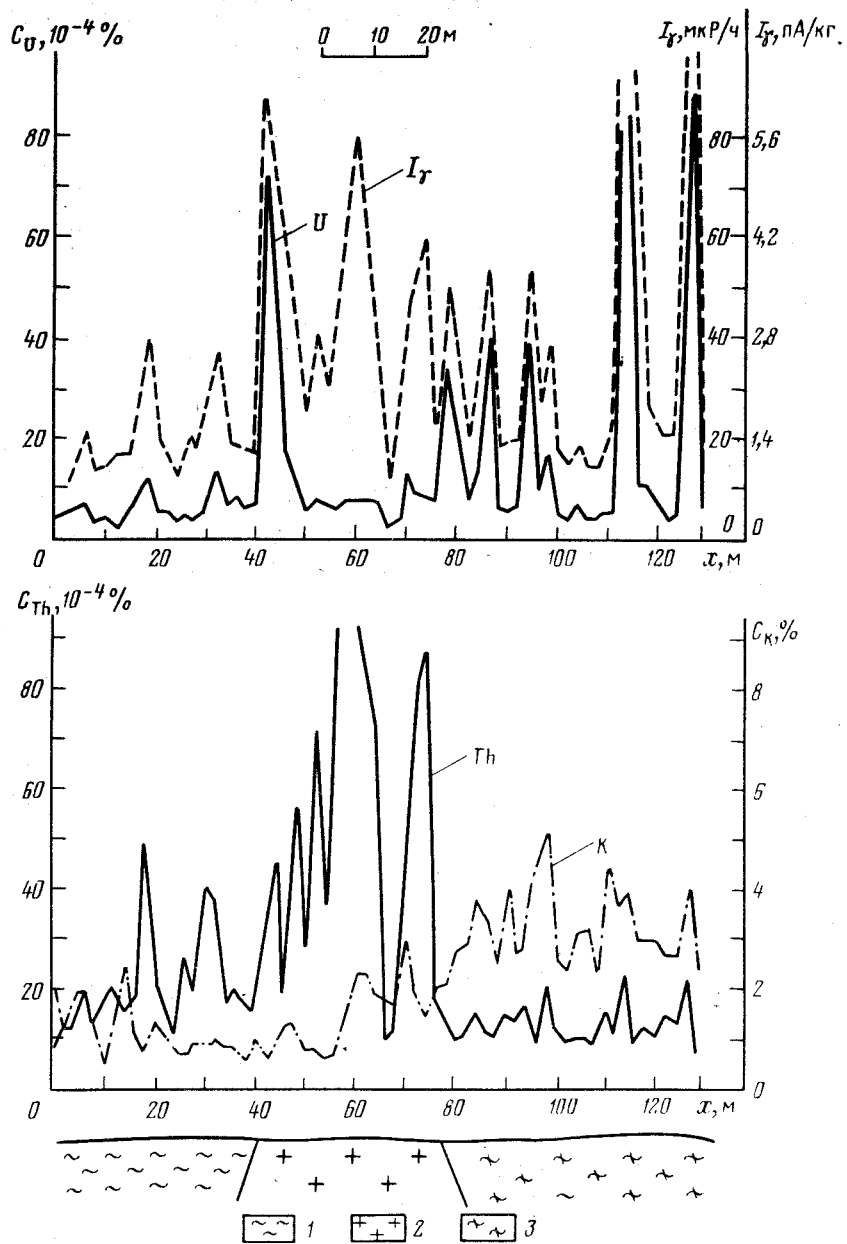
Перед началом рабочего дня оператор получает задание от инженера- геофизика с указанием участка работ, системы измерений, особенностей техники съемки и т.п., проверяет работоспособность прибора. Затем оператор производит измерения на малой рудной модели (МРМ). Прибор считается исправным, если измеренная концентрация ПРН (без фона) не превышает +5 % от средних значений, полученных ранее. При отсутствии МРМ работоспособность спектрометра оценивают на основании контрольных измерений применением ампульных радиевых источников типа Р-41.

По условиям и особенностям техники измерений различают: измерения на плоской поверхности пород с наземным блоком детектирования при отсутствии мешающего бокового излучения (2 $\pi$ -геометрия); измерения в шпурах диаметром не менее 45 мм и глубиной не менее 0,5 м (4 $\pi$ -геометрия) со шпуровым блоком детектирования; измерения в сложных геометрических условиях (горные выработки, локальные повышения и понижения рельефа и т.п.) .

Измерения на земной поверхности следует проводить в центре горизонтальной площадки размером не менее 1 м<sup>2</sup>, при измерениях в шпурах центр сцинтилляционного кристалла должен располагаться на глубине более 0,5 м от поверхности. При исследованиях в горных выработках различной конфигурации и размеров в результаты измерений вводят поправочный коэффициент, величину которого определяют по кривым,

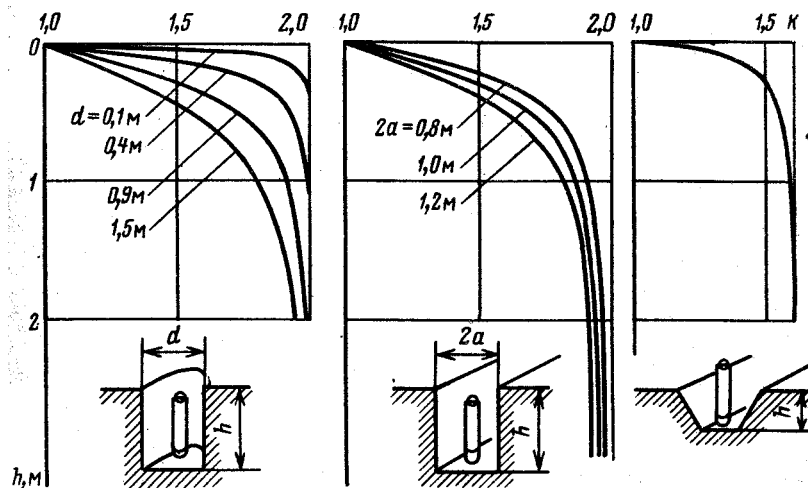
изображенным на рис. 5.4 для шурфа (левый), П-образной канавы (средний) и трапецеидной канавы (правый). Например, при ширине П-образной канавы 1,2 м и глубине 0,4 м поправочный коэффициент будет равен 1,5, т.е. измеренные прибором концентрации ПРН следует разделить на 1,5. Введение коэффициентов, естественно, не относится к измерениям со шпуровым блоком детектирования, так как его градуируют в 4 $\pi$ -геометрии.





**Рис. 5.3** Пример выделения урановых аномалий в высоком и переменном гамма-поле с помощью пешеходной гамма-спектрометрии:

1 - сланцы, 2 - граниты, 3 - гнейсы



**Рис.5.4. Кривые зависимости поправочных коэффициентов {K} от глубины, ширины и конфигурации горных выработок**

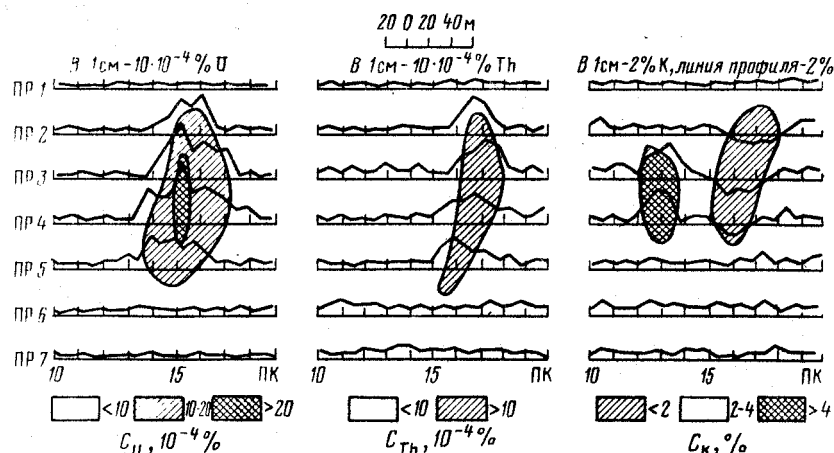
При региональных мелкомасштабных исследованиях и при изучении нормальной фоновой радиоактивности пород измерения производят на неизменных коренных породах каждой разновидности. Шаг (расстояние между точками измерений) зависит от размеров аномальных объектов и масштаба съемки и обычно составляет 5 - 10 м, расстояние между профилями зависит от масштаба съемки. При этом обязателен уверенный выход в нормальное гамма-поле, по которому оценивают фоновые концентрации ПРН и величину минимально-аномальных концентраций.

В поверхностных горных выработках измерения производят обычно с интервалом 1 - 2 м, в аномальных зонах - через 0,5 м.

Все полевые измерения заносят в полевой журнал, в который помимо скоростей счета для прибора СП-4 и концентраций ПРН для РКП-305 записывают сведения об условиях измерений, особенностях методики и т.п.

Первичная обработка материалов съемки включает вычисление концентраций ПРН для прибора СП-4, введение поправок на геометрические условия измерений и построение графиков распределения концентраций ПРН по профилям.

Основным итоговым документом пешеходной гамма-спектрометрии являются карты (планы) графиков концентраций ПРН (рис.5.5).



**Рис.5.5. Пример оформления результатов пешеходной гамма-спектрометрии**

На карты графиков наносят от одной до 3 - 5 изолиний концентраций каждого элемента. При этом первую изолинию первую изолинию выбирают на уровне минимально аномального значения. Горизонтальный масштаб целесообразно

выбирать на одну-две ступени крупнее масштаба съемки. Например, при съемке масштаба 1:5000 рекомендуется изображать результаты измерений в масштабе 1:2000, т.е. в 1 см - 20 м. Вертикальный масштаб графиков зависит от точности измерений, значения нормального поля и величины аномалий.

## Интервальная гамма-спектрометрия

Основное отличие интервальной гамма-спектрометрии от традиционных пешеходных (дискретных) измерений концентраций ПРН -совмещение процесса измерения и движения оператора по профилю, что позволяет увеличить в несколько раз производительность съемки. Преимуществом интервальной съемки по сравнению с обычной пешеходной является ее более высокая "представительность" за счет включения в процесс измерения всей полосы пород исследуемого профиля или маршрута. Это позволяет обоснованнее и проще рассчитывать значения различных отношений концентраций ПРН, так называемых мультипликативных показателей. Проведение интервальных съемок стало возможным благодаря разработке нового типа спектрометра-концентратора РКП-305, имеющего счетно-решающее и таймерное устройство.

При проведении интервальной съемки пульт прибора располагается на груди оператора, а блок детектирования - на спине или в руке.

Съемка в движении может проводиться по профилям и в маршрутном варианте, сопровождая геологические исследования. Оптимальный интервал усреднения - 25 (50) м, т.е. скорость движения радиометриста 25 (60) м/мин, оптимальные масштабы съемки - **1:25000 - 1:10000**.

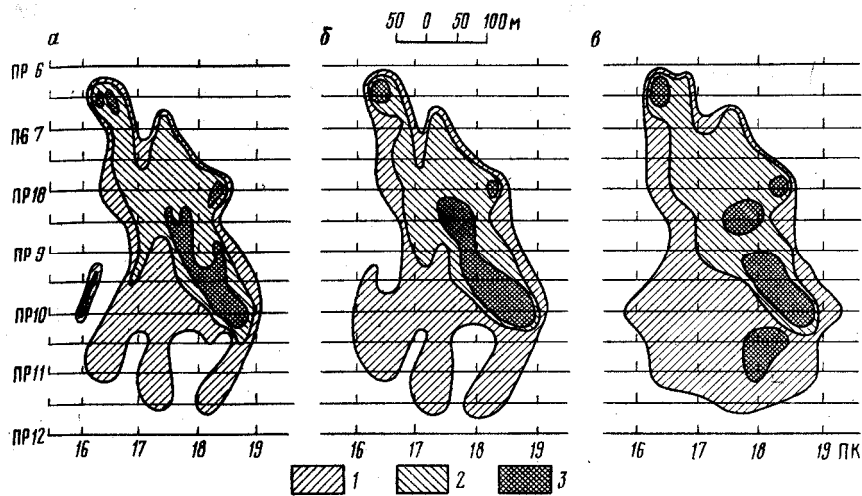


Рис.5.6. Данные пешеходной (а) и интервальной гамма-спектрометрии со скоростями съемки 25 м / мин {б} и 50 м / мин (в):

1, 2, 3 - участки с концентрациями урана соответственно 2, 5 и более 5 фонов (Гф )

В первую очередь, интервальные измерения применяют при изучении перспективных площадей, выявленных аэрогамма-спектрометрией или гидрохимическим опробованием поверхностных водотоков.

**Цель интервальной съемки - локализация участков для постановки в их пределах детальных исследований.**

После выделения и оконтуривания радиоактивных ореолов с помощью интервальной гамма-спектрометрии в пределах перспективных участков проводят пешеходную съемку более крупного масштаба для уточнения истинных размеров аномалий и определения реальных концентраций ПРН.

Интервальную гамма-спектрометрию успешно используют при изучении распределения ПРН в канавах и расчистках. При этом интервал усреднения составляет 1 - 2 м, а высота расположения детектора - 5 - 10 см над дном выработки. В результаты интервальных определений в канавах вводят поправки на геометрию измерений.

Величина аномалии интервальной съемки зависит от трех параметров (при постоянной высоте расположения детектора и определенного объема сцинтилляционного кристалла): ширины объекта концентрации ПРН интервала усреднения. Широкие ореолы рассеяния, зоны привноса и выноса ПРН четко выделяются на графиках интервальной съемки даже при незначительных изменениях концентраций ПРН. Сравнение данных точечных и интервальных измерений по одному из рудопроявлений урана приведено на рис. 5.6, из которого следует, что все основные особенности ореола урана, выявленного традиционной' съемкой, отмечаются по результатам интервальной гамма-спектрометрии.

## **Автомобильная гамма-спектрометрия**

**Цели и задачи автомобильной гамма-спектрометрии - выявление и оконтуривание радиоактивных аномалий в пределах перспективных участков и предварительная разбраковка аномалий.**

Попутно данные автогамма-съемки могут использоваться в целях геологического картирования, поисков нерадиоактивных полезных ископаемых и т.д.

Основное в преимущество этого вида съемки - оперативность получения результатов. Автогамма-спектрометрию проводят на открытых и полуоткрытых в равнинных, слабозалесенных и не заболоченных территориях с углами наклона местности не более 10%.

Для проведения съемки используют автогамма-спектрометры типа АГС-ЗМ, \*НЕВА\*, РСА-007, установленные на автомашине УАЗ-469. Гамма-спектрометры обычно имеют четыре рабочих канала, которые позволяют регистрировать гамма-кванты в режиме общего (интегрального) в счета и в трех дифференциальных каналах: урановом, ториевом и калиевом.

В режиме интегрального счета по каналу общего счета (ОК) суммарную интенсивность гамма-излучения измеряют в диапазоне энергий 0,2 - 3,0 МэВ. С помощью дифференциальных каналов оценивают концентрации ПРН. Заводская настройка каналов автогамма-спектрометров обеспечивает определение концентраций ПРН с достаточно высокой точностью. При соблюдении требований методики съемки абсолютные средние квадратические погрешности определения концентраций ПРН составляют для урана и тория (0,9 - 1,2) ° 10 %, для калия (0,2 - 0,3) % при измерениях около- кларковых концентраций ПРН. в

**Существуют два вида автогамма-спектрометрии:**

**а) маршрутная и б) площадная.**

**Маршрутную съемку применяют** при рекогносцировочных исследованиях средних и мелких масштабов (1:50 000 и мельче), площадную - в крупных масштабах по заранее подготовленной сети профилей. В отдельных случаях прокладывают только опорные магистрали, а профили разбивают глазомерно. Расстояния между магистралями в зависимости от характера рельефа местности и масштаба съемки изменяются от 0,5

до 3 - 4км. Оптимальные масштабы площадной автогамма-спектрометрии 1:10 000 - 1:5 000, средняя скорость движения автомобиля по профилю 10 - 15 км/ч.

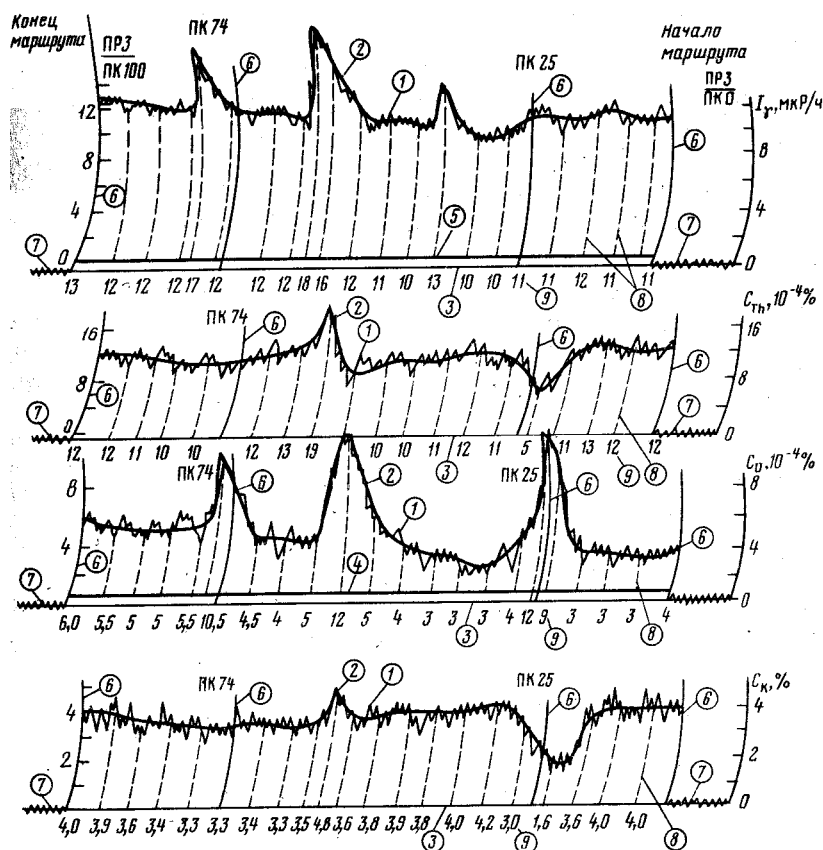
Соотношения масштабов, длины маршрутов и скоростей съемки приведены в

табл.5.1 . Методика полевых измерений включает следующие этапы: подготовку и проверку аппаратуры на контрольном пункте (КП), проверку чувствительности прибора на контрольном маршруте (КМ), измерения на рабочих маршрутах, детализацию выявленных аномалий.

Работы начинают с подготовки прибора в соответствии с технической инструкцией (инструкцией по эксплуатации) . Для этого на предварительно выбранном КП проверяют правильность расположения нулевых линий записи, установок масштабов шкал, записывают уровень фона по всем каналам и показания от контрольного источника на **малой рудной модели (МРМ)** .

Табл. 5,1

Масштабы и скорости съемки при автогамма-спектрометрии			
Масштабы съемки	Расстояния между маршрутами, м	Примерная длина маршрута, км	Скорость съемки, км/ч
1:25 000	250	3-4	15
1:10 000	100	2-3	10-15
1:5 000	50	1-2	7-10
1:2 000	20	0,5-1	7



**Рис.5.7. Пример обработки ленты записи автогамма-спектрометра:**  
 1 - кривая записи, 2 - усредняющая линия, 3 - нулевая линия, 4, 5 - нулевые линии, смещенные за счет вариаций гамма-поля, 6 - отметка пикетов, 7 - запись «нулевой линии», 8 - дуги палетки, У - концентрации ПРН и МЭД гамма-излучения по профилю

На ленте регистратора записывают диапазоны и шкалы измерений, дату, погодные условия.

По завершении работ на КП экипаж в составе водителя и оператора выезжает на контрольный маршрут протяженностью 400 - 600 м. В процессе съемки оператор

ведет визуальные наблюдения за характером записи прибора и прохождением маршрута.

На ленте записи отмечают начало и конец маршрута, номера пикетов с аномальными значениями концентраций ПРН, характер обнаженности местности.

При проведении авто-съемки без предварительно разбитых профилей аномалии закрепляют на местности вехами, каменными или земляными турами. Любую выявленную аномалию, как правило, проверяют повторным заездом со скоростью 3 - 5 км/ч. Работу завершают заездом по КМ и последующими измерениями на МРМ.

Полевая камеральная обработка материалов автогамма-спектрометрии включает расшифровку и первичную обработку лент записи, введение поправок, составление карт концентраций ПРН. Обработку начинают с просмотра лент и расшифровки условных знаков, которыми оператор в процессе съемки отмечает ориентиры, характер наносов, развороты и т.д.

На лентах записи проводят усредняющие линии, выделяют **экстремальные** значения, при этом особое внимание обращают на характер записи по наиболее чувствительному общему каналу. Пример обработки ленты записи автогамма-спектрометрии приведен на рис.5,7.

**Отчетными документами автогамма-спектрометрии являются карты концентраций ПРН и карты гамма-поля.**

## **Аэрогамма-спектрометрия**

**Аэрогамма-спектрометрия (АГСМ, АГСМ-съемка) - наиболее скоростной метод поисков радиоактивных руд, а также других полезных ископаемых, имеющих генетическую или корреляционную связь с ПРН.**

Данные АГСМ-съемки широко используют при геологическом картировании территории поисков.

АГСМ-съемки проводят, в основном, с помощью аэрогамма-спектрометрической станции СКАТ-77, в состав которой кроме гамма-спектрометра входят аэромагнитометр и аэроэлектроразведочная аппаратура.

Аэрогамма-спектрометрическую аппаратуру устанавливают на самолетах типа АН-2 и вертолетах МИ-8 и МИ-4.

