

*В.И. Исаев*

**дисциплина**

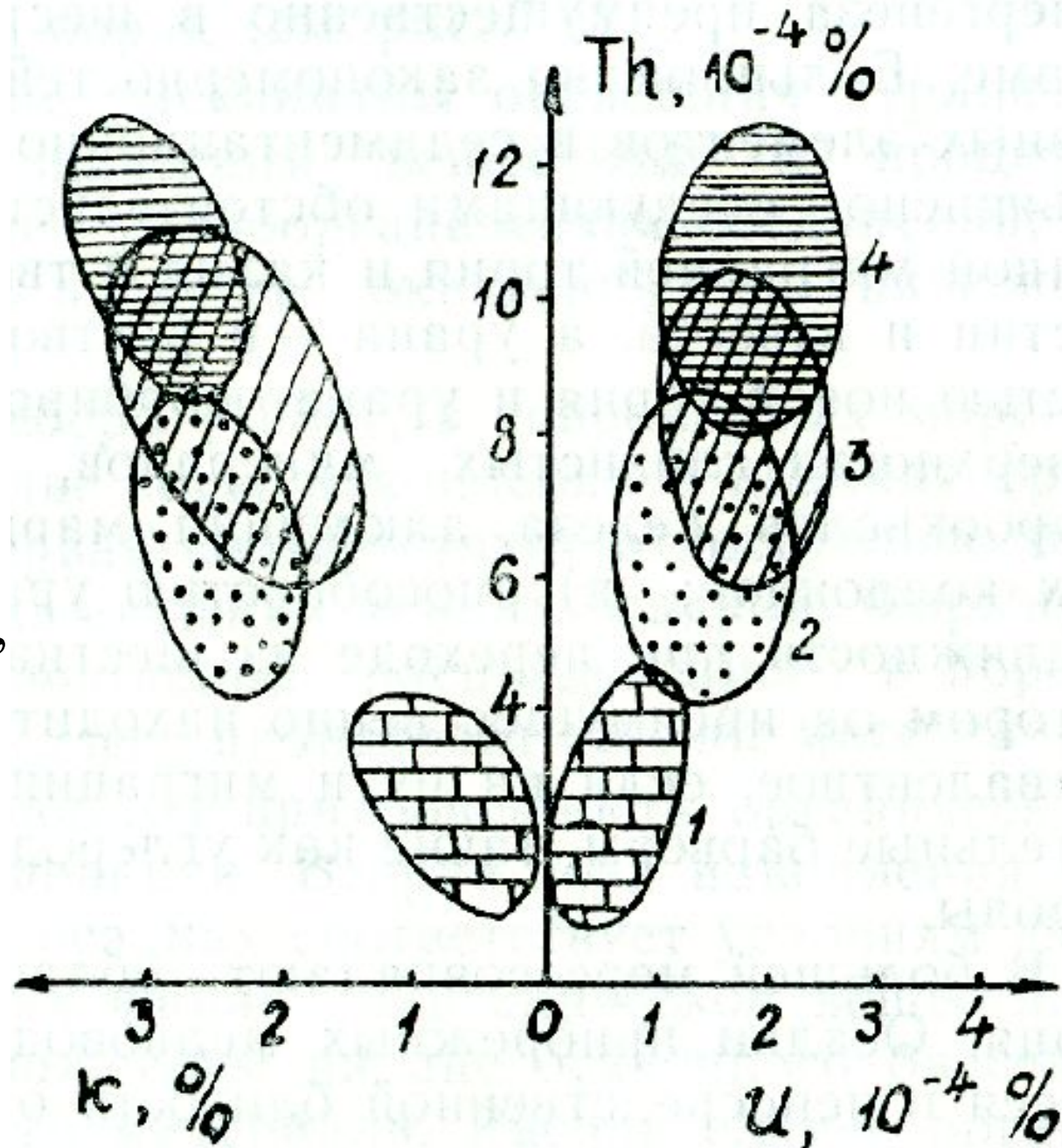
**«Теория методов ГИС».**

**ТЕОРИЯ РАДИОАКТИВНЫХ  
МЕТОДОВ**

- 1. Гамма-каротаж  
интегральный (ГК)**
- 2. Гамма-каротаж  
спектрометрический (ГК-С)**

## Радиоактивность осадочных горных пород. Радионуклиды.

Гамма-излучение калия ( $^{40}\text{K}$ ) монохроматично - 1,46 МэВ. Энергетические спектры элементов урановых ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) и ториевого ( $^{232}\text{Th}$ ) рядов имеют несколько линий, наиболее интенсивные — 242, 355, 609, 1120, 1765 кэВ и 238, 338, 583, 911, 969, 1587, 2620 кэВ соответственно.



