

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова
Кафедра: Геофизика

Комплексная интерпретация материалов ГИС

для специальности 7М07105
«Нефтегазовая и рудная геофизика»

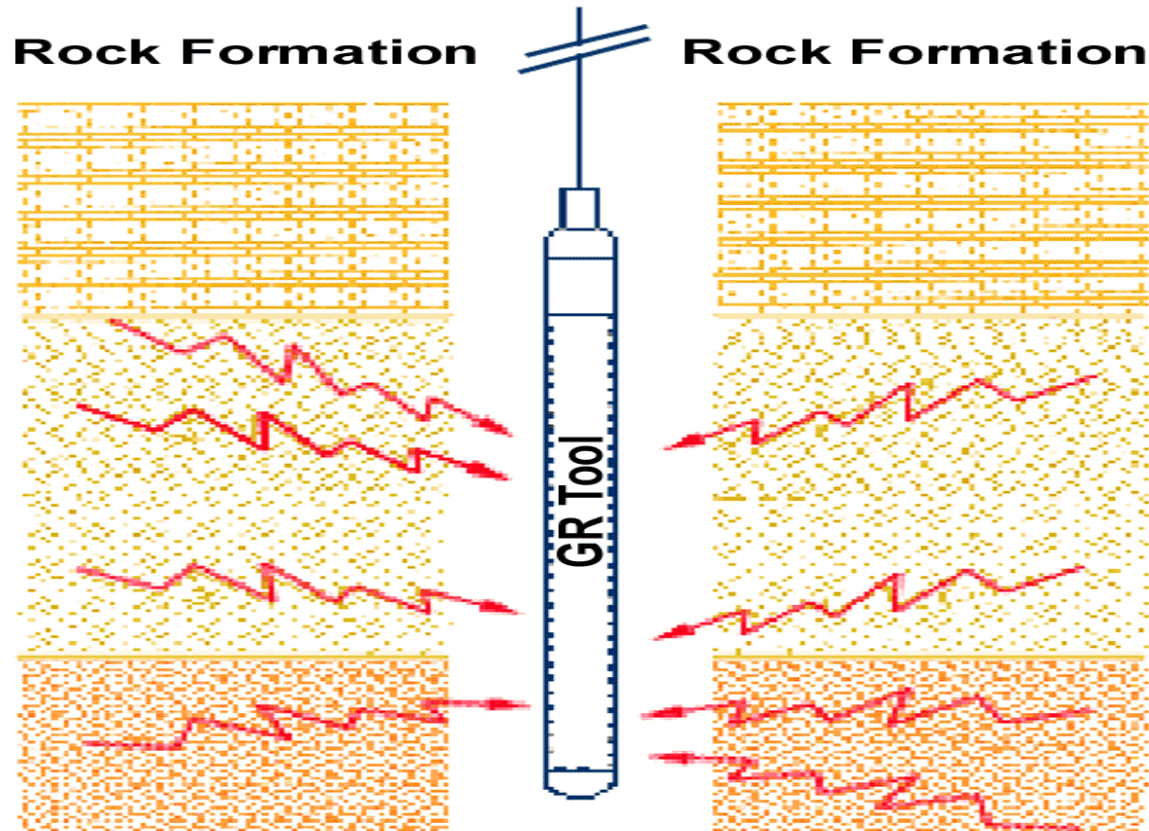
Истекова С.А.,
докт. геол.-минерал. наук,
проф. каф. Геофизики

