

Специальность 6В07201 – «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»
Дисциплина «Радиоактивные методы исследования»

Лекция

Физические основы гамма-гамма метода плотностного

Лектор: Пак Ю.Н.
д.т.н., проф.каф. ГРМПИ



План лекции:

1. Общие сведения о гамма-гамма методе.
2. Сущность и физические основы плотностного гамма-гамма метода.
3. Схемы зондовых устройств плотностного гамма-гамма-метода.
4. Методика измерений.
5. Примеры использования ГГМ-П.

Общие сведения о гамма-гамма методе

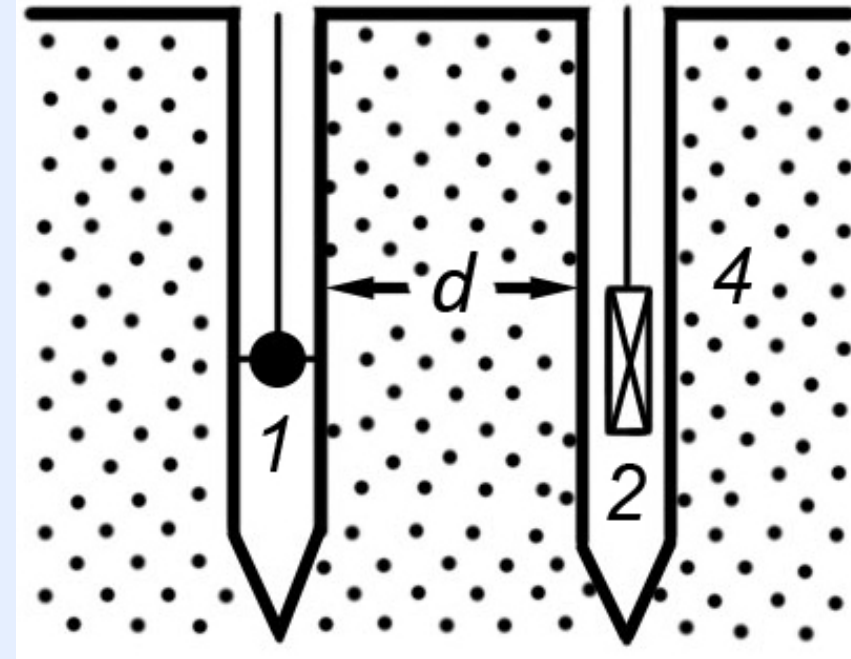
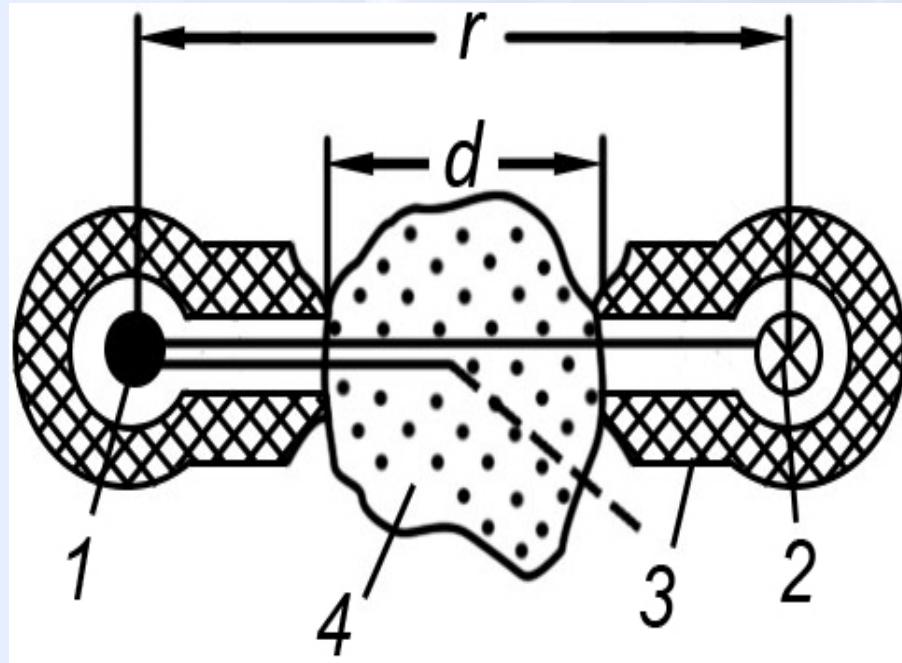
Плотностной гамма-гамма метод основан на облучении исследуемой среды гамма-квантами и измерении интенсивности ослабленных средой гамма-квантов.

Существуют две модификации измерения плотности: гамма-абсорбционный метод и метод рассеянного гамма-излучения.

Гамма-абсорбционный метод реализуют в геометрии, когда источник первичного гамма-излучения и детектор вторичного излучения располагают по разные стороны от объекта исследования.



Схема измерений узкого (а) и широкого (б) пучка излучений



а

б

1 – источник; 2 – детектор; 3 – экран; 4 – среда;
 d – толщина просвечиваемого слоя

Основная аналитическая зависимость для ГГМ-п в геометрии просвечивания узкого пучка гамма-квантов с учетом экспоненциального характера его ослабления, имеет вид:

$$\rho = \ln N / N_0 (\tau d)^{-1},$$

где N_0, N – плотность потока гамма-квантов соответственно до и после прохождения через исследуемый образец;

τ – массовый коэффициент ослабления первичного гамма-излучения исследуемой средой;

d – толщина просвечиваемого слоя образца.

Геометрия широких пучков применяется для определения плотности поверхностных слоев в шпурах. Гамма-абсорбционный метод используется не только в геофизических исследованиях. Метод получил распространение в горно-металлургических отраслях для контроля ряда технологических параметров.

Более широкое применение в геофизических исследованиях получил плотностной гамма-гамма метод в модификации рассеянного гамма-излучения, когда зонд, содержащий источник первичного гамма-излучения и детектор рассеянного средой гамма-излучения располагаются по одну сторону от поверхности исследуемой среды.

Такая геометрия измерений предотвращает прямое попадание первичного излучения в детектор, назначение которого регистрация рассеянных средой гамма-квантов.

Сущность и физические основы плотностного гамма-гамма метода

Плотностной гамма-гамма метод является одним из ведущих геофизических методов изучения геологического разреза скважин. Метод используется также для определения плотности различных сыпучих материалов и в процессе геофизического опробования твердых полезных ископаемых.

Плотность горных пород является важным параметром, используемым для изучения геологического разреза и подсчета запасов полезного ископаемого. К таким параметрам можно отнести пористость, влагонасыщенность, волновое сопротивление, скорость распространения сейсмических колебаний и др.

Плотность пород и руд изучают на всех стадиях разведки по образцам керна, полученного из буровых скважин, по образцам руды, отобраным в горных выработках.

Традиционные (весовые) методы определения плотности не удовлетворяют возрастающим потребностям в силу присущих им недостатков, резко снижающих эффективность исследований. К этим недостаткам относятся:

1. высокая трудоемкость процесса отбора керна и представительных проб;
2. низкая производительность и представительность;
3. деструктивность определения и невозможность оценки плотности в условиях естественного залегания пород.

Свободным от указанных недостатков классического метода является плотностной гамма-гамма метод, относящийся к разряду инструментальных методов.

При буровой разведке низкая представительность или плохой выход керна по рудному интервалу затрудняют объективное исследование образцов на плотность. В этих условиях использование ГГМ-П дает неоспоримые преимущества.