# Радиоактивность горных пород

Активность  $a$  одного кубического метра вещества называют **удельной объемной активностью**.

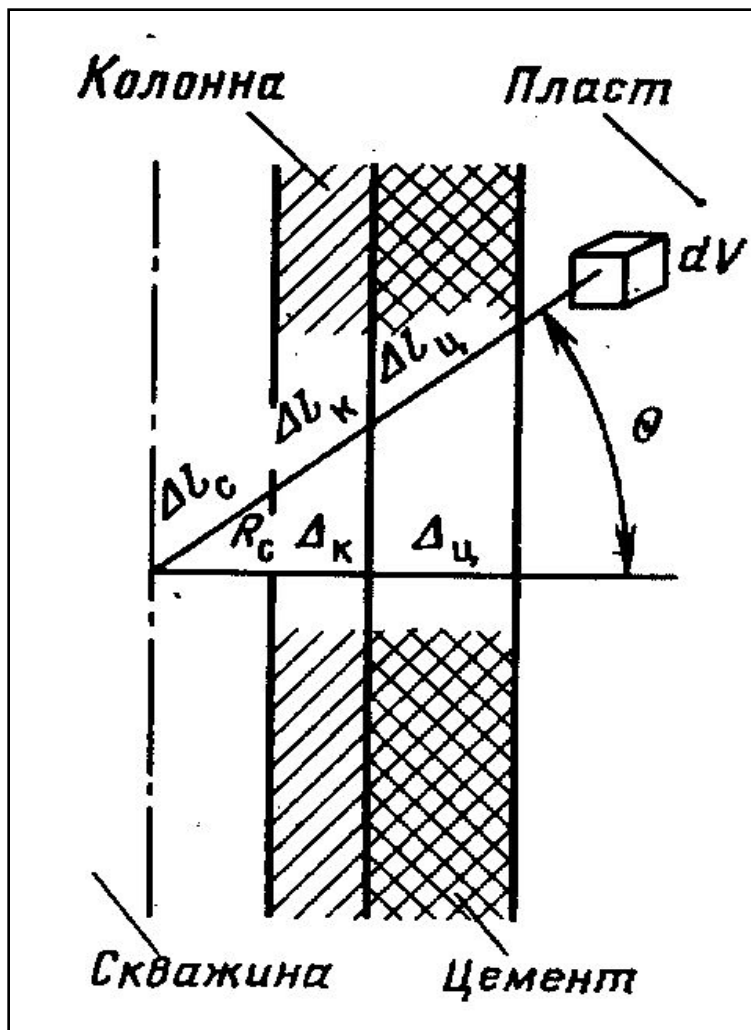
Величину  $a_m = a/\delta$  ( $\delta$  — плотность вещества) называют **удельной массовой активностью**.

Для практических целей используют **удельную объемную концентрацию  $Q_j$** , определяющую содержание  $j$ -го естественного радиоактивного элемента (ЕРЭ) в граммах в  $1$  сантиметре кубическом,

и относительную величину — **удельную массовую концентрацию**

$$q_j = Q_j / \delta.$$

# Решение прямой задачи интегрального ГК

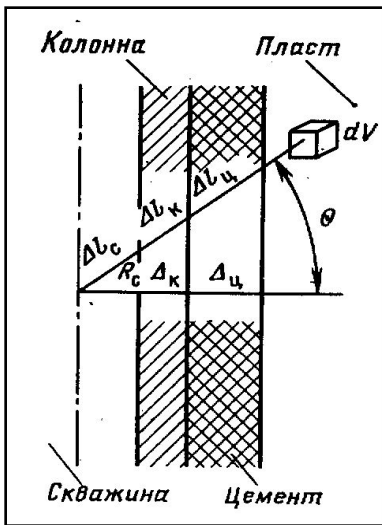


Решение прямой задачи заключается в нахождении зависимости показаний прибора от содержания ЕРЭ в пласте, вмещающих породах и промежуточных зонах — скважине, цементе, колонне. При приближенном аналитическом решении многократное рассеяние квантов учитывают, вводя **фактор накопления  $B$** .