**Наиболее благоприятны для проведения АГСМ-съемок районы с хорошей обнаженностью, маломощным чехлом элювиально-делювиальных отложений, с колебаниями высот до 200 м, с активно проявленной тектонической деятельностью и наличием открытых ореолов рассеяния (U) урана.**

В аэросъемочных работах участвуют летные и наземные отряды. Сотрудники летных отрядов выполняют съемку, обрабатывают материалы, проводят их интерпретацию. Основным результатом работ летного отряда является выделение урановых аномалий. Наземные отряды предназначены для проверки и оценки перспектив аномалий, выявленных при аэросъемке.

**Различают следующие виды АГСМ-съемок: рекогносцировочные (масштабы 1:500 000 - 1:1 000), собственно съемочные (1:25 000 - 1:200 000 и детальные {1:10 000}).**

Высота съемки зависит от характера местности и может изменяться от 25 до 100 - 130 м.

**Кондиционными** считаются съемки, выполненные на высотах не более 75 м. При поисках радиоактивных руд оптимальными являются масштабы 1:25 000 - 1:10 000 и высота полета 50 м. Скорость съемки составляет для самолетов 160 - 170 км/ч, для вертолетов 110-130 км/ч.

В равнинных и среднегорных районах аэропоиски проводят по прямолинейным маршрутам, в горных районах - по криволинейным маршрутам, путем облета склонов по горизонталям.

Привязку сети наблюдений и выявленных аномалий производят фотографированием ориентиров или радиогеофизическим методом, обеспечивающим точность привязки маршрутов не хуже 10-15 м.

В состав экипажа самолета (вертолета), выполняющего АГСМ-съемку, входят командир, штурман, бортмеханик и борт оператор. Непосредственным исполнителем съемки является, который непрерывно контролирует процесс измерений и отвечает за качество работ.

Регулярные съемочные полеты начинают с проведения рекогносцировочного полета с целью ознакомления экипажа с местностью, окончательного выбора контрольного маршрута, участка компенсации остаточного фона и проверки креновой девиации. По результатам рекогносцировки окончательно определяют расположение маршрутов и все подлежащие привязке ориентиры. Вблизи территории съемки выбирают радиометрический контрольный маршрут (РКМ) длиной 3 - 4 км, вдоль которого проводят измерения в начале и конце съемочного полета. РКМ должны иметь четкие ориентиры и монотонно изменяющиеся концентрации ПРН. Измерения на РКМ необходимы для проверки работоспособности аппаратуры и для учета влияния внешних помех на результаты съемки.

**Наиболее важный аспект АГСМ-съемок - выделение и детализация радиометрических аномалий.**

Обычно под детализацию выделяют локальные аномалии, величина пика записи которых по интегральному каналу превышает порог уверенного отсчета в 1,5 раза и более. Детализацию проводят на возможно малой высоте. Вначале повторяют записи аномалии и уточняют ее положение на местности. В случае подтверждения аномальной записи производят серию залетов из четырех-шести коротких маршрутов длиной 2 - 4 км с расстоянием между маршрутами 60 - 100 м в обе стороны от центра аномалии. Перспективные аномалии изучает наземный отряд.

**Оценку аномалии проводят в один или два этапа, каждый из которых включает предварительную и детальную проверки.**

На этапе предварительной проверки определяют параметры аномалии, природу радиоактивности, геологическую приуроченность.

Целью детальной проверки является выявление прямых признаков уранового оруденения и ориентировочная оценка его масштаба.

**Обработку материалов АГСМ-съемки проводят в два этапа - полевой и камеральный.**

Обработку выполняют а) \* вручную\*, б) с применением ЭВМ.

Полевая обработка включает расшифровку лент записи, выделение аномальных значений и определение их параметров, построение карт концентраций ПРН, карт локальных аномалий, карт полей  $\gamma$ -излучений, карт отношений элементов ( $\frac{U}{Th}$ ) и т.п.

В камеральный период выполняют окончательную обработку материалов АГСМ-измерений.

В результате окончательной обработки составляют крупномасштабную и мелкомасштабные карты гамма-поля, концентраций радиоэлементов и аномальных записей.

#### **Лабораторные ядерно-геофизические методы**

При поиске, разведке, эксплуатации МПИ, при оценке абсолютного возраста геологических образований и при решении др. задач

**пробы рыхлых отложений , коренных пород и руд  
пробы керна, воды, газа...**

Их вещественный состав определяется следующими методами:

1. химическими ;
2. радиометрическими ( ядерно-физическими );
3. радиохимическими.

**Химические методы**

а) чувствительны для (  $U + Th$  ), но плохи для определения продуктов их распада;

б) характеризуются высокой точностью, но в то же время - сложен, дорог, трудоемок, малопроизводителен ( Примечание: может быть использован для контроля и при производстве \* эталонов\* ).

**Радиометрические и радиохимические** основаны на регистрации излучений.

В радиометрических методах пробы измельчают.

Радиохимические ( Это комбинация радиометрического анализа с некоторой химической обработкой образца ).

Химическая обработка проводится:

1. для повышения концентрации искомых химических элементов;
2. для выделения его в удобном для излучения виде.

Это приводит:

- к повышению чувствительности и точности определений;
- к уменьшению помехи со стороны других радиоэлементов.

**Радиохимический анализ применяется** для определения продуктов распада (  $U + Th$  )  $Ra$  и его изотопов  $AcX$ ,  $ThX$ .

- У радиохимического метода:
1. Точность соизмерима с точностью химического анализа;
  2. он в 4-5 раз дешевле;
  3. в 5 - 6 раз производительнее;
  4. можно регистрировать любое излучение ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

В пробах с **ненарушенным равновесием** - регистрировать любое излучение.

В пробах с нарушенным равновесием производить комплексные ( $\beta + \gamma$  излучения) или проводить спектральный анализ.

К группе радиометрических методов относится **метод РАДИОГРАФИИ** ( фотографическое воздействие излучения на фотопластинку). Этот метод определяет концентрацию и состав химических элементов.

**Эффективность лабораторного анализа** зависит:

- от подготовки образцов для исследований;
- от правильного отбора проб

Чем больше неоднородность пород, тем больше должна быть масса отбираемой пробы. Методика исследований:

1. удаление выветрелых участков;



## 2. измельчение пробы до состояния порошка.

**Радиометрический метод** заключается в **сравнении показаний прибора для исследуемого и \* эталонного \* образцов.** (Причем измерения образца и \* эталона\* производятся в одинаковых условиях).

В результате содержание элемента определяется по формуле:

$$C_{\text{пр.}} = I_{\text{пр.}} \frac{C_{\text{Эт.}}}{I_{\text{Эт.}}} \quad \text{где } C_{\text{пр.}} - \text{содержание искомого элемента в пробе,}$$

$C_{\text{Эт.}}$  - содержание элемента в \* эталоне \*,

$I_{\text{пр.}}$  - показания прибора ( в определенных единицах ) от действия исследуемого образца,

$I_{\text{Эт.}}$  - показания прибора ( в тех же единицах ) от образцового источника ( \* эталона\* ).

формула справедлива при содержании в пробе и \* эталоне\* ( образцовый источник) одного радиоактивного изотопа.

Если в образце несколько семейств изотопов или изотопы одного семейства ( но в неравновесных количествах), то применяют систему уравнений.

Результаты ( в обоих случаях ) представляют в эквивалентных единицах активности радиоактивных элементов.

Чаще всего применяют \* эталоны\* с равновесным содержанием урана, а

$$C_{\text{пр.}} = \text{экв.ед. U / на ( г ) породы}$$

Исследуемые порошковые пробы и \*эталонны\* насыпают в спец, кассеты, форма которых зависит от детектора излучения.

По соотношению между толщиной образца ( d ) и длиной пробега ( l ) регистрируемых частиц различают :

- тонкий ,
- промежуточный,
- толстый ( слои ).

Толщина насыщенного слоя для { U + Th } руд :

$$d = 30 \text{ мг/см}^2 \quad ( \alpha - \text{излучение} );$$

$$d = 1,5 \text{ г/см}^2 \quad ( \beta - \text{излучение} );$$

$$d = 100 \text{ г/см}^2 \quad ( \gamma - \text{излучение} ).$$

Измерения насыщенным слоем возможны только для  $\alpha$  и  $\beta$  - излучений.

В  $\alpha$ -методах используются интегральные и импульсные камеры.

Диаметр пробы = 30-40 мкм. Слой ( l ) - 1 мм.

На фиксированном расстоянии помещают пробу и \* эталон\*.  
Расчет - концентрация радиоэлементов берется в экв. ед. равновесного ( U ).  
Результаты зависят от соотношения плотностей активного вещества и горных пород.

## ТЕМА 6 ЛЕКЦИЯ 6. ЭМАНАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### ЭМАНАЦИОННАЯ СЪЕМКА

#### Общие положения. Модификация метода

**Эманационные методы - наиболее чувствительные и глубинные из всех современных методов радиометрии.** Они основаны на изучении распределения в горных породах и перекрывающих отложениях радиоактивных газов (эманаций) - радона, торона и актинона( Rn, Tn, An ), которые образуются при распаде радия-226 и его изотопов: радия-224 и радия-223. Основные характеристики радиоактивных газов приведены в табл.

Радиоактивные газы, распространяясь в различных направлениях от эманлирующего объекта, образуют эманационные ореолы, обнаружение которых и является одной из основных задач полевого эманационного метода.

Выделение эманаций в трещины горных пород и воздушное пространство называется эманированием.

В количественном отношении эманирование характеризуется **интенсивностью эманирования  $I_{эм}$ , эманлирующей способностью ( $R_{эм}$ ), коэффициентом эманирования  $K_{эм}$ .**

**Интенсивность эманирования** определяется количеством эманации, выделяемой 1 г породы в 1 с.

**Эманлирующая способность** определяется количеством эманации, выделяемой 1 г породы за время, достаточное для установления радиоактивного равновесия с материнским изотопом радия.

**Коэффициентом эманирования** называется отношение количества эманации, выделившейся за определенное время из эманлирующего тела, ко всему количеству эманации, образовавшемуся в нем за тот же промежуток времени.

**$K_{эм}$**  изменяется от первых процентов - в монолитных коренных породах, до 90 - 98 % в разрушенных и выветрелых образованиях.

Большую роль в механизме образования эманационных ореолов играют природные воды. Миграция радона в природных водах может при вести к его переносу на многие десятки метров от эманлирующего объекта. Однако практическая глубинность метода не превышает 10 - 15 м, а глинистые отложения мощностью 2 - 3 м могут полностью экранировать эманлирующий объект.

**Торон ( Tn )** распространяется в горных породах на расстояние в несколько десятков сантиметров, однако при небольшой мощности наносов вклад тороновой

оставляющей в суммарную концентрацию эманации может намного превышать вклад от радона.

**Концентрация радона** прямо пропорциональна коэффициенту эманирования, концентрации урана, плотности породы, коэффициенту радиоактивного равновесия и обратно пропорциональна пористости породы.

Высокие концентрации эманации могут быть и не связаны с урановыми проявлениями, а обусловлены другими причинами, например, высокой эманацирующей способностью зон дробления и трещиноватости.

Поэтому разбраковка эманационных аномалий является сложной комплексной проблемой.

Наибольший поисковый интерес представляют эманационные ореолы, характеризующиеся следующими признаками: радоновой или радон-тороновой природой эманации; концентрациями **Rn**, превышающими фон в 5 раз и более; увеличением концентрации эманации и интенсивности гамма-излучения с глубиной; наличием аномалий урана в пределах эманационных ореолов; значительными размерами (сотни и тысячи квадратных метров).

Существуют несколько способов измерений концентрации эманации, которые условно можно разделить на две группы: **экспрессные ( традиционные )** и **экспозиционные ( статические )**.

Традиционные способы основаны на принудительном (динамическом) отборе проб грунтового воздуха с помощью насоса и последующей регистрации сцинтилляций, возникающих под воздействием альфа- частиц в слое сернистого цинка **ZnS(Cu)**, покрывающего стенки измерительной камеры.

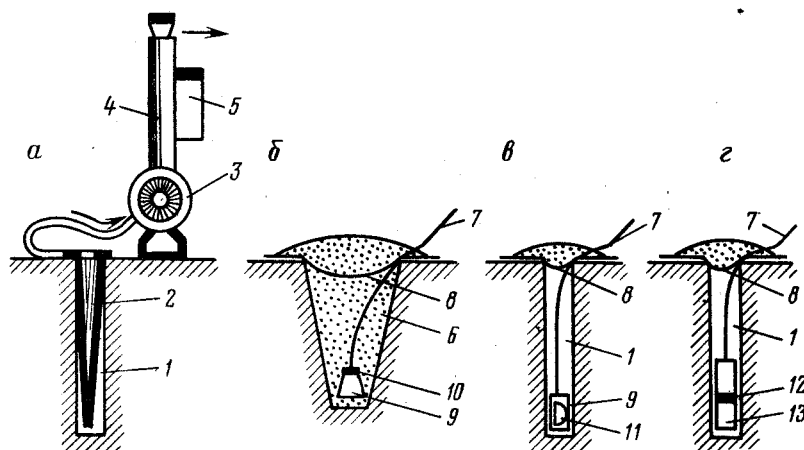


Рис. 6.1. Схема расположения детекторов и адсорбентов при эманационных измерениях экспрессным способом (а), трековым методом (б), способом активного налета (в) и альфаметрией (г):

1 - шпур, 2 - пробоотборник, 3 - сцинтилляционная камера, 4 - насос, 5 - измерительный пульт, б - копуша, 7 - проволока, 8 - рубероид, 9 - кассета, 10 - пленочный детектор, 11 - адсорбент, 12 - ППД, 13 - альфаметр

При определении концентрации эманации с помощью **статических** (экспозиционных) методов, измерительные устройства (пленочные и полупроводниковые детекторы или адсорбенты) помещают на длительную экспозицию (отсюда и название методов} непосредственно в грунт. Экспозиция может изменяться в зависимости от модификации эманационной съемки от 3 - 4 до 30 суток.

**Преимущество традиционной съемки** заключается в ее высокой производительности и оперативности получения результатов (время измерения на точке составляет 1 - 3 мин); недостаток - в больших статистических погрешностях измерений, связанных с метеорологическими условиями и методикой отбора проб. При наличии переувлажненных наносов отбор проб вообще невозможен, при щебенистом характере рыхлых отложений происходит разубоживание грунтового воздуха атмосферным. Эти факторы затрудняют выделение слабых эманационных аномалий, что может привести к пропуску перспективных объектов.

**Преимуществом экспозиционных методов** является их высокая чувствительность, хорошая воспроизводимость и возможность проведения измерения в пределах заболоченных и обводненных участков;

**недостатками экспозиционных методов** является трудоемкость и не оперативность получения информации.

Из нескольких видов скоростной эманационной съемки в настоящее время применяется один - съемка с альфа-радиометром РГА-01 \*Глициния\* и (РГА-500).

Наибольшее распространение из экспозиционных методов **имеют**

**а) способ активного налета (САН) и б) эманационный трековый метод (ЭТМ).**

Схема расположения детекторов и адсорбентов при измерениях различными модификациями эманационного метода приведена на рис. 6. 1.

## **Эманационная съемка с прибором РГА-01**

Наиболее благоприятными для проведения скоростной эманационной съемки с прибором РГА-01 являются площади развития рыхлых отложений однородного состава мощностью от 2 до 5 м, неблагоприятными - территории с хорошей обнаженностью, широким развитием осыпей, моренных (ледниковых) отложений, заболоченности и многолетней мерзлоты.

**Скоростную эманационную съемку** применяют на различных этапах геологоразведочных работ. Съемку масштабов 1:50 000 - 1:25 000 (сеть наблюдений (500 - 250) x (20 - 10) м) применяют для выявления отдельных месторождений и рудоконтролирующих структур. Работы в этих масштабах проводят с предварительной разбивкой магистралей, положение профилей определяют с помощью топографической карты и компаса.

**Детальную эманационную съемку масштабов 1:10000 - 1:50000, 1:2000)** проводят, как правило, в пределах перспективных участков по предварительно подготовленной сети наблюдений с расстояниями между профилями 100 - 50 (20) м и шагом измерений 5 - 10 м.

**Целью детальной эманационной съемки** является выявление и оконтуривание отдельных рудых тел на флангах известных месторождений, а также прослеживание под наносами тектонических нарушений и зон трещиноватости.

**Скоростную эманационную съемку** проводят бригадой, состоящей из радиометриста- оператора и одного-двух рабочих.

В обязанности радиометриста входят подготовка аппаратуры к работе, качественное проведение измерений, предварительная детализация аномалий и их закрепление на местности вехами, турами и т.п., правильное ведение полевой документации.

Обязанности рабочего заключаются в подготовке шпуров заданной глубины, установке пробоотборника и трамбовке верхней части шпуров, помощи оператору в

закреплении аномалий на местности, подготовке вспомогательного оборудования (кувалды, ломы, шланги) к работе.

Перед началом рабочего дня оператор проверяет готовность аппаратуры, вспомогательного оборудования и инструмента и получает дневное задание, в котором должны быть указаны название участка работ, номера профилей и пикетов, величина концентрации эманации, начиная с которой аномалию необходимо детально изучать, и т.п.

Процесс измерения концентрации эманации в точке наблюдения состоит из следующих операций:

включение и проверка работоспособности альфа-радиометра (эманометра) с помощью контрольного источника плутония-239; проходка шнура глубиной 0,6 - 1,0 м с помощью лома;

установка в шпур пробоотборника, соединенного шлангом с устройством детектирования (УД); измерение натурального фона прибора; отбор пробы грунтового воздуха с помощью насоса; измерение концентрации эманации; определение природы эманации в аномальных точках; удаление пробы воздуха из камеры многократным прокачиванием насосом; запись измеренных значений в полевой журнал; переход на следующую точку наблюдения.

Интенсивность альфа-излучения контрольного источника плутония-239 измеряют не менее трех раз в день: перед началом маршрута, после окончания маршрута и в середине рабочего дня.

При значительной зараженности стенок камеры радиоактивными осадками, уменьшающейся при дополнительном прокачивании, производят замену рабочей камеры. Зараженную активными осадками камеру промывают в мыльной воде с помощью тампона из ваты. Ввиду того, что светосостав, нанесенный на стенки камеры, и сцинтиллирующая пластмасса, приклеенная к торцу ФЭУ, имеют некоторое "послесвечение", измерения с новой камерой проводят не раньше, чем через 5 мин после ее замены.

Для предотвращения подсоса атмосферного воздуха тщательно герметизируют шпур. Оптимальное количество качаний насоса при отборе пробы грунтового воздуха зависит от длины шланга и объема сцинтилляционной камеры. В среднем, число качаний насоса при отборе пробы составляет 5 - 7. Если поршень насоса перемещается с большим усилием, то необходимо проверить состояние пылеуловителя и шлангов.

Затрудненный пробоотбор может быть связан и с переувлажненностью шнура; в этом случае необходимо приготовить новый шпур и произвести повторный отбор пробы.

При наличии на профиле различных помех для нормального пробоотбора (обнажения пород, осыпи, болота) измерения проводят в стороне от профиля.

Величину аномальной концентрации эманации, подлежащей детализации, для каждого конкретного участка определяет инженер-геофизик.

Максимумы концентраций эманации закрепляют на местности турами, вехами и т.п. Схему детализации заносят в полевой журнал.

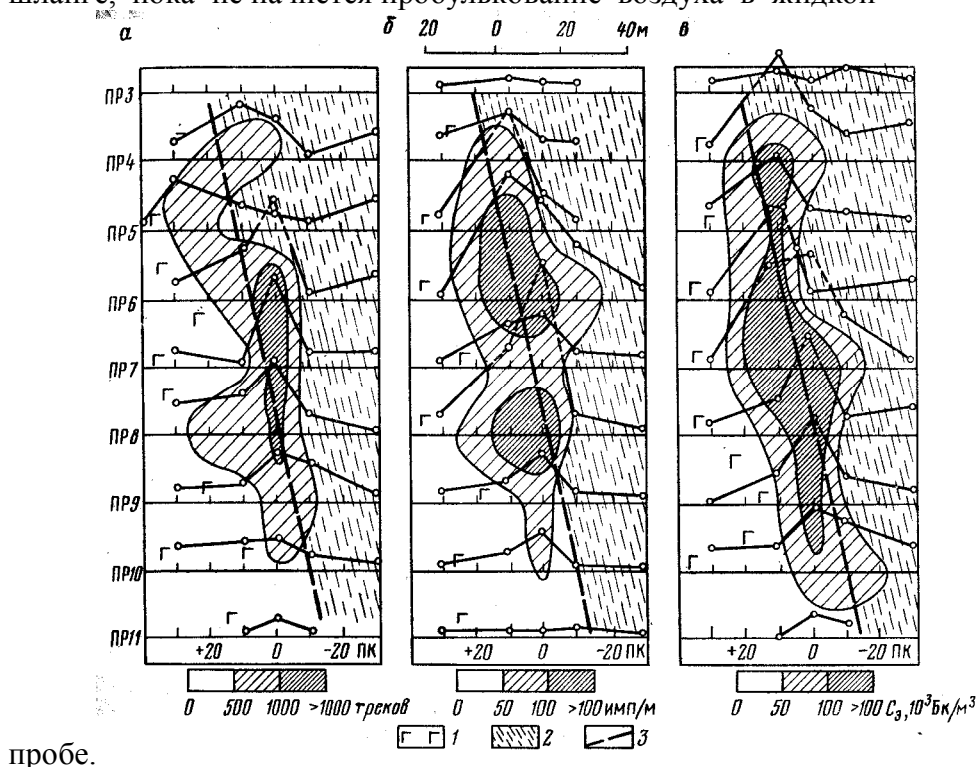
Суммарную концентрацию эманации  $C_{\text{сумм}}$  в (Бк/м<sup>3</sup>) определяют по формуле

$$C_{\text{сумм}} = \Pi \times 10^3$$

где  $\Pi$  - показания прибора.

При отдельных определениях концентраций радона и торона ( $T_n$ ) фиксируют "мгновенный" отсчет и отсчет через 100 с.

Для измерения объемной активности эманации в жидких пробах соединяют шлангом емкость с жидкой пробой и входной штуцер устройства детектирования, пережимают шланг зажимом, откачивают воздух из камеры прибора, освобождают зажим на патрубке емкости с жидкостью, плавно опускают зажим на соединительном шланге, пока не начнется пробурькование воздуха в жидкой



пробе.

