

Радиометрия скважин

Литература

1. Филиппов Е.М. Ядерная разведка полезных ископаемых. Справочник. К., “Наукова думка”, 1978, 588с.
2. Резванов Р.А. Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважин. Учебник для вузов. М., Недра, 1982.368 с.
3. Добрынин В.М., и др. Промысловая геофизика. –М.: Недра, 1986. 342 с.

Классификация ядерно- геофизических методов исследования скважин. Область применения. История вопроса.

Название: Радиоактивные, радиометрические, ядерные методы

Определение: радиоактивными методами исследования скважин принято объединять совокупность методов, основанных на регистрации различных ядерных излучений (гамма и нейтронное излучение)

Занимает основное место по числу модификаций, разнообразию решаемых задач.

Особенности:

1. Показания определяются в основном элементным составом горных пород
2. Структура и текстура горных пород слабо влияет на показания
3. Большинство методов применимо независимо от конструкции скважины, минерализации пластовых вод, характера заполнения колонны

Недостатки:

1. Меры предосторожности
2. Наличие статистических погрешностей
3. Малый размер зоны исследования

Радиоактивные методы

Пассивные методы

Регистрация естественного излучения горных пород

Метод естественной радиоактивности (Гамма- метод)
Основан на регистрации гамма-излучения радиоактивных элементов

А) Интегральная модификация
Б) Спектральная модификация

1) Однозондовые
2) Двухзондовые модификации

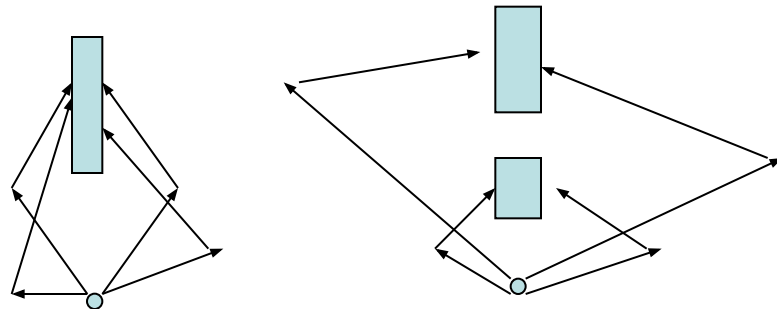
Активные методы

Регистрация вторичных излучений, связанных с облучением горных пород

Облучение гамма-излучением

Облучение нейтронами

А) Стационарные методы
Б) Импульсные методы



Нейтронные методы (НМ)

Стац. нейтр. методы

Нейтронно-нейтронный метод по надтепловым нейтронам ИНМ-нт

Нейтронно-нейтронный метод по тепловым нейтронам ИНМ-т

Нейтронный-гамма метод ИГМ

- 1) Интегральная
- 2) Спектральная модификации

Импульсные нейт. методы

Импульсный нейтронно-нейтронный метод по надтепловым нейтронам ИИНМ-нт

Импульсный нейтронно-нейтронный метод по тепловым нейтронам ИИНМ-т

Импульсный нейтронный-гамма метод ИИГМ

Углеродно-кислородный каротаж

Нейтр. актив. метод

Нейтронно-активационный метод - стационарный источник ИАМ

Нейтронно-активационный метод - импульсный источник ИАМ

Гамма-гамма метод (ГГМ)

Плотностная модификация

Cs-137 0.66 МэВ

Co- 60 1.25 МэВ

Селективная модификация

Th- 50-200 кэВ

Se- 121 кэВ

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1. Выделение горных пород
2. Выделение полезных ископаемых
3. Определение коэффициента пористости
4. Изучение технического состояния скважин
5. Определение характера насыщенности горной породы

История

- Начало - 30 – 40 годы 20 века. Гамма каротаж 1933 году- Горшков Г.В., Курбатов Л.М., Шпак А.В.
- Гамма-нейтронный каротаж- 1937 году Горшковым Г.В.
- Нейтронный- гамма каротаж- 1941 году Понтекорво Б.М.
- Нейтронно-активационный каротаж- 1947 году Коржев А.А.
- Гамма-гамма каротаж- 1950 годы плотность грунтов и почв Бердан Д., Бернард Р.К., Белчер Дж.
- Гамма-гамма каротаж- 1950 годы в скважине Арцыбашев В.А., Булашевич Ю.П., Гулин Ю.А.
- Гамма-гамма каротаж селективная- 1957годы Воскобойников Г.М.
- Импульсный нейтронный каротаж- идея 1956 году академик Флеров Г. Н.

Барсуков О.А., Дворкин И.Л., Резванов Р.А., Кантор С.А., Титл Ч., Аксельрод С.М., Орлинский Б.М., Кожевников Д.А., Поляченко А.Л. И др.


Взаимодействие излучения с веществом

- Радиоактивность- это самопроизвольное превращение ядра изотопа в ядра других элементов с выделением энергии.

α – распад: ${}^A_z M \rightarrow {}^{A-4}_{z-2} M + {}^4_2 He$

β – распад: ${}^A_z M \rightarrow {}^A_{z-1} M + {}^0_{-1} \beta$

γ – распад: $({}^A_z M)^* \rightarrow {}^A_z M + \gamma$



Нейтральные атомы содержат Z орбитальных электронов. Изотопы имеют тот же атомный номер Z, но разное массовое число A.

$(\frac{A}{z} M)^*$ символом обозначено ядро, находящееся в возбужденном состоянии. Ядро возвращается в свое основное состояние $\frac{A}{z} M$ испуская γ - квант.

$N = N_0 e^{-(\ln 2 / T) t}$ - **Закон радиоактивного распада**

1 Бк (беккерель) – 1 расп/сек, внесистемная единица -кюри (Ки) равна $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк, т.е. числу распадов в 1 г 226 Ra.

1 миллиграмм-эквивалент радия (Мг.экв.Ра – активность препарата, γ -излучение которого обладает такой же ионизирующей способностью, как и излучение 1 мг 226Ra (вместе с продуктами его распада) после прохождения через платиновый фильтр толщиной 0,5 мм.

Поле излучения характеризуется: *Плотностью частиц*- число частиц в единице объема в данный момент времени, n

Плотность потока частиц- $\Phi = n \cdot v$

Интенсивность излучения- энергия излучения падающего в единицу времени на единичную площадь $I = \Phi \cdot E$

α - излучение. Каждый α - активный изотоп испускает α - частицы, имеющие определенные энергии.

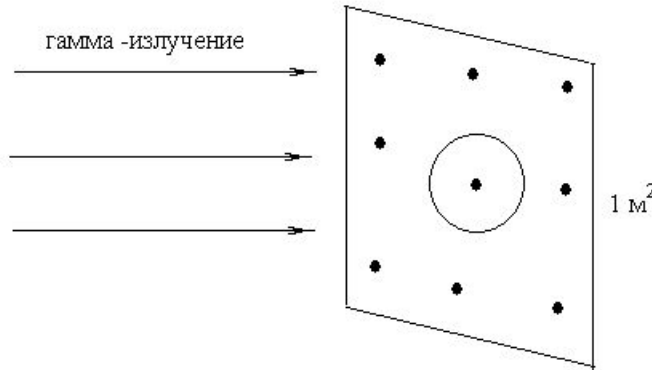
Энергии α - частиц, испускаемых различными изотопами, лежат в пределах от 4 до 11 МэВ. Пробег α - частицы в воздухе составляет 3-11 см, в алюминии 0,08-0,4 мм.

β -излучение. Проникающая способность β -излучения значительно больше, чем α - частиц. Пробег β -частиц в воздухе зависит от их энергии, пробег частиц обладающих энергией 3 МэВ, составляет около 3 м. Одежда и кожный покров человеческого тела поглощает примерно 75% β - частиц и только 20-25% проникает внутрь человеческого организма на глубину 2 мм.

γ - излучение обладает наибольшей проникающей способностью по сравнению α - и β - излучениями. В воздухе γ - излучение может преодолевать значительные расстояния, не испытывая ослабления. Свинец, сталь, бетон, грунт, вода и другие плотные материалы при определенных толщинах вызывают существенное ослабление γ - излучения.

Гамма- квант взаимодействует с атомами вещества.

Вероятность взаимодействия частицы с атомом-



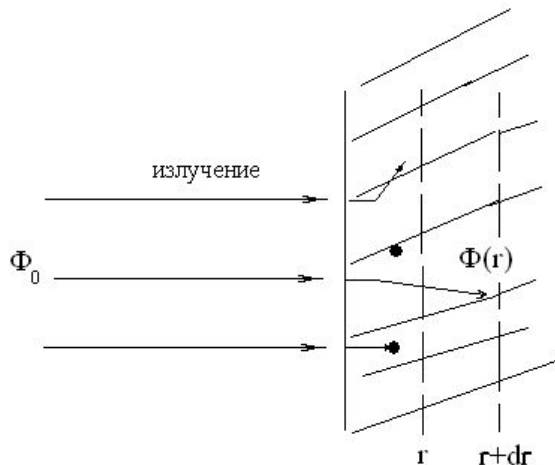
$$P_{вз} = \sigma N_{am}^* \Phi$$

N_{am}^* - число атомов в 1 м^2

σ -сечение взаимодействия
Площадь шара вокруг атома
Измеряют 1 м^2 или 1 см^2

Макроскопическое сечение взаимодействия $\mu = \sigma N_{am} \rightarrow 1/\text{м} \rightarrow 1/\text{см}$

Для сложных сред $\mu = \sum_1^K \sigma_i N_{ami}$



Изменение потока частиц

$$d\Phi = -\mu \Phi(r) dr$$

$$\mu = -\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dr}$$

Макросечение это изменение потока частиц относительно первоначального на единицу длины, т.е. линейный коэффициент ослабления

Интегрируем $\Phi(r) = \Phi_0 e^{-\mu r}$ - Закон ослабления параллельного пучка

$\Phi(r) = \Phi_0 B e^{-\mu r}$ B – фактор накопления

$\lambda = \frac{1}{\mu}$ - Длина свободного пробега

Виды взаимодействия гамма-излучения с веществом

Фотоэффект(фотоэлектрическое поглощение)



$$\delta_{\phi} \approx 6,65 \cdot 10^{-25} \frac{4\sqrt{2}}{134^4} Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_{\gamma}} \right)^{7/2}$$

Сечение взаимодействия растет с увеличением атомного номера Z вещества и наиболее вероятно взаимодействие с электронами К- и L-оболочек, ближайших к ядру.

Комптон эффект(комптоновское рассеяние)



$$\mu_k = N_{at} \sigma_k = \frac{N_A \rho}{M} Z \sigma_{ke} = \frac{1}{2} N_A \rho \sigma_{ke}$$

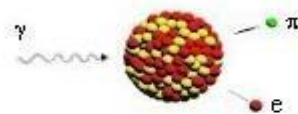
$$\frac{Z}{M} \approx 1/2$$

Сечение на один атом δ_k равно $\delta_k(E) = Z \delta_{ke}(E)$, где δ_{ke} – сечение на один электрон (не зависящее от Z)

Здесь N_{at} – число атомов в 1 см³; $\delta_e = (2Z/M) \rho$ – электронная плотность вещества; N_A – число Авогадро; M – массовое число атома; ρ – плотность вещества.

$$E'_{\gamma} = E_{\gamma} \left[1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \right]^{-1}$$

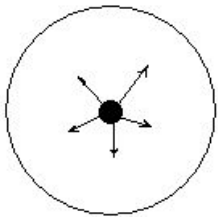
Эффект образования пар



$$2m_e c^2 = 1.02 \text{ МэВ} \quad \delta_n \approx Z^2; \quad \mu_n \approx \frac{Z^2}{M}$$

Уравнения переноса излучения. Приближенные методы решения.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\Omega \nabla \Phi - (\Sigma_s + \Sigma_p) \Phi + \int_{4\pi} \int_0^{\infty} \Sigma_p \Phi g(E, E', \Omega, \Omega') dE' d\Omega' + S(\vec{r}, E, \Omega, t)$$



$$S = 4\pi r^2$$

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \quad \text{Поток гамма-излучения при поглощении}$$

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi r^2} B(r, z, E, \Gamma) e^{-\mu r} \quad \text{Поток гамма-излучения с учетом рассеяния}$$

Формула Тейлора

$$B = A_1 e^{\alpha_1 \mu_0 r} + (1 - A_1) e^{\alpha_1 \mu_0 r}$$

Диффузионное приближение

Возрастное приближение

МЕТОД МОНТЕ -КАРЛО

Метод естественной радиоактивности. Гамма- метод. Теория метода. Область применения.

Радиоактивность горных пород обусловлена элементами **уранового и ториевого** радиоактивных семейств (ураном, торием и радиоактивными продуктами их распада), также **калием** К- 40.

U

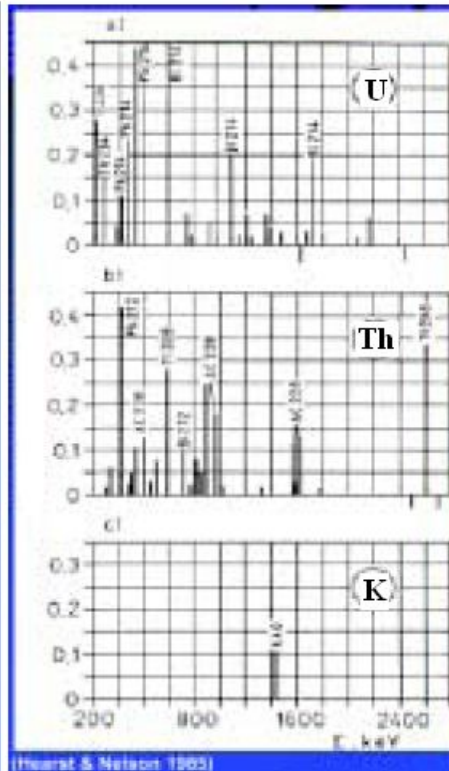
Спектр урана
Типичная серия Вi-214, энергия
1.76 МэВ

Th

Спектр тория
Типичная серия Th-208,
энергия 2.61 МэВ

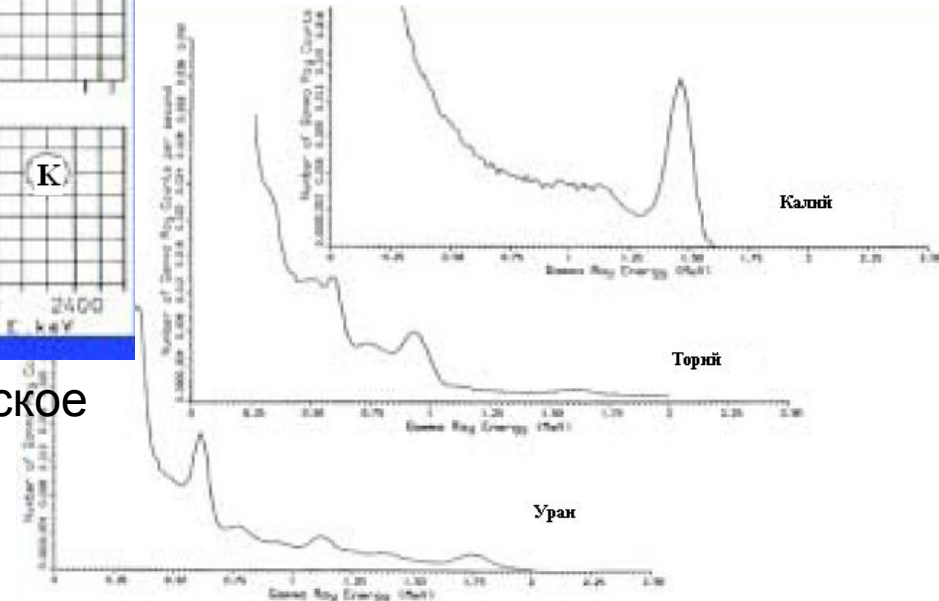
40K

энергия 1.46
МэВ



Ra-226: 242,352,609,1120,
1765 кэВ и 2204 и 2448 кэВ

238,338,583,911,969,1587 и
2620 кэВ



Калий- монохроматическое
излучение 1.46 МэВ

Наибольшая радиоактивность- магматические породы: граниты

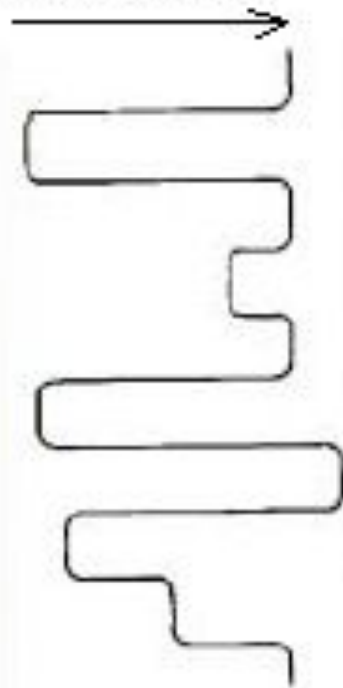
Наименьшая радиоактивность- ультраосновные породы