Поток излучения в любой точке считают созданным отдельными элементарными объемами, детектор точечным, а источники равномерно распределенными в областях кусочно-однородной среды.

# Решение прямой задачи интегрального ГК

Плотность потока излучения **кусочно-однородного пространства**



$$\Phi_j = \frac{1}{4\pi} \sum_i a_j B_j \int_V \exp \left[ - \sum_i \mu_{ij} \Delta l_i \right] \frac{dV}{(r - r_1)^2}.$$

где  $a_j$  — удельная объемная активность  $j$ -го ЕРЭ;

$B_j$  — фактор накопления  $j$ -го ЕРЭ;

$\mu_{ij}$  — коэффициент ослабления излучения  $j$ -го ЕРЭ в  $i$ -й среде, расположенной между точками  $r$  и  $r_1$ ;

$\Delta l_i$  — длина части отрезка, соединяющего точки  $r$  и  $r_1$  в среде  $i$ .

\*

# Решение прямой задачи интегрального ГК

Плотность потока излучения для **однородной среды**  
с точечным детектором в начале координат

$$\Phi_j = \frac{B_j a_j}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu_j r}}{r^2} 4\pi r^2 dr = \frac{B_j a_j}{\mu_j}.$$

## Решение прямой задачи интегрального ГК

$$\Phi_j = \frac{B_j a_j}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-\mu_j r}}{r^2} 4\pi r^2 dr = \frac{B_j a_j}{\mu_j}.$$

$$q_j = Q_j / \delta$$

Так как

$$a_j = \lambda_{pj} N_j / dV.$$

$$N_j / dV = N_A Q_j / A_j \dots$$

Получаем

$$\Phi_j = B_j \lambda_{pj} N_A q_j / A_j \mu_{mj},$$

где:  $\lambda_{pj}$  – параметр распада (вероятность распада за единицу времени)  $j$ -го  $EPЭ$ ;  $N_j/dV$  - число ядер  $j$ -го  $EPЭ$  в единице объема;  $N_A$  - число Авогадро;  $A_j$  - атомная масса  $j$ -го  $EPЭ$ ;  $Q_j$  - объемная концентрация  $j$ -го  $EPЭ$ ;  $\mu_{mj} = \mu_j/\delta$  - массовый коэффициент ослабления излучения  $j$ -го  $EPЭ$ .



# Решение прямой задачи интегрального ГК

**Показания скважинного прибора в однородной среде, содержащей  $j$ -й ЕРЭ,**

$$I_j = c_j \Phi_j = c_j V_j \lambda_{pj} N_A q_j / A_j \mu_{mj},$$

где  $c_j$  – аппаратная постоянная.

Введя коэффициент концентрационной чувствительности ( $C_j$ ), характеризующий отклик прибора на излучение единицы удельной массовой концентрации  $j$ -го ЕРЭ,

$$C_j = c_j V_j \lambda_{pj} N_A / A_j \mu_{mj},$$

получим выражение в более компактной форме:

$$I_j = C_j q_j.$$



# Решение прямой задачи интегрального ГК. Урановый эквивалент.

Показания скважинного прибора в однородной среде, содержащей *j*-й ЕРЭ,

$$I_j = C_U q_j e_{Uj}.$$

где  $C_U$  – коэффициент концентрационной чувствительности по урану.

$q_j$  – удельные массовые концентрации урана (U), тория (Th) и калия (K).

$e_{Uj}$  – урановые эквиваленты единичной концентрации урана (U), тория (Th) и калия (K).