Благодаря достаточно большой глубинности исследований и непрерывным измерениям по всему разрезу достигается большая представительность определений плотности.

Сущность ГГМ-П сводится к облучению горной породы потоком гамма-излучения и регистрации рассеянного породой гамма-излучения.

Обоснование оптимальных параметров плотностного метода заключается в выборе энергии первичного гамма-излучения и энергии регистрируемого рассеянного гамма-излучения.

Оптимизацию этих параметров выполняется на основе выражения для общего линейного коэффициента ослабления гамма-излучения:

$$\mu_o = \mu_{\phi} + \mu_{\kappa} + \mu_{\kappa\Gamma} + \mu_{\text{оп}},$$

где μ_{ϕ} , μ_{κ} , $\mu_{\kappa\Gamma}$, $\mu_{\text{оп}}$ – линейные коэффициенты ослабления, соответственно, за счет фотоэффекта, комптон-эффекта, когерентного рассеяния и образования электронно-позитронных пар.

Выразив линейные коэффициенты через микроскопические сечения, получим:

$$\mu_o = \sigma_{\phi}(E, Z) \frac{\rho N_A}{A} + \sigma_{\kappa}(E) \frac{\rho N_A}{A} Z + \sigma_{\kappa\Gamma}(E, Z) \frac{\rho N_A}{A} + \sigma_{\text{оп}}(E, Z) \frac{\rho N_A}{A}. \quad (1)$$

В практических измерениях пользуются конкретным источником первичного гамма-излучения, поэтому зависимость коэффициента ослабления (μ_0) от энергии не будет сказываться на измерении плотности.

На результаты измерения (μ_0) влияет величина Z , которая в свою очередь сильно воздействует на вероятности фотоэлектрического поглощения ($\sigma_{\text{ф}}$) и когерентного рассеяния ($\sigma_{\text{кг}}$) и образования электронно-позитронных пар ($\sigma_{\text{оп}}$).

Таким образом, колебания Z горной породы приведут в общем случае к изменению μ_0 , а следовательно, и к изменению показаний метода.

Если учесть, что в горных породах и рудах нет четкой однозначной связи между Z и плотностью, то колебания Z пород можно рассматривать как основной мешающий фактор при измерении плотности.

Из выражения

$$\mu_0 = \sigma_{\text{ф}}(E, Z) \frac{\rho N_A}{A} + \sigma_{\text{к}}(E) \frac{\rho N_A}{A} Z + \sigma_{\text{кг}}(E, Z) \frac{\rho N_A}{A} + \sigma_{\text{оп}}(E, Z) \frac{\rho N_A}{A}. \quad (1)$$

следует, что на μ_0 сильнее всего через величину Z оказывает влияние первое слагаемое, обусловленное фотопоглощением гамма-квантов ($\sigma_{\text{ф}} \sim Z^4$), третье слагаемое, обусловленное когерентным рассеянием ($\sigma_{\text{кг}} \sim Z^3$), и последнее слагаемое, обусловленное образованием пар ($\sigma_{\text{оп}} \sim Z^2$).

Отсюда необходимо выбрать такую энергию первичного гамма-излучения, при которой общий коэффициент ослабления будет преимущественно обусловлен составляющей за счет комптоновского рассеяния гамма-излучения.

Таблица – Значения энергии гамма-квантов, при которых наблюдаются соответствующие равенства

Элемент	E ₀ , МэВ	
	$\sigma_{\text{ф}} \approx \sigma_{\text{к}}$	$\sigma_{\text{ф}} \approx 0,2\sigma_{\text{к}}$
Углерод – 6	0,015	0,03
Алюминий – 13	0,05	0,08
Железо – 26	0,12	0,20

Для большинства горных пород при энергии квантов выше примерно 200 кэВ фотоэлектрическим поглощением можно пренебречь, так как их вклад в общий коэффициент ослабления будет пренебрежимо мал по сравнению с комптон-эффектом.

Исключением являются минералы с большим содержанием тяжелых элементов: свинец, вольфрам, ртуть, барит и др. Для таких элементов комптон-эффект преобладает над фотоэффектом при энергиях выше 500 кэВ. Когерентное рассеяние (третье слагаемое выражения) будет давать вклад в общий коэффициент ослабления при очень малых энергиях первичного изучения и для тяжелых элементов. Вероятность образования электронно-позитронных пар будет сопоставимой с сечением комптон-эффекта при энергиях значительно выше удвоенной энергии покоя электронов (1,022 МэВ).

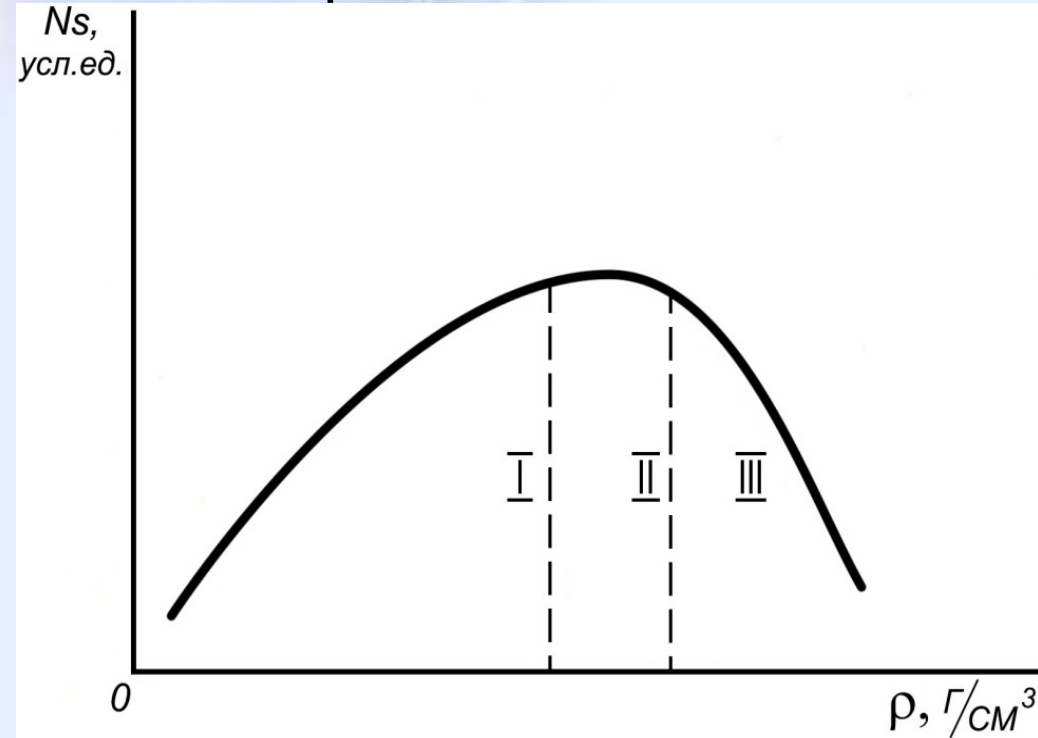
При реализации плотностного гамма-гамма метода создаются условия, при которых основную роль приобретает процесс комптоновского рассеяния гамма-квантов, вследствие чего результаты измерений в значительной степени определяются плотностью анализируемой среды.

Таким образом, если в качестве первичного гамма-излучения выбрать кванты с энергией выше 500 кэВ, но не более 2-3 МэВ, то основным процессом взаимодействия для большинства породообразующих элементов будет комптоновское рассеяние. Для более однозначного измерения плотности среды влияние эффективного атомного номера уменьшают за счет применения относительно высокоэнергетического первичного гамма-излучения с энергией выше примерно 500 кэВ.