Низкая радиоактивность - осадочные породы (кварц, ангидрит, гипс, галлий)

Неглинист.песчаники, соль, известняк <0.5 пг.экв.Ра/г

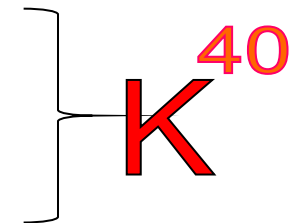
Глины – 2-5 пг.экв.Ра/г

Гамма-активность
увеличивается



глина
соль или уголь
глина
песчанистая глина
глина
известняк
глубоководная глина
песчаник
глинистый песчаник
глина

Полевой шпат
Слюда
Иллит

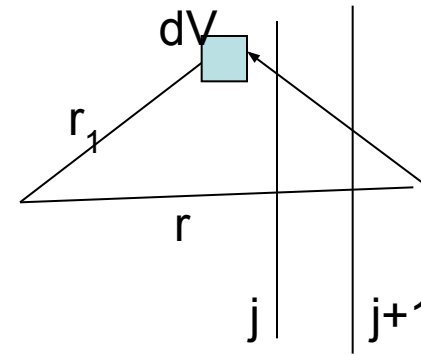
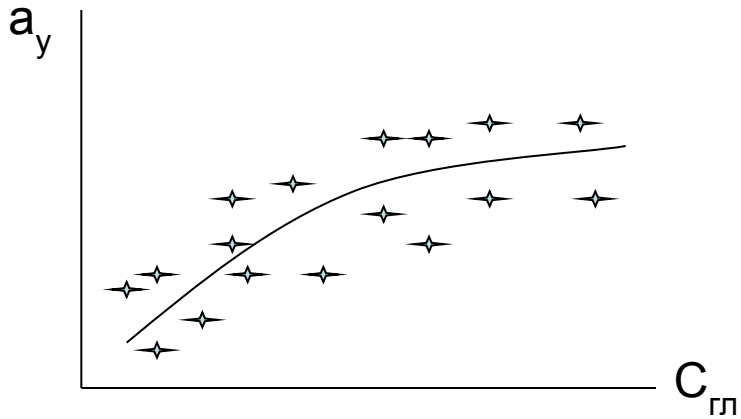


Фосфаты



Основной вклад в гамма-излучение
доломитов и известняков – Ra 226

Теория метода ГК



a_m – массовая удельная активность

ρ – плотность

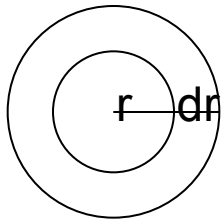
N_i – число γ квантов с энергией E_i с единицы активности

$$a_m \rho N_i dV = a N_i dV$$

$$d\Phi = \sum_i \frac{N_i a dV}{4\pi (r - r_1)^2} e^{-\sum_j \mu_{ij} \Delta l_j}$$

$$\Phi_i = \frac{N_i}{4\pi} \int \frac{a}{(r - r_1)^2} e^{-\sum_j \mu_{ij} r_j} dV$$

Однородная среда



$\mu, a - const$

$$r_1 = 0$$

$$dV = 4\pi r^2 dr$$

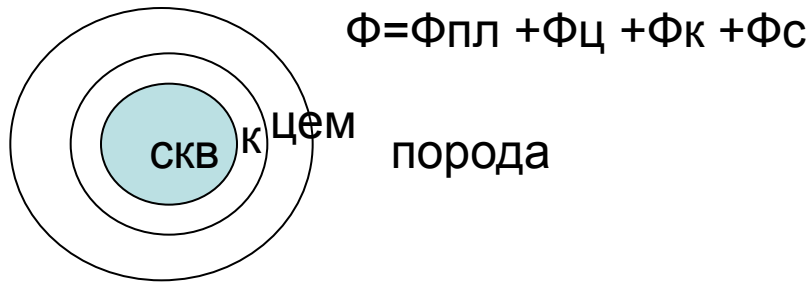
$$\Phi_i = \frac{N_i a}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} 4\pi r^2 dr = \frac{N_i a}{\mu} = \frac{N_i a_m \rho}{\mu_m \rho} = \frac{N_i a_m}{\mu_m}$$

Поток гамма-излучения не зависит от плотности, а зависит от удельной массовой активности горных пород

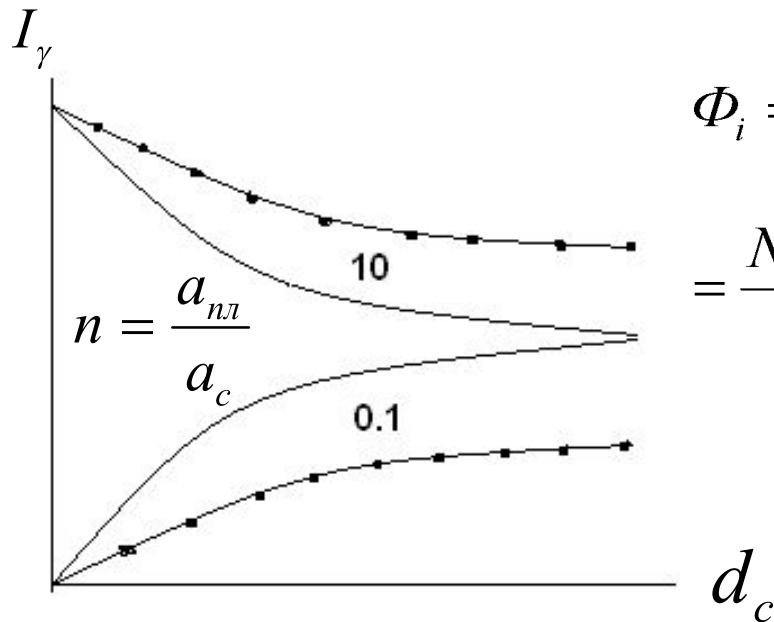
С учетом рассеяния

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \frac{N_i a}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} 4\pi r^2 B dr = \frac{N_i a}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} 4\pi r^2 (A_1 e^{-\alpha_1 \mu_0 r} + (1 - A_1) e^{-\alpha_2 \mu_0 r}) dr = \frac{N_i a}{\mu} \left[\frac{A_1}{1 + \alpha_1} + \frac{1 - A_1}{1 + \alpha_2} \right] = \\ &= \frac{N_i a_m}{\mu_m} \left[\frac{A_1}{1 + \alpha_1} + \frac{1 - A_1}{1 + \alpha_2} \right] \end{aligned}$$

Обсаженная скважина



$$\Phi_{пл} = \frac{N_{inn} a_{пл}}{\mu_{пл}} E(\Delta)$$

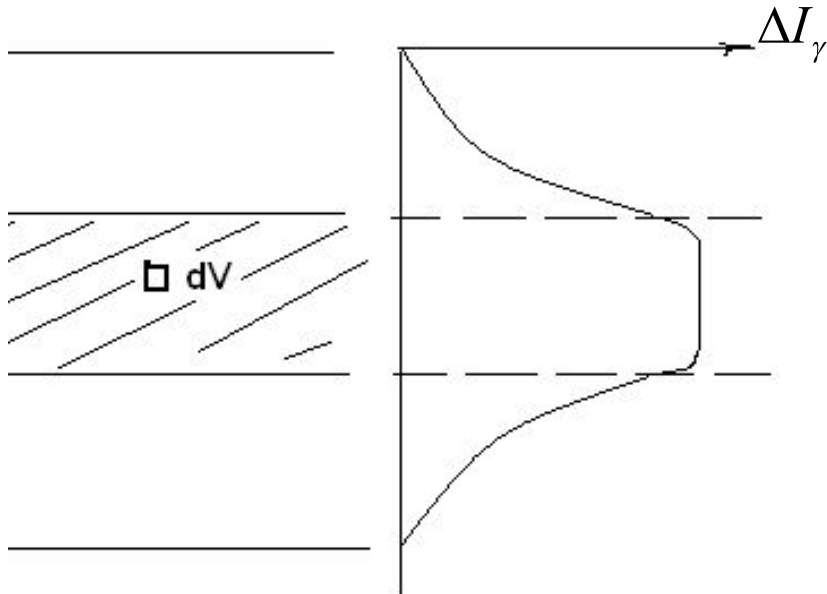


$$\Phi_i = \Phi_{пл} + \Phi_c$$

$$\Phi_i = \frac{N_{inn} a_{пл}}{\mu_{пл}} - \left(\frac{N_{inn} a_{пл}}{\mu_{пл}} - \frac{N_{ic} a_c}{\mu_c} \right) (1 - E(R\mu_c)) =$$

$$= \frac{N_{inn} a_{пл}}{\mu_{пл}} E(R\mu_c) + \frac{N_{ic} a_c}{\mu_c} (1 - E(R\mu_c))$$

Необсаженная скважина пересекающая пласт ограниченной мощности

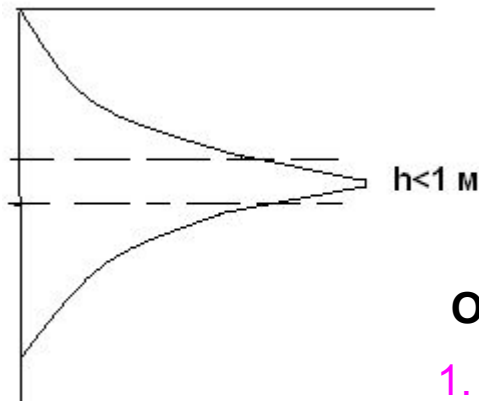
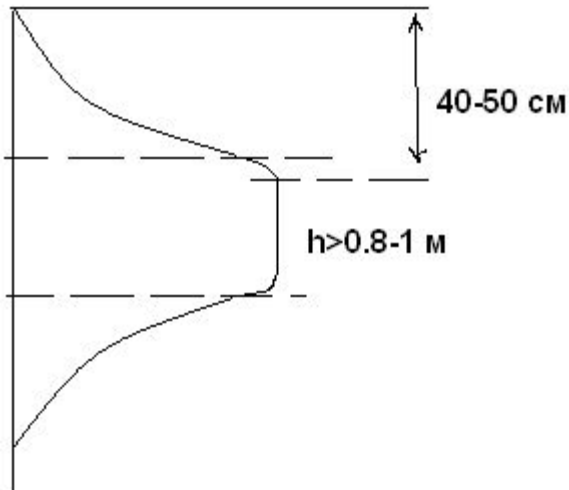


$$\Delta I_{\gamma} \approx \frac{N_i \Delta a R S}{2}$$

$$\Delta a = a_{пл} - a_{вм}$$

R - радиус скважины,

S -чувствительность детектора



Особенности:

1. Переходной участок 40-50 см
2. Форма кривых симметрична относительно середины пласта

Исключение влияния скважины

$$\Delta I = \frac{I_{\gamma} - I_{\gamma 1}}{I_{\gamma 2} - I_{\gamma 1}}$$

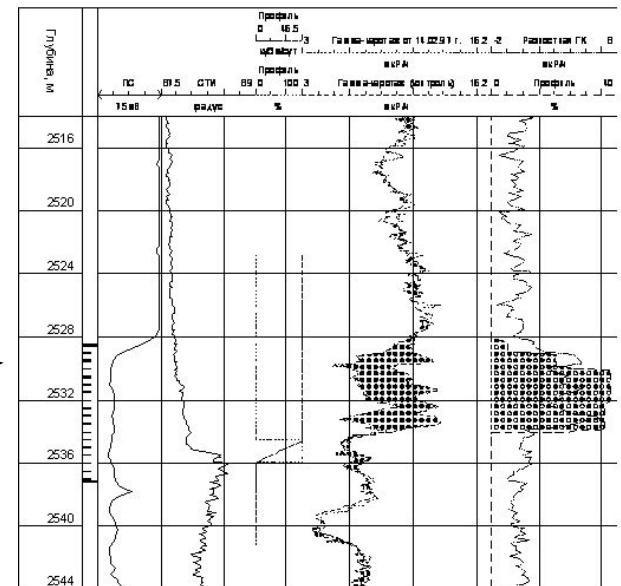
СПЕКТРОМЕТРИЯ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Определение U и Th
2. Определение минерального состава глин
3. Расчленение и корреляция разрезов

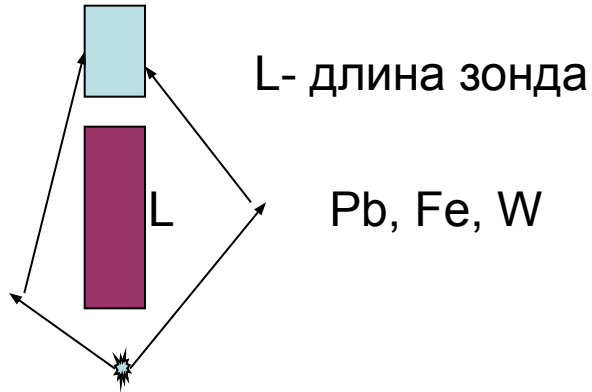
Область применения

1. Выделение и количественная оценка урановых и ториевых руд, калийных солей
2. Выделение полезных ископаемых: каменные соли, гипсы и.т.д.
3. Литология, коллектора
4. Определение глинистости $\Delta I_\gamma = f(C_{gl})$
5. Привязка глубин
6. Контроль обводнения по РГЭ

$$\Delta I_\gamma = \frac{a - a_1}{a_2 - a_1} \Rightarrow$$
$$a = a_1 + \Delta I_\gamma (a_2 - a_1)$$



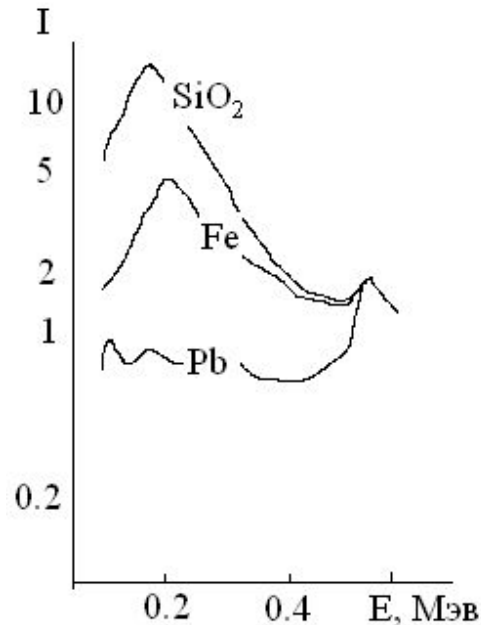
ГАММА-ГАММА МЕТОД



Метод рассеянного
гамма-излучения
(МРГ)



Метод поглощения
гамма-излучения (МПГ)



ГГМ-п и ГГМ-с

Энергия 0.5-1.5 МэВ – комптон эффект
<0.5 и >1.5 МэВ- фото- и образование пар

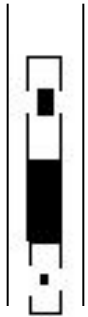
Источники $Cs^{137} - 0.66 \text{ МэВ}$
 $Co^{60} - 1.33 \text{ МэВ}$

Основной эффект – **КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ**

$$\mu_k = N_{at} \sigma_k = \frac{N_A \rho}{M} Z \sigma_{ke} = \frac{Z}{M} N_A \rho \sigma_{ke} =$$

$$\left| \frac{Z}{M} \approx 1/2 \right| = \frac{1}{2} N_A \rho \sigma_{ke}$$

Разновидности зондов



Симметричные

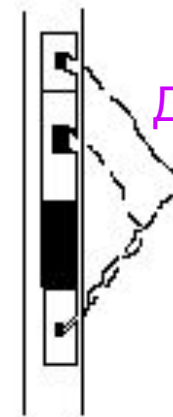
Длина зонда $l_{z\rho} = 40 - 100 \text{ г/см}^2$