Рис.6.2. Пример оформления результатов скоростной эманационной съемки:  
1 - графики концентраций эманации, 2 - результаты контрольных измерений,  
3 - концентрация радона, 4, 5 - участки с концентрацией эманации, соответственно  
(50 - 100) · 10<sup>3</sup> и более 100 · 10<sup>3</sup> Бк/м<sup>3</sup>, 6 - граниты, 7 - песчаники, 8 - разломы

Затем в течение 2 - 3 мин переводят радон в сцинтилляционную камеру и производят измерения, как указано выше, определяя концентрацию радона и торона по специальным формулам.

Природу эманационных аномалий можно ориентировочно определить и без формул, по характеру измерения показаний прибора во времени. Если показания увеличиваются или не изменяются в первые минуты после введения пробы в камеру, значит аномалия имеет радоновую природу; если показания медленно уменьшаются, то природа аномалии - смешанная, (радоно-тороновая); уменьшение показаний в 2 раза через каждую минуту говорит о тороновой (**Tn**) природе; резкий спад показаний в течение 1 - 2 мин свидетельствует о попадании в камеру пыли.

Контрольные измерения при проведении эманационной съемки выполняют в объеме не менее 5 % от первичных. Свидетельством хорошего качества измерений является повторяемость графиков концентраций эманации первичного и контрольного маршрутов. При этом абсолютные значения аномалий и фона при первичном и повторном измерениях могут расходиться.

Основными полевыми документами эманационной съемки являются полевые журналы и карты графиков концентраций эманации по профилям. В полевом журнале записываются дата, название участка, привязка точек, измерения, глубина шпура, положение переключателей, результаты измерений, характер наносов, особенности методики съемки.

Пример оформления результатов скоростной эманационной съемки приведен на рис. 6.2.

## **Эманационная съемка способом активного налета**

Эманационная съемка способом активного налета (САН) относится к экспозиционным эманационным методам поисков урана и заключается в измерении интенсивности альфа-излучения продуктов распада эманаций, осевших на адсорбентах, помещенных в специальную кассету - накопительную камеру.

САН - единственный из экспозиционных методов, в котором вместо детектора альфа-излучения в грунт помещается диск или квадрат из материала, хорошо адсорбирующего продукты распада радона (полиэтиленовая пленка, майлар, жесть площадью 80 - 100 см<sup>2</sup>). По сравнению с другими статическими эманационными методами САН более экономичен, прост и оперативен.

Классический вариант метода САН предусматривает установку в заранее подготовленную бурку (копушу) глубиной не менее 60 - 80 см цилиндрической измерительной камеры-кассеты объемом 1 дм<sup>3</sup> с закрепленным внутри ее адсорбентом (см. рис. 6.1, в), последующее извлечение адсорбента после экспозиции от 3 до 24 ч и измерение альфа-радиометром интенсивности альфа-излучения продуктов распада эманаций.

Камеру засыпают грунтом, а экспозиция определяется временем установления стационарного режима, необходимого для достижения радиоактивного равновесия между радоном и продуктами его распада.

Теоретические расчеты и практика работ показывают, что стационарный режим в выработках диаметром 30 - 40 см и глубиной 60 - 80 см, пройденных в суглинках, наступает через 3 - 4 ч и дальнейшее увеличение экспозиции не приводит к росту альфа-активности продуктов, накопившихся на адсорбенте. Обычно камеру с адсорбентом устанавливают в грунт на одни сутки с тем, чтобы работы проходили циклично.

Для увеличения производительности работ используют шпуровой вариант метода САН. В этом случае в качестве накопительной камеры применяют пластмассовый стакан диаметром 35 мм и высотой 140 мм.

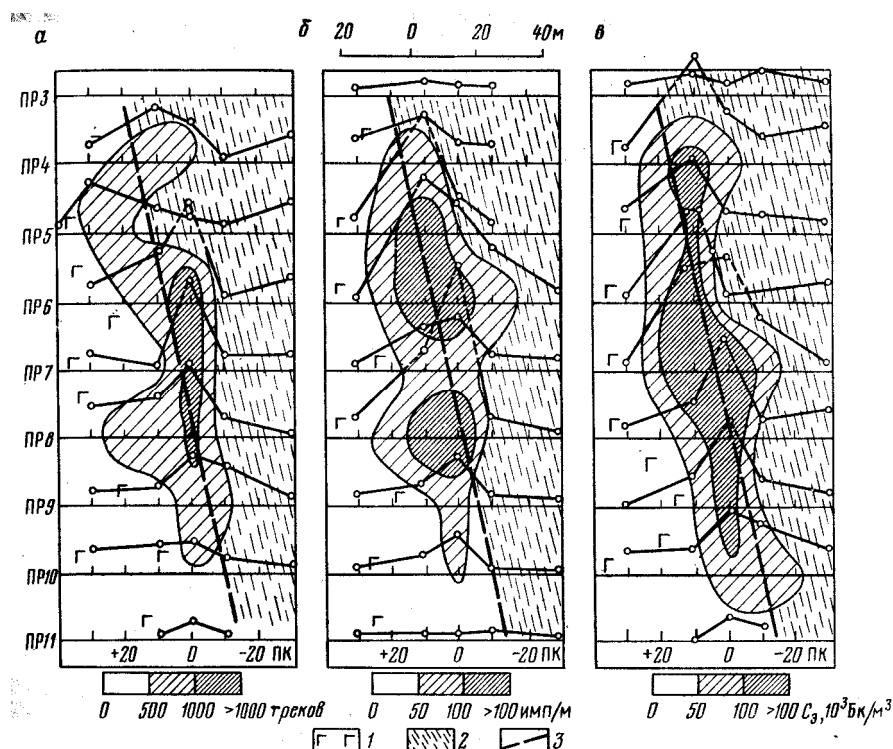


Рис. 6.3 Сравнение данных эманационных съемок ЭТМ(а). САН (б) и с прибором РГА-01 (в) на участке, закрытом маломощными наносами:  
1 - андезиты, 2 - алевриты, 3 - разломы

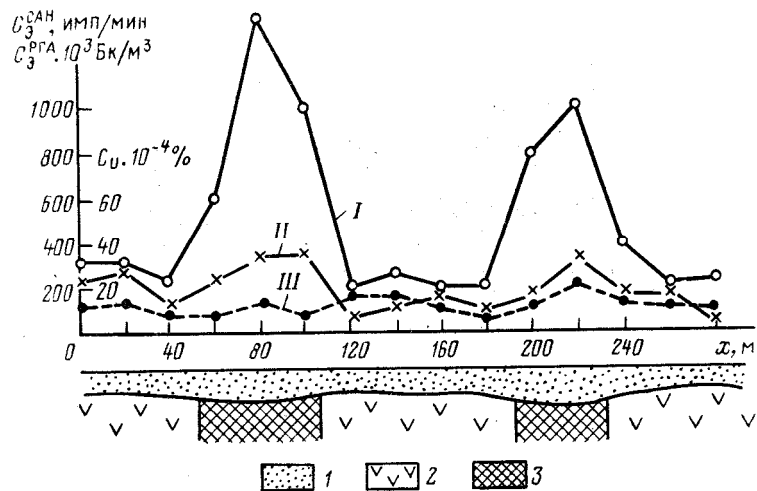
Полиэтиленовый адсорбент располагают по образующей боковой поверхности внутри камеры. Следует отметить, что повышение производительности шпурового метода САН связано с понижением чувствительности съемки, так как регистрируемый эффект пропорционален размерам измерительной камеры.

Камеру извлекают из шпура с помощью привязанной к ней проволоки, вынимают адсорбент и максимально оперативно с помощью альфа-радиометров измеряют его альфа-активность.

Эманационную съемку САН целесообразно применять при мощности наносов более 5 м, так как при маломощном чехле рыхлых отложений результаты метода САН сопоставимы с данными более оперативного экспрессного метода.

На рис.6.3 приведены результаты экспозиционных съемок САН и ЭТМ и традиционных измерений с прибором РГА-01 на участке, перекрытом наносами мощностью менее 2 м. Как видно из рис. 6.3 контрастность выявленной аномалии и ее размеры, полученные с помощью всех трех видов съемок, примерно одинаковы. При увеличении мощности наносов преимущество съемки САН по сравнению со скоростной съемкой становится очевидным (рис. 6.4) .





**Рис. 6.4. Сравнение результатов эманационных съемок САН (I) с прибором РГА-01 (II и гамма-спектрометрических измерений концентраций урана (III) над рудными зонами, закрытыми наносами мощностью более 6 м**  
**1 - наносы, 2 - фельзиты, 3 - рудные зоны** 1

Полевые работы методом САН проводит бригада, состоящая из радиометриста (оператора) и рабочего. Рабочий день бригада начинает с получения задания, проверки аппаратуры и оборудования, настройки прибора, подготовки кассет и адсорбентов. При проведении съемки обращают особое внимание на глубину бурок (копюш). Они не должны быть мельче 60 см. Бурки с помещенными в них кассетами герметизируют.

Для этого их засыпают грунтом, а в шпуровом варианте - закрывают куском рубероида, на который насыпают грунт. Для удобства извлечения кассет к ним прикрепляют проволоку, конец которой должен выходить на поверхность. По окончании экспонирования (обычно на следующий день после установки кассет) оператор вынимает адсорбент и прикладывает его к чувствительной поверхности блока детектирования той стороной, которая была обращена в сторону камеры. Время измерения обычно составляет 1 - 2 мин; в любом случае регистрируют не менее 50-100 импульсов. После измерения адсорбент убирают в специальный пенал, результаты наблюдений заносят в полевой журнал.

По завершении полевых наблюдений на базе партии повторно измеряют альфа-активность аномальных адсорбентов с целью определения соотношения концентраций радона и торона.

Результаты измерений съемки САН обычно выражают во внесистемных единицах - импульсах в минуту. Для их перевода в принятые в СИ единицы концентраций эманации Бк/м<sup>3</sup> или Бк/дм<sup>3</sup> (Бк/л) измерительные устройства градуируют и определяют градуировочный коэффициент, равный отношению единицы концентрации радона к количеству зарегистрированных распадов за время измерения.

Данные измерений представляют в виде карт графиков или карт изоконцентраций эманации (см. рис. 6.3).

### **Эманационный трековый метод**

Сущность эманационного трекового метода (ЭТМ) заключается в том, что чувствительную к альфа-излучению пленку устанавливают в измерительной камере в грунт и после экспонирования в течение 25 - 30 суток извлекают и обрабатывают для выявления видимых следов (треков) альфа-частиц. Затем под микроскопом

подсчитывают количество треков и определяют дозу альфа-излучения, полученную детектором во время экспонирования.

Положительной особенностью ЭТМ является возможность его применения на заболоченных территориях, в обводненных скважинах, в открытых водоемах.

В качестве детекторов в ЭТМ применяют кино- и фотопленки из нитрата или триацетата целлюлозы. Перед применением с пленки снимается фотоэмульсия. В качестве измерительных (накопительных) камер используют пластмассовые стаканы диаметром 50 мм и высотой 70 мм с перфорированной крышкой.

Куски пленки размером 35x35 мм прикрепляют нечувствительной стороной к дну камеры с помощью проволочной рамки или специального кольца. Камеру с пленкой закрывают крышкой с предварительно просверленными отверстиями для доступа грунтового воздуха и устанавливают в бурку глубиной не менее 60 - 80 см дном вверх; бурку засыпают грунтом и оставляют на 25 - 30 суток. Почвенный воздух за счет диффузионно-конвекционного переноса заполняет камеру, а альфа-частицы эманации, взаимодействуя с веществом детектора, образуют в нем треки.

При помещении кассет с пленками в воду следят за тем, чтобы камера не заполнялась водой полностью и пленка находилась в воздушной прослойке. С помощью ЭТМ проводят трековый картаж скважин. Для этого гирлянду кассет, прикрепленных через определенные интервалы к тросу или капроновому шнуру с привязанным на конце грузы, опускают в скважину и оставляют на 25 - 30 суток.

После экспонирования пленку вынимают из кассеты и подготавливают к травлению в растворе едкого калия. Обработке подвергают одну четверть пленки, остальную часть сохраняют в качестве дубликата. Перед травлением пленку промывают в проточной воде. Травление проводят в течение 55 - 60 мин при температуре  $(68 \pm 1)^{\circ}\text{C}$  в 43 %-ном растворе едкого калия. Удобно травить пленки в обычном бытовом термосе. Затем пленки промывают, просушивают и производят подсчет треков с помощью микроскопов МИН-8 или МИН-6.

Результаты подсчета нормируют на 30 суток экспозиции и на 1 мм пленки. Например, пленка экспонировалась 28 дней, число треков в поле зрения микроскопа (2,6 мм) - 260. Нормированное число треков в этом случае будет составлять  $(260 \times 30) : (28 \times 2,6) = 108$  треков на 1 мм<sup>2</sup>.

подавляющая часть треков, оставленных на пленке, обязана своим происхождением радону и продуктам его распада, так как время, в течение которого эманация попадает в кассету, в экспозиционных методах таково, что основная часть торона распадается, не достигнув пленки.

Основными полевыми материалами ЭТМ являются полевые журналы, в которые заносят сведения об особенностях методики, привязке точек измерения, результаты измерений, характер наносов. Основные графические материалы ЭТМ - карты графиков нормированного числа треков с изолиниями концентраций эманации (см. рис. 6.3).

## ТЕМА 7

### ЛЕКЦИЯ 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ в БУРОВЫХ СКВАЖИНАХ и ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Для обслуживания разведочных работ в подземных горных выработках используют комплекс рудничных радиометрических методов исследований, в который входят: радиометрическое обследование (гамма-профилирование) стенок горных

выработок, гамма-опробывание, гамма-каротаж шпуров и скважин подземного бурения, экспресс-анализ на радиометрических контрольных станциях ( РКС ) горнорудной массы и ряд других исследований.

С помощью этого комплекса :

1. оконтуривают рудные тела, подсеченные горными выработками, скважинами и шпурами ;
2. определяют качество руд в массиве;
3. контролируют полноту выемки руды;
4. определяют массовые доли ( концентрации ) урана в добытой руде и в естественном залегании.

#### **РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ( ГАММА - ПРОФИЛИРОВАНИЕ )**

При разведке месторождений радиоактивных руд ведут первичную геологическую документацию, которую обязательно сопровождают радиометрическими измерениями МЭД  $\gamma$ - излучения руд и вмещающих горных пород.

Систематические радиометрические измерения ( $\gamma$ - профилирование ) разведочных выработок помогают проследить контакты рудных тел и выяснять связь оруденения с элементами геологического строения.

Радиометрические измерения проводят непосредственно вслед за проходкой разведочных выработок.

**Гамма-профилирование** выполняют с целью составления радиометрической документации кровли и стенок подземных выработок.

При гамма-профилировании проводят \* прослушивание \* с помощью телефона полевого ( рудничного ) радиометра интенсивности  $\gamma$ -излучения горной выработки путем передвижения блока детектирования радиометра по всему периметру выработки, начиная от подошвы к её правой стенке, кровле и левой стенке.

Фиксированные измерения выполняют на гамма-профиле, который проходит по оси выработки, в центре её, примерно на высоте 1,0 - 1,5 м от подошвы и ( реже ) раздельно по стенкам и по кровле выработки. Расстояние между точками измерений 1 м.

Кроме того, измерения проводят на контактах пород, в тектонических зонах, трещинах, о чем делают соответствующую запись в журнале документации.

Для оценки качества работ выполняют контрольные измерения в количестве не менее 10 % от числа рудных интервалов.

При выявлении повышенной МЭД гамма-излучения ( $\gamma$  - аномалии ) прекращают измерения и проверяют работоспособность прибора. Убедившись в нормальной работе радиометра, выполняют повторные измерения на точках, где была зафиксирована аномалия, и в случае её подтверждения в пределах аномального интервала проводят  $\gamma$ -опробывание.

Первичная обработка материалов заключается в переводе показаний радиометра в мкР/ч ( пА / кг ) и нанесении данных измерений на геологическую основу ( карту ) в виде графиков  $\gamma$ -активности или в виде плана изогамм.

Результаты всех измерений, проведенных с радиометром, записывают в специальный журнал документации.

**РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРОБЫВАНИЕ ( ГАММА-ОПРОБЫВАНИЕ ) ( ГО )** - метод определения массовых долей ПРН и мощности рудных интервалов в условиях горных выработок в естественном залегании по  $I_{\gamma}$ .

ГО применяют для определения границ рудных тел и концентрации в них радиоактивных элементов.

Метод находит широкое применение на всех стадиях разведки и при эксплуатации месторождений радиоактивных руд и характеризуется большой производительностью, высокой точностью и простотой работ.

В горных выработках одновременно с излучением руд опробуемого участка регистрируют излучение всех других источников, находящихся в выработке.

Для выделения излучения в пункте измерений на фоне всего мешающего излучения

1. при помощи цилиндрических экранов с окном в торце надеваемых на блок детектирования радиометра (например, СРП-68-01);
2. с помощью радиометров направленного приема (например, ПРН4-01\*Дедал\*).

В первом случае измеряют МЭД  $I_{\gamma 1}$  и  $I_{\gamma 2}$  (без экрана и с экраном соответственно), не изменяя положения детектора относительно поверхности опробуемых руд.

Концентрацию радиоактивного элемента в руде определяют из выражения:

$$q = V_{\varepsilon} (I_{\gamma 1} - I_{\gamma 2}) = V_{\varepsilon} (\Delta I_{\gamma})$$

где  $V_{\varepsilon}$  - коэффициент экрана;  $\Delta I_{\gamma}$  - разностный эффект.

При проведении опробования с направленным приемом излучения используют прибор радиометрический, рудничный, направленного приема), предназначенный для определения концентрации естественных радиоактивных нуклидов с автоматической компенсацией мешающего (фонового) излучения.

Компенсации гамма-фона обеспечивают, регистрируя разностное излучение, поступающее по двум каналам от двух сцинтилляционных детекторов, разделенных свинцовым экраном специальной формы.

В этом случае расчет производится по формуле:

$$q = V_{\text{п}} (I_{\gamma 1} - I_{\gamma 2}) = V_{\text{п}} (\Delta I_{\gamma})$$

где  $V_{\text{п}}$  - коэффициент прибора.

Коэффициенты экрана  $V_{\varepsilon}$  и прибора  $V_{\text{п}}$ , численно равные МЭД гамма-излучения в пА / кг, приходящейся на 0,01 % равновесного  $U$ , определяют опытным путем на моделях и вычисляют по формулам (в %  $U$  на пА/кг).

Приборы, используемые для опробования, градуируют образцовым источником  $Ra$  через 7-10 дней работы.

Наиболее широкое применение находит методика опробования по профилям, которые ориентированы по мощности рудных тел, т.е. в направлении максимальной изменчивости оруденения.

Профили прокладывают по стенкам горных выработок, а при опробовании канав и расчисток - по дну.

Расстояние между профилями в зависимости от типа месторождения меняется от 0,5 до 15 м. Расстояние между точками измерений - 10 см.

Среднюю концентрацию  $U$  в руде по линии опробования рассчитывают по формуле

$$q = V_{\varepsilon} (V_{\text{п}}) (S/h)$$

где  $S$  - площадь аномалии;  $h$  - мощность рудного тела.

## ГАММА-ЭКСПРЕСС- АНАЛИЗ (ГЭА)

Сущность ГЭА заключается в быстрой ( экспрессной ) оценке по интенсивности гамма-излучения качества руд или содержания ( U, Th ) в добытых рудах, находящихся в различных транспортных емкостях.

По сравнению с геологическим опробыванием представительность данных при ГЭА повышается, т.к. анализируется вся руда, а не её часть.

По всем основным показателям ( оперативность, стоимость и даже точность ) ГЭА превосходит многие методы опробывания, принятые на месторождениях цветных и редких металлов.

Гамма-экспресс - анализ применяется:

- ◆ для контроля всей отбитой горнорудной массы, выдаваемой из шахт, который обеспечивает быстрое разделение руды по сортам и дальнейшую обработку на специальных технологических линиях ;
- ◆ для контроля добытых товарных руд, сырья и концентратов обогатительных фабрик, состоящего в определении количества полученного урана;
- ◆ для выявления и оценки потерь и разубоживания руд при их добыче;
- ◆ для автоматизации процесса откатки и сортировки вагонеток с горнорудной массой.

ГЭА производится на радиометрических контрольных станциях ( РКС ).

Так при вагонеточном опробывании (  $I_{\gamma}$  ) производят стационарным радиометром ( например, \* Алмаз\* ) по двум боковым поверхностям каждой вагонетки с рудой.

Концентрацию урана в руде рассчитывают по результатам градуировки радиометра с помощью серии эталонных вагонеток. В серию эталонных вагонеток включают две-три вагонетки с рудой различной концентрации и одну вагонетку с пустой породой.

Гамма-опробывание на РКС является одним из наиболее представительных способов опробывания, т.к. измеренная интенсивность гамма-излучения охватывает весь объем рудной массы вагонеток.

На больших рудниках на каждом горизонте ( обычно в конце главного откатного штрека ) находится своя подземная РКС.

Все вагонетки с рудой из забоев предварительно проходят через эту РКС, в результате чего вагонетки сортируют на рудные ( различных сортов ) и безрудные.

На небольших шахтах ( рудниках ) опробывание горнорудной массы и выделение заданных сортов руд выполняется одной установкой РКС, расположенной на поверхности шахты.

На крупных шахтах процесс вагонеточного опробывания руд обычно автоматизируют.

Автоматизированные контрольные станции ( АКС ) представляют такие же РКС, но оборудованные механизмами для самокатного передвижения вагонеток от ствола шахты до отвалов и бункеров.

АКС снабжены автоматическими радиометрами с пороговой настройкой срабатывания для выделения разных сортов руд и породы.

