

НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ

В основном, применяются методы:

- 1) нейтрон-нейтронный метод по тепловым нейтронам ННМ-Т (НМ-Т) или метод плотности тепловых нейтронов;
- 2) нейтронный гамма-метод (НГМ);
- 3) импульсные нейтронные методы (ИННМ, ИНГМ).

НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ. Процессы рассеяния и поглощения.

Если среда облучается *быстрыми нейтронами энергий ($E > 4-5$ МэВ)*, рассеяние нейтронов способствует превращению быстрых нейтронов в *надтепловые ($E \sim 1$ МэВ) и тепловые ($E \sim 0,025$ МэВ)*. Происходит замедление нейтронов, причем тем интенсивнее, чем больше в среде **водорода**.

Для тепловых нейтронов, при их взаимодействии с ядрами, наиболее вероятен **радиационный захват** нейтронов ядрами **хлора**.

СХЕМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

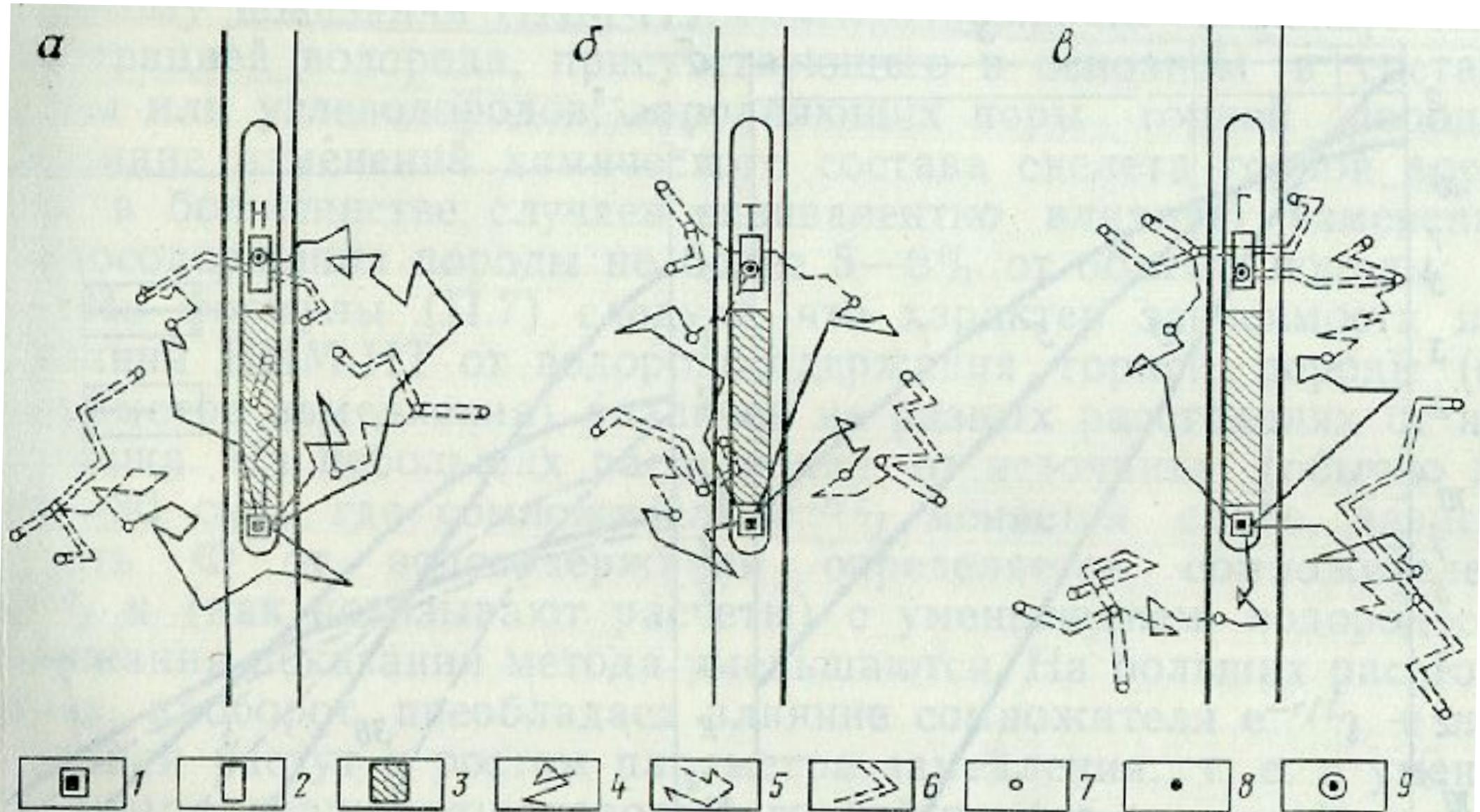


Рис. 42. Схема распространения и регистрации нейтронов и гамма-квантов в методе НМ-НТ (*a*), НМ-Т (*б*), НГМ (*в*).

Нейтронные свойства горных пород.

Эффективное микроскопическое сечение рассеяния σ_p нейтронов отражает вероятность встречи нейтрона с ядром элемента и последующего его рассеяния.

Величина σ_p определяется **отношением** числа актов рассеяния нейтрона на единице его пути к концентрации в единице объема ядер элемента.

Эффективное микроскопическое сечение захвата σ_3 нейтронов отражает вероятность захвата нейтрона ядром элемента. Величина σ_3 определяется **отношением** числа актов захвата нейтрона на единице его пути к концентрации в единице объема ядер элемента.

Эффективное сечение захвата и рассеяния имеют размерность площади и выражаются в квадратных сантиметрах.

Нейтронные свойства горных пород.

Эффективное макроскопическое сечение рассеяния Σ_p и эффективное макроскопическое сечение захвата Σ_z нейтронов определяют соответственно вероятности рассеяния или захвата нейтрона, но не одним ядром, а всеми ядрами одного или нескольких элементов в единице объема вещества.