Коллимированные



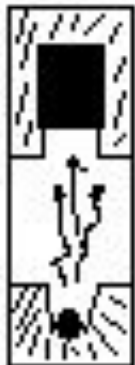
Однозондовые



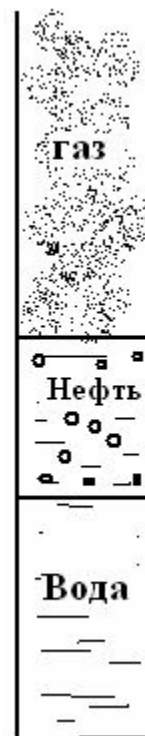
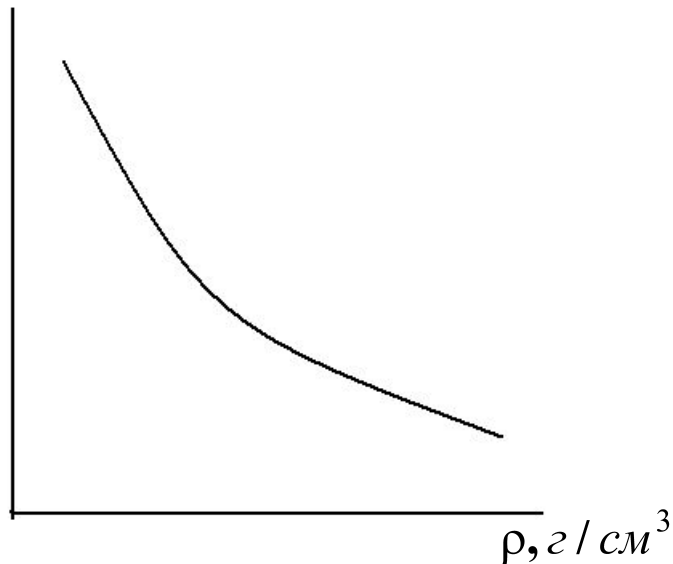
Двухзондовые

МЕТОД ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА - ИЗЛУЧЕНИЯ (МПГ)

Энергия источника 0.5-1.5 МэВ



$$\frac{J_{\gamma\gamma}}{J_{\gamma\gamma B}}$$

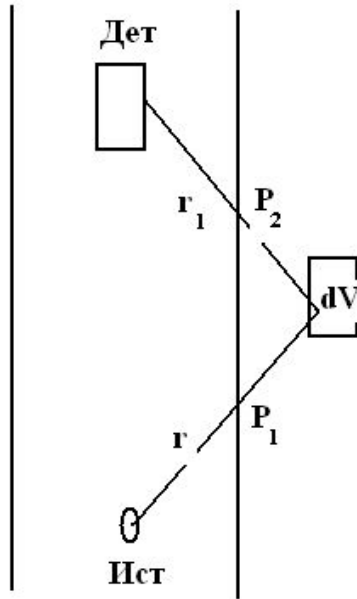


Разновидность- два источника с жестким и мягким излучением

ТЕОРИЯ МЕТОДА ГГК

Приближение однократного рассеяния

На малых расстояниях



P_1 - Вероятность достигнуть объем dV

P_2 - Вероятность достигнуть от dV до детектора

$$P_1 = \frac{1}{4\pi r^2} e^{-\mu_0 r} \cdot \mu_k dV$$

$$P_2 = \frac{1}{4\pi r_1^2} e^{-\mu r_1}$$

$$d\Phi = Q P_1 P_2 = Q \frac{1}{4\pi r^2 r_1^2} e^{-\mu_0 r - \mu_0 r_1} \mu_k \frac{1}{\sigma_{ke}} \frac{d\sigma_k}{d\Omega} dV$$

$$\mu_k = \frac{N_a \rho}{M} z \sigma_{ke}$$

$$d\Phi = Q \frac{1}{4\pi r^2 r_1^2} e^{-\mu_0 r - \mu_0 r_1} \frac{N_a \rho}{M} z \frac{d\sigma_k}{d\Omega} dV$$

$$\left| \Phi = Q \frac{\rho N_a z}{M} \int e^{-\mu_0 r - \mu_0 r_1} \frac{d\sigma_k}{d\Omega} dV \right|$$

Диффузионное приближение

Большие расстояния

Для однородной среды

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} n) - \frac{n}{\tau} + S$$

Стационарное распределение

$$\operatorname{div}(D \operatorname{grad} n) - \frac{n}{\tau} + S = 0 \longrightarrow D \frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + D \frac{2}{r} \frac{\partial n}{\partial r} - \frac{n}{\tau} = 0 \longrightarrow \frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial n}{\partial r} - \frac{n}{\tau D} = 0$$

$$u = n \bullet r$$

$L_D = \sqrt{\tau D}$ — Длина диффузии

$$u'' - \frac{u}{L_D^2} = 0$$

$$u = A_1 e^{-\frac{r}{L_D}} + A_2 e^{\frac{r}{L_D}}$$

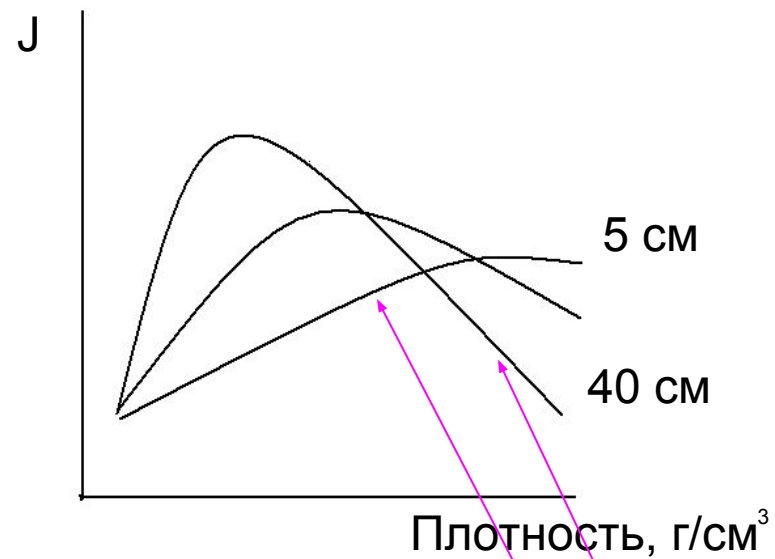
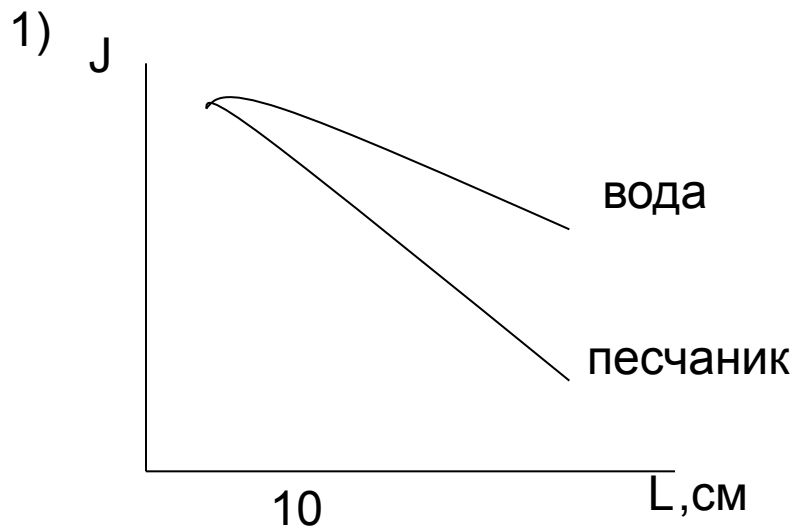
$$\int_0^{\infty} n 4\pi r^2 dr = Q \bullet \tau \longrightarrow 4\pi \int_0^{\infty} A_1 \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{L_D}} r^2 dr = 4\pi A_1 L_D^2$$

$$A_1 = \frac{Q \bullet \tau}{4\pi L_D^2}$$

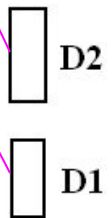
$$n = A_1 \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{L_D}}$$

$$n = \frac{Q\tau}{4\pi L_D^2 r} e^{-\frac{r}{L_D}} = \frac{Q}{4\pi D r} e^{-\frac{r}{L_D}} = \frac{Q\tau_{m\gamma}\rho}{4\pi L_{m\gamma}^2 r} e^{-\frac{r\rho}{L_{m\gamma}}}$$

Зависимость показаний ГГМ от свойств пласта



- 2) Увеличение плотности жидкости в скважине- уменьшение показаний
 - 3) Увеличение диаметра скважины- уменьшение чувствительности к плотности горной породы
 - 4) Влияние глинистой корки- (плотность меньше чем горной породы)
 - А) Доинверсионных зондах –снижает показания
 - Б) Заинверсионных- повышает
- Для исключения влияния глинистой корки- двойной инверсионный зонд



○ s

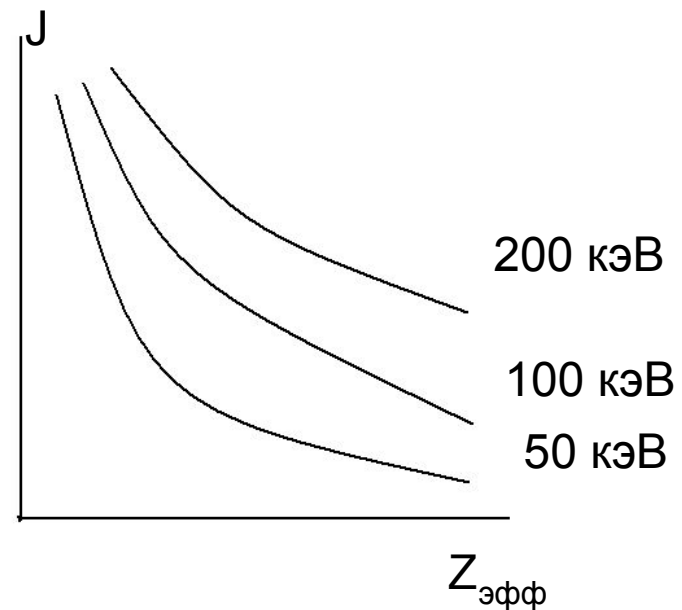
Область применения

Спектральная модификация ГГМ-с

Элементный состав горных пород

Влияние плотности

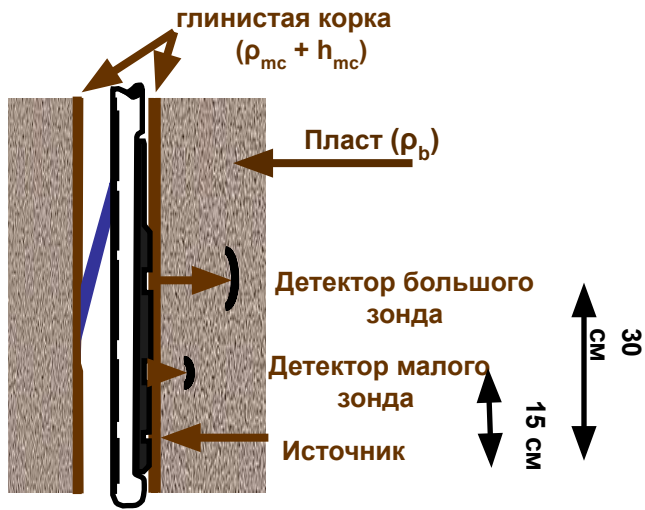
- 1) Регистрируют излучение в двух энергетических интервалах
- 2) Используют инверсионный зонд
- 3) Доинверсионный и заинверсионный зонд



- 1) Выделение горных пород с различной плотностью
Различие на 0.05 г/см.куб (каменные соли- 2.2. г/см.куб и ангидрид- 2.9 г/см.куб)
- 2) Выделение полезных ископаемых
Угли, калийные соли и каменные соли. Железные руды, свинцовые и.т.д.
- 3) Определение коэффициента пористости $\rho = (1 - K)\rho_{SiO_2} + K \cdot \rho_{H_2O}$

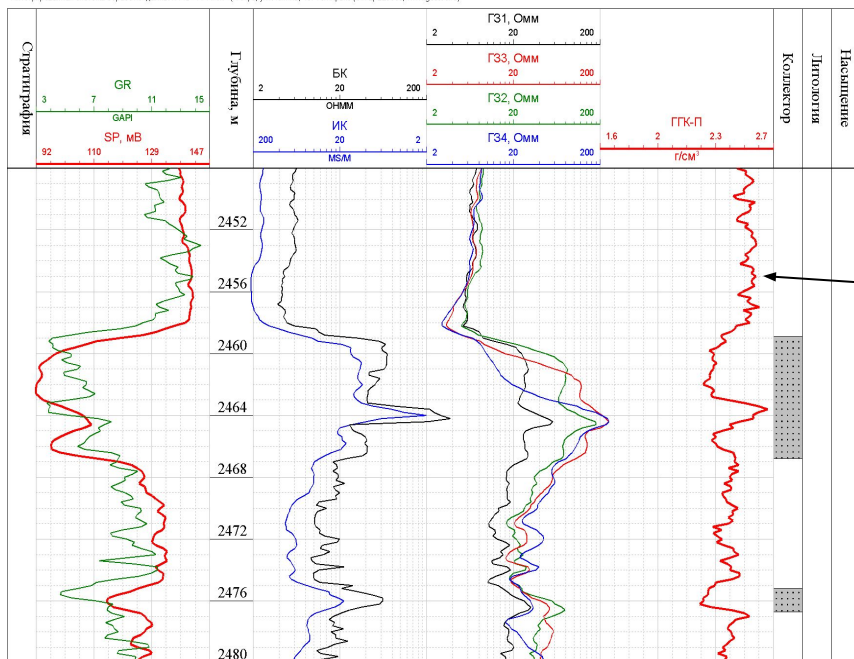
Преимущества: 1) Одинаковая чувствительность к K и плотности

2) Слабое влияние глинистости



Порода	Плотность зерен, г/см ³
Песчаник	2.55-2.69
Доломитовые песчаники	2.65-2.72
Известняк	2.70-2.76
Доломит	2.75-2.90
Гипс	2.32-2.40
Ангидрит	2.96
Пресная вода	1.00
Соленая вода (200г/л)	1.15
нефть	0.85
Натуральный газ	0.0008 (увелич. с давлением)
Воздух (сухой)	0.0012 (увелич. с давлением)

Интегрированная система обработки данных ГИС «ГЕОАИ» (г. Уфа, ул. Ленина, 13. Тел./факс: (3472) 226056; www.geotec.ru)