Отсюда выражение (1) приводится к виду
$$\mu_o \approx \sigma_k(E) \frac{\rho N_A}{A} Z.$$

Приняв во внимание, что для большинства породообразующих элементов, имеем $\mu_o \approx 0,5 \rho N_A \sigma_k(E) \cdot \frac{Z}{A} \approx 0,5$ Из полученного выражения $\frac{Z}{A}$ следует, что при энергии первичного гамма-излучения выше примерно 500 кэВ, коэффициент ослабления будет зависеть только от плотности ($N_A, \sigma_k - const$).

Общий вид зависимости потока рассеянных квантов от плотности горных пород



Такие зависимости называют инверсионными. Указанную зависимость можно разделить на 3 области: I-восходящая ветвь зависимости, доинверсионная область; II-область максимума, область инверсии; III-спадающая ветвь зависимости, заинверсионная область.

Сложная знакопеременная зависимость $N_s=f(\rho)$ делает невозможным однозначное определение плотности по количеству рассеянных квантов, так как одно и то же значение N_s возможно при двух различных значениях плотности.

Повышение интенсивности рассеянных квантов с увеличением плотности в области ее малых значений (I область) обусловлено увеличением актов рассеяний за счет увеличения электронной плотности. Число электронов в 1 см^3 горной породы равно:

$$n_e = \rho N_A \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{A_i} c_i,$$

где Z_i – атомный номер i -го элемента в среде;
 A_i – массовое число i -го элемента в среде;
 c_i – весовая концентрация i -го элемента в среде.

Электроны являются центрами рассеяний. Поэтому чем больше плотность среды, тем больше электронов в единице объема, больше рассеяний.

Снижение интенсивности квантов в III области вызвано возрастающей ролью фотоэлектрического поглощения рассеянных квантов. С увеличением плотности в области ее повышенных значений растет число рассеяний, при которых происходит потеря энергии рассеянных квантов, а с уменьшением энергии возрастает вероятность фотопоглощения, приводящая к убыли числа квантов, достигающих до детектора.

Положение максимума на кривой $N_s(\rho)$, когда интенсивность рассеянных квантов практически не зависит от изменения плотности, связано с компенсирующим действием фотоэлектрического поглощений рассеянных γ -квантов. Рост числа рассеянных квантов компенсируется соответствующей убылью рассеянных квантов за счет поглощения.

Отсюда следует, что если рабочий диапазон изменения плотности совпадает с областью инверсии зависимости $N_s(\rho)$, то метод практически нечувствителен к изменению плотности.

Положение максимума зависит от длины зонда и энергии первичного гамма-излучения. С увеличением энергии максимум смещается вправо, т.е. в область повышенных значений плотности. Аналогичный эффект достигается уменьшением длины зонда. Чтобы сдвинуть область инверсии влево, необходимо уменьшить энергию первичных γ -квантов или увеличить длину зонда.

Наиболее широко применяемым источником для реализации ГГМ-П является ^{137}Cs (660кэВ). Для него инверсия наступает при длине зонда 5-7 см в области плотности 1,5-2,0 г/см³.

Плотность пород можно определять доинверсионными зондами (имеющими характеристику I-й области) и заинверсионными (использующими заинверсионную III-ю область).

Доинверсионные зонды применяются реже и только при определении плотности легких сред. Они характеризуются низкой дифференциацией результатов от плотности. В практике чаще применяются заинверсионные зонды, отличающиеся повышенной чувствительностью к плотности.

В случаях когда при конкретной длине зонда и энергии первичного излучения рабочий интервал плотности пород попадает в область инверсии (II-я область), где практически результаты измерения слабо реагируют на изменения плотности, необходимо либо увеличить длину зонда, либо уменьшить длину зонда. В первом случае инверсионный зонд превращен в заинверсионный, во втором – в доинверсионный.

Таким образом, учитывая, что на практике используются в основном заинверсионные зонды, следует четко помнить об обратной зависимости $N_s(\rho)$, т.е. с увеличением плотности среды поток рассеянных γ -квантов снижается.

Обоснование параметров плотностного гамма-гамма метода сводится не только к выбору энергии первичного гамма-излучения. Достоверность оценки плотности пород по интенсивности рассеянных квантов определяется также и граничной энергией регистрируемых рассеянных γ -квантов.

В общем случае в детектор попадают рассеянные γ -кванты различных энергий. Их природа связана с различным числом комптоновских рассеяний. При каждом акте столкновения теряется энергия. Поэтому γ -кванты, рассеянные один, два, три и более раз будут обладать различными энергиями.

Выбор необходимой энергии регистрируемых рассеянных квантов диктуется с точки зрения минимального влияния вариаций эффективного атомного номера горной породы на результаты измерения плотности. Чем меньше энергия, тем выше вероятность фотопоглощения, которая сильно зависит от Z породы.

Поэтому, если регистрировать рассеянные γ -кванты, начиная с малых энергий, то их количество, дошедшее до детектора, будет сильно зависеть от величины Z , что вызовет ошибки в определении плотности по величине интенсивности рассеянного гамма-излучения.

Граничное значение энергии должно выбираться таким, чтобы коэффициент фотопоглощения был значительно ниже коэффициента комптоновского рассеяния.

В таблице приведены для ряда элементов значения массовых коэффициентов ослабления гамма-излучения различных энергий.

Массовые коэффициенты ослабления гамма-квантов

E, кэВ	Элемент						
	C – 6	Al – 13	S – 20	Ca – 20	Fe – 26	Ba – 56	Pb – 82
10	2,1	25,9	50,2	94,1	169,2	187,6	124,1
20	0,38	3,24	6,4	12,8	24,5	28,0	83,2
50	0,26	0,32	0,51	0,92	1,84	13,3	7,34
100	0,15	0,16	0,19	0,23	0,34	2,09	5,34
200	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,39	0,94
500	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,15

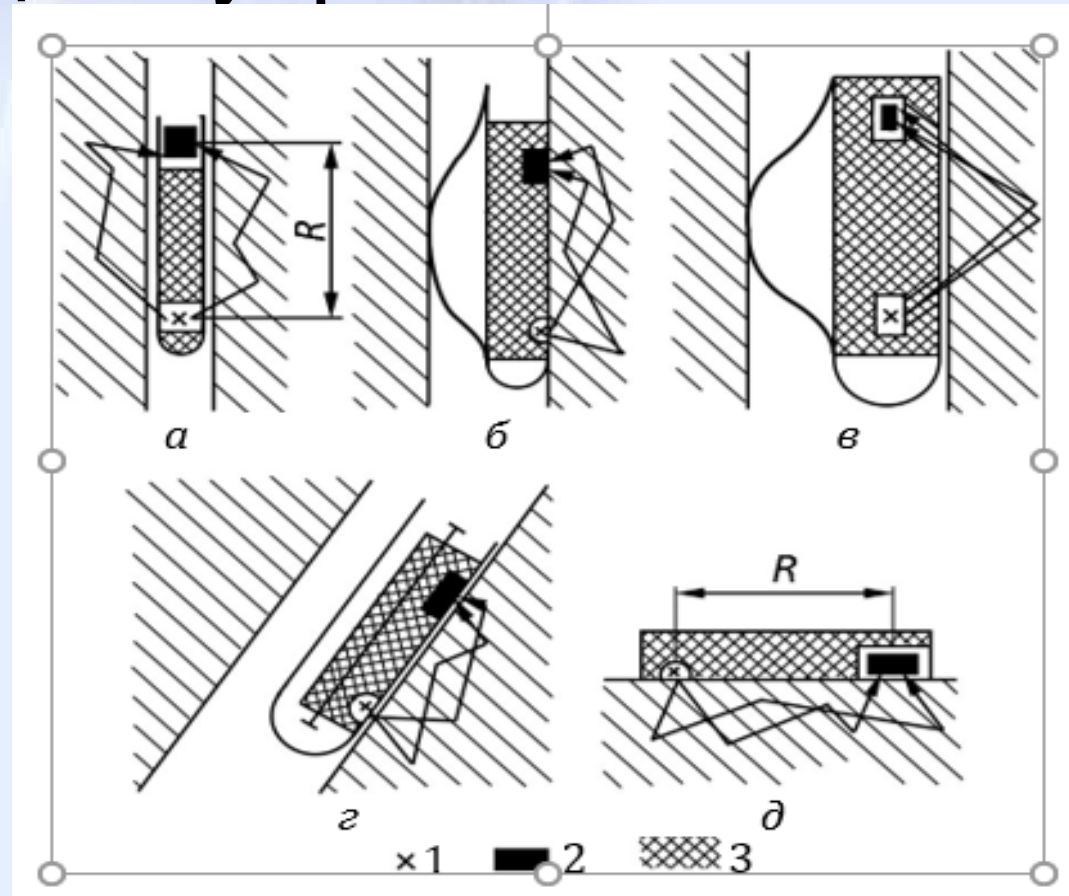
Таким образом, плотностной гамма-гамма метод реализуют путем облучения среды потоком γ -квантов с энергией выше примерно 500 кэВ и регистрации рассеянных средой γ -квантов с энергией выше примерно 200 кэВ.