Параметры Σ_p и Σ_z для вещества, состоящего из атомов только одного элемента с атомным весом A , σ_p и σ_z , определяются выражениями

$$\Sigma_p = \frac{\delta_n N}{A} \sigma_p, \quad \Sigma_z = \frac{\delta_n N}{A} \sigma_z.$$

где δ_n – плотность вещества, N – число Авогадро.

Если вещество представлено **сложным химическим составом**, то величины Σ_p и Σ_z зависят также от процентного содержания каждого элемента.

Нейтронные свойства горных пород.

Длина замедления быстрых нейтронов L_s – наиболее вероятное расстояние от источника, на котором быстрый нейтрон становится тепловым.

Длина диффузии D характеризует расстояние по прямой от места возникновения теплового нейтрона до места его поглощения.

Среднее *время жизни τ* тепловых нейтронов определяет наиболее вероятное время между возникновением и захватом теплового нейтрона и рассчитывается по формуле

$$\tau = 1/v \sum_3$$

где v - скорость движения тепловых нейтронов, равная $2,2 \times 10^5$ см/с при $t = 20^0C$ и возрастающая с увеличением t .

Импульсный нейтронный каротаж (ИНК).

Методы ГИС, основанные на облучении горных пород **нестационарным** потоком быстрых нейтронов:

- и регистрации тепловых нейтронов (ИННК),
- или регистрации γ -квантов гамма-излучения радиационного захвата (ИНГК ГИРЗ),
- или регистрации γ -квантов гамма-излучения неупругого рассеяния (ИНГК ГИНР),
- называют **импульсным нейтронным каротажем (ИНК).**

ГИРЗ возникает при поглощении тепловых нейтронов ядрами элементов среды – радиационный захват.

ГИНР возникает при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами тяжелых элементов среды – неупругое рассеивание.

Импульсный нейтронный каротаж (ИНК).

При ИНК применяют **низкочастотные** импульсные генераторы с частотой посылок в несколько сотен герц и **высокочастотные** импульсные генераторы с частотой посылок порядка 10 – 20 кГц.

С помощью **низкочастотных генераторов** реализуют *импульсный нейтрон-нейтронный каротаж (ИННК)*, основанный на регистрации *тепловых нейтронов*, и *импульсный нейтронный гамма-каротаж (ИНГК)*, основанный на регистрации *ГИРЗ*.