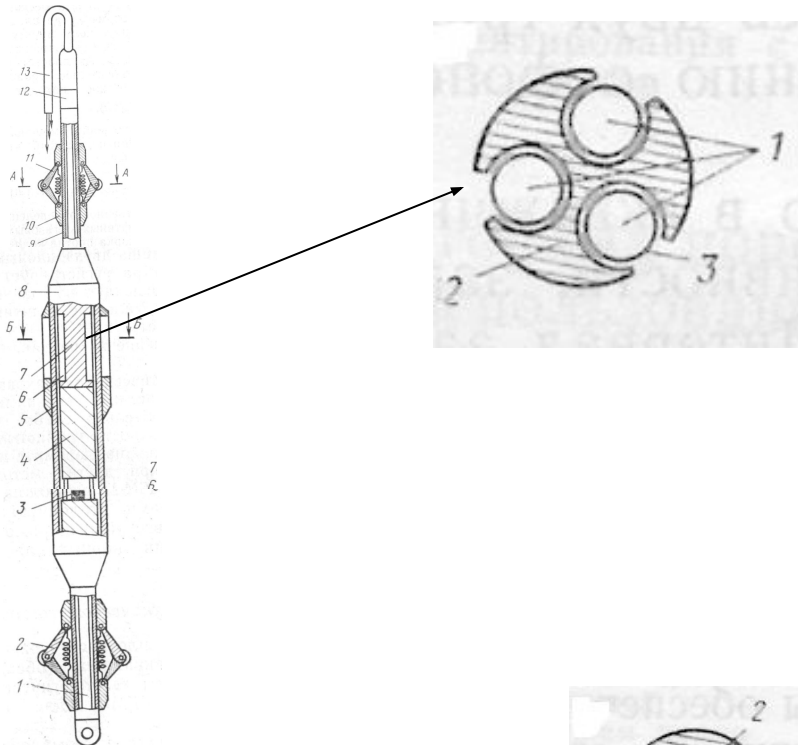


Кривая ГГК-п

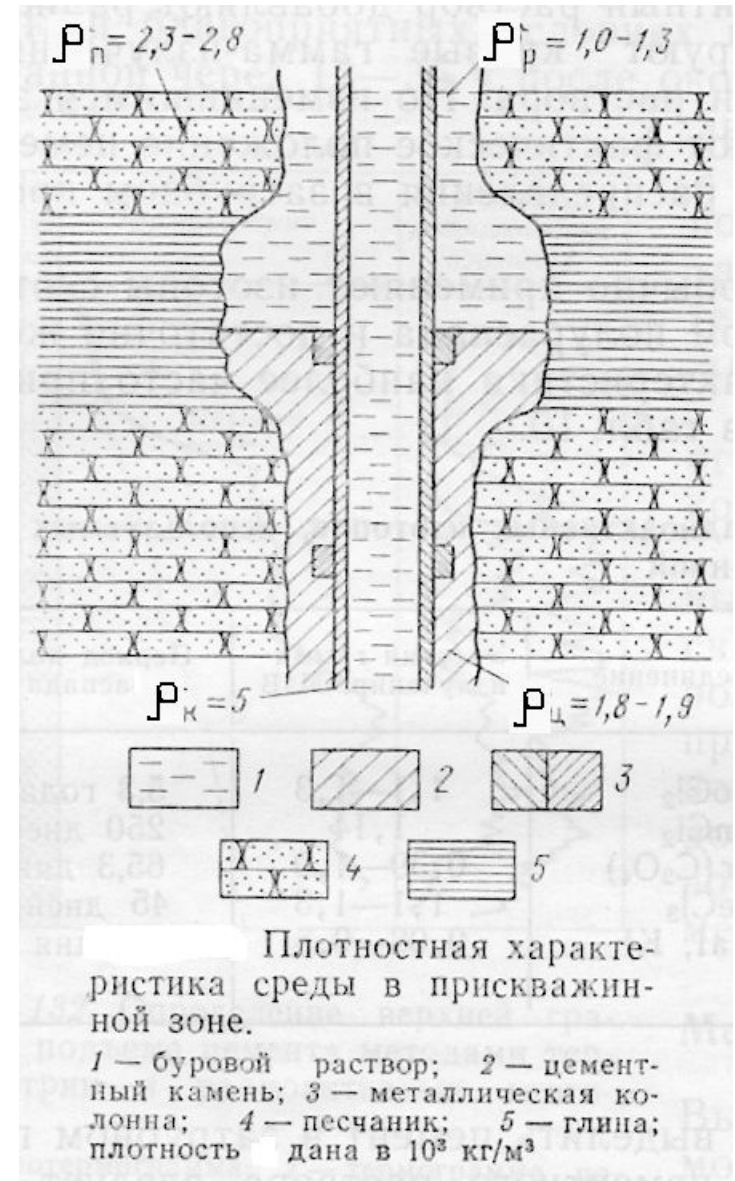
4) Изучение технического состояния скважин

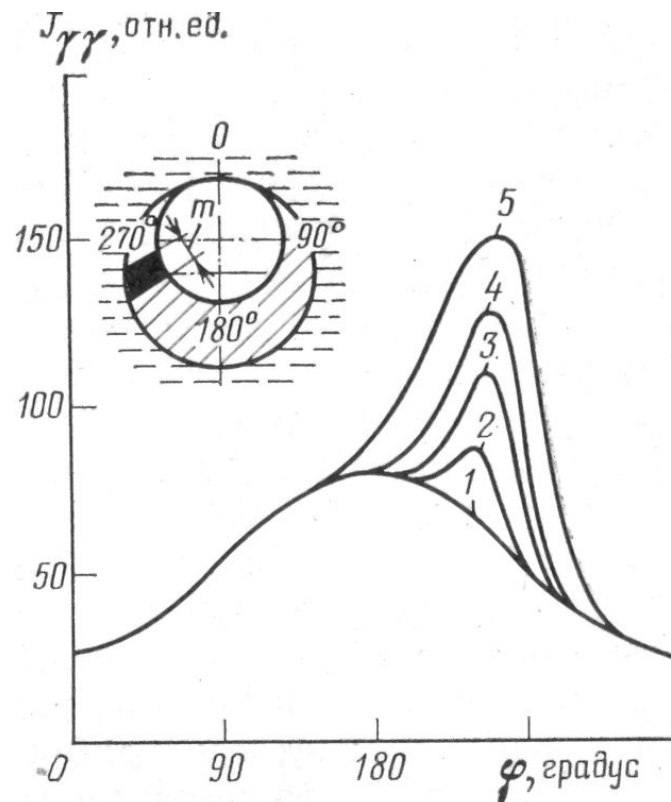
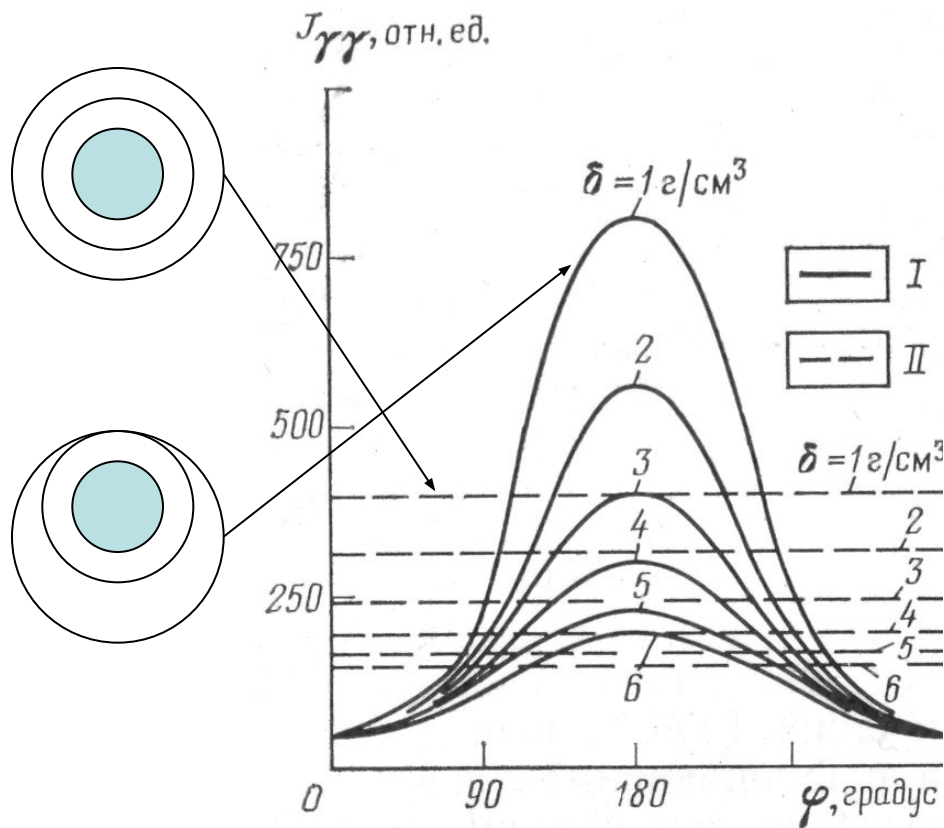
4.1. Определение высоты подъема и равномерности распределения цемента за колонной

Гамма-гамма цементомер



Гамма-гамма-дефектомер с вращающейся головкой

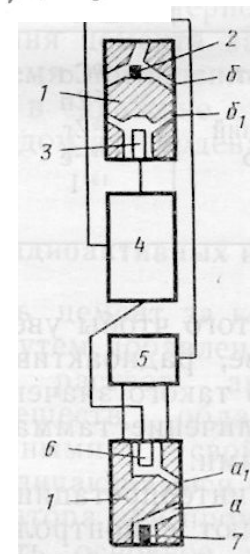


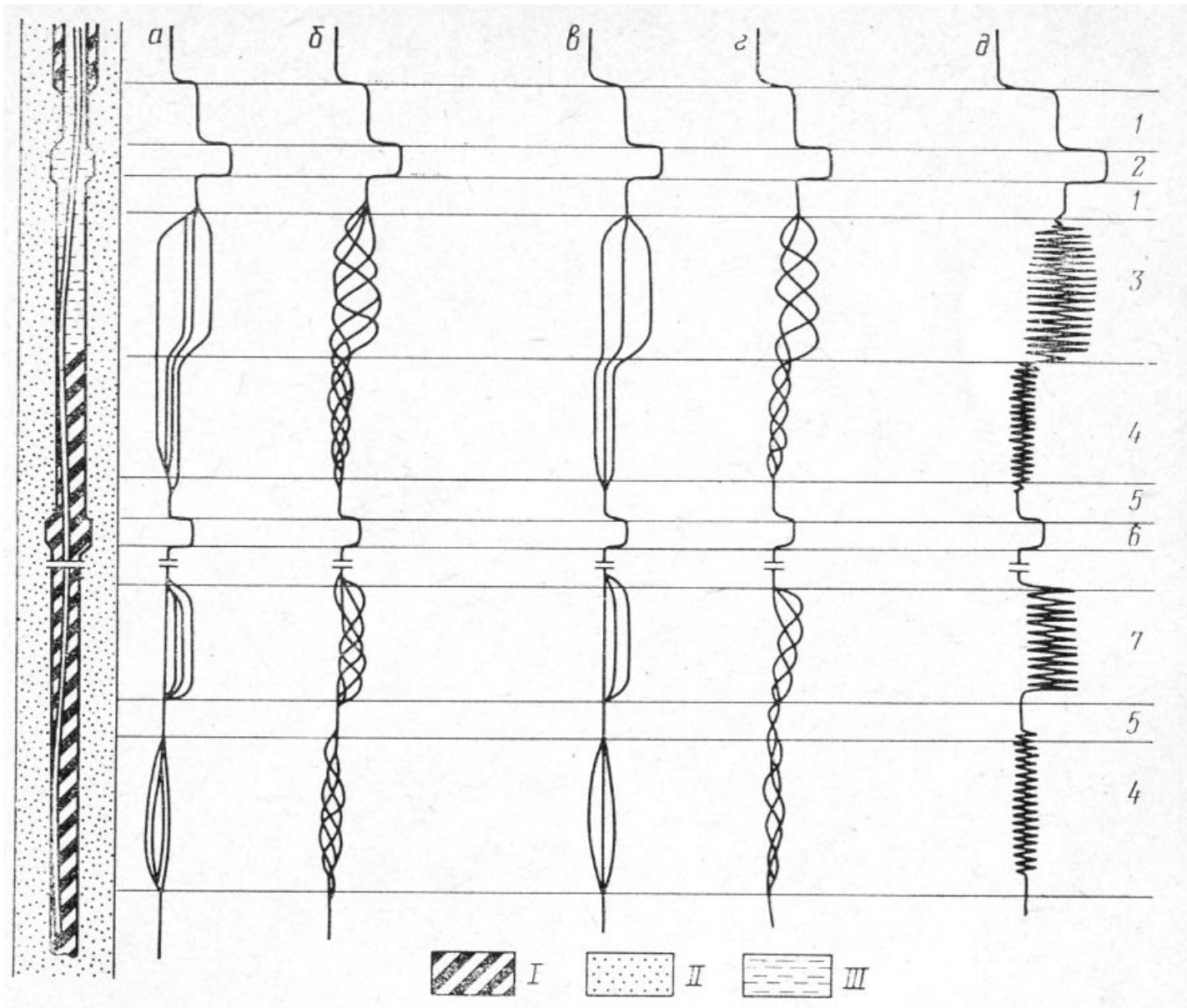


4.2. Измерение толщины стенки колонны (Толщиномер)

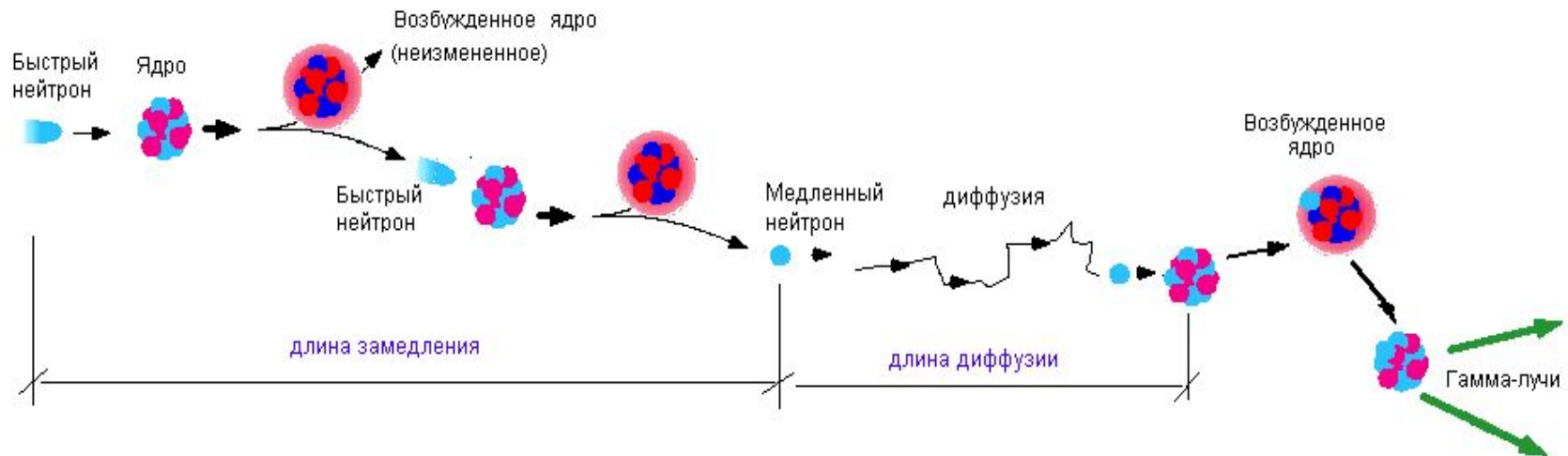
Длина зонда- 10 см, погрешность- 0.5 мм

4.3. Определение плотности флюида в скважине





Взаимодействие нейтронов с веществом



Быстрые > 0.1 МэВ

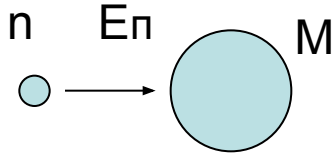
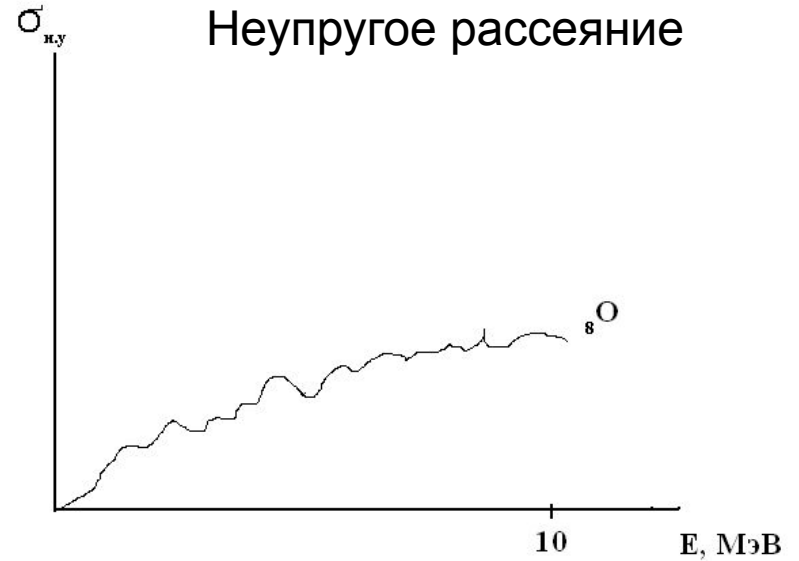
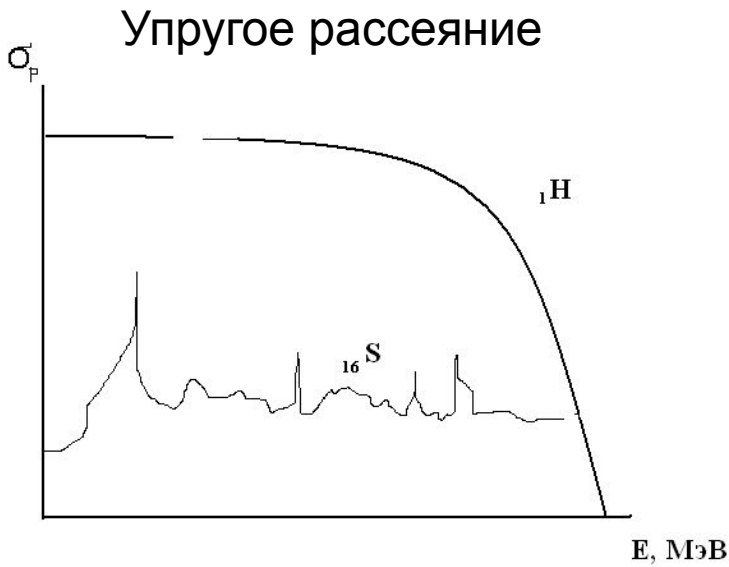
Промежуточные $1\text{эВ} < E < 0.1$ МэВ