**Радиоактивный картаж ( РК )** предназначен для изучения как естественной радиоактивности горных пород, так и вторичной ( наведенной ) , возникающей в результате облучения горных пород внешними источниками гамма-излучений или нейтронов, а также для изучения явлений поглощения, замедления и рассеяния горными породами внешних ионизирующих излучений.

Основные методы радиоактивных ГИС: гамма-каротаж, гамма - и нейтронные методы, основанные на эффекте взаимодействия источников излучения с горными породами. Результатами такого взаимодействия является рассеяние или поглощение нейтронов и гамма-квантов. Неоднозначность ответной реакции позволила создать ряд модификаций радиоактивных методов, таких как нейтронный гамма-каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж, импульсные нейтронные методы, активационный каротаж, рентгенорадиометрический и др.

Методами ядерно-физического каротажа можно измерять параметры в обсаженных и не обсаженных скважинах, сухих или заполненных буровым раствором, определять минеральный и химический состав пород, слагающих разрез скважины.

**Недостатки методов** сводятся к малому радиусу исследований ( невысокая глубинность ) и опасности работы с источниками излучений.

**ГАММА-КАРОТАЖ ( ГК)** основан на изучении *естественного гамма-излучения* пород вдоль ствола скважин. Гамма-излучение обладает наибольшей проникающей способностью среди других видов ядерных излучений и это дает возможность регистрировать её скважинным радиометром, основная часть схемы которого смонтирована в стальном скважинном снаряде.

**ГК-** это метод исследования горных пород, основанный на измерении характеристик  $\gamma$  -излучения естественных радионуклидов при перемещении детектора по стволу скважины.

Электрические сигналы ( импульсы тока или напряжения ), пропорциональные интенсивности гамма-излучения, передаются по кабелю на пульт каротажной станции и записываются на каротажную диаграмму или магнитную ленту ( при цифровой записи). В частности , на диаграммах выделяют пласты с разной радиоактивностью: так максимумами отмечаются породы и руды, содержащие уран, радий, торий, калий-40 и др. радиоактивные элементы, а также породы с их высоким содержанием ( например, граниты, глины ). Минимальными значениями отмечаются песчанистые и карбонатные породы, каменная соль, угли и пр.

На **интенсивность регистрируемого излучения(  $I_{\gamma}$ )** существенное влияние оказывают излучение от глинистого раствора, поглощение излучений обсадной колонной, цементом и т.д. Радиус обследования ГК около 50 см; излучение же от более удаленных участков поглощается средой и не достигает **детектора прибора**.

Увеличение диаметра скважины из-за размыва стенок или отпалок сопровождается уменьшением показаний. Все эти **помехи** учитываются в процессе количественной интерпретации, при которой данные гамма-каротажа приводятся к стандартным условиям.

**ГК проводят с целью :**

- \* для нахождения аномальных проявлений при поисках U, Th, K;
- \* для опробывания этих элементов;
- \* для литолого-стратиграфического расчленения разреза пород;
- \* для изучения физических свойств пород;

- \* при поисках и разведке нерадиоактивных полезных ископаемых, имеющих тесную парагенетическую связь с радионуклидами
- \* выделения глинистых пластов; оценки их глинистости, корреляции пластов в скважинах; и т.д.
- \* Данные гамма-каротажа являются основными исходными материалами при подсчете запасов U, Th, K.

Кривые ГК могут регистрироваться совместно с кривыми других методов каротажа. Каротаж может проводиться одновременно с выполнением технических операций в скважинах.

Приоритет в разработке и промышленном внедрении  $\gamma$ -каротажа принадлежит советским ученым ( Г.В.Горшков, Л.М.Курбатов, А.Г.Граммаков, В.Л.Шашкин, А.К.Овчинников, В.А.Шпак ).

А.П.Казанским разработаны теоретические основы качественной интерпретации  $\gamma$ -каротажа.

Применение рудного  $\gamma$ -спектрального каротажа связано с именами Г.Ф.Новикова, Ф.Я. Сеницына.

В условиях низкого выхода керна  $\gamma$ -каротаж позволяет перейти на бескерновое бурение, что значительно удешевляет работы.

При неравномерном характере оруденения ( результаты определения содержания металла ) обладают большей представительностью, чем данные опробования керна.

Кроме того имеется возможность определения параметров рудных тел и большая представительность определения содержания полезных компонентов.

**Методика проведения каротажа** - измерения производят непрерывно с записью на ленте или в отдельных точках.

Скважинный снаряд опускают со скоростью до  $V = 2000$  м/ч. При обнаружении аномалии скорость спуска снижают до 200 м/ч. ( фиксируют глубину залегания аномалии а также определяют диапазон измеряемых частот импульсов ).

При подходе к забою скорость спуска уменьшается до 50м/ч.

Интенсивность ( $I_\gamma$ ) гамма-излучения измеряют и при подъеме. Уверенная запись аномалии при  $V < 500$  м/ч ( т.к. постоянная времени прибора  $\{\tau = 1.5 - 2.5 \text{ с}\}$  ).

При ( $I_\gamma > 4$  пА/ кг ) нужно проводить детализацию. Детализацию проводят при низких скоростях ( значения оптимальной скорости \*спуска-подъема\* регламентируется Инструкцией по гамма-каротажу, исходя из величин  $\{\tau\}$  ).

Запись диаграмм при  $V < 500$ м/ч масштаба 1: 500 и при  $V > 1000$  м/ч масштаба 1:1000. Детализация проводится в масштабах 1: 50 и 1: 20 . Всегда нужен надежный выход в нормальное поле.

Для получения правильных параметров рудного тела важно записать аномалию без инерционных искажений.

Искажения проявляются а) в уменьшении амплитуды аномалии; б) увеличении её ширины; в) в смещении в сторону движения скважинного прибора.

Инерционные искажения, изменяя форму  $\gamma$ -аномалии, приводят к смещению границ рудного интервала (однако на площадь аномалии они не влияют).

Точечный способ регистрации  $\gamma$ -поля применяется там, где непрерывная запись не целесообразна. Например, в мелких скважинах подземного бурения.

Результатом  $\gamma$ -каротажа является кривая интенсивности  $\gamma$ -излучения по скважине. Характер кривой определяется мощностью рудного тела и содержанием радионуклидов (например, U).

Количественная интерпретация результатов  $\gamma$ -каротажа основывается на следующих положениях:

- 1) при мощности рудного пласта ( $h > 35-40$  см) максимальная интенсивность не зависит от мощности, а определяется только содержанием;
- 2) границе рудного пласта с четкими контактами соответствует точка перегиба кривой, в которой интенсивность ( $I_\gamma$ ) гамма-излучения равна половине максимальной;
- 3) величина ( $I_\gamma$ ) гамма-излучения в любой точке вне пределов рудного пласта является функцией содержания ( $d$ ) и расстояния точки измерения до границы пласта ( $z$ ), т.е.  $(I_\gamma) = \psi(d, z)$ .

Следовательно, площадь ( $S$ ), ограниченная кривой интенсивности  $\gamma$ -излучения и осью глубин, является функцией содержания ( $d$ ) и мощности ( $h$ ):

$$S = \varphi(d, h)$$

Экспериментально доказано, что эта зависимость имеет вид:

$$S = K_0 d \cdot h$$

Где  $K_0$  - коэффициент пропорциональности, равный интенсивности гамма-излучения насыщенного по мощности ( $h > 35-40$  см) пласта при содержании в нем равновесного урана 0,01 %.

[пересчетный коэффициент интегрального каротажа  $K_0$  (в пА/кг / 0,01% или мкР/ч / 0,01 % U) - является функцией  $I_\gamma$  интенсивности гамма-поля  $I_\gamma(E, Z)$  формирующегося в бесконечно излучающе-поглощающей среде с содержанием радионуклида ( $d = 0.01$  %).

$K_0$  зависит от типа детектора, его размера, толщины экрана, энергетического порога регистрации излучения.

Теория гамма-каротажа определяет  $I_\gamma$  (для точек вне пласта):

$$I(h, Z) \cong \frac{1}{2} I_\infty \left\{ \frac{I_{\max}}{I_\infty} [2(Z + \frac{h}{2})] - \frac{I_{\max}}{I_\infty} [2(Z - \frac{h}{2})] \right\} \quad (\text{при } Z > h/2)$$



$I_\gamma$  ( для точек внутри пласта ):

$$I(h, z) \cong \frac{1}{2} I_\infty \left\{ \frac{I_{\max}}{I_\infty} \left[ 2 \left( \frac{h}{2} + Z \right) \right] + \frac{I_{\max}}{I_\infty} \left[ 2 \left( \frac{h}{2} - Z \right) \right] \right\} \quad (\text{при } Z > h/2)$$

Основная формула гамма-каротажа, позволяющая рассчитать содержание урана ( в % ):

$$Д. = \frac{S}{K h K_{p.p.} П_r П_ж} \cdot 0,01 \%$$

где  $S = Bmn$  ( площадь занимаемая аномальной кривой )

$K_{p.p.}$  - коэффициент радиоактивного равновесия;

$П_r$  - поправка за влияние обсадных труб

$П_ж$  - поправка за влияние бурового раствора

### ГАММА-КАРОТАЖ ПОДЗЕМНЫХ СКВАЖИН

При разработке урановых месторождений проводится очень много буровых скважин самой различной длины и сечения.

Длина некоторых скважин для глубокой разведки ( горизонтальных и вертикальных ) может достигать 300-500 м. Для их документации используются традиционные способы интерпретации колонковых скважин.

Значительно больше на рудниках бурится ( для разведки и эксплуатации ) бескерновых скважин малого диаметра и глубоких шпуров .

Бескерновое бурение скважин на рудниках предъявляет особенно высокие требования к выполнению  $\gamma$ -каротажа и интерпретации результатов, поскольку этот вид работ является единственно возможным способом количественного определения урана для подсчета запасов или планировании добычи.

#### Методика и техника $\gamma$ -каротажа

В процессе  $\gamma$ -каротажа скважинным радиометром измеряется интенсивность естественного  $\gamma$ -излучения вдоль оси скважины или шпура для определения концентрации радиоактивных элементов в рудном теле или горной породе, пересекаемых скважиной.

Концентрация радиоактивного вещества в рудном теле (  $C_U$  ), его мощность (  $h$  ), площадь гамма-аномалии (  $S$  ) и максимальная интенсивность в центре пласта (  $I_{\max}$  ) находятся в определенных количественных соотношениях, основанных на математических законах поглощения  $\gamma$ -излучения.

Эти величины связаны между собой через коэффициент пропорциональности  $K_0$ , характеризующий максимальную интенсивность  $\gamma$ -излучения при концентрации радиоактивного вещества, равной единице:

$$C = S / K_0 h \quad \text{или} \quad C = I_{\text{мак.}} / K_0$$

Эта зависимость справедлива для любой закономерности распределения радиоактивного вещества в рудном теле при условии одинаковой плотности руды и вмещающей породы.

Гамма-каротаж мелких скважин, глубина которых на рудниках обычно не превышает 100м, выполняются специальными рудничными  $\gamma$ -каротажными радиометрами, вручную или с использованием несложных механических устройств, обеспечивающих автоматизацию процесса подачи каротажной гильзы в скважину. Эти устройства имеют механический или пневматический привод движения гильзы и механическое устройство, которое позволяет не только автоматизировать подачу каротажной гильзы в скважину с постоянной скоростью, но и проводить непрерывную регистрацию результатов измерений на ленте самописца.

Для  $\gamma$ -каротажа подземных скважин используются легкие каротажные радиометры со сцинтилляционными детекторами, которые обычно экранируются свинцовыми экранами толщиной 1 - 1,5мм. Благодаря чему устраняется зависимость показаний прибора от вещественного состава руд и исключается влияние рассеянного  $\gamma$ -излучения точечного источника при градуировании приборов.

Гамма-каротаж скважины выполняется после основательной её промывки водой или продувки сжатым воздухом. Это мероприятие исключает в значительной мере влияние продуктов распада **Rn**, значительная концентрация которых может привести к искажению результатов и появлению ложных аномалий в сильно эманурующих породах.

Существуют два способа записи результатов каротажа:

- \* непрерывная автоматическая регистрация самописцем ;
- \* дискретная запись через определенные интервалы ( ручная или автоматизированная ).

При непрерывной записи должна быть обеспечена постоянная скорость движения гильзы. Дискретная запись проводится через интервалы от 0,1 до 1м в зависимости от мощности рудного тела и степени неоднородности руд.

Гамма-каротаж сравнительно глубоких буровых скважин ( h до 300м ), пройденных из горных выработок, выполняется специальными облегченными каротажными станциями.

**В последние годы** стал широко внедряться в практику исследований спектрометрический гамма-каротаж **ГКс**, основанный на измерении энергетических характеристик излучений. **ГКс** позволяет определять природу радиоактивных аномалий, т.е. отдельно определять содержание **U**, **Th** **K-40**.

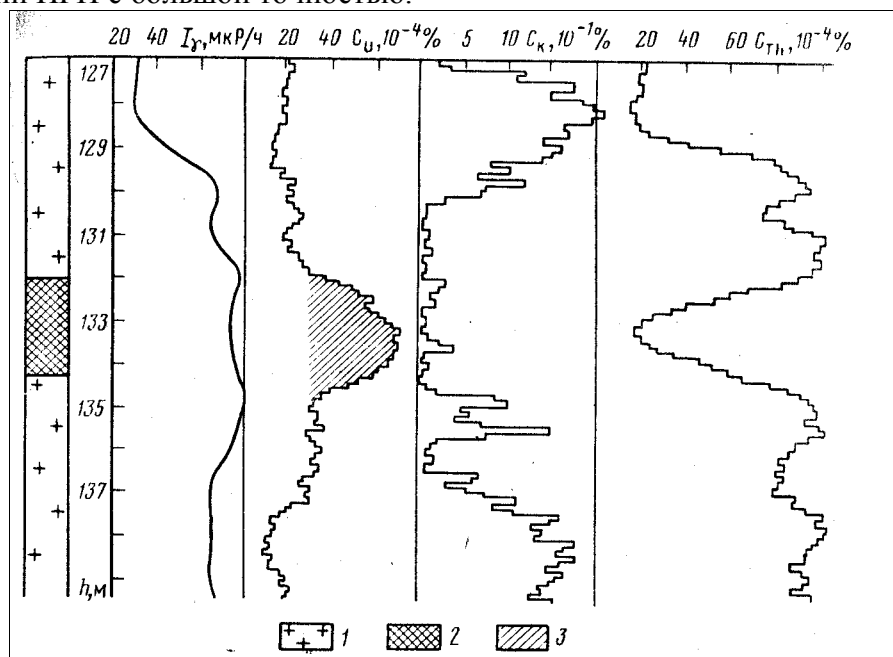
**ГКс** с успехом может применяться для поисков и оценки руд **нерадиоактивных** элементов: **Ta** , **Nb** , **Be** , **Sn** , **W** , **Mo**.

## Спектрометрический гамма-каротаж

Существующие методы измерения суммарной интенсивности гамма-излучения в скважинах в ряде случаев не удовлетворяют возросшим требованиям практики поисков месторождений радиоактивных руд.

Для оценки природы гамма-излучения на таких месторождениях приходится выполнять большие объемы лабораторных анализов керна скважин. В сложных, высоко-переменных гамма-полях с помощью гамма-каротажа не удастся выделить ореолы урана или маркирующие горизонты пород, характеризующиеся определенными соотношениями концентраций ПРН, так как часто повышенные концентрации одного из элементов сопровождаются пониженными концентрациями других ПРН (рис.7. 1).

Все это обусловило создание аппаратуры и методики спектрометрического гамма-каротажа (СГК), позволяющего проводить отдельные определения концентраций ПРН с большой точностью.



**Рис. 7.1. Пример выявления спектрометрическим гамма-каротажем урановой аномалии, не выделяемой гамма-каротажем:**  
**1 - граниты, 2 - рудная зона, 3 - урановая аномалия**

При поисках и разведке месторождений радиоактивных руд СГК проводят с помощью каротажных гамма-спектрометров типа РСС-006, РСКП-301 \*ТЕРЕК\*), ПСК-СГСЛ-3 и др. Основные задачи, которые решаются СГК, следующие:

- а) выделение зон нарушений первично-конституционального распределения ПРН (на стадии региональных исследований);**
- б) выявление радиоактивных ореолов и классификация аномалий по природе радиоактивности и условиям локализации (на стадии геолого-съёмочных работ);**
- в) изучение распределения концентраций ПРН в корях выветривания и корреляции геологических разрезов (на стадии поисковых работ);**
- г) изучения строения ореолов ПРН и картирование зон гидротермальных изменений (на стадии поисково-оценочных работ) .**

Настройка, градуировка и контроль работы скважинных гамма-спектрометров принципиально не отличаются от таковых для других типов гамма-спектрометрической аппаратуры, а методика проведения СГК имеет много общего с методикой ГК, за исключением скоростей подъема скважинного прибора. Теоретически рассчитанные скорости СГК при решении геологических задач (прибор РСС-006, монокристалл CsI (Т1) ( 25 x80 мм) приведены ниже.

Геологические задачи	Скорости, м/ч
----------------------	---------------

Определение концентраций ПРН в породах основного состава	10 - 20
То же, в породах среднего и кислого составов	40 - 60
Выделение пропластков пород мощностью 1-2 м, отличающихся по концентрациям ПРН от вмещающих пород не менее, чем в 3 раза	50 - 100
То же, при мощности пропластков более 5 м	150 - 250
Выделение слабых (2 - 3 фона) локальных аномалий в породах среднего и кислого составов	100 - 150
Определение особенностей локализации слабых аномалий	4~60

Ошибки определения концентраций ПРН при СГК зависят от соотношения концентраций ПРН, размеров монокристалла, экспозиции измерений и скорости каротажа.

## ТЕМА 8

### ЛЕКЦИЯ 8. ДРУГИЕ ( РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ) МЕТОДЫ ПОИСКОВ

#### РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

**Радиогеохимические съемки** используют для изучения закономерностей распределения концентраций ПРН и сопутствующих им элементов (элементов-спутников) в пробах горных пород, рыхлых отложений, воде и растительности. Эти виды работ относят к геохимическим методам поисков, однако специфические особенности позволяют условно рассматривать их **как составную часть радиометрии.**

**Среди радиогеохимических съемок выделяют  
а) литогеохимические, б) гидрогеохимические и в) биогеохимические.**

**Литогеохимические съемки** заключаются в отборе по определенной сети проб коренных пород (поиски по первичным ореолам), рыхлых отложений (поиски по вторичным ореолам) и донных осадков водотоков (поиски по потокам рассеяния} .

**Поиски по первичным ореолам** заключаются в выявлении повышенных концентраций ПРН и их спутников в рудовмещающих породах и изучении закономерностей их размещения по данным опробования горных выработок и скважин. Густота опробования зависит от целей и задач работ и определяется геометрией поисковой или разведочной сети. Отбор проб производят способом "пунктирной борозды", с каждого метра длины отбирают несколько осколков объемом 2 - 5 см<sup>3</sup>. Длина интервалов обычно составляет 5 см, вес пробы - около 200 г.

**При поисках по вторичным ореолам** рассеяния пробы рыхлых отложений массой 200 - 300 г отбирают из представительного горизонта, т.е. слоя пород; в

пределах которого вторичные ореолы максимальны по площади развития и интенсивности. В зависимости от глубины залегания этого горизонта пробы отбирают из закопшек глубиной 0,2 - 0,4 м, из шурфов или картировочных скважин. Отобранные пробы высушивают, дробят, истирают до состояния пудры и направляют в лабораторию на анализы.

В районах с развитой гидросетью для выявления потоков рассеяния урана и его спутников применяют метод донных осадков. Пробы отбирают из мелкого однородного материала, находящегося в руслах постоянных или временных водотоков. Густота маршрутов и шаг опробования зависят от масштаба съемки и степени разветвленности гидросети.

При мелкомасштабных съемках шаг опробования составляет 300-500 м, при масштабах 1:25 000 - 1:50 000 он равен 100 - 200 м.

Для поисков месторождений радиоактивных руд используют и гидрогеохимическую, т.е. съемку по водным ореолам рассеяния.

**Сущность метода состоит в отборе проб поверхностных грунтовых или подземных вод и анализе этих проб на содержание ПРН, радона и элементов-спутников.**

Пробы отбирают в стеклянные бутылки или пластмассовые канистры.

Для определения концентрации урана ( U ) требуется около 300 мл воды, для изучения распределения радия ( Ra ) - около 1 л.

Пробы на радон отбирают в специальные сосуды-промывалки, из которых предварительно откачивают воздух. При съемках масштаба 1:200000 одну пробу отбирают, в среднем, с площади 4 - 10 км, при съемках масштаба 1:5000 отбирают одну пробу с 1 км<sup>2</sup>.

В районах со слаборазвитой гидросетью, исключающей возможность применения радиогидрогеохимической съемки, одним из перспективных методов прогнозирования и поисков радиоактивных руд является

**биогеохимическая съемка**, заключающаяся в изучении распределения концентраций урана в золе растений. Глубинность метода может достигать 20 - 50 м, а площадь аномалий может в несколько раз превышать размеры ореолов по данным других радиометрических методов.