АЛМАТЫ 2023

Лекция 7

РАДИОАКТИВНЫЙ КАРОТАЖ

Gamma Ray Logging

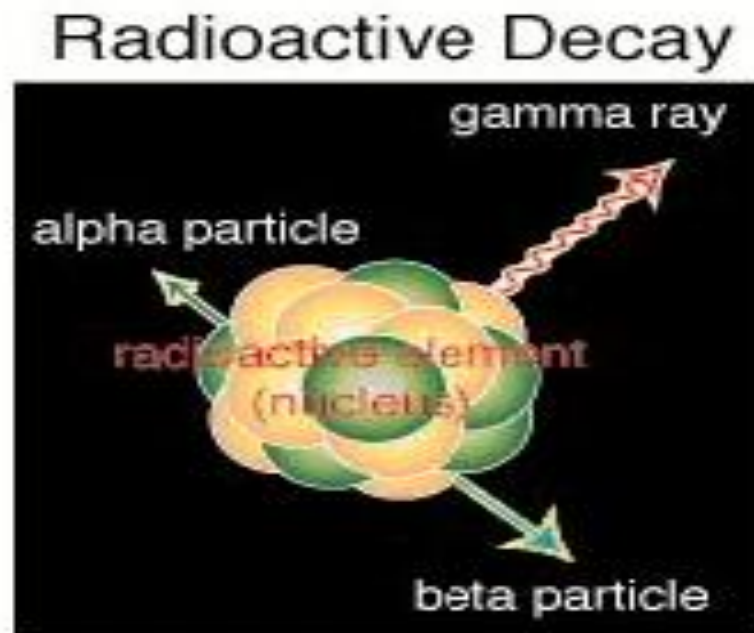


Радиоактивность

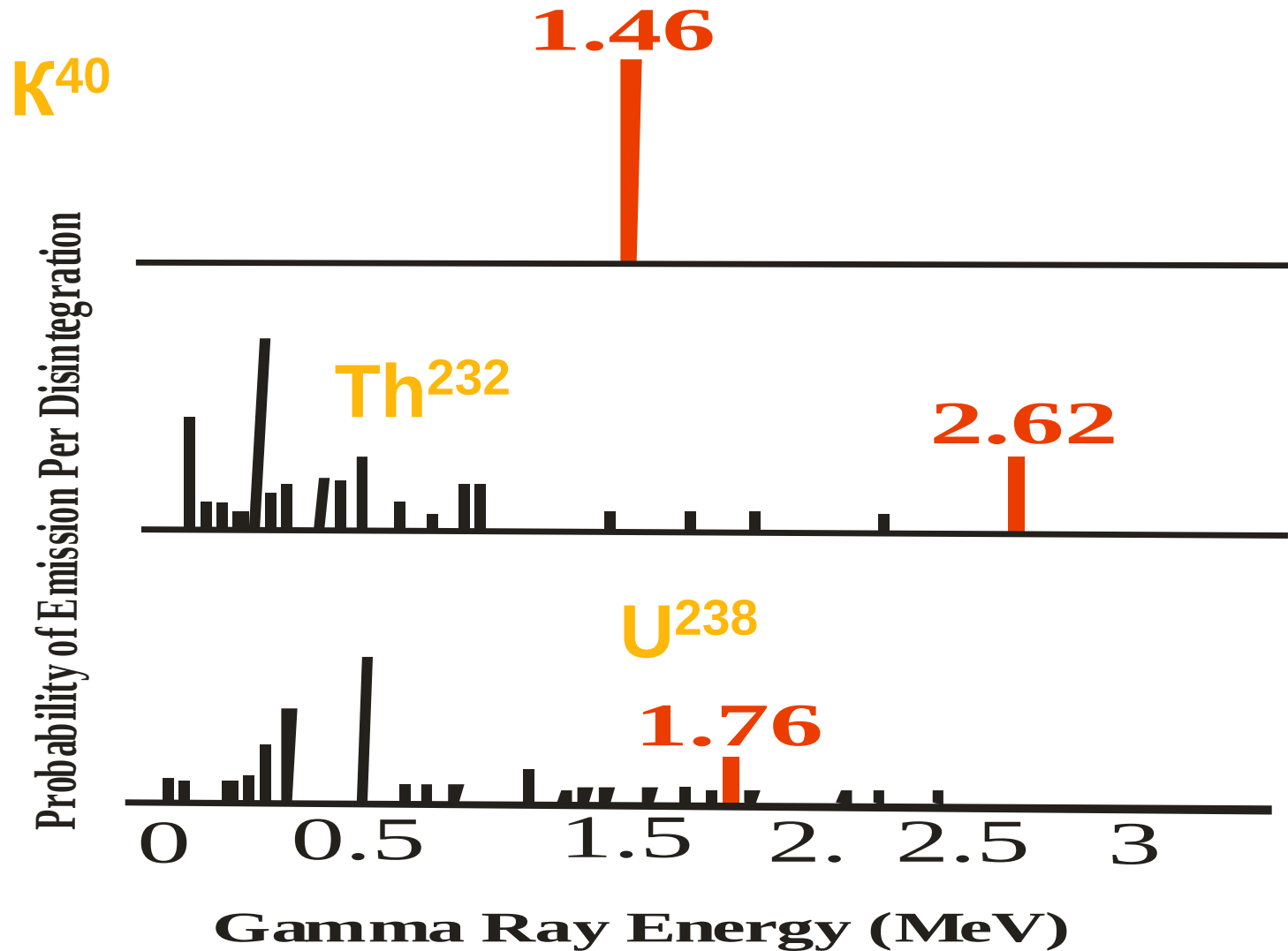
- ▶ Это результат распада нестабильных ядер, который сопровождается эмиссией частиц или энергии.
- ▶ **Гамма излучение** возникает, когда ядро переходит из более высокого энергетического состояния в более низкое или основное. При этом может испускаться как гамма луч, так и фотон.
- ▶ **Альфа частицы** – положительно заряженные частицы из двух протонов и двух нейтронов, идентичные ядру гелия.
- ▶ **Бета частицы:**
 - электроны, когда нейтрон переходит в протон,
 - позитроны, когда протон переходит в нейтрон.