Суммарное показание гамма-каротажа

$$I_\gamma = C_U \sum q_j e_{Uj}$$

## Суммарная удельная массовая концентрация радионуклидов

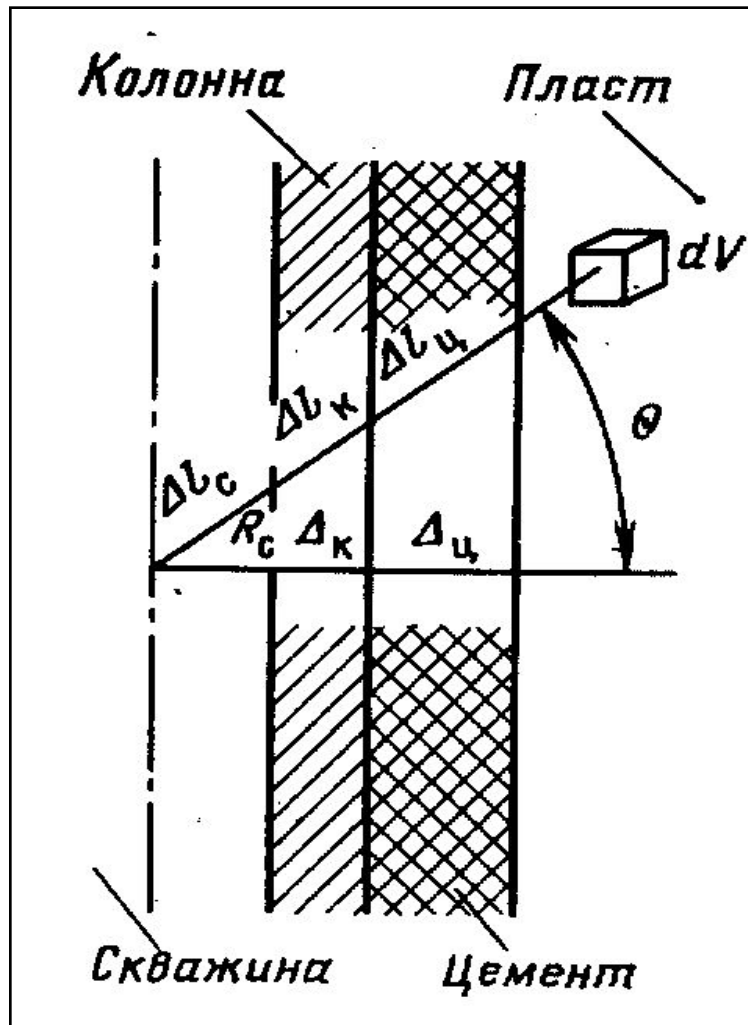
Суммарная удельная массовая концентрация смеси радионуклидов в единицах уранового эквивалента

$$\sum q_j e_{Uj} = I_\gamma / C_U,$$

где -  $I_\gamma = \sum I_j$  скорость счета, зарегистрированная с помощью интегральной аппаратуры гамма-каротажа.

Коэффициент  $C_U$ , позволяющий перейти от импульсов в единицу времени к суммарной концентрации радионуклидов в  $1$  грамме породы, определяют экспериментально с помощью образцового источника  $\gamma$ -излучения.

# Решение прямой задачи интегрального ГК



Для кусочно-однородной среды, содержащей пласт бесконечной мощности, плотность потока излучения равна сумме плотностей потоков, обусловленных пластом, скважиной, колонной и цементом

$$\Phi = \Phi_{пл} + \Phi_c + \Phi_k + \Phi_{ц}$$

В сферической системе координат

$$\Delta l_c = R_c / \cos\theta; \quad \Delta l_k = \Delta_k / \cos\theta;$$

$$\Delta l_{ц} = \Delta_{ц} / \cos\theta;$$

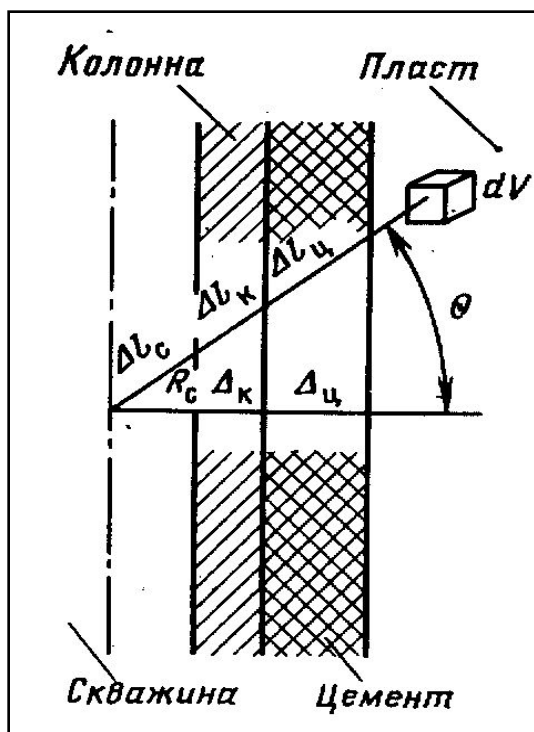
$$\Delta l_{пл} = r - (R_c + \Delta_k + \Delta_{ц}) / \cos\theta$$