В таежных районах обычно отбирают пробы ветвей сосны и ели, в степных и полупустынных -- ветви полыни. Масса пробы - 200 г. Пробы озолотят и анализируют лазерно-люминесцентным методом (ЛЛМ)

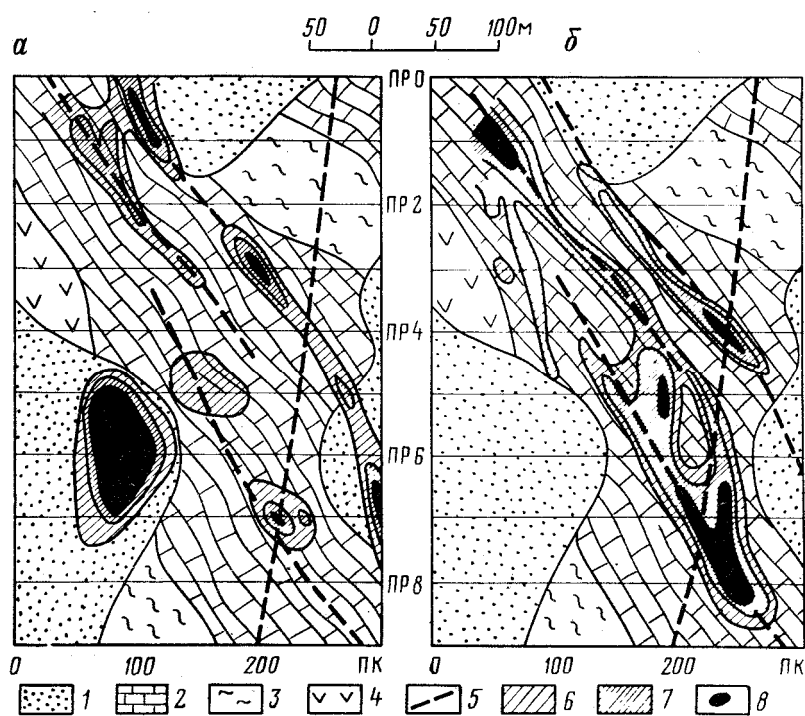
ЛЛМ - метод анализа на уран природных объектов (пород, вод, почв, растительности), основанный на возбуждении и последующей регистрации люминесценции (свечения) соединений урана. Люминесценция вызывается с помощью импульсного ультрафиолетового лазерного возбуждения. Этот метод анализа водных растворов с помощью аппаратуры АУФ-101 (АНГАРА) позволяет измерять концентрации урана до  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  г/л. Рабочий объем пробы - 3 мл, производительность - около 100 определений в смену.

## ИЗОТОПНО-СВИНЦОВЫЙ МЕТОД

Изотопно-свинцовый метод основан на связи между количеством долгоживущего радиоактивного элемента (урана-238, актиноурана-235, тория-232), количеством накопившегося конечного продукта распада (соответствующих изотопов свинца) и временем жизни радиоактивной минерализации. Поисковое значение метода определяется малой миграционной способностью свинца, благодаря чему он фиксирует первичное (древнее) местоположение урановых ореолов, которые претерпевают значительные изменения под влиянием процессов выщелачивания.

Иногда на месте интенсивных урановых ореолов через сотни миллионов лет остаются лишь незначительные аномалии, которые могут быть пропущены при поисках. В ряде случаев, наоборот, молодые вторичные аккумуляции урана с возрастом до 1 млн. лет могут без достаточного основания изучаться дорогостоящими буровыми работами.

С максимальной эффективностью метод применяют на этапе детальных исследований. В пробу массой 200 г отбирают мелкую фракцию из представительного горизонта. После просушивания, дробления и истирания проба поступает на изотопно-спектральный анализ на свинец и рентгено-спектральный анализ для определения современных концентраций урана. В каждой пробе по данным ИСА находят количество аномального свинца радиогенного происхождения ("радиогенную добавку")  $C_{ан.}^{206}$ .



**Рис. 8. 1. Первичное (древнее) и современное положения ореолов урана по данным рентгеноспектрального (а) и изотопно-свинцового (б) анализов: В 1 - наносы, 2 - известняки, 3 - сланцы, 4 - диабазы, 5 - разломы, 6, 7, 8 - участки с концентрациями урана соответственно 2 - 5, 5 - 10 и более 10 фонов (Гф)**

Величину  $C_{ан.}^{206}$  используют для определения первичной древней концентрации урана (палеоконцентрации)  $C_{др. U}$ .

$$C_{др. U} = 1.16 K^{206} C_{ан.}^{206}$$

где  $K^{206}$  - коэффициент, зависящий от времени образования урановой минерализации.

Для 100, 200, 400, 600 млн. лет  $K^{206}$  соответственно равны: 74,5; 37,1; 18,2; 11,9.

Сравнивая современные и палеоконцентрации, судят о привносе или выносе урана на аномальном участке.

На рис. 8.1 представлены результаты интерпретации данных изотопно-свинцового и рентгено-спектрального анализов на урановом рудопроявлении.

Как видно из рис. 8.1, наиболее интенсивный современный урановый ореол не представляет поискового интереса, так как в его пределах отсутствуют аномальные концентрации свинца-206; первоочередного изучения заслуживает ореол свинца-206, выявленный в южной части площади.

**МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ** основан на зависимости интенсивности космических мюонов ( $I_{\mu}$ ) от массы пройденного ими вещества (горных пород).

Космические мюоны, представляющие собой элементарные частицы с массой в 207 раз тяжелее электрона, образуются в атмосфере Земли в результате взаимодействия протонов первичных космических лучей с ядрами химических элементов воздуха.

Образовавшиеся мюоны имеют большие энергии  $E_{\mu} = 10^{15} - 10^{17}$  эВ, слабо взаимодействуют с веществом, поэтому могут проникать в горные породы до глубины 2-3 км.

Так же, как и  $\gamma$ -излучение, космические мюоны по мере прохождения через породы поглощаются по экспоненциальному закону. Таким образом, по измеренной интенсивности мюонов под землей и закону их поглощения можно получить плотность блока пород, через который прошли мюоны.

В скважинах измерения интенсивности мюонов выполняют на отдельных точках аппаратурой типа ИИКМ-С (измеритель интенсивности космических мюонов, скважинный). Аппаратура состоит из скважинного зонда, включающего сцинтилляционный или черенковский детектор мюонов, и наземного пульта для энергопитания и счета электрических импульсов. Используя градуировочные кривые, по величине измеренной интенсивности мюонов определяют плотность пород.

Мюонный метод применяется для определения плотности пород, залегающих между земной поверхностью и точкой измерения, или слоя пород, расположенного между двумя точками измерения интенсивности мюонов. По размерам исследуемого пространства, для которого определяется плотность, мюонный метод занимает промежуточное положение между плотностным гамма-гамма- и гравиметрическим каротажем

#### **ГЕЛИЕВАЯ СЪЕМКА**

При многочисленных исследованиях замечено, что в почвенном воздухе над рудными (урановыми) зонами, содержащими радиоактивные элементы, отмечаются повышенные концентрации гелия ( $He$ ).

$He^4_2$ , как правило, образуется при  $\alpha$ -превращениях радиоактивных изотопов

В отличие от Rn, Tn, An он не распадается и может достигать верхних горизонтов рыхлых отложений с больших глубин.

Поэтому применение гелиевой съемки для поисков месторождений радиоактивных элементов на территориях, перекрытых мощными толщами рыхлых отложений имеет неплохие перспективы.

Определение концентрации гелия в отбираемых по профилям пробам почвенного воздуха проводится с помощью масс-спектрографов.

Однако метод до настоящего времени не получил широкого распространения в практике из-за трудностей расшифровки выделенных аномалий.

Опытными работами по гелиевой съемке установлено, что если концентрация гелия в поровых газах в урансодержащих рудных телах в сотни и тысячи раз превышает концентрацию ( $He$ ) в атмосферном воздухе, то концентрация ( $He$ ) в почвенном воздухе над рудными телами иногда превышает её всего на 10-15 %.

В то же время в почвенном воздухе над отдельными без рудными зонами появляются повышенные концентрации гелия.

Так, например, известны повышенные содержания (He) над нефтегазовыми месторождениями, не связанными с месторождениями радиоактивных элементов.

## ТЕМА 9

### ЛЕКЦИЯ 8. ОСНОВЫ ОХРАНЫ ТРУДА и ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ при РАБОТЕ с РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений связаны с возможностью внешнего, внутреннего и смешенного (внутреннего + внешнего) облучения.

**Внешнее облучение** связано с воздействием на организм ионизирующих излучений от радиоактивных веществ, находящихся вне организма человека (или животного).

**Внутреннее облучение** - это воздействие на организм источников ионизирующего излучения, находящихся внутри него.

**Естественным фоном** называют излучение, состоящее из излучения естественно распределенных (природных радионуклидов) на поверхности Земли, в природной атмосфере, продуктах питания, воде, организме человека, а также из космического излучения.

При разведке и эксплуатации месторождений радиоактивных руд источником излучений являются сами руды и радиоактивные газы (Rn, Tn, An) - эманации.

Разные виды излучений по-разному воздействуют на здоровье человека, так как имеют различную проникающую и ионизирующую способности.

**Альфа-излучение** (несмотря на малую проникающую способность) при попадании внутрь организма могут оказать на него чрезмерно вредное воздействие, т.к.  $\alpha$ - частицы обладают высокой способностью к ионизации и возбуждению атомов среды. В результате таких процессов возникают новые химические соединения, приводящие к нарушению деятельности организмов. В то же время при внешнем облучении их \*поражающий эффект\* близок к нулю, т.к. они не могут проникнуть даже через наружный слой кожи человека.

**Бета- излучение** способно проникнуть в ткани организма на глубину ( $h = 1 - 2$  см).

**Гамма-излучение** - легко проходит через всё тело человека.

Повреждений вызванных в живом организме ионизирующим излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям.

**Количество** такой переданной организму энергии называют **ДОЗОЙ**.

**Количество энергии излучения, поглощенное единицей массы облученного тела, называется поглощенной дозой**

( Измеряется в Грех (Гр),  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/ кг}$ .)

Однако этот показатель не учитывает различий в опасности для здоровья одних и тех же поглощенных доз  $\alpha, \beta, \gamma$  - излучений.

Для учета этих различий применяют показатель, называемый **эквивалентной дозой**, которая измеряется в **зивертах (Зв)**.



Зиверт представляет собой единицу поглощенной дозы, деленную на коэффициент качества ( Q ), учитывающий неодинаковую радиационную опасность разных видов излучений.

На **практике** для определения величины эквивалентной дозы используется параметр - биологический эквивалент рентгена ( Бэр ), равный 0,01 Зв.

По отношению к ионизирующим излучениям все население страны разделяется на три группы: персонал ( категория А ), ограниченная часть населения ( категория Б ) и население ( категория В ).

**Персонал ( категория А )** - лица , которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений.

**Часть населения ( категория Б )** - это лица, которые непосредственно не работают с источниками ионизирующих излучений, но по условиям проживания ( или размещения их рабочих мест ) могут подвергаться воздействию радиоактивных излучателей.

**Население ( категория В )** - это жители страны, края , области, района .

Для лиц категории А максимально допустимый годовой уровень облучения не должен превышать **предельно допустимой дозы ( ПДД)**.

Под ПДД понимают наибольший годовой уровень облучения человека, не вызывающий при равномерном воздействии в течении 50 лет ( обнаруживаемых современными методами и средствами ) неблагоприятных изменений в состоянии здоровья самого облучаемого и его потомства.

Для лиц категории А установлена ПДД , равная 0,05 Зв ( или 5 бэр ) в год.

Для лиц категории Б предусмотрено понятие **предел дозы ( ПД )** - предельная эквивалентная доза за год.

ПД для ограниченной части населения равна 0,005 Зв ( т.е. 0,5 бэр ) в год.

Ограничение облучения населения страны ( категория В ) осуществляется регламентацией или контролем радиоактивности объектов окружающей среды ( воды, воздуха, пищи), доз получаемых от медицинского облучения и т.п.

Для обеспечения безопасной работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений необходимо строго руководствоваться **Нормами радиационной безопасности и Основными санитарными правилами работы** с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений, а также составленной с их учетом Инструкцией по технике безопасности при геофизических работах.

При поисковых и разведочных геофизических работах основными источниками излучений, действующими на организм являются образцовые источники ( или \* эталоны \* ).

При работе с ними предусмотрены следующие правила:

1. Запрещается переносить стандартные источники ( \*эталон\* ) в карманах, полевых сумках, рюкзаках...
2. Хранить и перевозить источники необходимо в специальных контейнерах, толщина которых обеспечивает МЭД на его поверхности не более  $21 \cdot 10^{-2}$  А/кг.
3. Стандартные \*эталон Ra \*, содержащие более 0,5 мг Ra , можно брать с помощью специальных щипцов с ручкой длиной не менее 50 см.
4. Предельно допустимой дозой облучения за один рабочий день считается  $0,044 \cdot 10^{-4}$  Кл/ кг.
5. Для предотвращения вредного внутреннего облучения запрещается :

а) засасывать ртом жидкие эталоны Ra из ампул с целью перевода их в барбатеры;

б) работать в выработках со значительной концентрацией Rn в воздухе без предварительной вентиляции этих выработок (допустимая концентрация эманации Rn -  $3.7 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>);

в) принимать пищу, курить, пить воду в помещении, где проводятся работы с открытыми радиоактивными изотопами;

г) принимать пищу без тщательного мытья рук перед едой;

д) употреблять воду содержащую повышенную концентрацию радиоактивных элементов ( $U > 5 \cdot 10^{-5}$  г/л;  $Ra > 5 \cdot 10^{-11}$  г/л; Rn более  $37 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>).

В практике радиометрических и ядерно-физических исследований существуют три основных способа защиты от воздействия внешнего ионизирующего излучения на организм человека: **временем, расстоянием и экранами.**

**Защита временем** заключается в максимальном уменьшении времени пребывания исполнителя в зоне облучения.

**Защита расстоянием** состоит в максимальном удалении источников ионизирующих от исполнителя, для чего применяют дистанционные приспособления: щипцы, захваты, манипуляторы.

**Экраны для защиты** от ионизирующих излучений могут быть различными в зависимости от вида излучений. Для защиты от  $\alpha$ -излучений экраном может служить слой воздуха толщиной 10-20 см, лист бумаги или тонкая пластина плексигласа.

$\beta$  - излучение полностью экранирует слой свинца толщиной в 1,4 мм, или алюминиевая пластина ( $d=5.5$  мм).

Для защиты от  $\gamma$ -излучения применяют мощные экраны из свинца, бетона и других материалов, толщина которых рассчитывается по специальным таблицам.

Для защиты от попадания радиоактивных веществ в организм человека применяют специальные респираторы, а при большой активности - защитные камеры (боксы), оснащенные манипуляторами.

При работе с нейтронными источниками придерживаются следующих правил.

Для нейтронов различных энергий приняты следующие допустимые плотности потока: тепловые нейтроны - 700 нейтр./см<sup>2</sup> х с; промежуточные нейтроны - 430 нейтр./см<sup>2</sup> х с; быстрые нейтроны - 19 нейтр./см<sup>2</sup> х с

## ТЕМА 10

### ЛЕКЦИЯ 9. ОСНОВЫ ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ

Зарождение прикладной ядерной геофизики относится к 1941 г., после того как Б.Я.Понтекорво была опубликована работа по применению источников \* нейтронов\* в скважинах для исследования горных пород.

Метод был использован для определения пористости ( $\eta$ ) и плотности ( $\sigma$ ) горных пород.

В последнее время различают (классифицируют):

1. Ядерно-физические методы анализа (преимущественно, определение содержания химических элементов).
2. Ядерно-геофизические методы (служат для определения необходимых параметров и свойств горных пород на месте залегания).

Ядерные методы основаны на взаимодействии { $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , нейтронов} с ядрами и электронами глубоких орбит атомов вещества.

При взаимодействиях происходят:

1. с **электронными оболочками** : а) рассеяние электронов, б) возбуждение характеристического ( преимущественно, рентгеновского ) излучения
2. с **ядрами** : а) испускание ядрами частиц; б) образование радиоактивных изотопов.

**Вторичное излучение** обладает **специфическими** для каждого химического элемента **видом [ $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $p$ ]**, периодом полураспада (  $T_{1/2}$  ) и энергией  $E_{\alpha, \beta, \gamma, n, p, hv}$ .

Наиболее перспективны нейтронные и гамма-методы; применение альфа- и бета- методов ограничено.

Различают ядерные ( и атомные ) :

а) гамма-методы;

б) нейтронные методы.

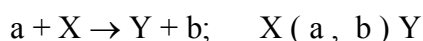
Ядерные реакции при взаимодействии с ядрами атомов вызывают изменения в составе ядра.

При бомбардировке ядер используют: а) протоны (  $p$  ), б) нейтроны (  $n$  ), в) дейтроны (  $D^2$  ), тритоны (  $T^3$  ), альфа-частицы.

Заряженные частицы нужно ускорить, чтобы преодолеть силы электрического отталкивания ядра.

Лучше всего использовать нейтроны, так как они не имеют заряда и поэтому могут попасть в ядро.

Запись ядерной реакции следующая:



Вероятность столкновения бомбардируемой частицы с ядром - называется сечением взаимодействия ( или сечение реакции ).

Сечение реакции (  $\sigma_p$  ) - это площадь с центром в бомбардируемом ядре. Размерность сечения реакции (  $\text{см}^2$  ), а единица **барн** =  $10^{-24} \text{см}^2$

В зависимости от вида взаимодействия с ядром различают:

1. сечение рассеяния (  $\sigma_p$  )
2. сечение захвата (  $\sigma_3$  ).

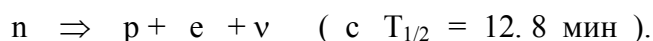
Для одного и того же ядра различны и энергии бомбардирующих частиц.

### ХАРАКТЕРИСТИКА НЕЙТРОНОВ

Нейтроны - это частицы, не имеющие заряда (  $Z=0$  ).

масса нейтронов больше массы протонов на 2,5 массы электрона.

Нейтроны устойчивы только в составе ядерных ядер, а в свободном состоянии они распадаются:



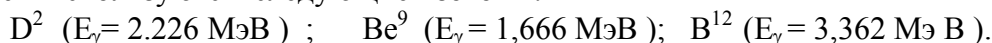
Будучи электрически нейтральными **нейтроны** легко проникает в ядра, в т.ч. и тяжелые, и вызывает ядерные реакции.

При попадании нейтронов в ядро - из ядра вылетают гамма-кванты и частицы, а сами ядра раскалываются на 2 части (деление ядер урана).

В природе нейтроны образуются при спонтанном делении  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и  ${}_{90}^{230}\text{Th}$ , при этом вылетают из ядра 2-3 нейтрона. Но  $T_{1/2}$  спонтанного деления очень велик  $T_{1/2}(\text{U-235}) = 5 \cdot 10^{18}$  лет;  $T_{1/2}(\text{Th-232}) = 10^{20}$  лет.

Чтобы вылетел нейтрон из ядра нужно, чтобы  $E_\gamma > E$  (связи нуклонов в ядре). Причем энергия связи в ядрах увеличивается по мере увеличения массового числа.

Только для легких химических элементов (из табл. Менделеева) в качестве мишеней используются следующие изотопы:



Нейтронное излучение может быть охарактеризовано плотностью потока нейтронов  $\{ \text{нейтр.} / (\text{с} \cdot \text{м}^2) \}$ .

Источник нейтронов характеризуется **активностью**  $\{ \text{нейтр.} / \text{с} \}$ .

В ядерных реакторах свободные нейтроны испытывают многократные столкновения с ядрами вещества (графит или тяжелая вода) замедляются до тепловых

$\{ E = 0.025 \text{ эВ} \}$ , которые затем поглощаются.

При достаточном количестве ядер - процесс лавинообразен.

Стержни Cd регулируют выход нейтронов в нужных границах.

В современных реакторах (научные)  $N$  (плотность потока)  $= 5 \cdot 10^{11} \{ \text{нейтр.} / (\text{с} \cdot \text{м}^2) \}$ .

В геофизике ядерные реакторы используются для интенсивного облучения проб.

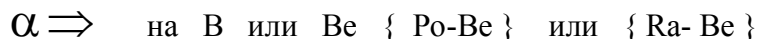
Большое применение на практике нашли \* размножители нейтронов \*  $\{ \text{Ra-Be} \}$  или  $\{ \text{Po-Be} \}$ ; тут нейтроны больших энергий проходят через замедлитель (до тепловых энергий). Нейтроны ( $E_n = 0.025 \text{ эВ}$ ) захватываются (U)-ми стержнями, которые находятся в замедлителе.

Стержни U-235, скорость реакции регулируют Cd-стержни.

Размножители имеют  $N_n = 2 \cdot 10^4$  до  $N_n = 2 \cdot 10^9$  (нейтр./с).

На практике применяются стационарные установки.

При полевых работах используются малогабаритные источники (неуправляемые). Здесь нейтроны образуются при ядерных реакциях:



**Генератор нейтронов** регулирует поток нейтронов (изменение  $\Delta U$  до 100 кВ).

Катод (ионы  $\text{D}^2_1$ ). Анод ( $\text{T}^3$ ).

В ННМ может наблюдаться **упругое** рассеяние в результате чего

$$E = E_0 \frac{M^2 + 2M \cdot \cos\phi + 1}{(M + 1)}$$

где  $M$  - отношение массы ядра к массе нейтрона.

$E_0$  - энергия падающего нейтрона;

$\phi$  - средний угол отклонения нейтрона от первоначального.

Анализ формулы показывает, что потери энергии нейтронов на легких ядрах выше (раз в 50), чем на тяжелых. (например, Pb-204).

Поэтому водородсодержащие (вода, парафин, орг.стекло) среды сильные замедлители нейтронов.

Свинец (Pb) - легкая преграда для быстрых нейтронов.

Сечение реакции упругого рассеяния на ядрах атома зависит от  $E_n$

**Неупругое рассеяние нейтронов** происходит на ядрах с расходом кинетической энергии на возбуждение ядра. Переход из возбужденного состояния сопровождается выделением энергии, которые несут  $\gamma$ -кванты.

Иногда переход (из возбужденного состояния) осуществляется через промежуточный уровень.

В некоторых случаях переход из возбужденного состояния в основное связан:

а) с испусканием заряженной частицы; б) К-захвата.

Неупругое рассеяние происходит а) на легких ядрах ( $E_n = 160$  фДж);

б) на тяжелых ядрах ( $E_n = 96$  фДж).