Тепловые нейтроны $E < 1$ эВ Средняя скорость - 2200 м/с, $E_{ср}$ - 0.025 эВ

Надтепловые нейтроны

Виды взаимодействия: рассеяние и поглощение

Рассеяние - упругое и неупругое



$$E'_n = E_n \frac{M^2 + 2M \cos \varphi + 1}{(M + 1)^2}, \quad \varphi = \pi, \quad E'_n = E_n \frac{(M - 1)^2}{(M + 1)^2}$$

$$\alpha = \frac{(M - 1)^2}{(M + 1)^2} \quad \Delta E_{\max} = E_n - E'_{n \min} = (1 - \alpha)E_n$$

При изотропном рассеянии $\alpha E_n < E'_n < E_n \longrightarrow \bar{E}'_n = \frac{\alpha E_n + E_n}{2} = \frac{1 + \alpha}{2} E_n$

$$\Delta \bar{E}_n = \frac{1 - \alpha}{2} E_n$$

Среднелогарифмическая потеря энергии $\xi = \frac{\ln E_n - \ln E'_n}{\ln E_n} = 1 + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \ln \alpha$

$$j = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_n}{E'_n}$$

Максимум
потери
энергии

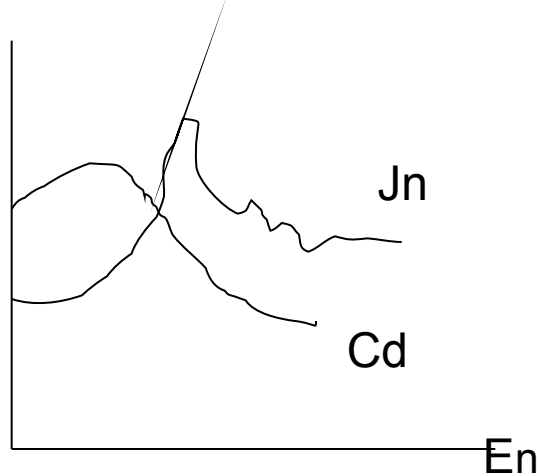
$$\xi = 1, \quad M = 1$$

Водород

Неупругое рассеяние

При $E > E_{\text{пороговое}}$

Поглощение нейтронов



(n, p) , (n, α) , (n, γ) , $(n, 2n)$

Радиационный захват (n, γ)

Несколько линий гамма-излучения

1 квант/100 захватов



Диффузионное приближение

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\text{div}(D \text{grad } n) - \frac{n}{\tau} + S$$

$$\tau = \frac{1}{v\Sigma_3}$$

Стационарный случай без источников

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi D_\phi r} e^{-\frac{r}{L_D}}$$

$$L_D = \sqrt{D\tau}$$

Длина диффузии

Возрастное приближение

Летаргия $u = \ln \frac{E_0}{E}$

q_3 - плотность замедления, число нейтронов в ед. объема и времени пересекающие при замедлении пороговое $E_{пор}$ $u_{пор}$

Прибыль и убыль нейтронов

$q_3(u)$ $q_3(u + du)$

диффузия

$$q_3(u + du) - q_3(u) = -\frac{1}{3\Sigma_{mp}} \nabla^2 \Phi(u) du$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial u} = -\frac{1}{3\Sigma_{mp}} \nabla^2 \Phi(u)$$

$$q_3 = \Phi(u) \xi \Sigma_p$$

$\chi = \Sigma_p \xi$ ← Замедляющая способность

$$\frac{\partial q_3}{\partial u} = -\frac{1}{3\chi \Sigma_{mp}} \nabla^2 q_3$$

$d\theta_\phi = \frac{du}{3\Sigma_{mp}\chi}$ ← Возраст нейтронов

$\frac{\partial q_3}{\partial \theta_\phi} = \nabla^2 q_3$ ← Уравнение
возраста нейтронов

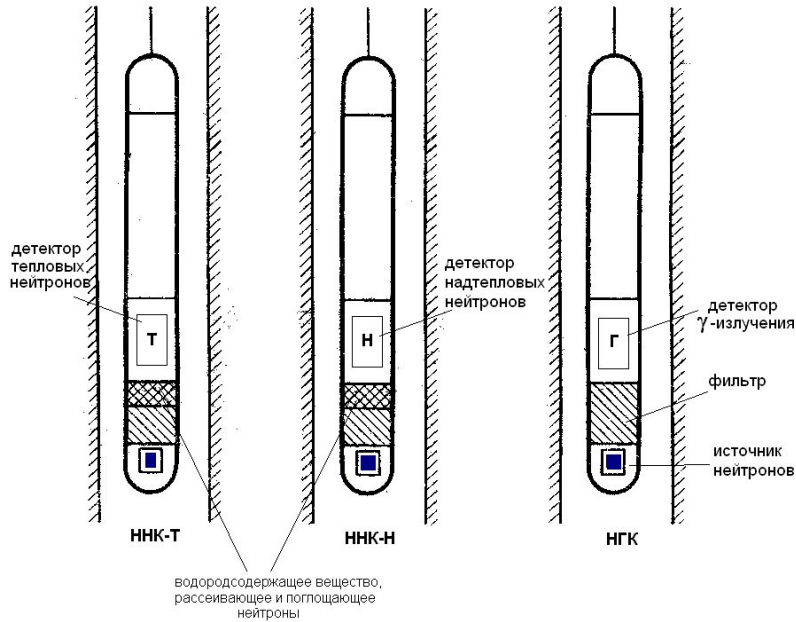
$$q_3 = A e^{-\frac{r^2}{4\theta_\phi}}$$

$$\int q_3 dV = \int q_3 4\pi r^2 dr = Q$$

$$A = \frac{Q}{(4\pi\theta_\phi)^{\frac{3}{2}}} \quad q_3 = \frac{Q}{(4\pi\theta_\phi)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{r^2}{4\theta_\phi}}$$

$L_3 = \sqrt{\theta_\phi}$ - Длина замедления

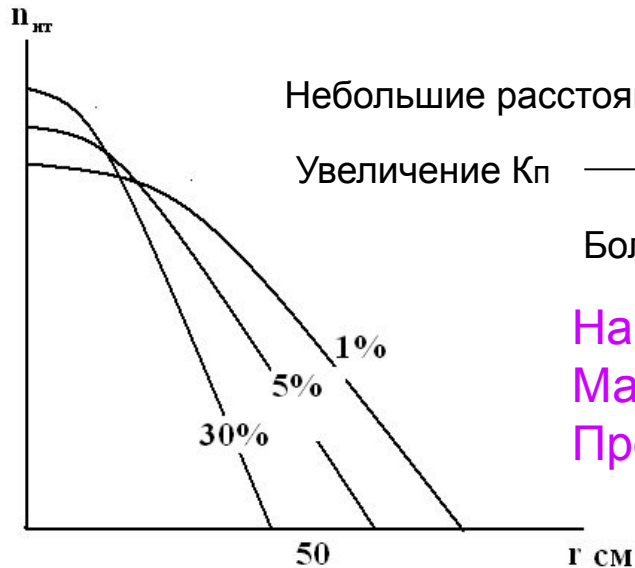
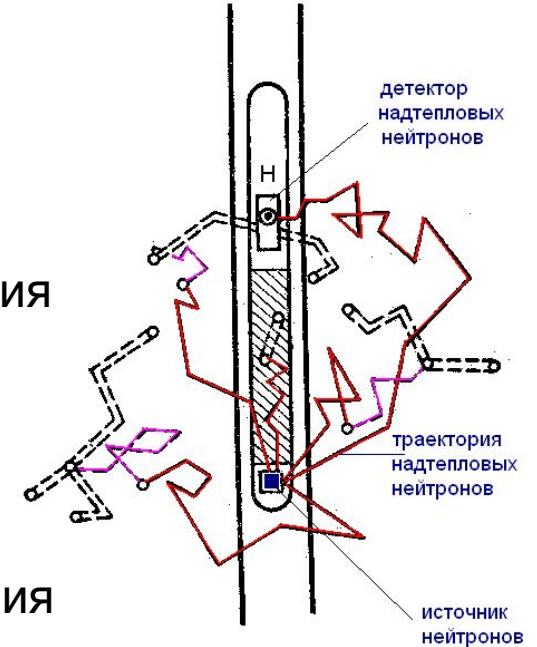
Po+Be- источник



$$\Phi = \frac{Q}{8\pi L_3^2 \chi} e^{-\frac{r}{L_3}}$$

Зависит от водородосодержания

↑ Увеличение ↓ Уменьшение
длины замедления



Небольшие расстояния - вклад $\rightarrow e^{-\frac{r}{L_3}}$ Основной вклад $L_3^{-3} \chi^{-1}$

Увеличение $K_p \rightarrow n_{нт} \uparrow$

Большие расстояния - увеличение $K_p \rightarrow n_{нт} \downarrow$

Наименьшие показания – глины, аргиллиты, гипсы
 Максимум- известняки, ангидриды, соли
 Промежуточные – пористые известняки, песчаники

Зависимость показаний от свойств породы



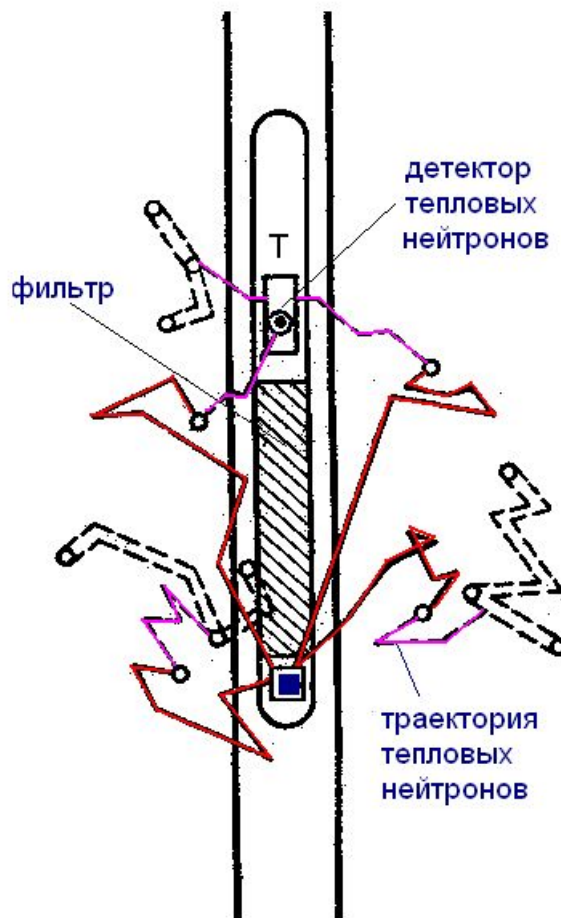
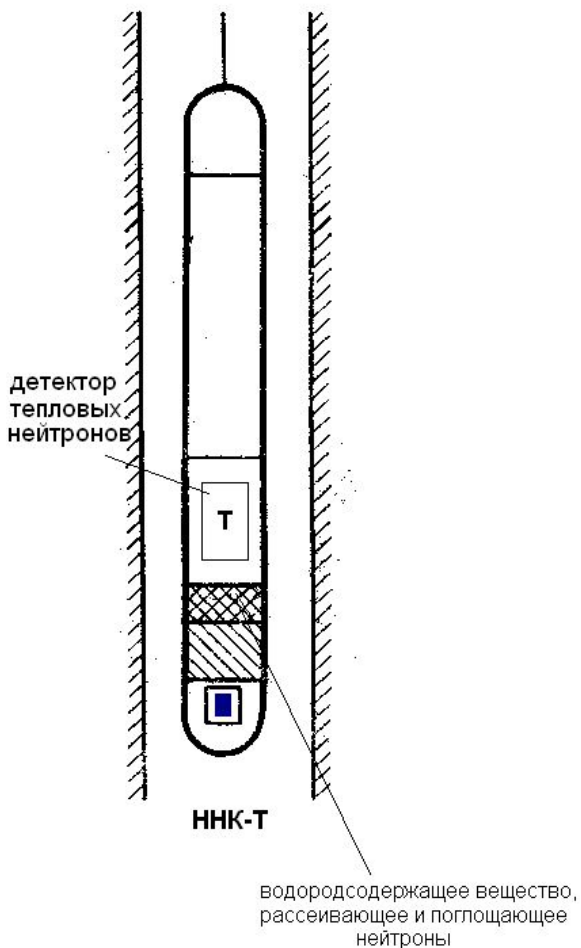
Водонасыщенные и нефтенасыщенные – одинаковое количество водорода.

Газонасыщенные пласты меньше водорода – показания больше

- Влияние химического состава слабое
- Большое влияние изменение диаметра скважины – увеличение диаметра приводит к уменьшению показаний

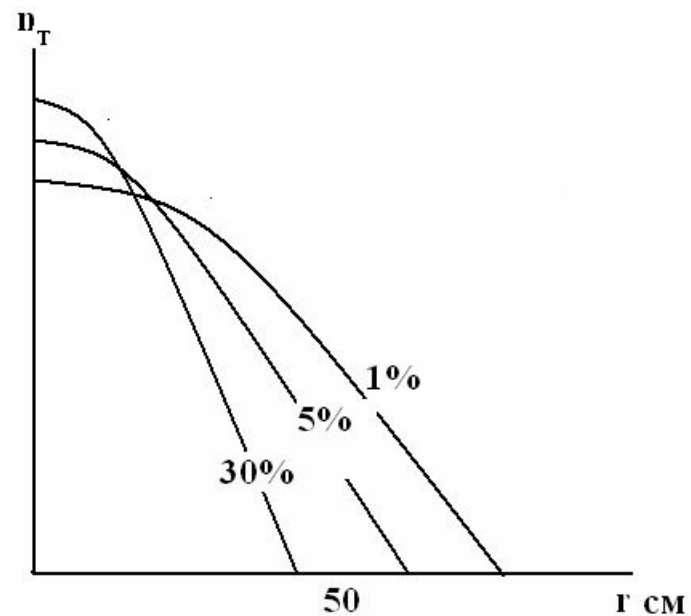
Определение коэффициента пористости

Нейтронные методы исследования скважин ННК-Т



$$n_T = \frac{Q \cdot \tau}{8\pi(L_3^2 + \frac{L_D^2}{2})^{3/2}} e^{-\frac{r}{\sqrt{L_3^2 + \frac{L_D^2}{2}}}}$$

$$\tau \approx \frac{1}{\Sigma_3} - \text{Хлор, бор, марганец}$$



Больше глубинность метода

Длина диффузии уменьшается с увеличением водородосодержания, зависит от поглощающих свойств

1. Выделение различных горных пород:

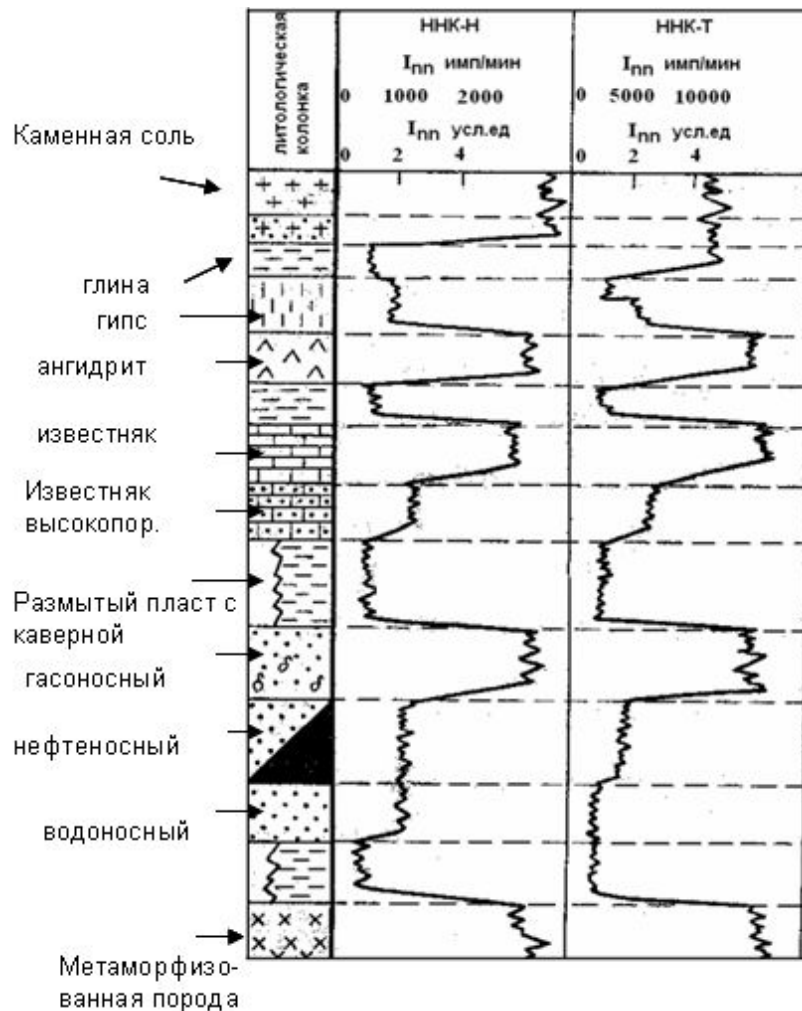
мин показания – гипсы, глины, известняки, песчаники с хлором