С помощью **высокочастотных генераторов** реализуют *импульсный нейтронный гамма-каротаж (ИНГК)*, основанную на регистрации *ГИНР*.

Физические основы ИННК и ИНГК.

При ИННК и ИНГК изучают **процесс спада** плотности тепловых нейтронов или плотности γ -квантов ГИРЗ **во времени**, после коротких импульсов генератора нейтронов.

После некоторой задержки t регистрируют чисто импульсов во временных окнах Δt . По значениям числа импульсов в нескольких окнах находят параметры временного распределения. При достаточном числе временных окон (8 - 16) *вид временного распределения плотности тепловых нейтронов или γ -квантов удается восстановить с высокой детальностью.*

Физические основы ИННК и ИНГК.

Пространственно-временное распределение **тепловых нейтронов** от помещенного в начало координат точечного импульсного источника быстрых нейтронов

$$n_T(r, t) = \frac{Q}{[4\pi(\theta_\phi + Dt)]^{3/2}} \exp\left(\frac{-r^2}{4(\theta_\phi + Dt)} - \frac{t}{\tau}\right).$$

Q - объемная концентрация источников тепловых нейтронов; длина замедления быстрых нейтронов

$L_S \approx \sqrt{\theta_\delta}$; D и τ - длина диффузии и время жизни тепловых нейтронов.

Физические основы ИННК и ИНГК.

Пространственно-временное распределение γ -квантов от помещенного в начало координат точечного импульсного источника быстрых нейтронов

$$\bar{n}_\gamma(r, t) = \frac{Q}{[4\pi(\theta_\phi + L_\gamma^2 + Dt)]^{3/2}} \frac{v\tau_\gamma}{\tau} \exp\left[-\frac{t}{\tau} - \frac{r^2}{4(\theta_\phi + L_\gamma^2 + Dt)}\right].$$

v - скорость движения тепловых нейтронов, τ_γ - время жизни γ -квантов; Q - объемная концентрация источников γ -квантов; L_γ - длина переноса γ -квантов;

длина замедления быстрых нейтронов $L_S \approx \sqrt{\theta_\delta}$; D и τ - длина диффузии и время жизни тепловых нейтронов.

Физические основы ИННК и ИНГК.

Для значительных t , т. е. начиная с некоторых задержек, отношение показаний ИННК-Т в двух пластах (с τ_1 и τ_2) определяется выражением:

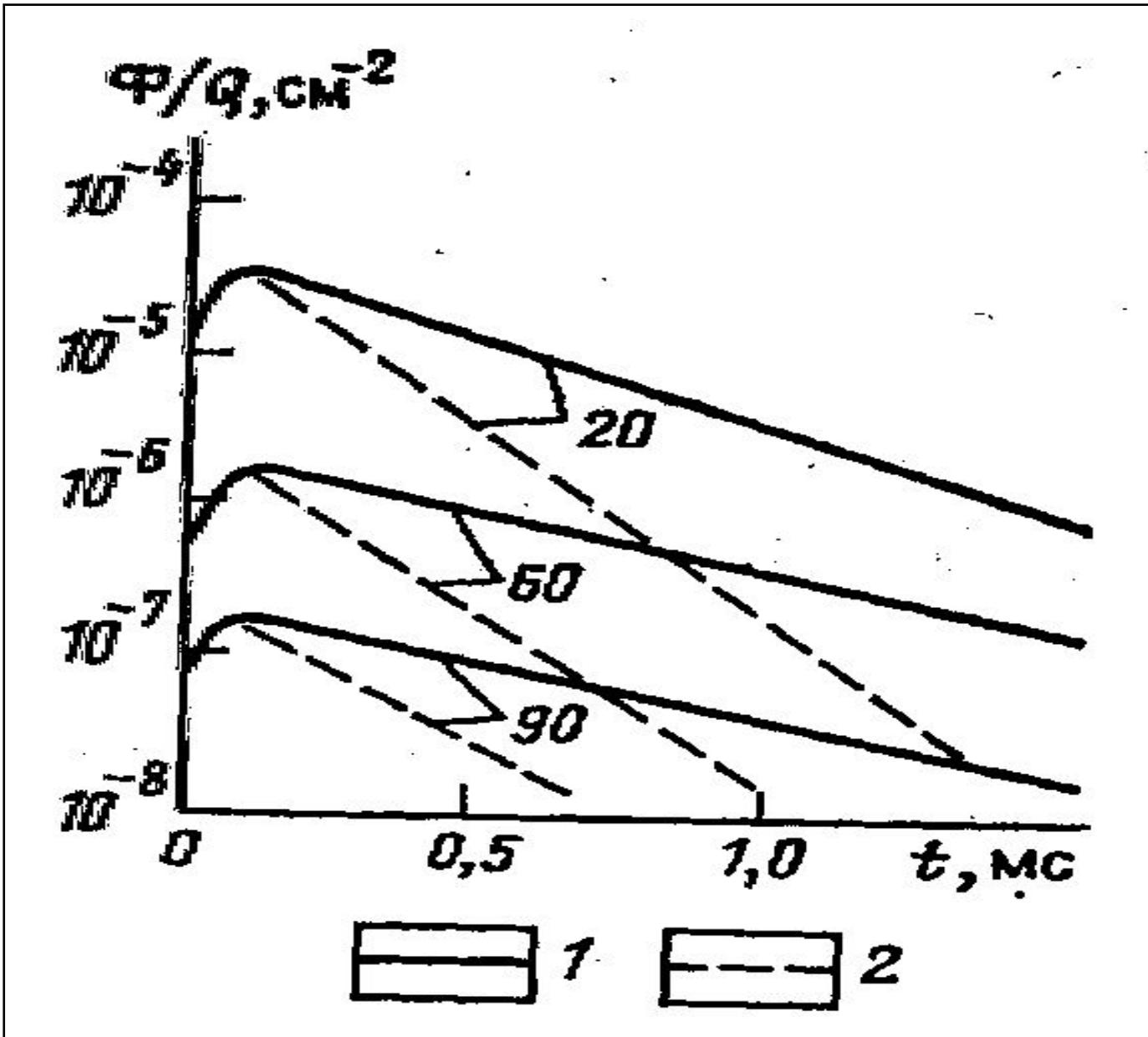
$$n_{T2}(r, t) / \overset{\boxtimes}{n}_{T2}(r, t) = \exp\left[t(\tau_2^{-1} - \tau_1^{-1})\right]$$

свидетельствующим о возможности литологического расчленения пород и идентификации нефтенасыщенных и водонасыщенных частей коллекторов по их нейтронопоглощающим свойствам.

Для стационарного ИННК-Т

$$n_{T2}(r) / \overset{\boxtimes}{n}_{T1}(r) \approx \tau_2 / \tau_1,$$

Физические основы ИННК и ИНГК.



Временное распределение плотности тепловых нейтронов для зондов разной длины L_3 в однородном водонасыщенном песчанике

1 – пресная вода; 2 – соленая вода (NaCl = 200 г/л); шифр кривых L_3, cm

Физические основы ИННК и ИНГК.

Глубинность ИНК, как и других нейтронных методов, определяется длиной миграции излучения. Поэтому глубинность *по водородосодержанию* для ИННК и ИНГК

пропорциональна $2\sqrt{L_s^2 + Dt}$ и $2\sqrt{L_s^2 + L_\gamma^2 + Dt}$

соответственно.

По поглощающим свойствам глубинность

оценивают как $2\sqrt{Dt}$ и $2\sqrt{L_\gamma^2 + Dt}$.

Как в первом, так и во втором случае глубинность растет с увеличением t .

Применение ННК.

При временном анализе используют *временной декремент затухания* поля тепловых нейтронов

$$\lambda_t = \frac{\ln n_T(t_1) - \ln n_T(t_2)}{t_2 - t_1}.$$

λ_t определяют на разных участках распределения, т.к. его величина при разных задержках по-разному зависит от свойств скважины, зоны проникновения, пласта и, таким образом, содержит информацию об этих свойствах.

При относительно больших t величина λ_t близка к декременту в однородной среде, и потому *обусловлена нейтронопоглощающими свойствами пласта* и при прочих равных условиях — *характером насыщения*.

Применение ННК.