Гамма лучи – фотоны (частицы), или электромагнитная энергия высокой частоты, распространяющиеся со скоростью света.

Не имеет свободной массы.



Энергетические спектры основных радиоактивных элементов

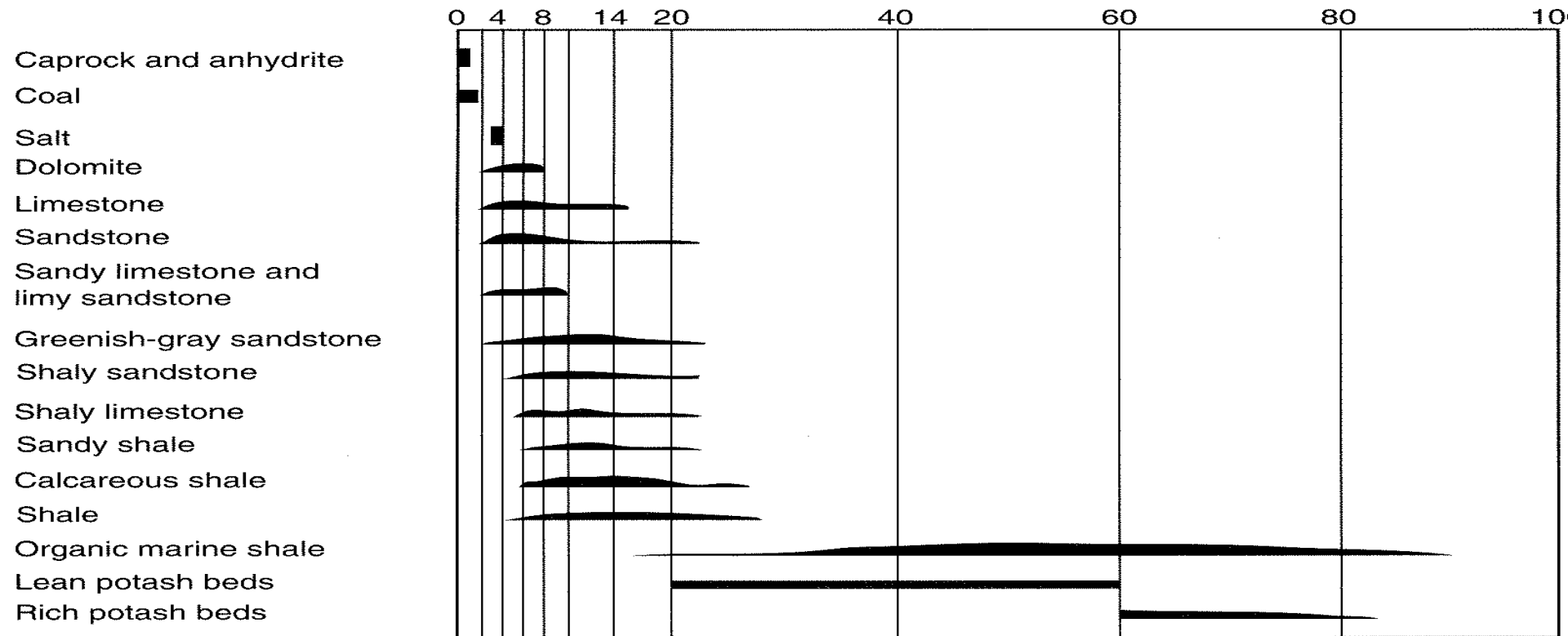


Активность горных пород

- Магматические горные породы:
 - Максимальная активность – кислые породы (из-за повышенного содержания калия),
 - Минимальная - ультраосновные породы.
- Осадочные породы:
 - Наиболее активны глины, обладающие высокой адсорбционной способностью,
 - Менее активны песчаники,
 - Наименьшей активностью обладают известняки и доломиты, а также гидрохимические осадки (гипс, ангидрит, каменная соль).

Радиоактивность минералов, наиболее распространенных в земной коре

Mineral or Lithology	Composition	Gamma Radiation (API Units)
Pure Mineral		
Calcite	CaCO_3	0
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0
Quartz	SiO_2	0
Lithology		
Limestone	-	5-10
Dolomite	-	10-20
Sandstone	-	10-30
Shale	-	80-140
Evaporites		
Halite	NaCl	0
Anhydrite	CaSO_4	0
Gypsum	$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	0
Sylvite	KCl	500
Carnalite	$\text{KCl MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$	220
Langbeinite	$\text{K}_2\text{SO}_4(\text{MgSO}_4)_2$	290
Polyhalite	$\text{K}_2\text{SO}_4\text{MgSO}_4(\text{CaSO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$	200
Kainite	$\text{MgSO}_4\text{KCl}(\text{H}_2\text{O})_3$	245
Others		
Sulphur	S	0