мах показания: ангидрид, плотные известняки

2. Определение коэффициента пористости

3. Определение коэффициента пористости и состава скелета гор. пород (НМи ГГМ)

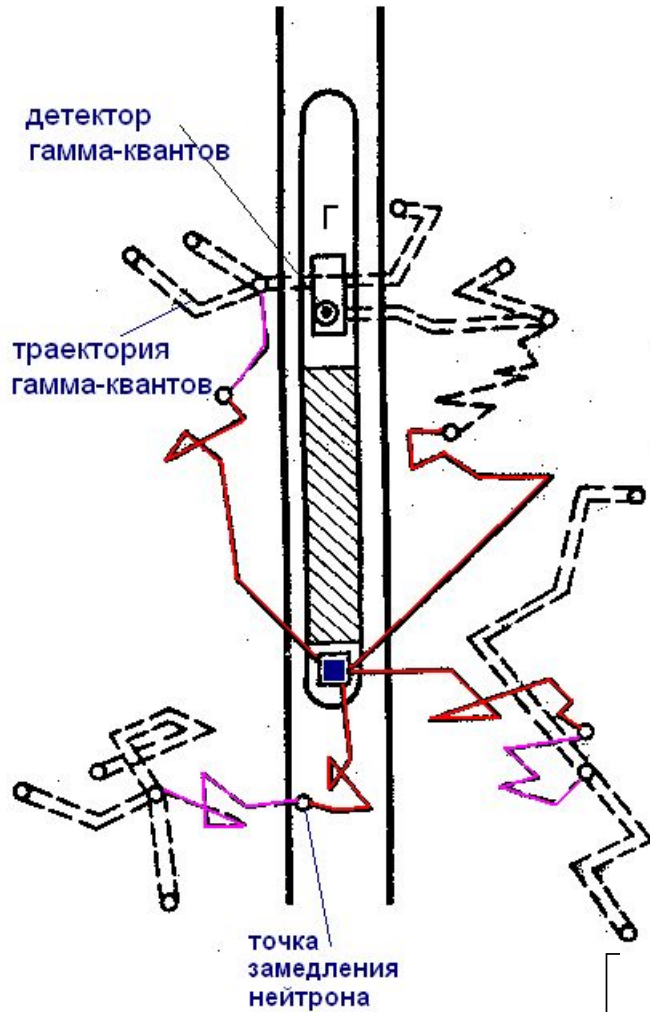
4. Разделение нефтеносных и водоносных пластов – пористость > 15-20%, Cl-150-200 г/л



5. Выделение и колич. оценка руд (бор, ртуть и т.д)

6. Интервал отложения парафина

Нейтронные методы исследования скважин НГК



$$D_\gamma \frac{\partial^2 n_\gamma}{\partial r^2} + D_\gamma \frac{2}{r} \frac{\partial n_\gamma}{\partial r} - \frac{n_\gamma}{\tau} + S_\gamma = 0$$

$$S_\gamma = \Phi_T \cdot \Sigma_3 \cdot v = n_T \cdot v \cdot \Sigma_3 \cdot v = \frac{n_T \cdot v}{\tau}$$

$$n_T = \frac{Q \cdot \tau}{4\pi r} \frac{e^{-\frac{r}{L_3}} - e^{-\frac{r}{L_D}}}{L_3^2 - L_D^2}$$

$$n_\gamma = \frac{u}{r}$$

$$u'' - \frac{u}{L_\gamma^2} = F \left(e^{-\frac{r}{L_3}} - e^{-\frac{r}{L_D}} \right) \quad L_\gamma^2 = D_\gamma \tau_\gamma$$

$$n_\gamma = \frac{Q \cdot v \cdot \tau_\gamma}{4\pi r} \left[\frac{L_\gamma^2 e^{-\frac{r}{L_\gamma}}}{(L_\gamma^2 - L_3^2)(L_\gamma^2 - L_D^2)} + \frac{L_3^2 e^{-\frac{r}{L_3}}}{(L_3^2 - L_D^2)(L_3^2 - L_\gamma^2)} + \frac{L_D^2 e^{-\frac{r}{L_D}}}{(L_D^2 - L_\gamma^2)(L_D^2 - L_3^2)} \right]$$

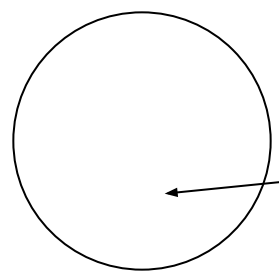
Повышение поглощающих свойств- повышение показаний

НМ-нт – увеличение водородосодержания ↓ показаний

НМ-т – рост содержания хлора ↓ показаний

НГМ- рост содержания хлора ↑ показаний

Наличие скважины



Интенсивность

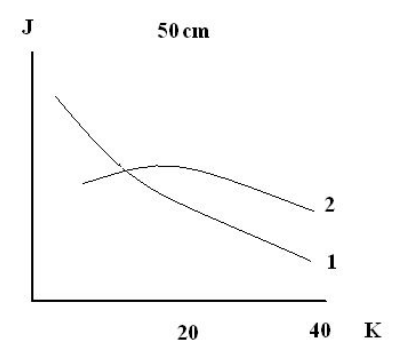
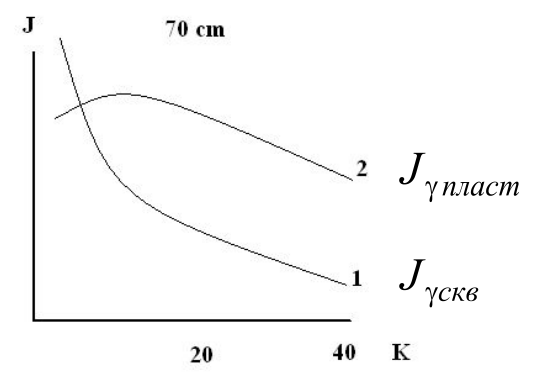
$$J = J_{\gamma_{скв}} + J_{\gamma_{пласт}}$$

Парадокс НГМ

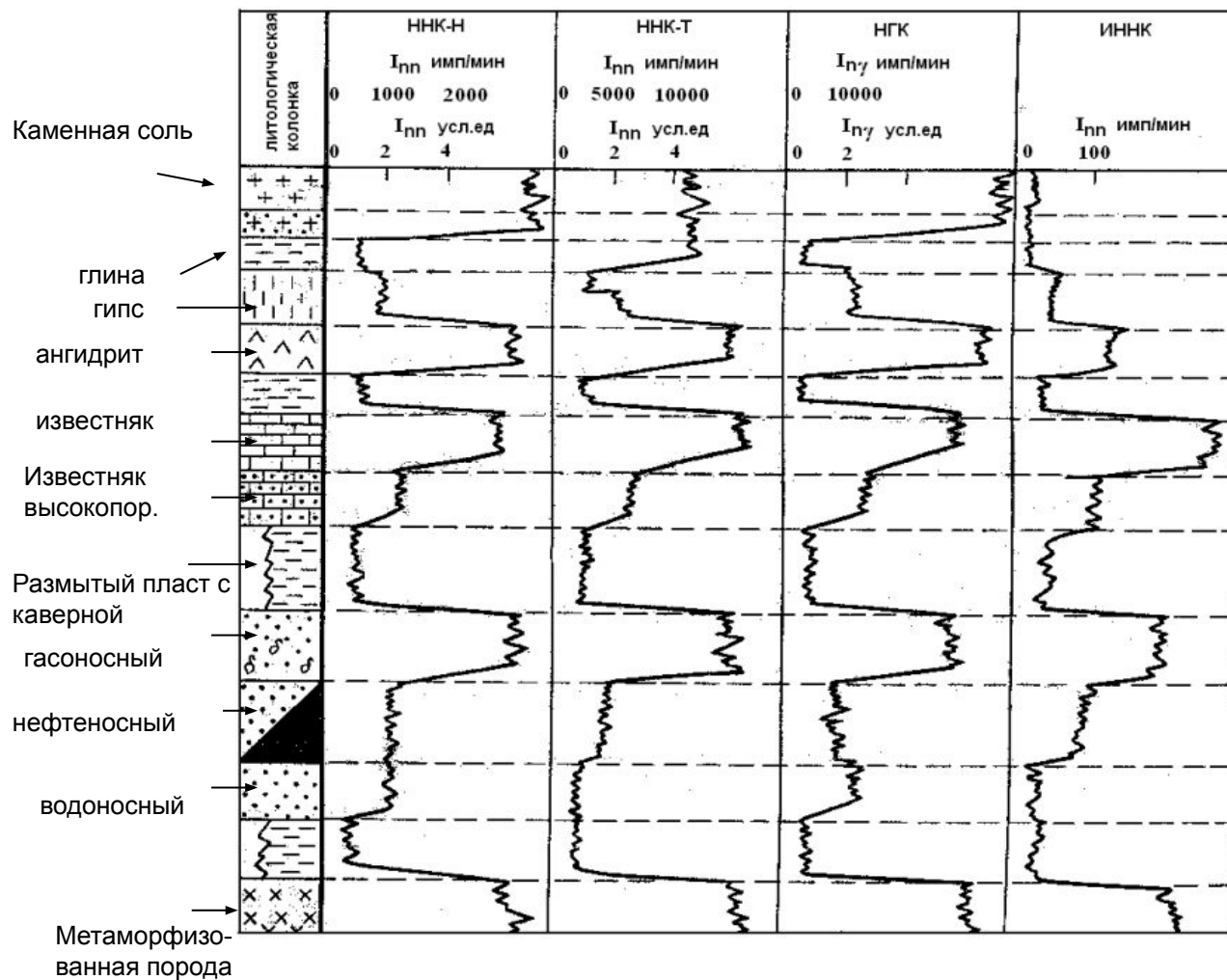
Исследование поглощающих свойств- наличие хлора в скважине играет отрицательную роль (для его уменьшения прибор окружают бором)

При рассмотрении дифференциации показаний НГМ от водородосодержания- излучение скважины имеет положительную роль

Показания НГМ растут при уменьшении водородосодержания



Зависимость показаний от типа горных пород



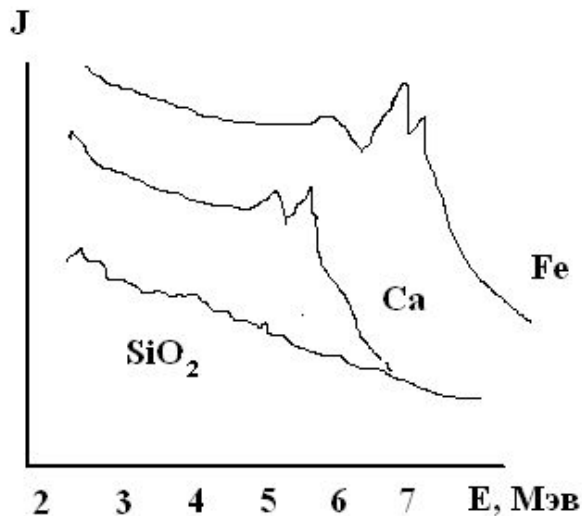
Глубинность -20-70 см по водородосодержанию

По хлору- 20-30 см

Решаемые задачи

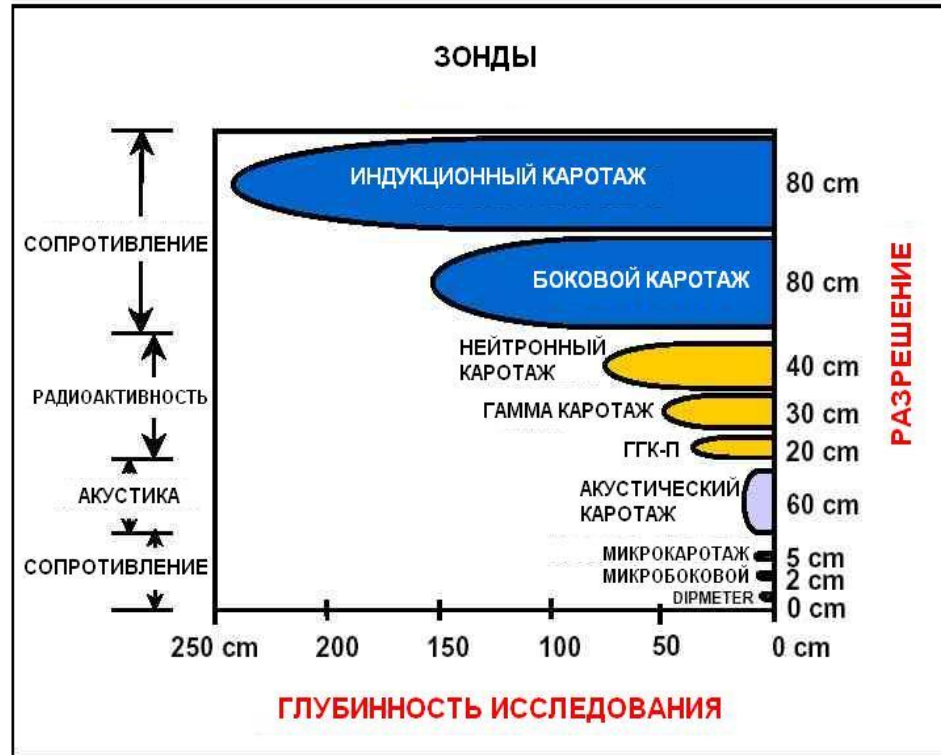
1. Расчленение пород по водородосодержанию
2. Коэффициент пористости
3. Газожидкостный контакт
4. Водонефтяной контакт

Спектрометрия гамма-излучения радиационного захвата



Al, Si, Ca – Линии 3-6 МэВ
Fe- линии > 6 МэВ

Глубинность методов

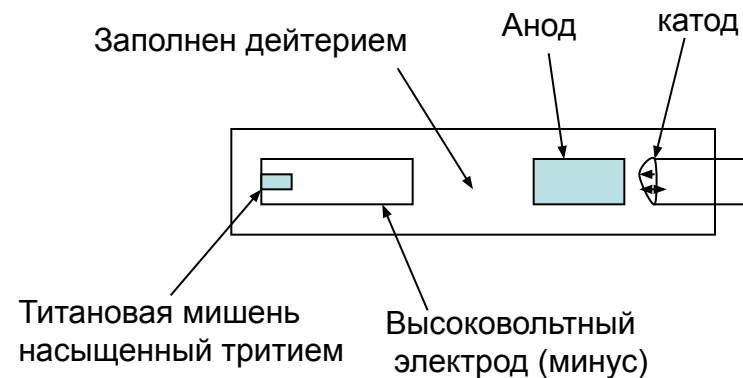
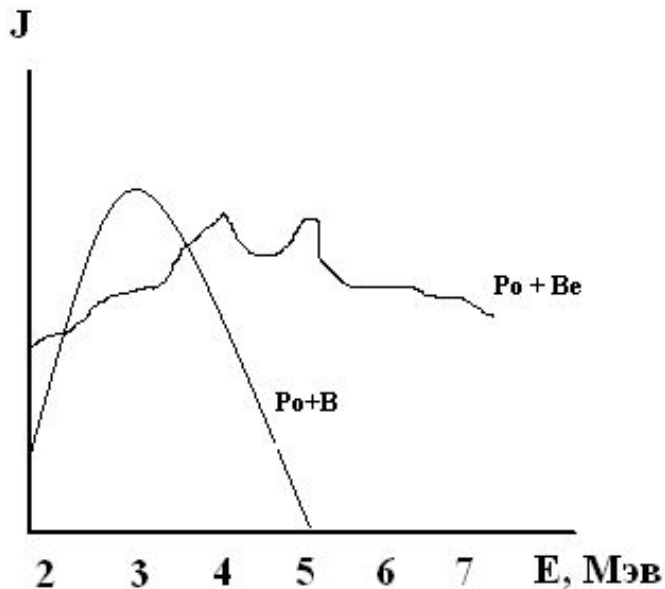
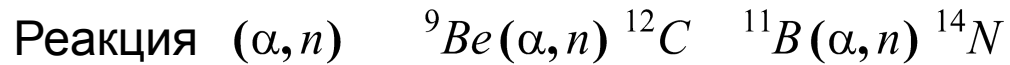


ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

1) Ампульные,

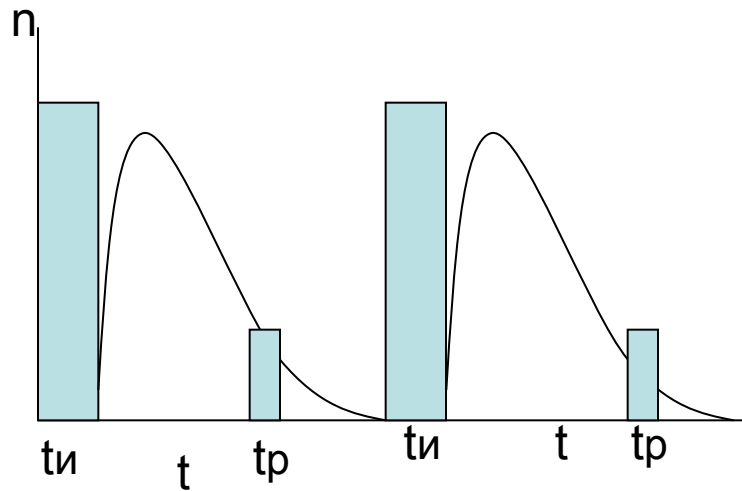
2) генераторы

Смесь алфа-излучателя с бериллием или бором



Периодически с частотой 1-1000 Гц,
интервал облучения- 1-100 мкс

Импульсный нейтронный метод (ИННМ-т, ИНГМ)



t_i - 100-200 мкс

t - время задержки

Быстрые нейтроны замедляются в течение нескольких микросекунд

$$t = 0, \quad n = n_0$$

$$dn = -n \nu_T \Sigma_3 dt = -n A_n dt$$

$$n = n_0 e^{-A_n t}$$

$$\tau = \frac{\int t dn(t)}{\int dn} = \frac{\int t n_0 A_n e^{-A_n t} dt}{\int n_0 A_n e^{-A_n t} dt} = \frac{\int t e^{-A_n t} dt}{\int e^{-A_n t} dt} = \frac{1}{A_n}$$

$$n = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\nabla^2 n - \frac{n}{\tau} + S$$

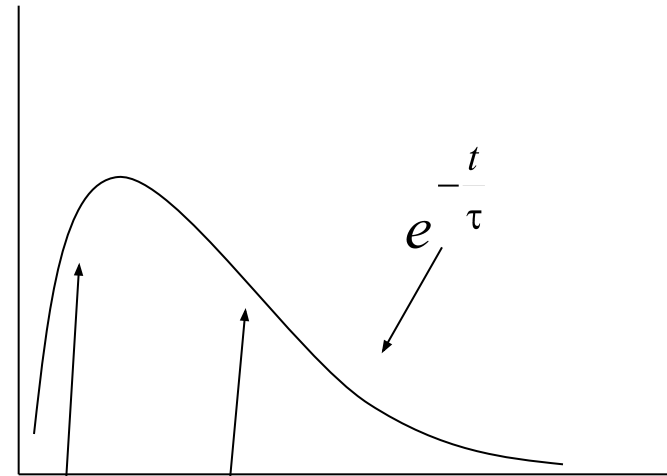
$$S = \delta(t)\delta(r)$$

$$n = \varphi e^{-\nu_T \Sigma_3 t} = \varphi e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D\nabla^2 \varphi \Rightarrow \varphi = \frac{1}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{r^2}{4Dt}}$$

$$n = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{r^2}{4Dt} - \frac{t}{\tau}}$$

$$n = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{r^2}{4Dt} - \frac{t-t_3}{\tau}}$$



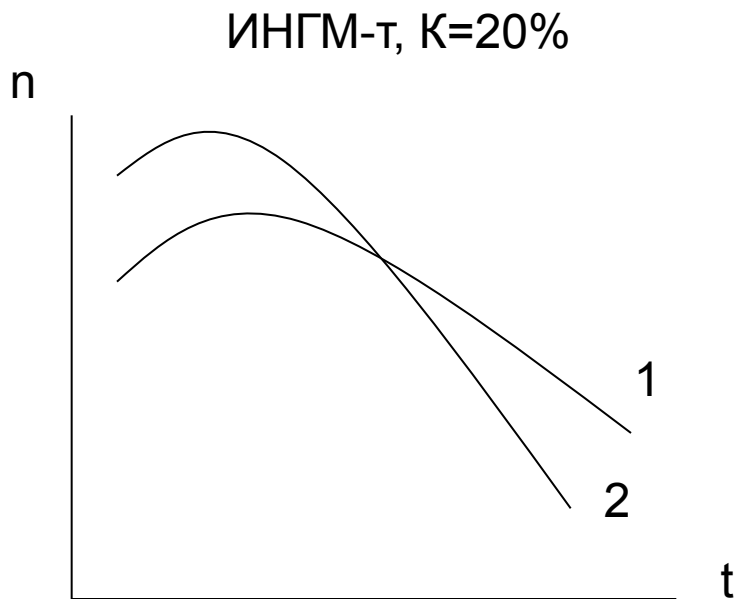
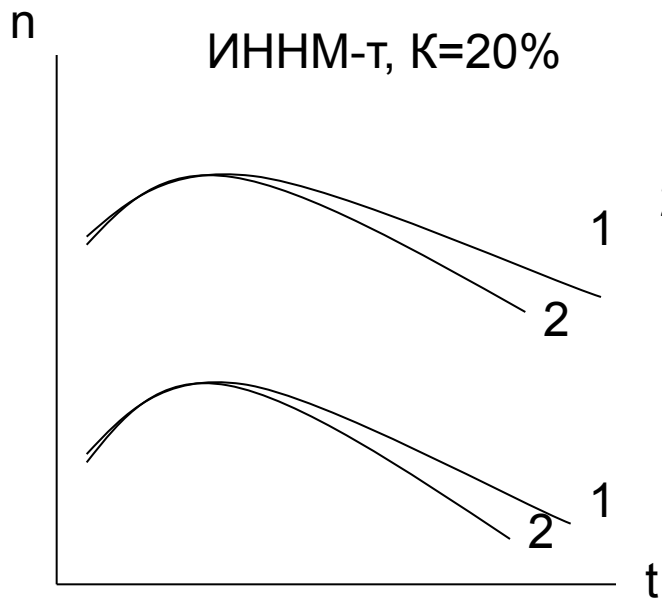
$$n = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Рост плотности тепловых нейтронов-замедление

Уменьшение- поглощение

Водоносные минерализованные пласты- меньшие показания

В ИНГМ влияние длины зонда слабее, чем ИННМ-т.



$$n_{\gamma}(r, t) = \frac{Q}{4\pi(\theta_{\phi} + L_{\gamma} + Dt)} \frac{v\tau_{\gamma}}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau} - \frac{r^2}{4(\theta_{\phi} + L_{\gamma} + Dt)}}$$

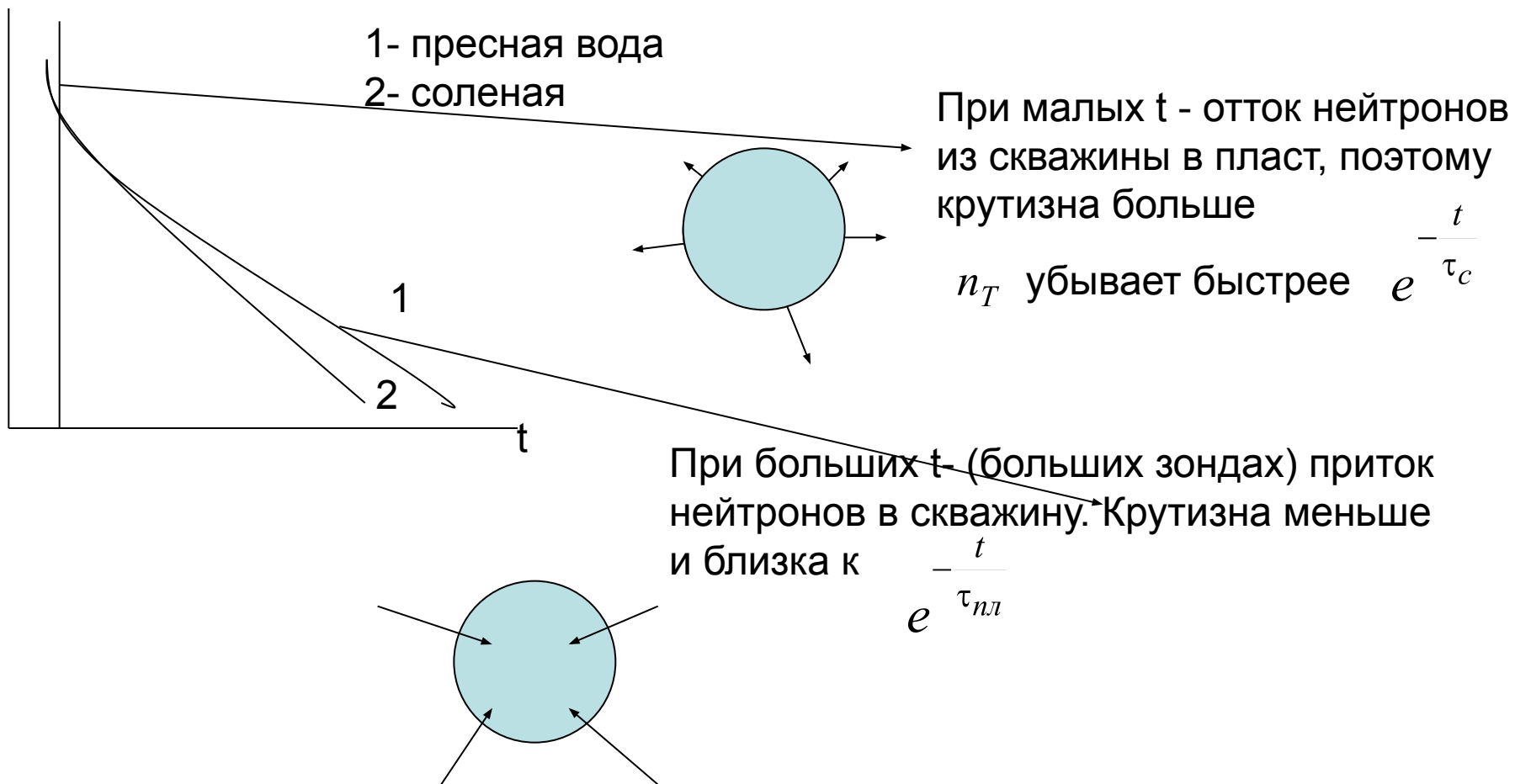
1- нефтеносный
2- водоносный пласт 200 г/л NaCl

При малых t- основное влияние $\frac{v}{\tau}$

При больших t- $e^{-\frac{t}{\tau}}$

Влияние скважины

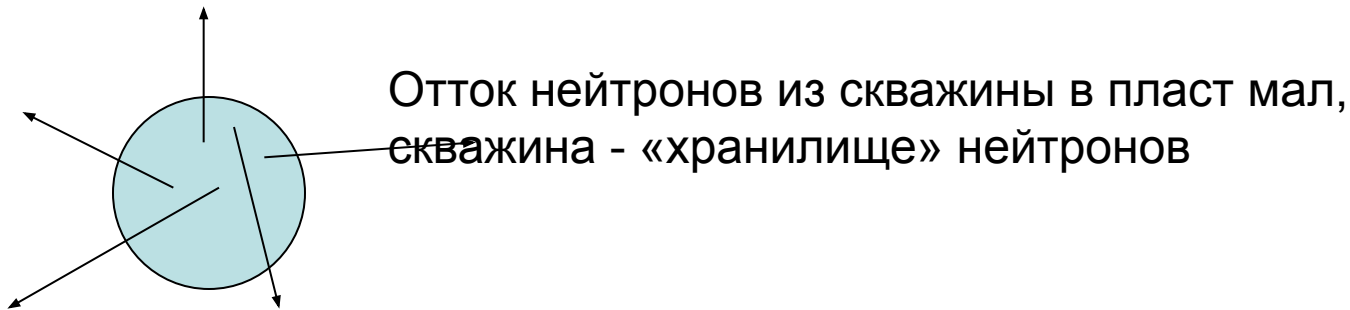
1. $\tau_c < \tau_{пл}$ Пласт слабопоглощающая среда. Скважина заполнена соленой водой



При больших t влиянием скважины можно пренебречь

2. Сильное поглощение в пласте $\tau_c > \tau_{пл}$

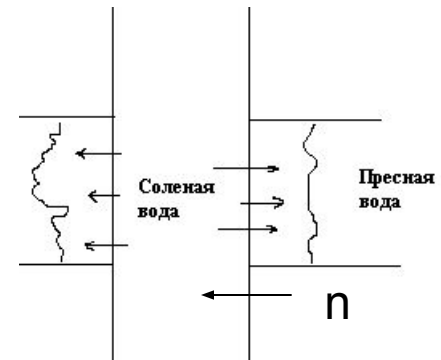
При больших t – плотность нейтронов в скважине больше, чем в пласте



1. Зона проникновения пресная вода

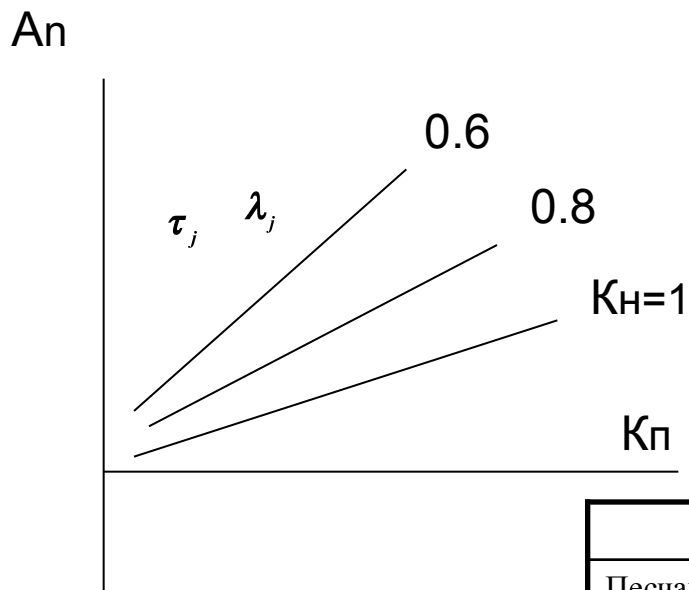


Зона проникновения уменьшает чувствительность метода



Для повышения чувствительности метода скважину заполняют соленым раствором

2. Количественное определение коэффициента нефтенасыщения и газонасыщения



$$\frac{N_1}{N_2} = \exp[-\lambda_k (t_1 - t_2)]$$

$$\tau_j = \frac{1}{\lambda_j}$$

Время задержки t_1 и t_2

Декремент затухания λ_k

$$\lambda_k = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{t_2 - t_1}$$

$$\lambda = \sum_j V_j \lambda_j = \sum_j m_j \lambda_j^{(m)} \quad \lambda = \lambda_{m\epsilon} (1 - k_n) + \lambda_{\epsilon} k_n$$

Горная порода	,мс	,мс ⁻¹
Песчаники, насыщенные пресной водой ($c < 15$ г/л) или нефтью ($k_n > 0,9$)	0,3-0,65	1,5-3,5
Песчаники, насыщенные солёной водой ($c=200$ г/л)	0,11-0,33	3-9
Песчаники, насыщенные солёной водой с коэффициентом нефтенасыщения $k_n=50\%$	0,16-0,5	2-6
Газоносные песчаники	0,2-0,8	1,2-5
Известняки, насыщенные солёной водой ($c=200$ г/л)	0,16-0,6	1,7-6
Глины	0,1-0,25	4-10
Гранит	0,25-0,3	3,3-4