Подавление низкоэнергетического γ -излучения возможно либо с помощью фильтров-экранов, либо с помощью электронных устройств-дискриминаторов, ограничивающих прохождение импульсов с амплитудой ниже заданной.

Например, стальной корпус прибора толщиной 5 мм подавляет согласно закону ослабления почти 80% гамма-квантов с энергией 100 кэВ и только 30% квантов с энергией 300 кэВ. Если поставить экран из свинца толщиной 1 мм, то доля прошедшего через него низкоэнергетического (100 кэВ) излучения ничтожно мала, в то время как доля прошедшего жесткого (300 кэВ) излучения составляет около 70%.



Схемы зондовых устройств плотностного гамма-гамма-метода



1 – источник γ -излучения; 2 – детектор; 3 – свинцовый экран

Зонды, показанные на рисунке а, используются при исследовании скважин небольшого диаметра. В основном они находят применение при инженерно-геологических изысканиях. Особенность такого зонда состоит в круговом облучении стенок скважин. Такие зонды называют 4π -зондами с симметричным облучением и регистрацией рассеянных γ -квантов.

Так называемые 2π -зонды (рисунок б) применяются при исследовании рудных и угольных скважин диаметром от 59 до 110 мм. Зонд снабжен прижимным устройством, позволяющим исключить влияние переменного диаметра скважин и каверн. Особенность такого зонда состоит в одностороннем облучении стенок скважины и регистрации рассеянного излучения.

Для изучения скважин большого диаметра на нефтяных месторождениях используют зонды (рисунок в), особенностью которых является жесткая фокусировка первичного и регистрируемого излучений, обеспечиваемая соответствующей коллимацией этих излучений. Это позволяет в сочетании с пороговой дискриминацией мягкого гамма-излучения регистрировать преимущественно однократно рассеянное γ -излучение.

Исследования, выполненные такими зондами, характеризуются повышенной глубиной и пониженным влиянием скважинных условий. Недостаток такого зонда – в низкой скорости счета, приводящей к высокой погрешности измерений. Это вынуждает применять более мощные источники первичного γ -излучения.

Зонд типа (рисунок *г*), применяют для изучения наклонных скважин большого диаметра на нефтяных и газовых месторождениях. Источник и детектор вращаются вокруг эксцентричной оси.

В приставных плотномерах, применяемых для исследования поверхностных слоев пород и руд, используются зонды (рисунок *д*), основной характеристикой которых является их длина R , равная расстоянию от источника до детектора. В зависимости от плотности среды меняют длину зонда, которая обеспечивает использование заинверсионной части зависимости.

Обычно в практике ГГМ-П используются источники на основе Cs-137 (660 кэВ) и Co-60 (~1250 кэВ).

Методика измерений

Интенсивность рассеянного γ -излучения существенно зависит от особенностей зондового устройства, геометрических и скважинных условий измерения.

Из-за многообразия факторов, влияющих на поток рассеянных γ -квантов, нельзя в ГГМ-П определить стандартные условия измерений и заранее установить зависимость величины интенсивности рассеянных квантов от плотности среды. Поэтому, как правило, эталонировку выполняют непосредственно на исследуемом объекте конкретного вещественного состава с учетом особенностей скважинных условий.

Существуют два способа эталонирования. Суть первого заключается в измерении интенсивности рассеянных γ -квантов в нескольких опорных пластах, плотность которых определена другим независимым способом. По этим данным строят зависимость вида

$$N_s = f(\rho). \quad (1)$$

Неудобство способа состоит в трудности создания набора опорных пластов достаточно широкого диапазона изменения плотности.

Второй способ эталонирования основан на измерении интенсивности рассеянного излучения в протяженном опорном пласте известной плотности при различных длинах зонда R с последующей обработкой результатов приближенными методами теории подобия.

Эталонировочную зависимость строят в инвариантных координатах

$$\frac{N_s}{A} = f(\rho \cdot R), \quad (2)$$

где A – нормированная величина, зависящая от длины зонда.

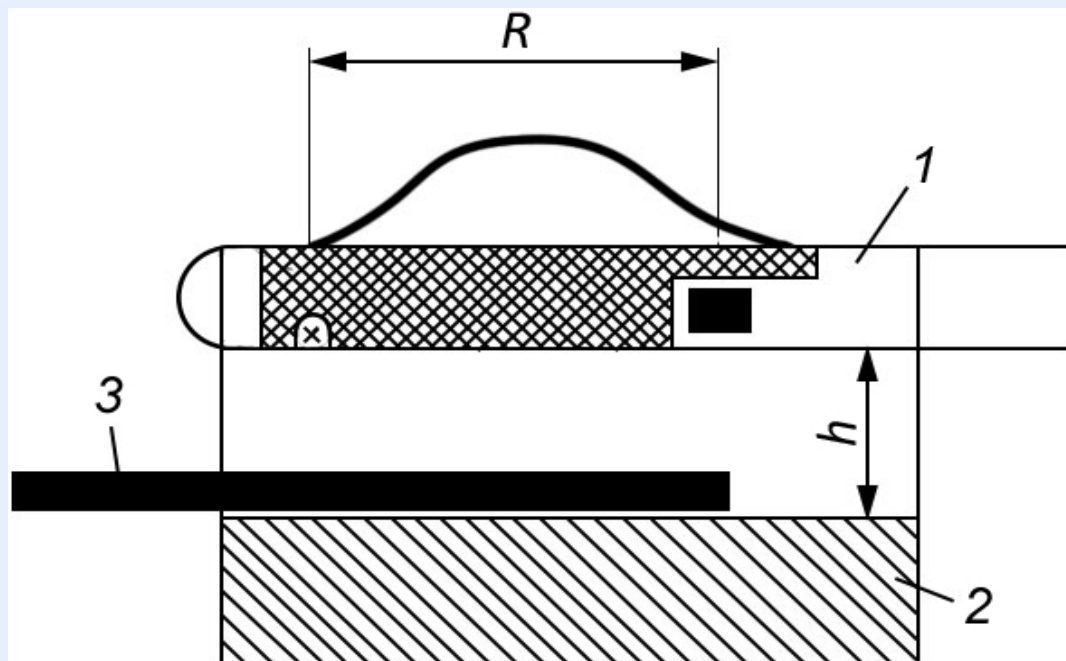
Первый из рассмотренных методов более точен. Обычно зависимости вида (1) и (2) хорошо аппроксимируются выражением

$$N_s = B \cdot \exp(-\alpha \rho R),$$

где B – постоянная;