Расхождение показаний на двух зондах разной длины зависит от водородного индекса и *применяется для оценки водородосодержания.*

Из выше приведенных формул следует, что при фиксированной величине t/τ пространственное распределение тепловых нейтронов определяет суммарная длина миграции нейтронов

$$L_n = \sqrt{\theta + Dt} = \sqrt{L_s^2 + L_D^2},$$

которая существенно зависит от замедляющей способности среды, т. е. от ее *водородосодержания.*

Применение ИНК.

Преимущества ИНК перед обычным НК при решении задачи нефтепромысловой геофизики обусловлены:

- 1) более высокой чувствительностью к хлорсодержанию;
- 2) меньшей зависимостью показаний от влияния скважины.

Выделение ВНК *импульсным НК* возможно при минерализации пластовой воды, превышающей 30 г/л.

При *обычном НК* минерализация должна превышать 100 - 150 г/л.

.

ИНК, основанный на регистрации ГИНР

Спектр ГИНР осложнен рядом близких энергетических линий. Поэтому *методику ГИНР* комплексируют с *методикой ГИРЗ* и *активационной*.

При этом удастся разделить излучение различных элементов за счет амплитудной и временной селекции. *Углерод* определяют по энергетической линии его ГИНР, равной *4,6 МэВ*, а *кислород* – *обычно активационным методом*. Таким путем удастся найти местоположение водонефтяного контакта.

Применение современных детекторов позволяет включить в *перечень определяемых элементов* *O, Mg, Si, S, реже C*.

Интерпретационные параметры ИНК

Показания *скорости счета* гамма-квантов или тепловых нейтронов $I(t_r)$ определяется главным образом макроскопическим сечением поглощения тепловых нейтронов в пласте $\Sigma_{зП}$.

Поэтому метод эффективно используется для решения тех задач скважинкой геофизики, которые связаны с оценкой или изменением величины $\Sigma_{зП}$ пород в пространстве и во времени за счет элементов, сильно поглощающих тепловые нейтроны (например, хлора).

К таким задачам относятся - *определение положений ВНК, ГНК, ГВК.*

.

Интерпретационные параметры ИНК

Интерпретационные параметры однозондового ИНК: I_i , λ , $\nu T \Sigma_{зП} = 1/\tau$, где λ — декремент временного затухания плотности регистрируемых частиц i ; τ — среднее время жизни тепловых нейтронов в горной породе.

Эти параметры определяются из первичных данных измерений полного числа импульсов N_i (счета), зарегистрированного на задержках t_i , в окнах Δt_i , за время набора статистики T . $I_i = N_i/T$:

Основными параметрами, используемыми в настоящее время для количественной интерпретации, является декремент λ (или эффективное время жизни $\tau_{эф} = 1/\lambda$), а также $\Sigma_{зП}$ — макроскопическое сечение поглощения.

Интерпретационные параметры ИНК

*Двухзондовые
модификации ИНК,*
кроме λ и $\Sigma_{зП}$,
используют еще
два параметра:

$$\beta = I(t, z_1) / I(t, z_2);$$

$$F_D = \frac{d\sigma^2}{dt} \approx D \approx \Sigma_{tr}^{-1};$$

$$\sigma^2(t) = \frac{z_2^2 - z_1^2}{4 \ln \beta(t)}$$

величины которых определяются главным образом $\Sigma_{рП}$ в пласте. Здесь β — отношение показаний ближнего z_1 и дальнего z_2 зондов; Σ_{tr} — транспортное сечение рассеяния, D — диффузия тепловых нейтронов.

Интерпретационные параметры ИНК

Аномально большое микросечение рассеяния *медленных* нейтронов ядрами водорода (σ_{sH}) позволяет использовать *двухзондовый ИНК* для определения водородосодержания ω в породах.

Глубинность ИНК $R_u \approx 2\sqrt{L_s^2 + D_n t} \sim 40 - 80\text{см}$

Параметры Σ_* и Σ_{tr} линейно зависят от содержания отдельных компонентов породы. Это положение лежит в основе всех методик интерпретации ИНК.