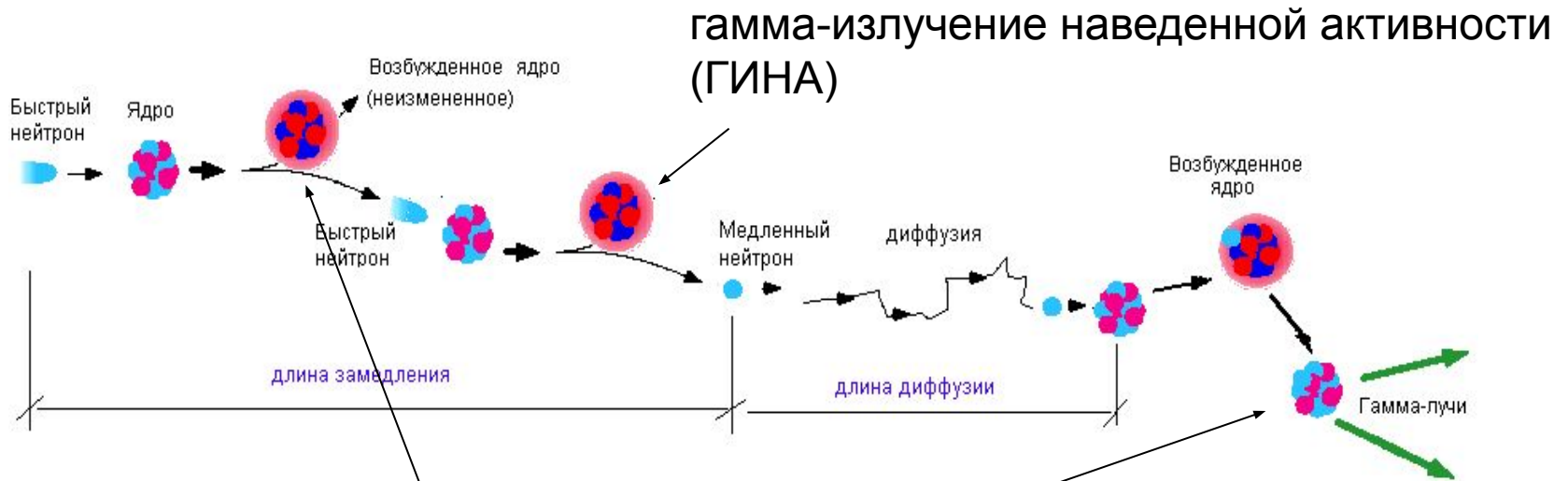
3. Выделение твердых полезных ископаемых

4. Определение коэффициента пористости

Углеродно-кислородный каротаж (C/O-каротаж)

C/O – каротаж основан на регистрации гамма-излучения неупругого рассеяния (ГИНР) и радиационного захвата (ГИРЗ) нейтронов

Генератор излучает импульсы нейтронов -14 МэВ, частота (~10 кГц)



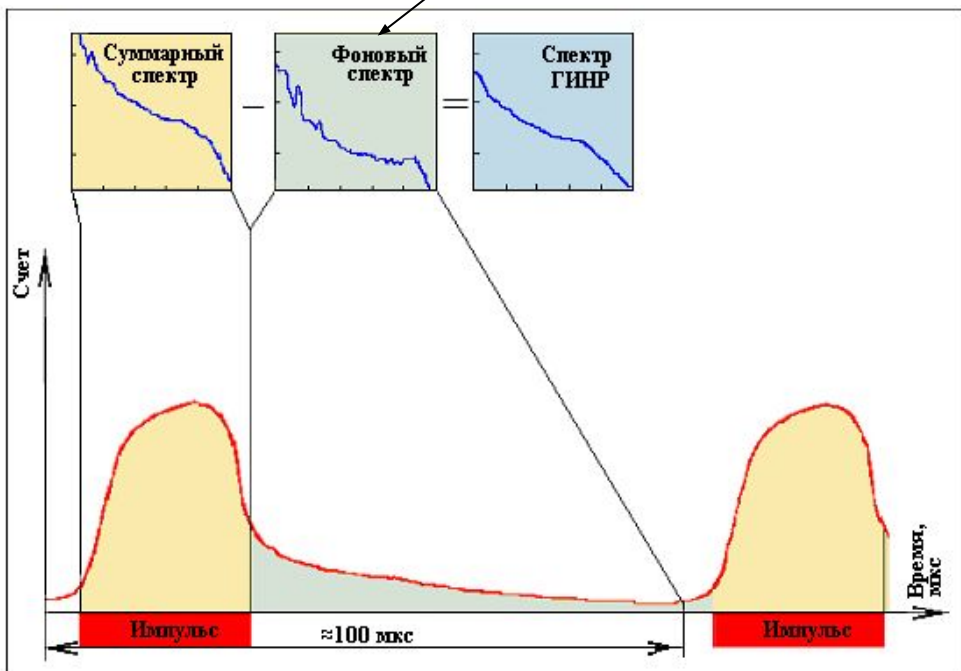
гамма-излучение наведенной активности (ГИНА)

Образуются гамма- кванты

**Наиболее характерные линии ГИНР и ГИРЗ основных
породообразующих элементов и элементов конструкции скважины и
скважинного прибора, наблюдаемые
в регистрируемых спектрах**

Элемент	ГИНР, МэВ	ГИРЗ, МэВ
Водород, Н	-	2.23
Кислород, О	6.13; 7.1	-
Углерод, С	4.43	-
Кремний, Si	1.78	3.54; 4.93
Кальций, Ca	3.74; 3.90; 4.49	1.94; 4.42; 5.90; 6.42
Железо, Fe	0.84; 1.25	5.92; 6.02; 7.28; 7.63; 7.65
Алюминий, Al	1.02; 3.80	1.78
Натрий, Na	0.44; 2.00; 2.7	0.47; 2.75; 3.98; 6.40
Калий, K	2.52; 2.81	0.77; 1.62; 2.07; 5.38
Магний, Mg	1.37	1.81; 2.83; 3.92
Хлор, Cl	2.50; 3.60; 4.10	1.95; 6.11; 6.62; 7.41
Бор, В	-	0.48

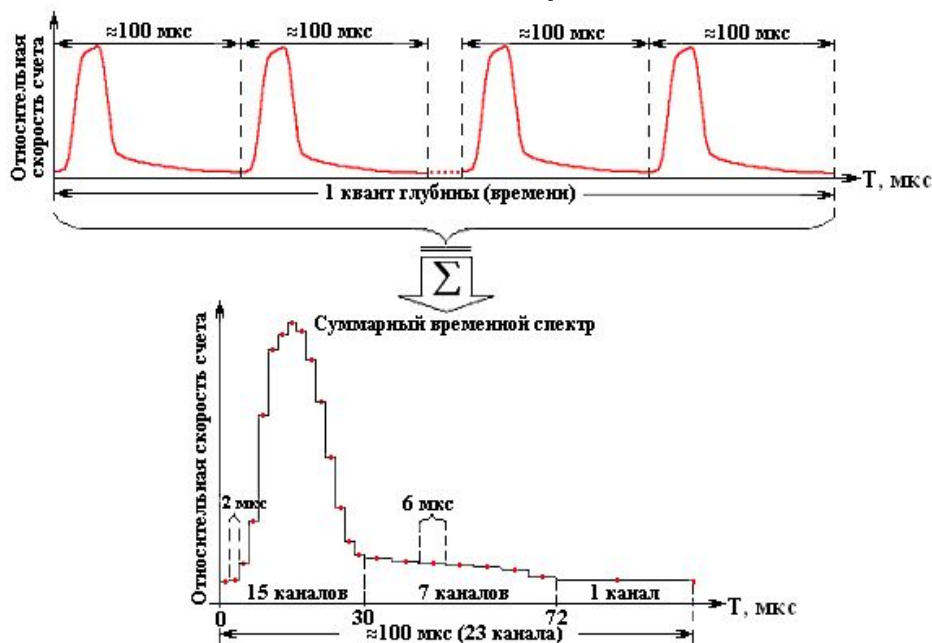
Гамма-излучение наведенной активности (ГИНА)



ГИНР регистрируются в процессе излучения импульса нейтронов излучателем, длительность которого составляет $15 \div 25$ мксек.

Время жизни тепловых нейтронов в типичных разрезах колеблется от 100 до 500 мксек

Схема формирования временного спектра единичного цикла измерений



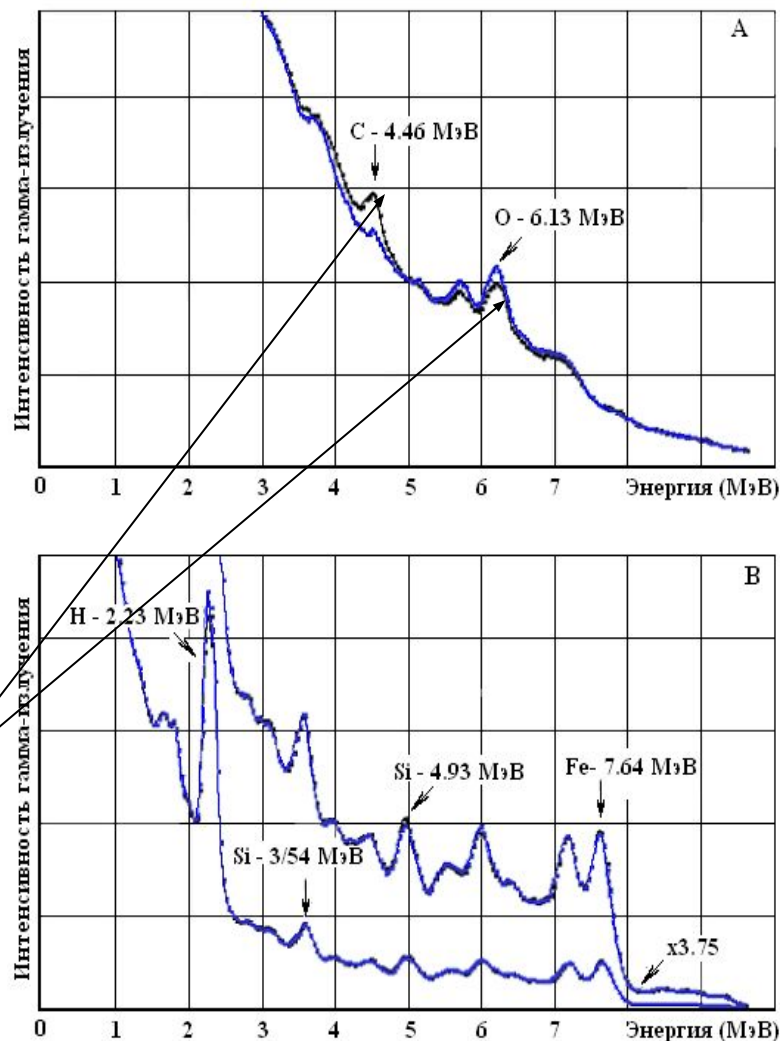
Временной спектр аппаратуры АИМС состоит из 23 каналов.

Первые 15 каналов имеют длительность 2 мкс, следующие 7 каналов - 6 мкс

Последний 23 канал - 72 мкс.

Синий спектр - водонасыщенный
песчаник, черный спектр -
нефтенасыщенный песчаник.

Пример аппаратных спектров неупругого рассеяния (А) и радиационного захвата нейтронов (В) прибора АИМС

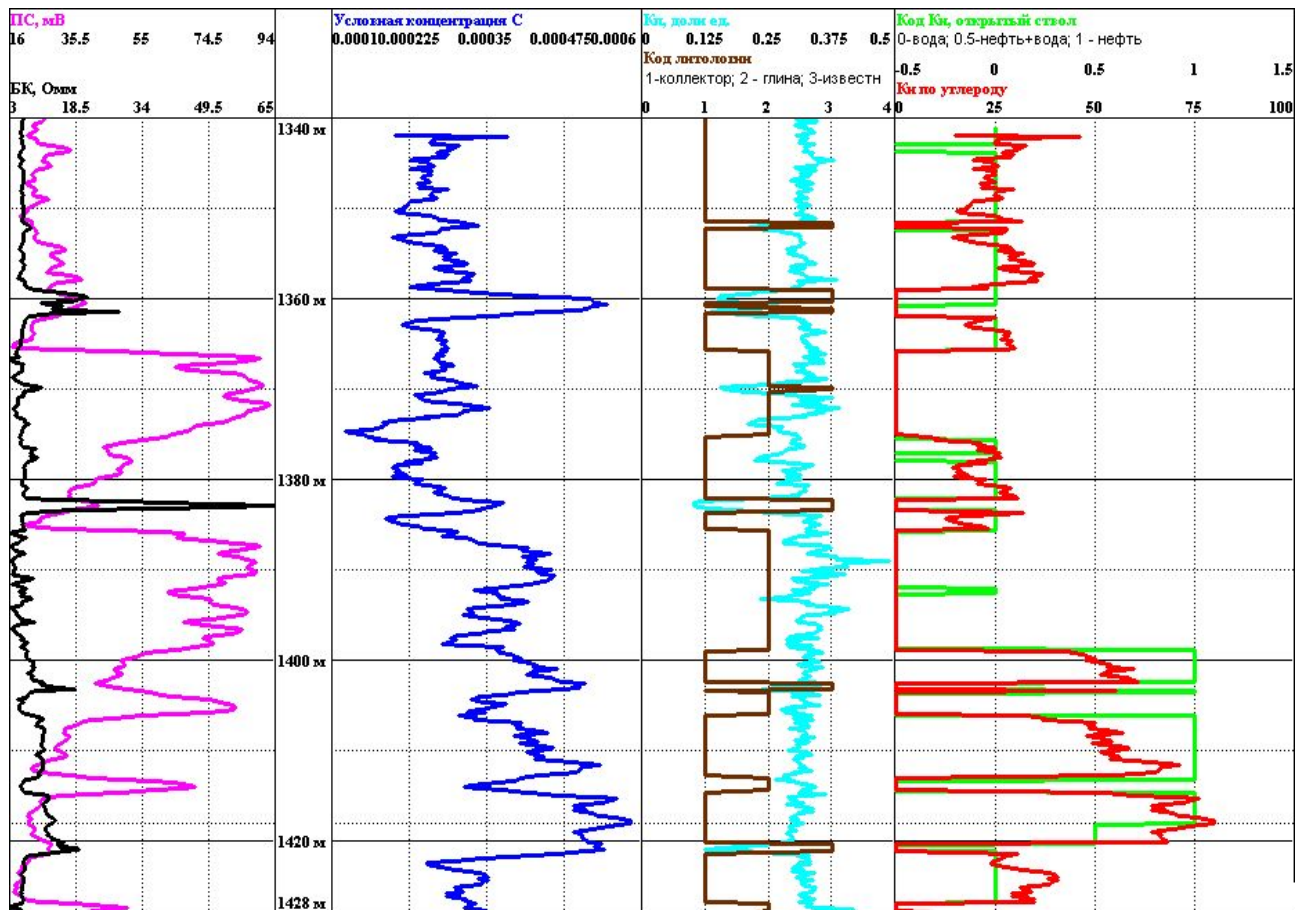


Ограничения С/О каротажа- малая глубинность метода (10-17см)

Факторы снижающие информативность С\О каротажа:

- Наличие границ раздела «нефть/вода» в интервале измерений.
- Наличие твердых и вязких углерод содержащих отложений (битумы, шлаки) в области измерений.
- Наличие нефти в полостях и порах цементного камня.
- Заколонные перетоки обуславливающие перераспределение пластовых флюидов в прискважинной области.
- Плохое качество цементирования между колонной и породой.

Главная особенность отношения СО – относительно незначительные различия в значениях K_p для пластов с различным нефтенасыщением.



Результаты обработки материалов С/О-каротажа и сопоставление нефтенасыщенности, определенной по С/О-каротажу с нефтенасыщенностью, определенной по материалам открытого ствола.

Рентгено- радиометрический метод

Основан на облучении горных пород гамма- излучением и регистрации характеристического рентгеновского излучения. Спектрометрия – выделение отдельных элементов

Гамма- нейтронный и гамма- активационный метод

Фотоядерная реакция (гамма, протон) (гамма, нейтрон)

Регистрируют нейтроны

Нейтронно- активационный метод

Облучают нейтронами и исследую искусственную радиоактивность

По периоду полураспада и спектру гамма- излучения- изотоп

По интенсивности гамаа- излучения- концентрация элемента

Метод радиоактивных изотопов – активированная сода (15 часов), радон (3.8 суток)

Акустические методы исследования скважин (самост)