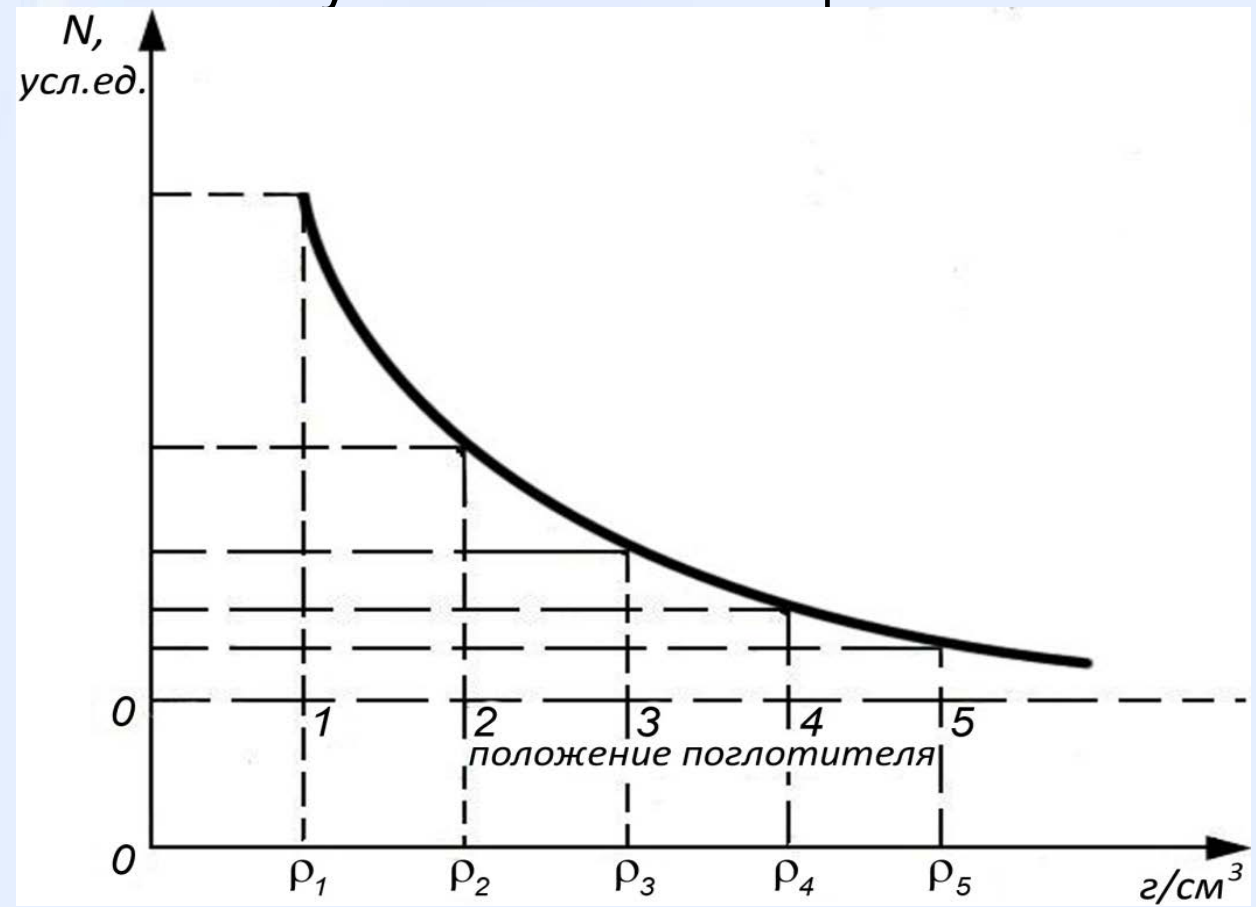
α – угловой коэффициент графика зависимости (1) или (2)

Устойчивость эталонировочного графика и контроль стабильности аппаратуры проверяются контрольно-калибровочным устройством (ККУ) (рисунок), представляющим собой протяженную пластину из легкого материала, выполняющего роль рассеивателя γ -квантов.



1 – зонд; 2 – слой, поглощающий γ -излучение;
3 – слой, поглощающий γ -излучение

Пример эталонировочной зависимости,
полученной с помощью ККУ



При определении плотности пород как в лабораторных, так и скважинных условиях важно знать, с какой глубины поступает информация об определяемом параметре. С этой целью введено понятие о глубинности метода.

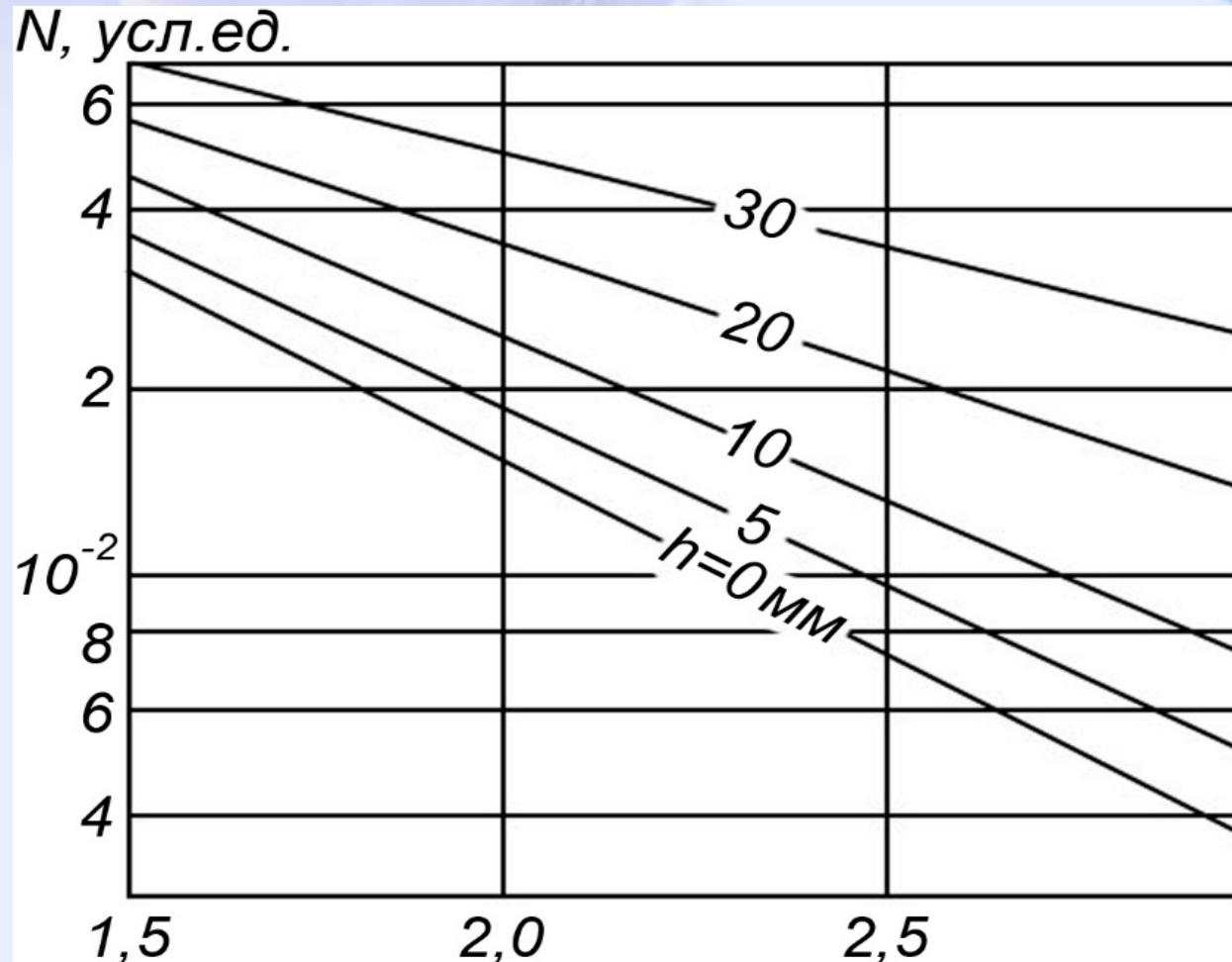
В ядерной геофизике под глубинностью метода понимают слой среды, из которого к детектору приходит 90 % регистрируемого.