Пример, нейтронно-абсорбционный метод (разновидность ННМ). Он основан на ослаблении потока нейтронов (тепловых) при определениях химических элементов с большим сечением поглощения нейтронов.

$$\text{Плотность потока (I)} \quad I = I_0 \exp(-n\sigma d).$$

Где  $\sigma d$  - макроскопическое сечение поглощения

Сечение поглощения нейтронов ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \sigma_{\text{захвата}} + \sigma_{\text{рассеяния}}$$

В зависимости от состава среды и  $E_n$  -  $\sigma_p, \sigma_z$  могут меняться в широких пределах (В, Li, Cd, Cl).

$$\sigma_p = n \cdot 10^{-26} - n \cdot 10^{-25} \text{ м}^2, \text{ т.е. } \sigma_z > \sigma_p$$

$$\sigma_z = n \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$$

Если считать  $\sigma = \sigma_{\text{зах}}$ , то ослабление потока медленных нейтронов ( $E_n$ ) прохождении через среду зависит от содержания этих элементов (т.е. концентрации).

При решении гидрогеологических задач и изучении месторождений нефти и газа ННМ используется для расчленения толщи пород по содержанию в них ( $H^1$ ).

Регистрация тепловых или надтепловых нейтронов производится на некотором расстоянии от источника.

Для изоляции детектора от источника применяются экраны ( от гамма-излучения обычно из Pb, а от нейтронов - из каучуковой резины ).

Очень эффективен метод ННМ при изучении редкоземельных элементов ( Nb, Hf, Ta ), где  $\sigma_p = \text{сотни - тысячи Барн}$ .

### НЕЙТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Не испытывая действия электрического поля электронов и ядер атомов нейтроны легко проникают в ядра любых элементов, вызывая ядерные реакции, которые позволяют изучать вещественный состав горных пород.

Нейтроны по энергиям условно делятся на:

Энергетический класс	Энергия нейтронов	
	Дж	эВ
Холодные	$1,6 \cdot 10^{-22}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Тепловые	$4 \cdot 10^{-21}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$
Медленные	$0,8 \cdot 10^{-29}$	0,5
Резонансные	$1,6 \cdot 10^{-18}$	10
Промежуточные	$(0,8-3,2) \cdot 10^{-14}$	$(0,5-2) \cdot 10^5$
Быстрые	$3,2 \cdot 10^{-14} - 1,6 \cdot 10^{-12}$ и более	$2 \cdot 10^5 - 10^7$

При прохождении нейтронов через вещество ( горную породу ) они взаимодействуют с ядрами атомов, причем при этом существует несколько типов элементарных процессов взаимодействия, основными из которых являются:

а) упругое рассеяние; б) неупругое рассеяние; в) радиационный захват нейтронов.

Все три процесса зависят от энергии нейтронов и свойств вещества и практически полностью определяют распространение нейтронов в среде.

**Упругое рассеяние** характерно для быстрых нейтронов и сред с малым атомным номером.

Процесс аналогичен столкновению двух упругих шаров: кинетическая энергия нейтронов после столкновения с ядром-мишенью перераспределяется обратно пропорционально их массам. Ядро при этом не возбуждается, а лишь претерпевает отдачу ( ядро отдачи ), нейтрон изменяет направление и скорость своего движения.

**Неупругое рассеяние** происходит при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами тяжелых элементов.

В этом случае нейтрон теряет значительную долю своей энергии на возбуждение ядра, т.е. увеличение его внутренней энергии. Возвращаясь в основное состояние, возбужденное ядро испускает один или несколько гамма-квантов, спектр энергии которых характерен для данного рассеивающего элемента.

Неупругое рассеяние имеет порог: а) для легких ядер  $\eta = 2 - 4$  МэВ

б) для больших  $\eta = 0,6 - 1$  МэВ

**Радиационный захват нейтронов** наблюдается преимущественно при взаимодействии тепловых (  $n_T$  ) и медленных (  $n_M$  ) нейтронов с любыми средами.

В области малых энергий вероятность захвата обратно пропорциональна скорости нейтронов.

Захват (  $n$  ) сопровождается испусканием одного или нескольких  $\gamma$ -квантов.

Спектр  $\gamma$ -излучения радиационного захвата (  $n_0^1$  ) различен для разных элементов, максимальная энергия  $\gamma$ -квантов достигает 10 МэВ.

Поскольку радиационный захват ( $\rho$ ) связан с увеличением отношения числа  $\frac{n}{p}$  в ядре, то продукт реакции оказывается, как правило, радиоактивным. Поэтому данный вид взаимодействия широко используется для получения радиоактивных нуклидов.

**Нейтроны, попавшие в горную породу, в течении короткого промежутка времени ( $t = 10^{-5}$  с) замедляются в результате упругого и иногда неупругого взаимодействия с ядрами.**

**В результате замедления большая их часть приобретает энергию, характерную для тепловых нейтронов, и захватывается ядрами.**

Распределение нейтронов в горных породах, т.е. плотность ( $n^1_0$ ) на различных расстояниях от источника, определяется и так называемыми **нейтронными свойствами** или **параметрами среды**, среди которых наиболее важными являются:

**а) параметр замедления (или средняя логарифмическая потеря энергии) на один акт упругого рассеяния  $\xi = \ln E_0 - \ln E$**

**б) длина замедления нейтронов**

$$L_3 = \sqrt{r^2} / 6$$

где  $r^2$  - среднее значение квадрата расстояния между источником быстрых нейтронов и точкой замедления их до тепловых;

**в) среднее время жизни тепловых нейтронов**

$$\tau_T = L_3 / v$$

где  $L_3$  - путь нейтронов по ломанной линии от точки замедления до точки поглощения;

$v$  - скорость движения тепловых нейтронов ( $v = 2.2 \cdot 10^5$  см/с при  $T=20^0$ С);

**г) длина диффузии** характеризует среднее квадратическое расстояние, проходимое нейтроном от точки замедления до точки поглощения

$$L_D = \sqrt{D\tau_T}$$

где  $D$  - коэффициент диффузии тепловых нейтронов, аналогичный коэффициенту диффузии молекул в газе.

Параметры  $\xi, L_3, L_D$  - зависят главным образом от содержания водорода в горных породах, а  $\tau_T$  - от концентрации элементов с высокой поглощающей способностью нейтронов (В, Cl, Cd и т.д.).

**Эти обстоятельства позволяет использовать нейтронные методы для определения физического состояния и элементного состава горных пород и руд.**

### ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ и НЕЙТРОНОВ

В ядерно-физических методах в качестве источников первичного излучения используются специально изготовленные промышленностью источники нейтронов а также  $\gamma, \alpha, \beta$ -излучений.

Каждый применяемый в методах геофизики изотоп характеризуется тремя основными параметрами:

- энергией фотонов  $\gamma$ - излучения и нейтронов;
- периодом полураспада;
- активностью источника.

Определяющим фактором при выборе источника  $\gamma$ -излучения является энергия  $\gamma$ -квантов, излучаемых им. Источник  $\gamma$ -квантов в большинстве случаев испускает излучение с энергетическим спектром, включающим одну или несколько линий. Качество

спектра  $\gamma$ -излучения источника зависит от вида процесса превращения, при котором происходит  $\gamma$ -излучение.

Наиболее чистым спектром  $\gamma$ -излучения обладает изотоп  $^{119m}\text{Sn}$ , в котором  $\gamma$ -излучение возникает в результате **изомерного перехода (ИП)**.

ИП - это процесс, при котором возбужденное ядро атома переходит в стабильное состояние без выделения частиц, а только за счет выделения энергии в виде  $\gamma$ -кванта. Порядковый номер  $Z$  и массовое число ( $A$ ), при изомерном переходе не изменяются.

Гамма-излучение высокой чистоты образуется при электронном захвате ( $\text{ЭЗ}$ ). При захвате электрона собственной оболочки ядро испускает  $\gamma$ -квант типичной для данного ядра энергии.

Источники  $\gamma$ -излучения  $\alpha$ - (альфа-излучающие) - относительно малочисленны. К этой группе относятся  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

Наиболее обширную группу  $\gamma$ -излучателей составляют изотопы, испытывающие  $\beta$ -превращение. При  $\beta$ -превращениях возникает  $\gamma$ -излучение, иногда сложного спектрального состава, и характеристическое рентгеновское излучение атома.

Основной недостаток  $\beta$ -излучающих источников - низкая чистота спектра  $\gamma$ -излучения.

**Источники  $\gamma$ -излучения**, используемые в радиометрии, включают образцовые источники второго класса из  $^{226}\text{Ra}$ , предназначенные для градуирования радиометров.

Эти источники изготавливаются из порошкообразного  $\text{RaBr}_2$ , который запаивается в стеклянные ампулы (безборное стекло марки Ц-32). Ампула помещается в латунный футляр. Ампулы разделены резиновыми колпачками, обеспечивающими их сохранность.

Источники  $\gamma$ -излучения изготавливаются нескольких серий:

- а) в источниках серии 1 масса радия имела значения  $m = 0.1$  мг,
- б) в источниках серии 2  $m = 0.16$  мг;
- в) в серии 10 масса равна около 1 мг.

МЭД  $\gamma$ -излучения на расстоянии 1 м от источника определяется по формуле:

$$I_{\gamma} = \frac{840 * m}{r^2}$$

где 840 -  $\gamma$ -постоянная радия в стандартном источнике в (мкР/ч) на расстоянии 1 м от источника с массой  $^{226}\text{Ra}$  1 мг;  $m$  - масса  $^{226}\text{Ra}$  в источнике в (мг);  $r$  - расстояние от источника в метрах.

В качестве контрольных источников в радиометрической практике используются источники из  $^{60}\text{Co}$ , изготавливаемые в виде диска диаметром 6 мм, запрессованного в диск из алюминия или нержавеющей стали. Основной недостаток - низкий период полураспада ( $T_{1/2} = 5,25$  года).

Для настройки, усиления и определения разрешения гамма-спектрометров используется источник  $\gamma$ -излучения  $^{65}\text{Zn}$  ( $T_{1/2} = 245.7$  суток) и  $E_{\gamma} = 179,2$  фДж (1,1 МэВ).

**Источники нейтронов** изготавливаются в виде двойных герметизированных ампул из нержавеющей стали (полоний-борные источники выпускаются в ампулах из хромированной латуни).

**Плутоний-бериллиевые (Pu + Be)** источники быстрых нейтронов (типы ИБН-1 - ИБН-10) изготавливаются из сплава плутония с бериллием и характеризуются постоянством потока внешнего излучения благодаря большому периоду полураспада плутония ( $T_{1/2} = 24360$  лет). Выход нейтронов в источниках различных типов от  $1 * 10^4$  до  $5 * 10^7$  нейтр./с, а энергия нейтронов от 0,3 до 11 МэВ (т.е. 48 - 1860 фДж).

Достоинства этого типа источников нейтронов - стабильность внешнего потока нейтронов и практически полное отсутствие  $\gamma$ -излучения.



**Радий-бериллиевый ( Ra + Be )** источник нейтронов представляет собой смесь тонкого порошка металлического Be с бромистой солью радия, смешанных в отношении 3-5 г бериллия на 1 г ( Ra Br<sub>2</sub> ) и спрессованных в таблетку; а таблетка помещается в металлическую ампулу.

В только что сделанном (Ra+ Be) источнике в течение первого месяца после изготовления выход нейтронов нарастает за счет накопления Rn и ближайших продуктов его превращения ( RaV и RaC ). После накопления радона рост активности ( около 0,2 % за год ), продолжается до накопления равновесного количества полония.

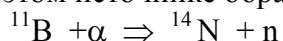
Недостаток (Ra+ Be) источника - высокая мощность потока  $\gamma$ -излучения, что требует надежной защиты.

**Полоний-бериллиевые ( Po + Be )** источники с относительно короткоживущими альфа-излучателями. На порошок карбида бериллия осаждается <sup>210</sup>Po. Получение <sup>210</sup>Po идет по реакции <sup>209</sup>Bi ( n ,  $\gamma$  ) <sup>210</sup>Bi .

( Po + Be ) источники изготавливаются двух типов с выходом нейтронов от 0,9\*10<sup>6</sup> до 9\*10<sup>7</sup> и от 10<sup>6</sup> до 4\*10<sup>8</sup> нейтр./с.

Активность ( Po + Be ) источников убывает по экспоненциальному закону относительно быстро ( т.к. T<sub>po</sub> = 138,4 суток ).

**Полоний- борный ( Po + B )** источник нейтронов изготавливается из смеси полония и карбида бора. Нейтроны в этом источнике образуются вследствие реакции



Получаемые нейтроны характеризуются энергией 4,5 - 5 МэВ, а выход внешнего излучения от 10<sup>6</sup> до 10<sup>7</sup> нейтр./с.

Недостатки источников - выход нейтронов у них в 6 раз меньше выхода нейтронов (( Po + Be ) источника.

**Для защиты персонала от излучения при работе** с источниками нейтронов используются переносные контейнеры ( например КНКП ).

Они состоят из внутреннего и наружного цилиндров, изготовленных из листовой стали. Пространство между цилиндрами заполнено парафином. Конструкция контейнера позволяет опускать источник в скважину, не вынимая его из контейнера, для чего имеется специальная прорезь для пропускания кабеля.

При толщине парафина 150 мм обеспечивается двукратное ослабление потока нейтронов.

## ТЕМА 11.

### ЛЕКЦИЯ 12. ГАММА МЕТОДЫ В ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

В качестве первичного излучения в методах ядерной геофизики наибольшее распространение получили гамма и нейтронное излучения, поскольку  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения имеют малую проникающую способность.

В названии того или иного метода ядерной геофизики обычно включают обозначение первичного излучения, воздействующего на горную породу, и характер взаимодействия или вид вторичного излучения, которое испускается горной породой и регистрируется детектором прибора.

**РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД (РРМ)** основан на возбуждении атомов анализируемых элементов первичным излучением и на последующей регистрации характеристического рентгеновского излучения возбужденных атомов.

В результате взаимодействия мягкого  $\gamma$ - излучения источника с веществом происходит фотоэлектрическое поглощение этого излучения электронами глубоких оболочек ( обычно К- и реже L-оболочки ). При этом атом оказывается в возбужденном состоянии, которое является очень неустойчивым . Через короткое время (

$T \cong 10^{-8}$  с ) на освободившееся место ионизированной оболочки переходит один из электронов с более удаленных оболочек.

В процессе такого перехода избыток энергии атома либо выделяется в виде кванта характеристического рентгеновского излучения ( для элементов с порядковым номером  $Z > 13$  ), либо передается вторичному электрону ( для элементов с  $Z < 13$  ).

При этом с увеличением  $Z$  элемента энергия характеристического излучения возрастает.

Для вырывания электрона с той или иной оболочки необходимо, чтобы энергия первичного излучения была больше энергии связи электрона на данной орбите. Так наибольшая энергия связи у электрона, находящегося на К-оболочке. На L-оболочке она уже в 5-7 раз меньше, чем на К-орбите и т.д.

Характеристическое излучение, испускаемое возбужденными атомами, имеет линейчатый спектр, который состоит из нескольких групп ( или линий ): К, L, М и т.д., сильно различающихся по энергиям.

Наибольшую энергию имеет излучение К-серии, которое возникает при переходе электрона с более удаленной орбиты на К-оболочку.

Определение большинства элементов проводят именно по излучению этой серии, которое является не только наиболее жестким, но и наиболее интенсивным. Оно состоит из четырех линий  $K_{\alpha 1}$ ,  $K_{\alpha 2}$ ,  $K_{\beta 1}$ ,  $K_{\beta 2}$  .

Относительная интенсивность этих линий следующая:

$$J_{\alpha 1} : J_{\alpha 2} : J_{\beta 1} : J_{\beta 2} = 100 : 50 : 25 : 5$$

Для исследований обычно используют  $J_{\alpha 1}$  , называемую **аналитической линией**.

Интенсивность этой линии характеристического излучения в значительной мере зависит от энергии первичного излучения.

Так для определения легких и средних элементов (  $Z = 20 - 30$  ) наиболее подходящим источником является  $Cd^{109}$  (  $T_{1/2} = 1.3$  год ) с энергией гамма-квантов 0,022 МэВ.

Для элементов с  $Z > 30$  в качестве источника первичного излучения применяют  $Tm^{170}$  (  $T_{1/2} = 129$  сут. ), испускающий кванты с энергией 0,052 и 0,084 МэВ.

Для элементов  $Z > 65$  используют  $Co^{57}$  (  $T_{1/2} = 270$  сут. ) с  $E_{\gamma} = 0,123$  МэВ.

*/ Все эти нуклиды получают путем облучения **стабильных** элементов нейтронами в ядерных реакторах . /*

Для регистрации характеристического рентгеновского излучения элементов используют приборы ( анализаторы ) на базе пропорциональных и сцинтилляционных детекторов. В лабораторном варианте метод РРМ реализуется на полупроводниковых детекторах.

Лабораторный анализ РРМ реализуется по следующей схеме .

Источник первичного гамма-излучения помещается с свинцовый коллиматор, создающий направленный на пробу пучок  $\gamma$ -излучения. Между пробой и детектором на пути характеристического излучения при необходимости устанавливаются дифференциальные фильтры.

Концентрацию анализируемого элемента находят относительным методом, т.е. сравнением скоростей счета от исследуемой пробы и стандартного образца (СО) . Поэтому пробы и стандартные образцы должны иметь приблизительно одинаковую степень измельчения ( крупность зерен 75 - 100 мкм ).

Объем пробы для исследования зависит от применяемой методики измерений и энергии характеристического излучения.

Для уменьшения влияния вещественного состава проб чаще всего измерения проводят в тонких слоях, для чего пробу массой 20- 100 мг (разведенную в ацетоне до жидкой пасты ) наносят на фильтровальную бумагу. Проба высыхает и становится

пригодной для анализа после выдержки в 5-10 минут. Аналогично готовится и стандартный образец.

При проведении анализа измельченную пробу и СО насыпают в тарелочки, уплотняют и разравнивают так, чтобы исследуемый материал не выступал над бортиком тарелочек. Все пробы и СО должны иметь толщину слоя, не меньшую толщины слоя насыщения (обычно 1-3 мм).

Применяемый при анализах спектрометр (анализатор) предварительно градуируют путем измерения СО с различной концентрацией определяемого элемента и строят график зависимости  $N_{CO} = f(q_{CO})$ .

Измеряя скорость счета пробы  $N_{пробы}$  с помощью этого графика определяют концентрацию анализируемого элемента в пробе  $q_{пр}$ .

Практика показала, что анализ порошковых проб на элементы с  $Z > 25$  возможен с порогом чувствительности  $n(10^{-2}-10^{-3})\%$ .

**Применение метода РРМ для опробывания руд и отбитой горной массы.** . Метод может применяться для опробывания поверхностей горных выработок, штучных образцов, керна скважин и отбитой массы с целью определения Cr и Fe в хромитовых рудах, Mn и Fe в марганцевых рудах, Pb и Zn в свинцово-цинково-молибденовых рудах, а также Sb, W, Sn, Mo.

Для уменьшения влияния изменений вещественного состава вмещающей породы, который обуславливает степень поглощения первичного и характеристического рентгеновского излучения, при проведении опробывания стенок горных выработок используют **способ спектральных отношений**.

Сущность данного способа заключается в том, что с помощью двухканального гамма-спектрометра измеряют отношение скоростей счета в двух участках спектра, один из которых соответствует энергии характеристического излучения определяемого элемента, а второй имеет несколько большие значения.

Так, например, при анализе на Pb ( $E_{\alpha_1} = 0,075$  МэВ) первый канал настраивают на энергию 0,07-0,08 МэВ, а второй - на 0,09-0,1 МэВ. В первом канале измеряют интенсивность характеристического излучения, а во втором - интенсивность рассеянного излучения источника, отражающего изменения поглощающих свойств пород.

Спектрометры градуируют сопоставлением данных рентгенорадиометрического и химического анализа бороздовых проб, отобранных по тем же сечениям рудного тела. Это обстоятельство позволяет определять пересчетные коэффициенты для перехода от спектральных отношений к концентрации металла по небольшому числу бороздовых проб.

**ГАММА-ГАММА-МЕТОДЫ** применяют в основном в полевом варианте для определения плотности пород и руд (плотностной гамма-гамма-метод ГГМ-П) и определения концентрации некоторых тяжелых элементов (селективный гамма-гамма-метод ГГМ-С)

Для облучения геологической среды в обоих случаях используют точечные источники  $\gamma$ -излучения.

Доказано, что гамма-поле точечного источника в конкретных условиях (определенная активность и энергия  $\gamma$ -излучения, тип детектора, геометрия измерений) являются функцией плотности среды ( $\sigma$ ) и её эффективного атомного номера  $Z_{эфф}$ .

**Плотностной гамма-гамма-метод** - основан на регистрации рассеянного горной породой гамма-излучения источника помещенного в среду или на её поверхность.

Метод позволяет определять такой важный параметр физических свойств горных пород и руд в естественном залегании, увеличивает производительность работ,

снижает их стоимость, улучшает достоверность результатов по сравнению лабораторными измерениями образцов.

Изучение плотности пород ГГМ выполняют помещением на поверхность породы или внутри её источник гамма-излучения и детектор, защищенный свинцовым экраном от первичного излучения.

При определенных условиях измерения поток рассеянного  $\gamma$ -излучения является функцией плотности и атомного номера среды  $\Phi = f(\sigma, Z_{эф.})$ .

При определении  $\sigma$  выбирают такие условия измерений, при которых влияние вещественного состава минимально. Поскольку из всех процессов взаимодействия  $\gamma$ -квантов со средой только комптоновское рассеяние ( $E\gamma > 0.5$  МэВ) не зависит от  $Z_{эф.}$ . В качестве источника используют изотопы  $Cs^{137}$  ( $E\gamma = 0.662$  МэВ) и  $Co^{60}$  ( $E\gamma = 1,25$  МэВ). Детекторами служат газонаполненные счетчики и сцинтилляционные (в металлических фильтрах) - малоэффективные при регистрации низкоэнергетической области спектра гамма-излучения).

Характер зависимости потока  $\gamma$ -квантов от плотности определяется по определенному закону (по мере увеличения  $\sigma$  поток  $\gamma$ -квантов вначале возрастает за счет рассеянных  $\gamma$ -квантов, а затем убывает вследствие поглощения части рассеянных гамма-квантов).