При интегральных ИННК и ИНГК наиболее интересна область больших времен задержки t после импульса (*временная асимптотика*), где показания наиболее тесно связаны с ядерно-физическими характеристиками *пласта*, а уровень помех от скважины минимален.

Нейтронный активационный гамма-каротаж (АНГК)

При НАГК горные породы облучают быстрыми или тепловыми нейтронами.

По природе полураспада *искусственных* радиоактивных ядер и энергии их γ -излучения определяют *исходный стабильный изотоп*, а по интенсивности γ -излучения судят о его *концентрации*.

Сечение σ_x ядерных реакций, приводящей к образованию искусственных радиоактивных ядер, называют *сечением активации данного элемента*. Высокие сечения активации быстрыми нейтронами имеют *O, Mg, Al, Si, Cl, Cr, Mn, F*.

Активационный нейтронный гамма-каротаж (АНГК)

Спад активности $I_{\gamma a}$ *изотопа*, образовавшегося при облучении, после облучения подчиняются выражению

$$\ln I_{\gamma a} = \ln I_{\gamma 0\infty} - \lambda_p t = \ln \Phi N_x \sigma_x - \lambda_p t.$$

где $I_{\gamma 0\infty} = \Phi N_x \sigma_x$ – максимальная активность искусственного изотопа при данной плотности активирующего потока нейтронов Φ , достигаемая при времени облучения $t_0 \rightarrow \infty$.

N_x – число атомов активируемого элемента в единице объема.

λ_p – постоянная распада образовавшегося изотопа.

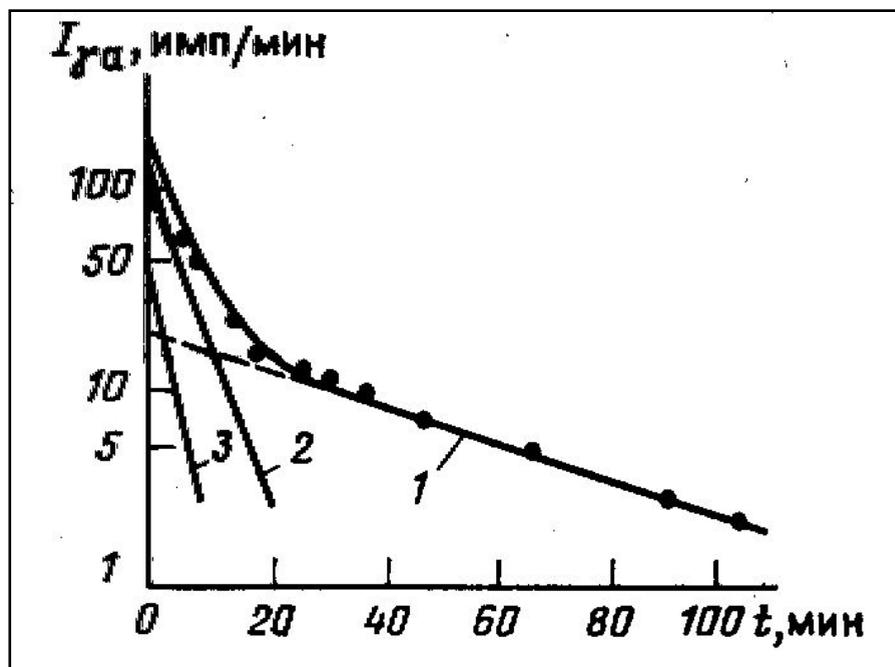
t – время, прошедшее с момента окончания облучения.

Активационный нейтронный гамма-каротаж (АНГК)

Анализ *графика* выражения

$$\ln I_{\gamma a} = \ln I_{\gamma 0\infty} - \lambda_p t = \ln \Phi N_x \sigma_x - \lambda_p t.$$

позволяет сделать вывод, что тангенс угла наклона кривой $\ln I_{\gamma a} = f(t)$ равен $-\lambda_p$, а отрезок, отсекаемый графиком на оси ординат, прямо пропорционален *концентрации определяемого элемента*.



Пример графического расчленения зависимости $I_{\gamma a} = f(t)$ для смеси радиоактивных изотопов : 1- ^{38}Cl ; 2- ^{52}V ; 3- ^{28}Al