Иными словами, глубинность – это толщина слоя, в котором формируется 90% регистрируемого детектором излучения.

Толщина слоя, при котором интенсивность соответствует 90 % от предельной, принимается за глубинность. Глубинность метода зависит от энергии гамма-излучения, вещественного состава и плотности среды.

Чем выше энергия и легче исследуемая среда, тем при прочих равных условиях выше глубинность исследований, а следовательно, и представительность определения плотности.

В общем случае глубинность также зависит от геометрических условий измерения и параметров зонда.



Зависимость интенсивности рассеянного гамма-излучения от плотности (Шифр – мощность промежуточной зоны в см)

Влияние промежуточной среды различно в зависимости от длины зонда. Чем больше длина зонда, тем больше вклад ближней зоны в показание метода. Например, при длине зонда 20 см с источником Cs-137 буровой раствор мощностью 10 см увеличивает интенсивность рассеянных гамма-квантов на 47%, а при длине зонда 35 см – на 74% при плотности среды 2,5 г/см³.

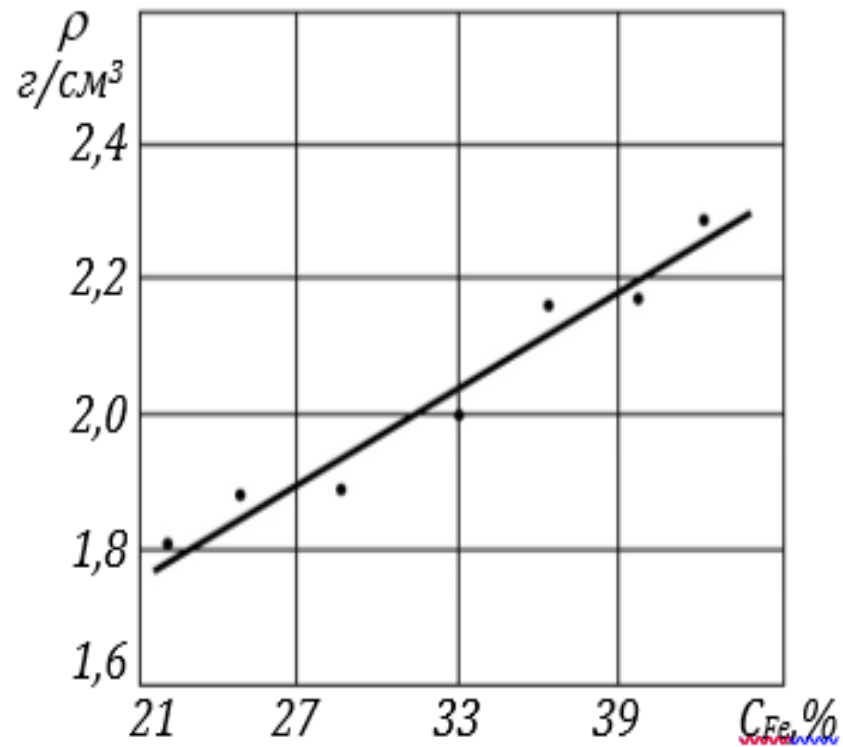
Зонды с цезиевым источником рекомендуется использовать, когда мощность промежуточной зоны невысока (менее 30 мм). Это объясняется конечной глубиной и снижением чувствительности к плотности среды при росте мощности ближней зоны. При больших значениях мощности промежуточной зоны следует применять более высокоэнергетический источник (Co-60).

Основным методическим приемом учета скважинных условий при проведении ГГК-п является градуирование зонда в реальных условиях скважины.

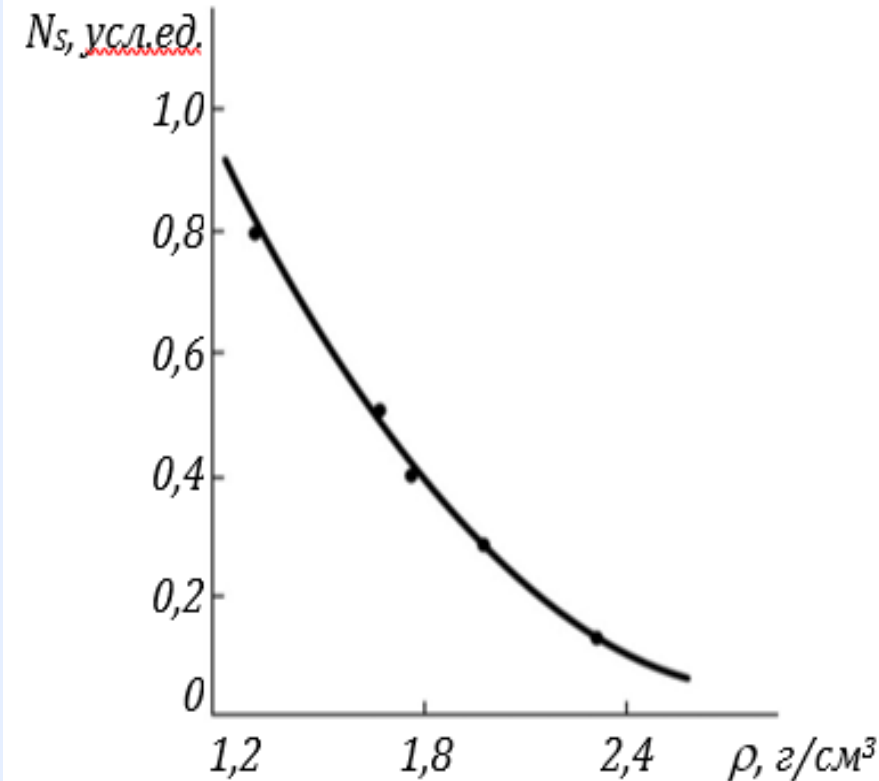


Примеры использования ГМ-П

Зависимость плотности железных руд Лисаковского месторождения от содержания Fe



Зависимость показаний гамма-плотномера от плотности руд



Такой же подход можно использовать и для оценки качества углей. Увеличение в угле минеральных примесей, формирующих зольный остаток, повышает плотность углей. Теснота взаимосвязи плотности угля от его зольности будет влиять на точность оценки зольности по данным плотностного гамма-гамма метода.