# Решение прямой задачи интегрального ГК

$$\Phi = \Phi_{пл} + \Phi_c + \Phi_k + \Phi_{ц}$$

Поток излучения пласта  $\Phi_{плj}$ , содержащего  $j$ -и ЕРЭ

$$\Phi_{плj} = \frac{B_{плj} a_{плj}}{\mu_{плj}} G(\Delta) = \frac{B_{плj} \lambda_{плj} N_A q_{плj}}{A_j \mu_{плj}} G(\Delta),$$



Где

$$G(\Delta) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta \exp(-\Delta / \cos \theta) d\theta$$

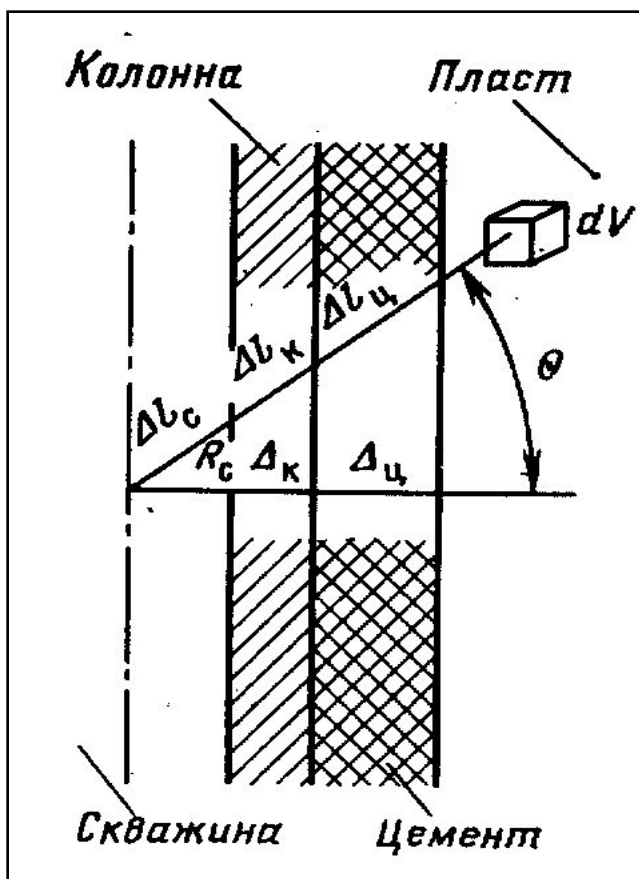
$$\Delta = \Delta_{ц} \mu_{цj} + \Delta_k \mu_{kj} + R_c \mu_{cj}$$

$$\Phi_j = \frac{B_j a_j}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu_j r}}{r^2} 4\pi r^2 dr = \frac{B_j a_j}{\mu_j}$$

$$\Phi_j = B_j \lambda_{pj} N_A q_j / A_j \mu_{mj}$$

## Решение прямой задачи ГК. Геометрический фактор.

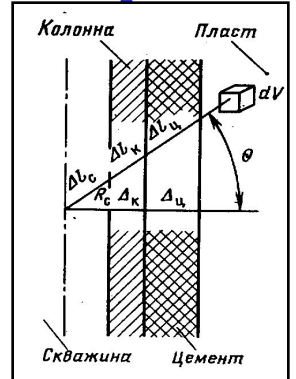
Плотность  $\Phi_{плj}$  пропорциональна коэффициенту  $G(\Delta)$ , который зависит от геометрии системы, коэффициентов  $\mu_{uj}$ ,  $\mu_{kj}$ ,  $\mu_{cj}$  и характеризует вклад данной области в регистрируемый сигнал. По существу  $G(\Delta)$  – аналог геометрического фактора. Для кусочно-однородной среды, содержащей  $K$  областей с  $j$ -м ЕРЭ



$$\sum_{i=1}^K G_{ij} = 1$$

## Решение прямой задачи ГК. Геометрический фактор.

Введя геометрические факторы колонны  $G_{jk}$ , цемента  $G_{jц}$ , скважины  $G_{jc}$ , пласта  $G_{jнл} = G(\Delta)$ , и переходя к показаниям прибора, для среды, содержащей смесь **ЕРЭ**, запишем:



$$I_{\gamma} = C_U \left( \sum_j q_{jнл} eU_j G_{jнл} + \sum_j q_{jc} eU_j G_{jc} + \sum_j q_{jk} eU_j G_{jk} + \sum_j q_{jц} eU_j G_{jц} \right).$$