Для большинства пород, имеющих  $\sigma > 2,0$  г/см<sup>3</sup>, плотность определяют, используя спадающую ветвь кривых  $\Phi = f(\sigma)$ , т.е. выбирают такие источники и зонды, при которых увеличение  $\sigma$  сопровождается пропорциональным уменьшением потока рассеянных  $\gamma$ -квантов.

Для сред с малой плотностью (почвы, торф, снег, лед) определение  $\sigma$  осуществляется с помощью зондов малой длины в области восходящей ветви кривых  $\Phi = f(\sigma)$ .

**СЕЛЕКТИВНЫЙ ГАММА-ГАММА-МЕТОД (ГГМ-С)** служит для определения вещественного состава пород и руд.

Регистрацию рассеянного породой  $\gamma$ -излучения от внешнего источника выполняют в условиях, при которых основным процессом взаимодействия  $\gamma$ -квантов со средой является фотоэлектрическое поглощение.

Процесс фотоэлектрического поглощения  $\gamma$ -квантов является доминирующим при  $E\gamma < 0.5$  МэВ. Поэтому в качестве источников низкоэнергетического  $\gamma$ -излучения используют такие изотопы как  $Hg^{203}$ ,  $Tm^{170}$ ,  $Se^{75}$ ,  $Co^{57}$ .

*/ Соответствующие условия могут быть достигнуты и при использовании источников  $Cs^{137}$  и  $Co^{60}$  путем регистрации низкоэнергетической части спектра на больших расстояниях от источника  $\gamma$ -излучения/.*

Для руд определенного состава можно подобрать такие условия измерения, при которых обеспечиваются максимальная чувствительность к изменению  $Z_{эф.}$ , и линейность зависимости  $\Phi = f(Z_{эф.})$ . Это достигается выбором соответствующих каждому типу руд источников  $\gamma$ -квантов определенной энергии.

Учет влияния  $\sigma$  на характер зависимости  $\Phi = f(Z_{эф.})$  осуществляется путем использования специальных зондов. При небольших размерах зонда зависимость между потоком рассеянных  $\gamma$ -квантов и плотностью - прямая, а при больших R - обратная.

Двойные зонды, в которых два детектора удалены на разное расстояние от источника излучения позволяют скомпенсировать изменение плотности пород.

При **спектрометрии** рассеянного  $\gamma$ -излучения одновременно регистрируют две энергетические составляющие  $\gamma$ -поля, одна из которых зависит только от плотности пород, вторая (низкоэнергетическая) от  $\sigma$  и  $Z_{эф.}$  среды.

На этой основе возможно определение как плотности, так и вещественного состава пород и руд.

Возможности ГГМ-С определяются связью  $Z$  эфф, с содержанием в породе элементов с высоким атомным номером

Обычно ГГМ-С применяют для определения содержания в рудах тяжелых элементов, таких как Pb, W, Hg, Ba и др.

Зависимость между содержанием определяемого элемента и потоком рассеянного  $\gamma$ -излучения устанавливают в каждом конкретном случае на моделях из руд месторождения или даже одного рудного тела.

ГГМ-С используют для выделения руд и оценки содержания в них тяжелых элементов в условиях естественного залегания, в транспортных емкостях и при лабораторном анализе.

**МЕТОД ЯДЕРНОГО ГАММА-РЕЗОНАНСА** основан на использовании эффекта резонансного поглощения или рассеяния  $\gamma$ -излучения источника в исследуемой пробе или породе (известен в ядерной физике под названием эффект Мессбауэра).

Резонансное взаимодействие возникает лишь при воздействии  $\gamma$ -квантов, испускаемых определенными радиоактивными элементами на ядра те же элементов, но находящихся в невозбужденном состоянии.

Эти ядра возбуждаются (под действием первичного излучения) и мгновенно через ( $t=10^{-8}$  с) переходят опять в основное состояние, испуская кванты с энергией, равной поглощенной.

При этом ядерное гамма-резонансное взаимодействие сопровождается резким уменьшением интенсивности резонансных  $\gamma$ -квантов, проходящих через слой вещества в направлении первичного пучка (резонансное поглощение).

Резонансное поглощение сопровождается излучением, имеющим резонансную энергию (резонансное рассеяние).

Величина резонансного поглощения и рассеяния зависит от количества резонансных ядер, что позволяет использовать эффект Мессбауэра для определения концентрации некоторых элементов (окисного олова, Fe и др.).

Так для определения концентрации  $\text{SnO}_2$  в поверхностном слое исследуемой руды используют схему измерений, в которой источник  $\gamma$ -квантов и детектор расположены так, что регистрируется  $\gamma$ -излучение, возникающее при высвечивании возбужденных в результате резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов.

При неподвижном источнике  $\gamma$ -квантов энергия испускаемых фотонов равна резонансной и величина рассеянного излучения возрастает при увеличении концентрации рассеивающих ядер  $\text{Sn}^{119}$ .

При вибрирующем относительно опробуемой поверхности источнике энергия его  $\gamma$ -квантов изменяется из-за эффекта Доплера, при этом нарушаются условия возникновения резонанса и величина рассеянного излучения уменьшается.

Величину эффекта Мессбауэра (в %) определяют из выражения:

$$\varepsilon_M = \frac{N_0 - N_B}{N_B} 100(\%)$$

где  $N_B$  и  $N_0$  - скорости счета импульсов, вызванных  $\gamma$ -квантами соответственно при вибрирующем и неподвижном источнике  $\gamma$ -квантов.

Для проведения опробывания руд используются приборы МАК-1, МАК-3, АЛОК и др., которые предварительно градуируют на пробах исследуемого месторождения с известной концентрацией касситерита.

Методика проведения исследований аналогична гамма-опробыванию и заключается в измерении эффекта Мессбауэра в точках по профилю вкрест простирания рудного тела.

Результаты опробывания по профилю изображают в виде гистограммы концентраций.

Диапазон измеряемых концентраций 0,1 - 4 %.

## ТЕМА 12.

### ЛЕКЦИЯ 11. НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

К нейтронным методам ядерной геофизики относятся методы, основанные на взаимодействии нейтронов ( $n^1_0$ ) с породами и рудами и на последующей регистрации вторичных нейтронов, возникающих в результате ядерных реакций, либо вторичного  $\gamma$ -излучения, возникающего под действием нейтронов.

**НЕЙТРОН-НЕЙТРОННЫЙ МЕТОД (ННМ)** основан на регистрации потока замедляющихся ( $n^1_0$ ) в изучаемой среде от источника быстрых нейтронов.

Замедление ( $n^1_0$ ) определяется в основном содержанием водорода ( $H^1_1$ ) в горных породах, а поглощающие свойства - наличием элементов с высоким сечением ( $\sigma_3$ ) поглощения тепловых и надтепловых нейтронов, таких как (В, Li, Cd, Mn, Cl, Hg и др.).

Эти особенности нейтронного поля позволяют использовать ННМ для определения влажности горных пород, пористости пород и концентрации элементов с большими поглощения нейтронов.

**Определение влажности горных пород** производится приборами влагомерами, в которых применяют источники ( $n^1_0$ ) с выходом (6-8) нейтр./с, а в качестве детекторов применяются пропорциональные (борные) и сцинтилляционные счетчики тепловых нейтронов.

Кожух, в который заключен зонд, является одновременно фильтром, поглощающим тепловые ( $n^1_0$ ) и замедляющим надтепловые нейтроны.

В практике чаще всего используются алюминиевые фильтры, толщиной в несколько (мм), незначительно ослабляющий скорость счета.

Приборы - влагомеры (например, НИВ-1, НИВ-2, НИВ-3, НВУ -1 и др.) предварительно градуируют на типичных грунтах с различной влажностью, величина которой определена предварительно другим (независимым) методом.

Градуировочный график строят для средней плотности сухого грунта, а изменения плотности при полевых исследованиях учитывают путем введения соответствующих поправок.

Измерения проводят либо в поверхностном слое или в неглубоких ( $h = 10-15$  м) скважинах.

Измерительный зонд влагомеров включает в себя источники нейтронов (Po + Be), (Pu + Be) и детекторы тепловых ( $n^1_0$ ).

Глубинность исследований при определении влажности грунтов составляет  $140 \text{ г/см}^2$  при нулевой влажности и  $50-30 \text{ г/см}^2$  при влажности 10-40 %.

Относительная погрешность определений  $\pm 2-10\%$ .

#### **Определение элементов с высоким поглощением ( $\sigma_3$ ) нейтронов.**

Применение ННМ для изучения вещественного состава пород и руд основано на зависимости потока замедлившихся ( $n^1_0$ ) от концентрации нейтронно-поглощающих элементов в среде. Поток тепловых и надтепловых нейтронов убывает по мере роста концентрации этих элементов в облучаемой среде.

Зависимость потока от концентрации имеет нелинейный характер и определяется энергией нейтронов, условиями измерения и диапазоном содержания нейтронно-поглощающего элемента.

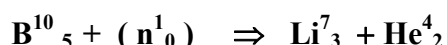
Выбираются такие условия, при которых достигается максимальная чувствительность к изменению содержания соответствующего элемента в диапазоне измеряемых концентраций.

К настоящему времени наиболее полно разработана методика определения бора (В) в лабораторных и полевых условиях.

По результатам борометрического профилирования выявляют и оконтуривают участки с повышенной концентрацией бора.

Нейтронное опробывание горных выработок занимает ведущую роль при подсчете запасов борного сырья.

Поглощение нейтронов бором приводит к реакции:



Чем больше  $\text{B}^{10}_5$  содержит порода, тем сильнее поглощение ( $\text{n}^1_0$ ) и тем меньше их число будет достигать детектора прибора.

Разработаны следующие варианты метода. :

1. Автомобильный вариант НМ - его обычно применяют при поисках ореолов бора в степных районах. Съёмку ведут с помощью датчика, буксируемого по поверхности земли автомашиной.

/ Датчик представляет зонд ( L = 38 см ) с парафиновым и бор-кадмиевым разделительными экранами для обеспечения направленности приема нейтронного излучения. В установке применяют мощный ( Po + Be ) источник с выходом  $N_{\text{вых.}} = 10^7$  нейтр./с.

Для регистрации ( $\text{n}^1_0$ ) используется борный пропорциональный счетчик . Скорость движения автомобиля по профилю определяется опытным путем ( V=5-20 км/ч. ) Пороговая чувствительность определения  $\text{B}_2\text{O}_3$  равна ( .ε = 0,01% ) . Глубинность исследований 15-25 см /.

2. Пешеходный вариант применяют для исследования участков, не доступных для автомобиля. Его разновидность может быть применена для опробывания горных выработок. В этом случае применяют зонд ( L = 18 см ) с двумя борными детекторами и нейтронным источником с  $N_{\text{вых.}} = 3 \cdot 10^4$  нейтр./с . Порог определения  $\text{B}_2\text{O}_3$  равен 0,01%.

Известен борометр на базе сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов и состоит из приставного устройства и радиометра типа СРП-68-01.

**НЕЙТРОННЫЙ ГАММА-МЕТОД ( НГМ )** основан на регистрации  $\gamma$ -излучения , возникающего при радиационном захвате нейтронов ядрами элементов.

Различают его следующие варианты:

- интегральный ( НГМи ) метод, где регистрируется интегральный поток  $\gamma$ -излучения;
- спектрометрический ( НГМс ), когда исследуется ( анализируется ) спектр  $\gamma$ -излучения.

**НГМи** близок к ( НМТ ) и решает практически те же задачи; ( НГМс ) - по своим возможностям более универсален и решает большой круг задач, в частности, при изучении содержания химических элементов.

Основное применение метод НГМ получил в скважинном варианте. Поток  $\gamma$ -излучения, регистрируемый детектором на некотором удалении от точечного источника

нейтронов, зависит от замедляющих свойств химических элементов, захвативших медленные нейтроны.

Причем возможность анализа пород и руд по  $\gamma$ -излучения радиационного захвата нейтронов определяется различиями величин сечения захвата нейтронов и индивидуальным характером спектров  $\gamma$ -излучения образующихся изотопов химических элементов.

Среди элементов, характеризующихся высокими сечениями захвата ( $\sigma_{\text{захв.}} > 6-7$  МэВ), выделяются три группы:

1. Имеющие интенсивные  $\gamma$ -линии в жесткой части спектра (Cl, Al, Fe, Ti, Mn, Ni, Cu и др.
2. Интенсивные  $\gamma$ -линии в средней части спектра (3 - 6 МэВ) такие как Ca, Si и др.
3. Наиболее обширную, для которой характерно наличие в спектре  $\gamma$ -излучения интенсивных  $\gamma$ -линий в относительно мягкой (менее 2-3 МэВ) - H, In, Cs.

Оценка содержаний различных элементов производится на основе изучения интенсивности  $\gamma$ -излучения в соответствующих частях спектра и последующего сопоставления с данными градуирования.

**НЕЙТРОННЫЙ АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД (НАМ)** основан на измерении наведенной активности искусственных радиоактивных нуклидов, образующихся при облучении горных пород нейтронами.

В нейтронном активационном методе различают активацию тепловыми и быстрыми ( $n^1_0$ ).

**Образующийся радионуклид** характеризуется определенным периодом полураспада, видом и энергией излучения, что используют для идентификации элементов, входящих в горную породу.

Активация тепловыми ( $n^1_0$ ) происходит по реакции ( $n, \gamma$ ).

Значительный активационный эффект наблюдается при активации  $\text{Na}^{23}$ ,  $\text{Al}^{27}$ ,  $\text{Cl}^{37}$ ,  $\text{Mn}^{55}$ ,  $\text{Cu}^{63}$ ,  $\text{Cu}^{65}$ .

Активации быстрыми ( $n^1_0$ ) осуществляется по реакциям ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ), ( $n, 2n$ ), имеющим пороговый характер, т.е. происходящим при энергии ( $n^1_0$ )  $E_n > 1$  МэВ.

Наиболее доступны для активации быстрыми ( $n^1_0$ ):  $\text{Fe}^{19}$ ,  $\text{Si}^{28}$ ,  $\text{P}^{31}$ .

Наведенная активность образца или горной породы  $A_t$  к которой регистрирует прибор в процессе измерений, определяется массой анализируемого нуклида  $m$ , потоком активизирующего излучения  $\Phi$ , макроскопическим сечением активации  $\Sigma$  и временем активации  $t_a$ :

$$A_t = \Phi \Sigma m (1 - e^{-\lambda t})$$

Где  $\lambda$  - постоянная распада активированного радионуклида.

Макроскопическое сечение активации можно получить из выражения (в  $\text{см}^2/\text{г}$ ):

$$\Sigma = \sigma_a f N_a / A$$

Здесь  $\sigma_a$  - сечение реакции, т.е. вероятность реакции, в результате которой образуется радионуклид;  $f$  - доля активизируемых атомов в естественной смеси нуклидов;  $N_a$  - число Авогадро ( $6,022045 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ );  $A$  - массовое число.



В общем виде формула изменения наведенной активности определяется следующим выражением :

$$A_t = A_{\infty} ( 1 - e^{-\lambda t} ) \times e^{-\lambda t}$$

Зависимость наведенной активности от (  $T_{1/2}$  ) радионуклида позволяет уменьшить влияние мешающих нуклидов, присутствующих в образце или породе, выбором соответствующего времени активации.

## ТЕМА 13

### ЛЕКЦИЯ 12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделившиеся из ядерной физики в начале XX века методы, основанные на измерении радиоактивных излучений, со временем получили широкое распространение в различных областях науки, техники, производства и самых различных областях человеческой деятельности.

Сегодня трудно представить ту или иную сферу человеческой деятельности, где бы не использовались радиоактивные вещества ( элементы ) и соответственно не использовались методы и способы измерения излучений, возникающий при превращениях этих элементов в другие ( более легкие, т.е. стоящие ближе к началу в таблице химических элементов Д.И.Менделеева ).

Радиометрические методы измерений получили широкое распространение в военном деле, прежде всего в тех родах войск, которые имеют дело с ядерным оружием, а также различными установками, где в качестве горючего используется радиоактивное топливо ( ядерные реакторы, силовые установки и пр. ). Особая роль этих методов достигается при анализе местности, подвергнутой ядерными бомбардировками и ракетным поражениям, а также возможным авариям и катастрофам произошедшим на различных ядерных объектах, в т.ч. в атомных электростанциях.

Достаточно велико использование радионуклидов в сельском хозяйстве - при борьбе с различными видами сорняками и вредителями растений. Особое место занимают в сельхоз.практике методы, ориентированные на выведение новых сортов полезных растений и животных.

Известно широкое применение радионуклидов в медицине и ветеринарии, как одно из эффективных способов борьбы с трудноизлечимыми болезнями.

Особое место занимают радиометрические методы при дозиметрическом контроле зданий, помещений и других построек, где могут располагаться те или источники радиоизлучений, или осуществляться с ними та или другая работа; а также на участках и более-менее крупных территориях, подвергнутых радиоактивному заражению.

Доказаны возможности отдельных методов ( радиогеохимических, эманационных и др. ) при прогнозировании таких грозных природных явлений как землетрясения и извержение вулканов.

Особо важное место принадлежит радиометрическим методам, используемым для решения тех или иных геологических задач, число которых увеличивается год от года.

Эти методы могут быть использованы, например :

- \* при определении абсолютного возраста различных геологических образований, попутно радиологические методы могут быть использованы в археологии при датировании возраста находок различного возраста и происхождения;
- \* при геологическом картировании больших и малых территорий, а также преимуществе при поисках, разведке, эксплуатации месторождений радиоактивных элементов;

\* попутно методы могут быть использованы при поисково-разведочных работах на различные виды полезных ископаемых, таких как (золото, алмазы, фосфориты, флюорит, редкие, редкоземельные элементы), которые находятся парагенетической и пространственной связи с различными радионуклидами;

Особая роль принадлежит радиометрическим методам при развитии урановой промышленности, где с каждым годом отмечается подъем добычи урановой руды и производства концентратов, что приводит в значительному расширению поисковых и геологоразведочных работ.

Подъем в урановой промышленности связан с возрастанием темпов развития ядерной энергетики и повышением спроса на урановое сырье.

Возросшая потребность в уране вызывает необходимость поисков новых крупных месторождений урана для удовлетворения текущих запросов.

Несмотря на произошедшую катастрофу на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.) в последние годы произошел существенный перелом в развитии урановой промышленности - - сопровождающийся во многих странах значительными увеличением поисково-разведочных работ на ( $^{238}_{92}\text{U}$ ).

В сферу поисковых исследований вовлекаются не только известные урановые провинции, но и новые районы, что обусловлено необходимостью существенного увеличения запасов уранового сырья в ближайшие десятилетия XXI в.

При этом ожидается повышение стоимости поисковых работ, связанное с задачей увеличения глубинности исследований, разработки новых методов и внедрения новой техники, а также в связи с удалением объектов работ от известных центров урановой промышленности.

По сравнению с прошлыми годами возросло количество типов выпускаемой радиометрической аппаратуры.

При этом основной упор делается на создание  $\gamma$ -спектрометрической аппаратуры, ориентированной на использование высокочувствительных кристаллических детекторов больших объемов, а также на внедрение многоканальных дифференциальных  $\gamma$ -спектрометров с применением дискретной цифровой регистрации и компьютеризированными измерительными комплексами.

Особое внимание стало уделяться геохимическим методам. При этом серьезное внимание уделяется выявлению корреляционных связей ( $^{238}_{92}\text{U}$ ) с другими элементами.

При такой постановке вопроса исследований - изучается распределение элементов-спутников в литохимических ореолах (почвы, отложения водотоков, породы) и в водах малых рек и ручьев. Для них характерны корреляции с В, F, SiO<sub>2</sub>; если корреляции урана с тяжелыми металлами в поверхностных водах не отмечаются, то для почв и отложений водотоков, напротив, характерны корреляции с тяжелыми металлами.

На ряде объектов отмечается связь урана с (Cu, Pb, Zn, Be и др.). Получены положительные значения при использовании ртутнометрических съемок при рекогносцировочных поисках урана.

Разрабатываются методы в основе которых лежит расчет величин отношений ряда химических элементов к друг к другу. Например, отношения  $\frac{\text{Hg}}{\text{Rn}}$  осуществленные на различных глубинах и высотах относительно дневной поверхности.

За последние годы активно разрабатываются новые геохимические методы поисков месторождений, базирующиеся на изучении наиболее информативных признаков рудных элементов, измеряемых на уровне почвенного горизонта. Спецификой методов является селективное выделение и накопление с применением мембранных технологий слабо закрепленных подвижных форм элементов в почвенном слое. С применением высокочувствительного масс-спектрометрического анализа и индуктивно связанной плазмы.

В практику геохимических исследований стали внедряться новые высокочувствительные методы анализа ( нейтроно-активационный , рентгенорадиометрический и др. )

Особая роль при поисковых и разведочных работах принадлежит скважинным методам. При этом особое место уделяется  $\gamma$ -каротажу в комплексе с электрокаротажем ( ПС, КС ), термометрии, кавернометрии , что позволяет повысить эффективность исследований.

В США, например, до 90 % затрат на радиометрические и геофизические исследования при поисках урана приходятся на каротажные работы. При этом применяется также комплекс методов включающий ГК, электрокаротаж, акустический каротаж, кавернометрию и термометрию.

В Англии при ГК на уран используются как счетчики Гейгера-Мюллера, та и сцинтилляционные детекторы. Применение первых предпочтительно при изучении жильных месторождений с высоким содержанием урана, а вторых - при разведке и оценке месторождений рассеянных руд.

Осуществлены попытки использования метода **селективного естественного гамма-каротажа**, основанного на использовании фотоэлектрического эффекта, обусловленного присутствием ( U ) в породе. Измерения ведутся в двух областях рассеянного гамма-спектра, определяется отношение количества импульсов в этих областях.

При этом величина отношения зависит от эквивалентного атомного номера породы, содержания ( U ) и химического состава породы.

Аппаратура включает сцинтилляционный детектор, два многоканальных анализатора и стабилизатор спектра.

Определенные ожидания связаны с изучением теплового потока и установлением зависимости между распределением радиоактивных элементов и образованием радиогенного тепла.