В настоящее время ГГК-П широко применяется при исследовании углеразведочных скважин для расчленения и корреляции разрезов, определения глубины залегания и мощности угольных пластов, выявления трещиноватых и нарушенных пород, для исследования углей на зольность.

Метод с успехом применяется для выявления в разрезе скважин различных рудных залежей. Высокая плотность (выше 3 г/см^3) у ряда руд железа, хрома, бария, полиметаллов по сравнению с вмещающими горными породами способствует использованию ГГК-П.

При изучении нефтяных и газовых скважин данные гамма-гамма каротажа плотностного используются в основном для определения пористости пород:

$$m = \frac{\rho_M - \rho}{\rho_M - \rho_I},$$

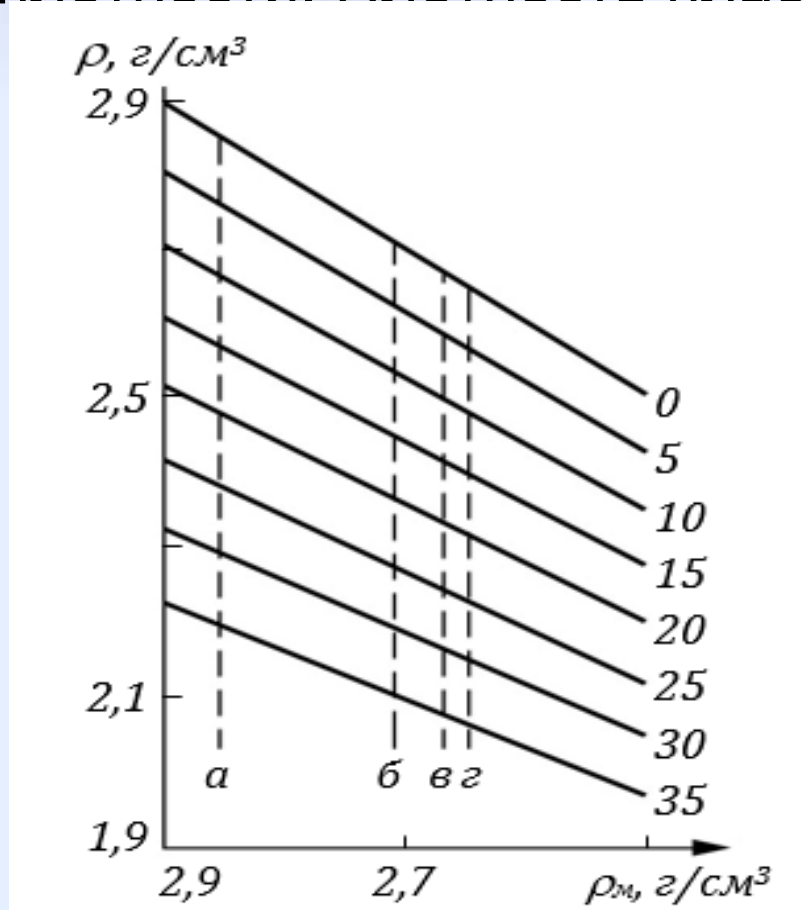
где ρ_M – минералогическая плотность;

ρ – объемная плотность породы;

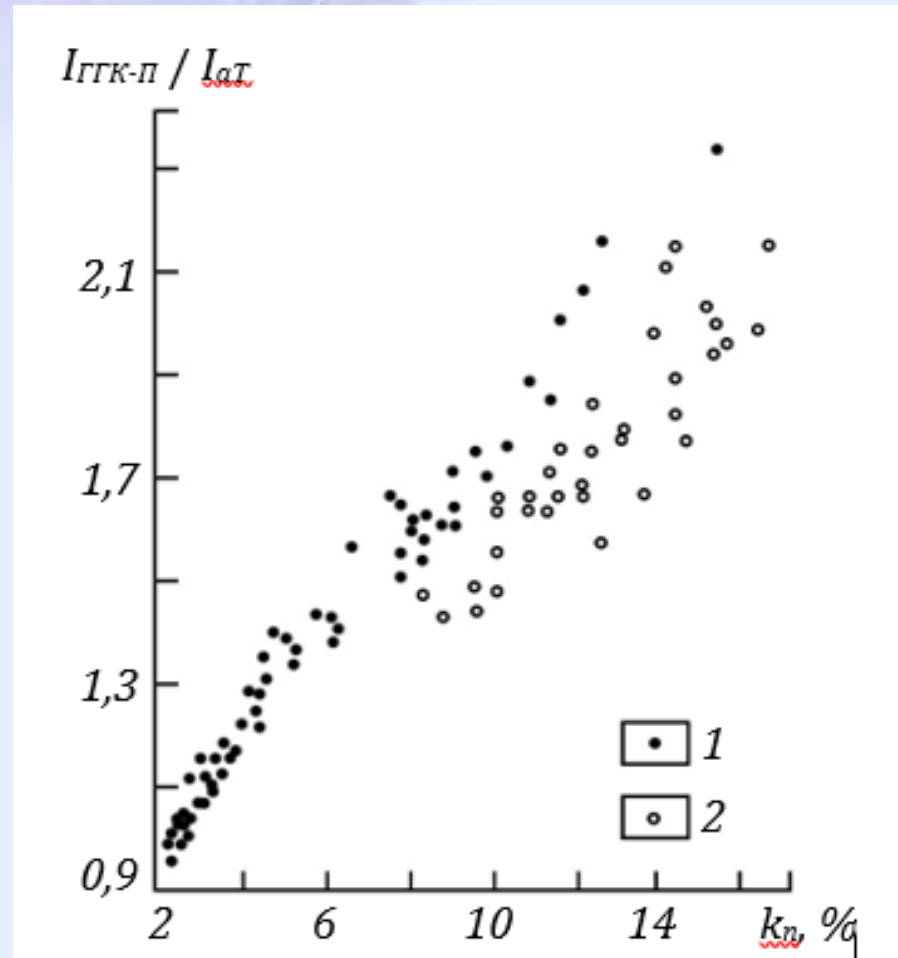
ρ_I – плотность жидкости, заполняющей поровое пространство.



График определения пористости пород через величины плотности и минералогической плотности. Плотность пластовой жидкости 1 г/см^3



а – доломит; б – известняк; в – слабоглинистый кварцевый песчаник; г – чистый кварцевый песчаник. Шифр кривых – K_p в %



Сопоставление относительных показаний ГГК-П с пористостью карбонатных пород, определенной по керну

Например наличие глинистой корки толщиной 1 см и плотностью 1,5-1,7 г/см³ приводит к занижению истинного значения плотности породы на 0,15-0,20 г/см³. Поэтому количественная оценка пористости однолучевым зондом возможна только при отсутствии ближней зоны и кавернозности.

В практике определения плотности сред методом рассеянного гамма-излучения в условиях наличия промежуточной среды находит применение двухзондовый ГГМ-п, основанный на облучении среды первичным гамма-излучением и регистрации рассеянных гамма-квантов двумя детекторами, расположенными по одну сторону от источника на различных расстояниях.

Основная аналитическая зависимость двухзондового метода имеет вид:

$$\ln(N_1 / N_2) = a_0 + a_1 \cdot \rho,$$

где a_1 , a_0 – константы, зависящие от геометрических параметров зонда и энергии первичного гамма-излучения; N_1 , N_2 – плотность потока рассеянного гамма-излучения, регистрируемая первым и вторым детекторами.