Геометрические факторы областей мало зависят от типа **ЕРЭ**. Поэтому уравнение при однородной промежуточной зоне

$$I_{\gamma} = G_{нл} C_U \sum_j q_{jнл} eU_j + (1 - G_{нл}) C_U \sum_j q_{jнл} eU_j,$$

$\sum_j q_{jнл} eU_j$  - суммарная массовая удельная концентрация **ЕРЭ** в скважине, цементе и колонне.

\*

$$I_{\gamma} = C_U \sum_j q_j e_{Uj}$$

## Решение прямой задачи ГК. Пласт конечной мощности

Пласт конечной мощности, пересеченный необсаженной скважиной, вызывает приращение плотности потока

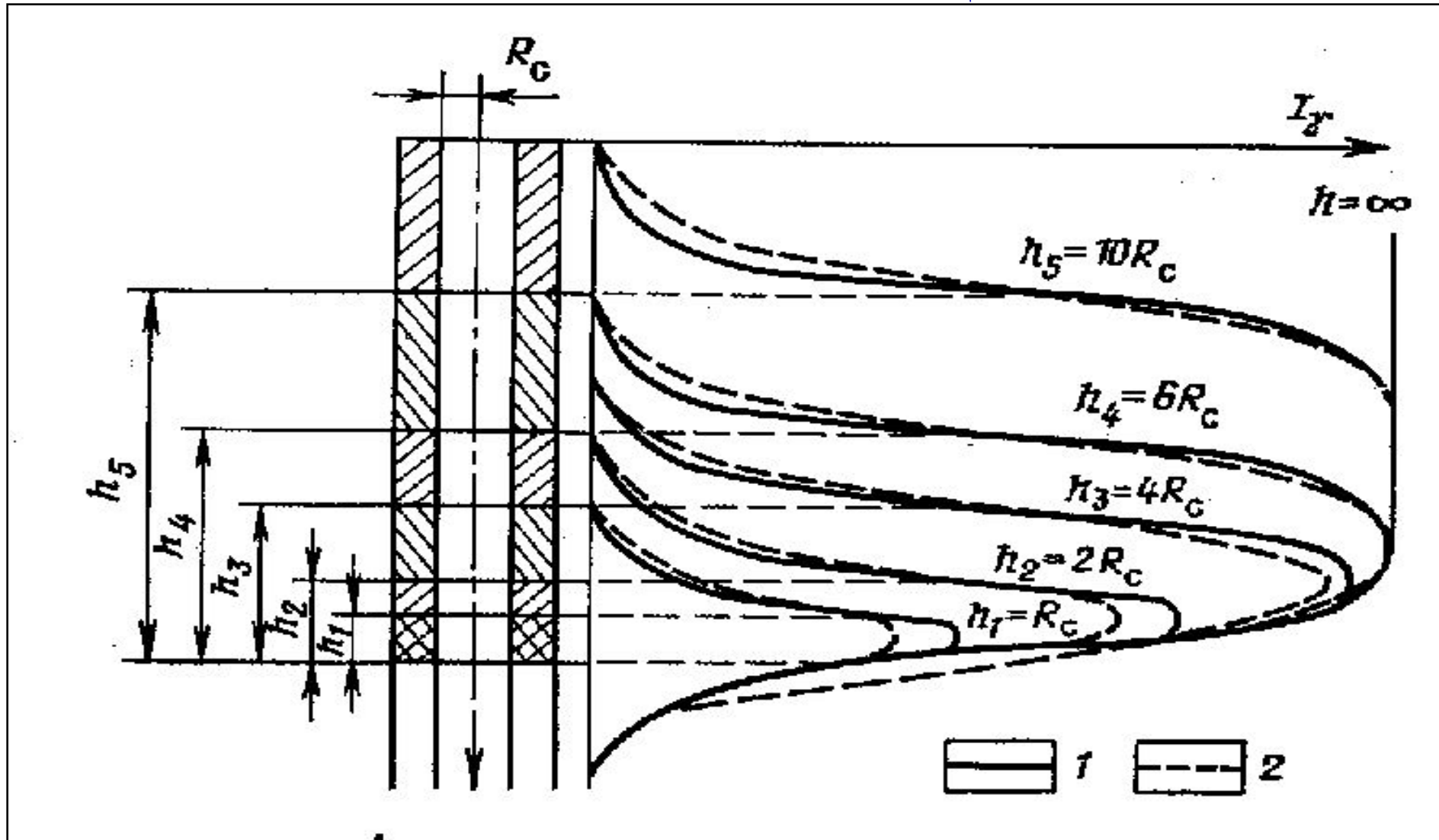
$$\Delta\Phi = \Phi_{пл} - \Phi_{вм},$$

где  $\Phi_{вм}$  — плотность потока излучения во вмещающих породах. Если параметры  $B$ ,  $\mu_{жс}$  и  $G$  против пласта и вмещающих пород практически равны, то  $\Delta\Phi$  равно плотности потока при массовой активности  $\Delta a = a_{пл} - a_{вм}$ , где  $a_{вм}$  — удельная объемная активность вмещающих пород.

Подставив в вышеприведенные формулы  $\Delta a$ , получим выражение для  $\Delta\Phi_{пл}$ , позволяющее рассчитать диаграммы  $ГК$  против пласта с заданными параметрами, для случая для  $v\tau_{я} = 0$ .



# Решение прямой задачи ГК. Диаграммы ГК против пластов конечной мощности.



Детекторы: 1 – точечный, 2 – длиной  $2R_c = 30 \text{ см}$ ;  $\mu_{пл} = 0,1 \text{ см}^{-1}$ ;  
 $\delta_{пл} = 3 \text{ г/см}^3$

# Спектрометрический гамма-каротаж. СГК

*Первичный спектр* естественного гамма-излучения пород дает представления о распределении его интенсивности по энергиям. Этот спектр содержит характерные максимумы, соответствующие энергиям определенных ЕРЭ.