Возросла в последние годы роль эманационных методов не только как одного из глубинных методов поисков радиоактивных элементов, но и как методов направленных на решение геолого-экологических задач ( обследование жилых и рабочих зданий и помещений ) и прогнозирования землетрясений).

Не до конца оценены пока возможности таких относительно новых методов исследований как СПН( способ природных нейтронов), МЗН ( метод запаздывающих нейтронов), ММНД ( метод мгновенных нейтронов деления ) и пр.

Определенные горизонты могут открыться перед поисками глубокозалегающих радиоактивных руд после созданий относительно малогабаритных детекторов нейтрино - **метод нейтринной индикации.**

**Особое положение при геофизических исследованиях** принадлежит методам ядерной геофизики, которые повсеместно в различных вариантах ( космическом, аэро-авто-, скважинно-выработочном, лабораторном ) привлекаются не только для изучения вещественного состава пород и руд, но и при решении широко круга других задач:

\* **расчленение горных пород, оконтуривание рудных зон, определение мощности рудных тел и содержания полезных компонентов** в разрезах поисково-разведочных и эксплуатационно-разведочных скважин.

*По сравнению с методами геологического опробывания эти методы обладают большей представительностью и позволяют точнее определять глубину залегания, мощность и строение рудных тел. В настоящее время методы ядерной геофизики используют при подсчете запасов многих видов полезных ископаемых : бериллий, плавиковый шпат, хромиты и др.;*

\* **определение элементного состава горных пород и руд** в горных выработках, на выходах коренных пород и в наносах.

- \* **определение содержания металлов** в различного рода пробах - керновых, шламовых и т.д. на месте их отбора;
- \* **определение ряда физических свойств**( плотность, пористость, влагонасыщенность и пр. ) горных пород и руд прежде всего в естественном залегания, без отбора проб.

Методы ядерной геофизики, основанные на использовании как ампульных , так и без ампульных источников радиоактивных излучений стали играть существенную роль в повышении эффективности поисков, разведки и отработки месторождений разных видов полезных ископаемых ( прежде всего твердых ).

Основное достоинство ядерно-физических методов заключается в возможности представительной , непрерывной и экспрессной геологической документации разрезов скважин и горных выработок.

В ряде случаев они успешно применяются для качественной и количественной оценки оруденения и подсчета запасов полезного ископаемого.

Попутно методы, аналогичные методам ядерной геофизики можно с успехом использовать в самых различных сферах человеческой деятельности таких как ( криминалистика, археология, медицина , при анализе химического состава человека, в биологии и пр. ).

Особого успеха добились исследователи с методами, ориентированными на использование нейтронов различных энергий ( прежде всего при нейтронно-активационном анализе ).

Радиометрические и ядерно-физические методы исследований, примененные на летающих космических орбитальных и автоматических станциях способствовали обнаружению радиационных поясов в космическом пространстве ( прежде всего в непосредственной близости от орбит Земли и др. планет солнечной системы ), определению их конфигураций, выявлению их зонального строения, выяснению природы излучений и измерению интенсивностей в пределах определенных зон.

Аппаратура, установленная на пилотируемых космических кораблях и АКС ( автоматических космических станциях ) позволила определить химический состав многих космических тел и планет ( Луна, Венера, Марс и др. ).

**Достоинством всех этих методов**, что все измерения можно проводить не только в лабораторных условиях ( с предварительной подготовкой проб для анализа: дробление, размельчение, обработка рядом химических реагентов и пр. ) , но и в естественном залегании, т.е. на месте выхода исследуемых пород и руд на обнажениях, в горных выработках ( канавах, шурфах, штольнях, шахтах ), по разрезу буровых скважин и на большой удаленности от места регистрации ( на космических телах и в их атмосфере ).

**Эффективность методов ядерной геофизики и радиометрии зависит** от разработок в области теории методов, петрофизических исследований, аппаратуры и методик обработки и интерпретации.

Особая роль принадлежит интерпретации ( истолкованию ) получаемых данных, которая невозможна без использования математических методов и современной вычислительной техники.

Использование технических и теоретических достижений кибернетики открывает новые горизонты перед работниками различных специальностей: геологами, геофизиками, геохимиками, гидрогеологами.

Еще до недавнего времени во всех звеньях связанных с получением и обработки геолого-геофизических данных роль \* регулятора системы \* играл человек, причем

выполнял их в \*ручную\* не будучи вооруженным какими-либо устройствами, облегчающими, в первую очередь, анализ этих данных.

Малая эффективность \* ручной \* обработки связаны с целым рядом причин объективного и субъективного характера.

Радикальное повышение ЭФФЕКТИВНОСТИ \* обработка - интерпретации\* геолого-геофизической информации возможно на основе АВТОМАТИЗАЦИИ с привлечением современной кибернетической техники.

Применение этой техники может идти по двум линиям:

1. по пути совершенствования интерпретации текущей информации с использованием самой современной вычислительной техники (включая и автоматизированный сбор первичного материала);
2. углубленной обработке материалов прошлых лет (\* разведка архивов\*).

Повторная обработка \*архивов\* связана со следующим:

а) в процессе разведки, полученные выводы устаревают часто довольно быстро... вновь полученные данные требуют пересмотра положений, легших в основу первоначальной обработки материалов;

б) со временем совершенствуется и методика обработки материалов, в результате ранняя обработка данных становится неэффективной с точки зрения сегодняшнего дня.

Так, например в США в результате \* разведки архивов \* был открыт целый ряд месторождений различных полезных ископаемых ( прежде всего нефти и газа ).

В настоящее время речь идет о применении ЭВМ всех классов не столько для решения отдельных задач, связанных с громоздкими вычислительными работами, а сколько о применении этой техники для широкой автоматизации хранения и обработки разнообразной геолого-геофизической информации, получаемой от компьютеризированных станций и лабораторий.

Повышение эффективности \* Радиометрии и ядерной геофизики \* , и следовательно, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых различных видов, связывается с разработкой технологии комплексной интерпретации разных видов информации о районе работ - данных полевой геофизики, в первую очередь сейсмике, гравиразведки, электроразведки, геологических и др. данных, ГИС.

Формальное объединение существующих автоматизированных систем обработки разнообразной информации в единую систему с переводом на новые более мощные вычислительные средства не позволит обеспечить резкого повышения эффективности, из-за отсутствия единого методического подхода в разных системах.

Техническое перевооружение геофизических организаций новыми современными вычислительными средствами - персональными компьютерами, станциями интерактивной графики, мощными ЭВМ, спец. процессорами, оптическими дисками, аппаратными и программными средствами развития диалога \* пользователь - ЭВМ \* ..( включая средства распознавания речи, синтезаторы речи ) - явилось благоприятным моментом для создания нового поколения систем регистрации, обработки и

интерпретации геолого-геофизической информации, удовлетворяющих возросшим требованиям к детальному изучению месторождений.

В начале XXI в. Основными принципами организации интегрированной системы сбора, хранения, передачи, обработки, истолковании информации должны стать:

- система должна обеспечить сбор и любую обработку геолого-геофизической информации при решении задач на всех этапах геологоразведочных работ на различные виды полезных ископаемых.
- базироваться на использовании персональных компьютеров, сочлененных с большими ( даже супер-ЭВМ );
- обработка и интерпретация геоданных должна производиться, как в ВЦ на больших ЭВМ, так и в полевых и камеральных подразделениях на персональных компьютерах, соединенных с большой ЭВМ и представляющих собой рабочее место интерпретатора.;
- система должна иметь, помимо базы данных, базу знаний, куда загружаются все имеющиеся сведения о районе работ в виде карт, схем, разрезов, таблиц, разного рода теоретических и эмпирических данных, необходимых для совместного анализа данных ГИС и полевой геофизики ( среди которых важное место принадлежат методам ядерной геофизики и радиометрической разведки);
- система должна обеспечить работу со знаниями, находящимися в банке данных, включая их хранение, пополнение, проверку, логические решения, вывод, объяснение;
- система должна обеспечить консультирование геофизика по всем вопросам обработки и интерпретации, вызвавшим затруднения.

**Современное состояние** радиометрии и методов ядерной геофизики со временем должно привести к появлению нового научного направления, которое может быть названо методами атомной геофизики.

**Атомная геофизика** ориентируется на изучение прохождения через различные среды (твердые, жидкие, газообразные) многочисленных видов излучений (частиц, квантов, фотонов), обязанных своим происхождением не только ядрам химических элементов, но и их ближайшему окружению (электронам, находящимся на внутренних и внешних орбитах), а также взаимодействию различных излучений с этими электронами.

Кроме того эффект взаимодействия этих излучений может наблюдаться не только на ядрах атомов (в т.ч. находящихся в любом состоянии: нормальное, возбужденное, квазинормальное, субвозбужденное и пр.), но и на любых электронах, принадлежащих одному атому или группе разнородных атомов (т.е. различным химическим элементам).

Благодаря чему может быть существенно увеличено как число методов исследования, так и могут быть объяснены многие особенности строения материального мира (например, могут быть выделены отдельные составные части атомов).

Используемая в практике аппаратура базируется на последних достижениях человеческой мысли - электронные схемы собраны на малогабаритных и высоконадежных устройствах: микромодули, микросхемы (средние, большие и т.д.).

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

**альфа- и бета -частицы,**

гамма-кванты,  
гамма-каротаж,  
гамма-гамма-каротаж,  
градуирование,  
детектор радиоактивного излучения,  
единицы радиоактивности,  
ионизирующее излучение,  
ионизационная камера,  
комптон-эффект,  
нейтроны,  
поле ядерных излучений,  
радиоактивные вещества,  
радиационное поле,  
радиометр,  
спектрометр,  
сцинтилляционный счетчик,  
счетчик Гейгера-Мюллера,  
эманометр,  
эманации,  
эффекты взаимодействия излучения с веществом

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ

- Атом** - мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства. Атом состоит из ядра окруженного электронами, Электроны расположены в пределах пространственных зон, называемых оболочками. Оболочки принято обозначать буквами K,L,M, N, O,P,Q. Размеры атома примерно  $10^{-10}$  м.
- Атомное ядро** -центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов. Общее число протонов и нейтронов в ядре атома определяет его массу.
- Атомная масса**- масса атома химического элемента, выраженная в единицах физической шкалы атомной массы ( а. е. м. ). За единицу атомной массы принята 1/ 12 массы основного изотопа углерода  $C^{12}$ , равная  $1,6598 \cdot 10^{-27}$  кг.
- Градуирование**- определение цены деления радиометрического прибора ( при линейной зависимости ) или установление зависимости между показаниями прибора и параметрами изучаемого радиационного поля.
- Изотопы**- нуклиды с одинаковым числом протонов в ядре. Радиоактивные изотопы могут отличаться один от другого по своим радиоактивным свойствам.
- Изобары**- нуклиды с одинаковым числом нуклонов.
- Ион**- электрически заряженная частица, образующаяся при потере ( или присоединении ) атомом ( или группой атомов ) одного или нескольких электронов. Ионы всегда образуются парами : один заряжен положительно, а другой - отрицательно. Заряд иона всегда кратен единичному электрическому заряду и определяется числом потерянных электронов.
- Ионизация**- процесс образования ионов из нейтральных атомов и молекул. Для ионизации атома требуется источник энергии в виде электрического поля, электромагнитного излучения или какой-либо иной форме. Обратный процесс, связанный с превращением заряженных ионов в нейтральные атомы и молекулы называется **рекомбинацией**.
- Нейтрон**- частица с массой , близкой к массе протона, но электрически нейтральная,  $m_n = m_p + 2.5 m_e$   $T_{1/2} = 11,7$  мин.

**Нейтрино**- элементарная частица, носитель кинетической энергии, не обладающая электрическим зарядом. Для процессов, связанных с явлением радиоактивности, масса нейтрино составляет тысячные доли массы электрона. Нейтрино отличается огромной проникающей способностью.

**Нуклон**- ядерная частица с единичной массой без учета заряда. Количество нуклонов в ядре обозначается буквой *A*. Например,  $^{238}\text{U}$ ,  $^4\text{He}$ . Число нуклонов в ядре называется массовым числом.

**Нуклид**- вид атомов с данным числом протонов и нейтронов в ядре. Например, нуклиды  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{235}_{92}\text{U}$  являются атомами химического элемента урана. Каждый нуклид характеризуется только присущими ему радиоактивными свойствами. Так, радиоактивное превращение нуклида  $^{238}_{92}\text{U}$ , происходит в шесть раз медленнее, чем нуклида  $^{235}_{92}\text{U}$

**Позитрон**- элементарная частица, по массе равная электрону, но положительно заряженная.

**Протон**- частица, обладающая положительным электрическим зарядом  $q = 1.60 \cdot 10^{-19}$  Кл и массой  $m = 1.67 \cdot 10^{-27}$  кг. В физике заряд протона обозначают числом +1, а масса принимается равной 1. Число протонов в ядре атома обозначается числом *Z* и соответствует порядковому номеру химического элемента в периодической таблице Менделеева.

**Фотон**- элементарная частица, носитель энергии электромагнитного излучения. Фотон не имеет массы покоя, скорость движения фотонов в пространстве определяется свойствами среды, в вакууме скорость равна скорости света, т.е.  $V = 3 \cdot 10^8$  м/с

**Электрон**- частица с  $m_e = 0.91 \cdot 10^{-30}$  кг (приблизительно в 1840 раз меньше массы протона) и несущая единичный ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл) отрицательный электрический заряд.

**Эманации**- радиоактивные газы (*Rn*, *Tn*, *An*). Термин латинского происхождения на практике означает \*течь, истекать\*.

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### Основная литература

1. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. М., Атомиздат, 1980.
2. Горбушина Л.В., Зимин Д.Ф., Сердюкова А.С. Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1970.
3. Нагля В.В., Овчинников Л.И. Радиометрические и ядерно-физические методы разведки. М., Недра, 1982.
4. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. Л., Недра, 1989.
5. Радиометрия и ядерная геофизика. / Л.В.Горбушина, Д.Ф.Зимин, В.В.Нагля, Л.И.Овчинников / . М., Недра, 1974.
6. Разведочная ядерная геофизика. Справочник геофизика. Под ред. О.Л.Кузнецова, А.Л.Поляченко. М., Недра, 1986.

### Дополнительная литература

1. Баранов В.И., Сердюкова А.С., Горбушина Л.В., Назаров И.М., Ефимкина З.Н. Лабораторные работы и задачи по радиометрии. М., Атомиздат, 1964, 1966.



2. Заяц А.П., Нагля В.В. Радиометрическая аппаратура и оборудование. М., Недра, 1983, 1992.
3. Ларионов В.В., Резванов Р.А. Ядерная геофизика и радиометрическая разведка. М., Недра, 1988.
4. Методические указания к лабораторным работам по курсу \* Ядерная геофизика и радиометрическая разведка\* для студентов специальности 0105. / Н.Ф.Шевченко, А.Г.Антонец / . Ташкент, изд. ТашПИ, 1983.
5. Методические указания по проведению учебной геофизической практики ( Раздел \* Радиометрия и ядерная геофизика\* ) для студентов геологоразведочного факультета. / Н.Ф.Шевченко, А.Г.Антонец ). Ташкент, изд. ТашПИ, 1985.
6. Методические указания по теме \*Эманационный метод\* для студентов геологоразведочного факультета. / Н.Ф.Шевченко, А.Г.Антонец / . Ташкент, изд. ТашПИ, 1989.
7. Радиометрист. / Под ред. В.А.Царицына/. М., Недра, 1991.
8. Российский геофизический журнал. N 3-4, 1999 г.
9. Пруткина М.И., Шашкин В.Л. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. М., Энергоатомиздат, 1984.
10. Тезисы научно-технической конференции “Урановая геология и уранорудная база Республики Узбекистан”. Под ред. Х.К.Каримова ,А.П.Мазуркевича, И.Г.Печенкина , Ташкент, Госкомгеология 1996.
11. Пухальский Л.Ч. Рудничная геофизика. М., Энергоатомиздат, 1983.
12. Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан /КаримовХ.К., Бобонов Н.С., Бровин К.Г., Гольдштейн Р.И., Корсаков Ю.Ф., Мазуркевич А.П., Натальченко Б.И., Толстов Е.А., Шмариович Е.М./ Ташкент,Фан, 1996 г.

## Содержание

	стр.
<b>Лекция 1.</b> ВВЕДЕНИЕ	3
<b>Лекция 2.</b> Радиоактивность. Законы радиоактивных превращений	
<b>Лекция 3.</b> Радиоактивные излучения и взаимодействие их с веществом	
<b>Лекция 4.</b> Методы измерения естественной и искусственной радиоактивности	
<b>Лекция 5.</b> Гамма-методы	
<b>Лекция 6.</b> Эманационные методы исследований	
<b>Лекция 7.</b> Исследование естественной радиоактивности в буровых скважинах и подземных горных выработках	
<b>Лекция 8.</b> Основы охраны труда и техники безопасности при работе с радиоактивными веществами	
<b>Лекция 9.</b> Основы ядерно-геофизических методов разведки	
<b>Лекция 10.</b> Гамма-методы в ядерной геофизике	

## Лекция 11. Нейтронные методы ядерной геофизики

## Лекция 12. Заключение

### Ключевые слова

### Информационно-методическое обеспечение

## Приложение 1

### СПИСОК ВОПРОСОВ для САМОКОНТРОЛЯ

- Назначение и области применения методов ядерной геофизики и радиометрической разведки.
- История развития методов поисков радиоактивных элементов.
- Роль отечественных и зарубежных ученых в создании и развитии радиометрических и ядерно-физических методов.
- Основные виды радиоактивных превращений.
- Ионизирующие излучения и их основные свойства.
- Основные характеристики таких видов излучений как альфа-, бета-, гамма.
- Радиоактивные семейства и их основные свойства.
- Основные свойства таких радиоэлементов как: уран, торий, актино-уран, калий (в т.ч. К-40).
- Суть закона радиоактивных превращений и его математическое отображение.
- Основные константы закона радиоактивного распада ( превращения ).
- Понятие о радиоактивном равновесии, его виды.
- Коэффициент радиоактивного равновесия уранового ряда и способы его определения.
- Основные методы определения абсолютного возраста геологических образований и их сущность.
- Взаимодействие альфа- и бета- частиц с веществом и наблюдаемые при этом процессы.
- Гамма-излучение и процессы взаимодействия его с веществом.
- Понятие об энергетическом спектрах гамма-излучения.
- Нейтроны их взаимодействие с веществом. Классификация нейтронов в зависимости от энергий.
- Распространение в воздухе различных видов излучений и способы определения расстояний , на которые распространяются излучения различных энергий.
- Перечислить основные способы регистрации радиоактивных излучений и дать им краткие характеристики.
- Устройство и принцип работы основных типов детекторов, используемых в ядерно-геофизической и радиометрической аппаратуре.
- Устройство и принцип работы ядерно-геофизической и радиометрической аппаратуры.
- Основные единицы радиоактивности, используемые в различных методах радиометрии, дозиметрии и при оценке содержаний радионуклидов.
- Основные способы градуирования ( эталонирования ) радиометрической и ядерно-физической аппаратуры.
- Гамма-поле от точечного радиоисточника и объемных источников различной формы.
- Основные методы, применяемые при поисках месторождений радиоактивных руд.
- Общие принципы ведения полевых работ.
- Основные модификации гамма-съемки и их сущность.
- Особенности методики маршрутной и площадной гамма-съемок.
- Способы детализации, выявляемых радиоактивных аномалий.
- Особенности измерения гамма-полей в поверхностных горных выработках.
- Основные задачи ,решаемые гамма-спектрометрическими съемками.
- Особенности методики различных вариантов гамма-спектрометрических съемок.
- Основные особенности проведения интегрального и спектрометрического вариантов гамма-каротажа, области применения, круг решаемых задач.
- Различные виды эманионных методов: области применения, особенности методики и техники работ, области применения.

Основные операции на пунктах наблюдений при съемках САН и ЭТМ.

Основные виды радиогеохимических съемок: сущность методов, методика работ, обработка и представление материалов, их истолкование.

Особенности применения изотопно-свинцового метода, круг решаемых задач, возможности истолкования получаемых результатов.

Основные методы, применяемые в подземных горных выработках. Сущность методов и их отдельных вариантов (модификаций) и основы методики работ.

Особенности гамма-каротажа в горизонтальных, слабонаклонных и вертикальных подземных горных выработках.

Особенности проведения радиометрических работ в различных транспортных емкостях. Сущность метода и особенности методики работ метода, основанного на регистрации космического излучения (мюонов).

Основные правила техники безопасности при проведении полевых радиометрических и ядерно-физических работ.

Воздействие ионизирующих излучений на человека. Предельно допустимые нормы, установленные для работ с радиоактивными веществами.

Общие положения об активных ядерно-геофизических методах; современная классификация ядерно-физических методов разведки.

Процессы, лежащие в основе ядерно-геофизических методов, ориентированных на определение вещественного состава горных пород и руд и определения некоторых физических свойств горных пород.

Источники гамма-излучений и источники нейтронов различных энергий.

Гамма-гамма-метод. Различные варианты. Особенности методики работ в различных условиях.

Рентгено-радиометрический метод: сущность, основы теории и методики полевых работ. Обработка материалов и истолкование результатов исследований.

Метод ядерного гамма-резонанса: сущность метода, характер взаимодействия первичного излучения с анализируемым веществом, особенности методики работ различными вариантами метода.

Гамма-нейтронный метод: основы теории, методика и техника работ в различных условиях, обработка и интерпретация получаемых результатов.

Нейтронные методы ядерной геофизики. Особенности их применения.

Нейтронно-активационный анализ: особенности взаимодействия излучения с веществом, методика и техника работ, требования к аппаратуре, методика работ, интерпретация результатов.

Применение радиометрических и ядерно-геофизических методов в геологии, горном деле, экологии и других сферах человеческой деятельности.

Комплексное применение методов радиометрии и ядерной геофизики при решении широкого круга поисковых задач.

Перспективы развития методов ядерной геофизики, возможные достижения, появление новой сферы деятельности - атомной геофизики.

.