Отличительными достоинствами двухзондового метода является возможность определения плотности среды при наличии промежуточной зоны между зондом и поверхностью исследуемой среды. Результаты двухзондового метода определяются плотностными свойствами участка среды, расположенного на некоторой глубине от поверхности. Выбором геометрических параметров можно исключить влияние промежуточной зоны.

В конечном счете интерпретация данных ГГК-П сводится к определению по измеренному значению плотности величины общей пористости пород и сопоставлению этой величины с результатами измерения пористости другими геофизическими методами.

Использование комплекса геофизических методов позволяет уточнить истинное значение пористости, оценить литологию.

Решение этой задачи возможно только в случае, если погрешность определения плотности не превышает определенных пределов, зависящих от диапазона изменения пористости пород.

Пористость карбонатных отложений изменяется в пределах от 5 до 20 %, а терригенных пород – от 12 до 30 %, что соответствует изменениям плотности на $+ 0,15 \text{ г/см}^3$ от среднего значения.

Таким образом, если плотность определяется с точностью до $0,15 \text{ г/см}^3$, то использование этих данных для оценки пористости теряет смысл. Для уверенного разделения пород по пористости погрешность не должна превышать $0,05 \text{ г/см}^3$. Разделение карбонатных пород на известняки и доломиты базируется на различии минералогической плотности этих пород, которое составляет $0,05 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, кроме решения прямой задачи, связанной с определением плотности горных пород, ГГМ-П применяется для:

- выделения в разрезе скважин горных пород с различной плотностью;
- определения типа пород (совместно с другими геофизическими методами);
- количественного определения содержания полезных ископаемых, плотность которых сильно дифференцирована от плотности вмещающих пород;
- оценки коэффициента пористости коллекторов нефти и газа;
- исследования технического состояния скважины.

Область применения	Условия измерений	Установка	Решаемые задачи
Исследование разрезов нефтяных, газовых и гидрогеологических скважин	Необсаженная скважина $d_c > 150$ мм, заполненная промывочной жидкостью	Двухзондовая с коллимированными детекторами и источником с прижимным устройством	Определение объемной плотности пород и по ней пористости
Исследование разрезов угольных и рудных скважин	Необсаженная скважина с $d_c > 100$ мм; заполнена промывочной жидкостью	Однозондовая с экранировкой от скважины детектора и источника с прижимным устройством	Выявление угольных и рудных пластов, оценка зольности углей и содержания рудных элементов
Исследование заколонного пространства нефтяных, газовых и гидрогеологических скважин	Скважина, крепленная колонной обсадных труб	Однозондовая с экранировкой от скважины (2π-геометрия)	Оценка качества цементированной колонны обсадных труб
Исследование стальной колонны скважин, бурильных труб	Скважина, крепленная колонной обсадных труб	Однозондовая с коллиматорами детектора и источника. Зонд инверсионный	Определение толщины стальной колонны с целью выявления дефектов, коррозии, износа бурильных труб

Таблица – Свойства пород и минералов

Порода, минерал	ρ , г/см ³	μ (в см ⁻¹) при энергии, МэВ		$Z_{эф}$
		0,5	2,0	
Галенит	7,4-7,6	0,577	0,298	77,2
Гематит	4,9-5,3	0,415	0,214	23,0
Магнетит	4,9-5,2	0,411	0,212	23,2
Пирит	4,9-5,2	0,419	0,217	21,6
Хромит	4,5-4,6	0,369	0,191	22,0
Барит	4,3-4,6	0,34	0,176	45,6
Халькопирит	4,1-4,3	0,345	0,179	24,6
Диабаз	2,9-3,2	0,26	0,134	15,4-16,4
Гранит	2,46-3,1	0,236	0,122	13,3-14,0
Известняк	2,5-3,0	0,237	0,122	14,8-15,5
Доломит	2,44-2,9	0,229	0,119	13,6-13,9
Мергель	2,2-2,6	0,206	0,107	14,4-15,1
Песчаник	1,8-2,8	0,198	0,102	11,6-13,1
Глина	2,0-2,2	0,181	0,093	11,4-14,7
Каменный уголь	1,26-1,33	0,116	0,06	6,3-6,5
Бурый уголь	1,1-1,25	0,107	0,055	6,5-6,8
Вода	1,0	0,096	0,05	7,6

Контрольные вопросы

1. Принципиальные отличия гамма-абсорбционного измерения плотности от метода рассеянного гамма-излучения.
2. Области применения модификации определения плотности в геометрии просвечивания объекта исследования узкоколлимированным пучком гамма-квантов.
3. Особенности измерения плотности поверхностных слоев пород в условиях геометрии широких пучков.
4. Какой принцип положен в основу определения толщины материала?
5. Основные преимущества ГГМ-п в сравнении с традиционными весовыми методами определения плотности.
6. Что характеризует глубинность метода? Какие факторы влияют на глубинность плотностного гамма-гамма метода?
7. Почему колебания эффективного атомного номера пород являются дестабилизирующим фактором при определении плотности ГГМ-П?

Контрольные вопросы

8. Укажите пути снижения мешающего влияния непостоянства эффективного атомного номера среды на результаты ГГМ-п.
9. Обоснуйте оптимальный диапазон энергии первичного гамма-излучения для реализации ГГМ-п.
10. Инверсионный зонд в ГГМ-п. Физическая сущность явления инверсия. Основные характеристики инверсионной зависимости.
11. По какой причине заинверсионные зонды получили широкую применимость при определении плотности?
12. С какой целью в ГГМ-п регистрируют рассеянные средой гамма-кванты с энергией выше примерно 200 кэВ? Каким образом это технически реализуется?
13. Суть эталонирования в процессе ГГК-п.
14. Влияние промежуточной зоны на показания ГГК-п.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Применение ГГК-п для оценки пористости пород различного литологического состава.
2. Сущность и конструктивные особенности двухзондовых устройств ГГМ-п. Достоинства и недостатки.
3. Обоснуйте возможности применения ГГМ-п для определения содержания отдельных элементов.

Список литературы

1. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. – М.: Атомиздат, 1980, 321 с.
2. Якубович А.Л., Зайцев Е.И., Пржиялговский С.М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. – М.: Атомиздат, 1982.
3. Мейер В.А., Ваганов П.А., Пшеничный Г.А. Методы ядерной геофизики. – Л.: Изд-во ЛГУ. 1988. – 376 с.
4. Старчик Л.П., Пак Ю.Н. Ядерно-физические методы контроля качества твердого топлива. – М.: Недра, 1985. – 224 с.
5. Ларионов В.В. Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.
6. Резванов Р. Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважин. – М.: Недра, 1982.
7. Филиппов Е.М. Ядерная геофизика. Т.2. – Новосибирск: Изд-во Наука. Сибирское отд., 1973. – 400 с.
8. Ю.Н. Пак, Д.Ю. Пак. Ядерные технологии в геофизических исследованиях. Издательство КарГТУ, 346с. Учебник, 2016.
9. Пак Д.Ю., Пак Ю.Н. Лабораторный практикум по ядерно-радиометрическим методам в геолого-геофизических исследованиях, Издательство КарГТУ, 106с, Учебное пособие, 2018.
10. Пак Д.Ю. Лабораторный практикум по ядерно-радиометрическим методам в геолого-геофизических исследованиях (часть 2), Издательство КарГТУ, 103с, Учебное пособие, 2019.
11. Пак Ю.Н., Пак Д.Ю. Монография. Методы и приборы ядерно-физического анализа углей. Изд-во КарГТУ, Караганда, 2012.

На этом лекция завершена.
Спасибо за внимание!