*Аппаратурный спектр* гамма-излучения породы отмечает максимумы первичного спектра, соответствующие энергиям **0,6 и 1,8 МэВ для радия (урана); 0,9; 1,6 и 2,6 МэВ для тория; 1,46 МэВ для калия.**

*Дифференциальный спектр* характеризует интенсивность  $I_\gamma$  естественного гамма-излучения в заданном диапазоне энергии  $\Delta E$ , причем каждый диапазон исследуется отдельным каналом.

# Спектрометрический гамма-каротаж. СГК

Для определения удельных массовых концентраций  $q_U$ ,  $q_{Th}$ ,  $q_K$  по интенсивностям  $I_{\gamma 1}$ ,  $I_{\gamma 2}$ ,  $I_{\gamma 3}$ , зарегистрированным первым, вторым и третьим каналами, решают систему уравнений:

$$I_{\gamma 1} = a_{u1}q_U + a_{Th1}q_{Th} + a_{k1}q_K;$$

$$I_{\gamma 2} = a_{U2}q_U + a_{Th2}q_{Th} + a_{K2}q_K;$$

$$I_{\gamma 3} = a_{U3}q_U + a_{Th3}q_{Th} + a_{K3}q_K.$$

Коэффициенты  $a_U, a_{Th}, a_K$  в уравнениях, для конкретного радиометра, определяют путем эталонирования прибора.

# Спектрометрический гамма-каротаж. Задачи

С помощью СГК решают задачи:

1. **Детальное литологическое расчленение разрезов,** представленных терригенными, карбонатными, вулканогенно-обломочными, магматическими породами.
2. **Выделение в плотных карбонатных породах зон трещиноватости** по интервалам повышенного содержания урана при низком содержании тория и калия. И показаниям других методов ГИС на отсутствие глинистого материала.
3. **Определение минерального состава глинистых пород** по отношению  $Th/K$ .
4. **Оценка ресурсов органического углерода** в битуминозных глинистых нефтематеринских толщах.
5. **Контроль перемещения ВНК,** разделение продуктивного коллектора на участки заводненнные и не охваченные разработкой.