Lignite	$\text{CH}_{0.849} \text{N}_{0.015} \text{O}_{0.221}$	0
Anthracite	$\text{CH}_{0.358} \text{N}_{0.009} \text{O}_{0.022}$	0
Micas	-	200-350



(After Russell, 1941)

Самая высокая радиоактивность наблюдается в калиевых пластах и в глинах, которые сформировались в восстановительной обстановке в присутствии органического материала

РАДИОАКТИВНЫЙ КАРОТАЖ

Методы, основанные на измерении как естественных, так и искусственно вызванных радиоактивных излучений в скважинах.

Естественные излучения регистрируются в методах:

GR – гамма-каротаж (ГК)

DSL – спектральный гамма-каротаж (СГК)

Искусственно вызванные радиоактивные излучения регистрируются в методах:

ZDL – плотностной каротаж (ГГК-П)

NGR -Нейтронный гамма-каротаж (НГК)

CN – компенсированный нейтронный каротаж (ННК)

Гамма-каротаж

- Измерение естественной радиоактивности

Основные радиоактивные элементы:

Калий

Торий

Уран

К и Th в основном в глинах

U происходит из других источников

- **В основном используется для определения литологии (песчаник/глины)**

Гамма-каротаж (ГК)

- Заключается в измерении γ -излучения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), содержащихся в горных породах, пересеченных скважиной.
- Интенсивность и энергетический спектр регистрируемого
 - излучения зависит от состава, концентрации и пространственного распределения ЕРЭ, а также от плотности и эффективного атомного номера горных пород.
- Наиболее распространенными ЕРЭ являются:
 - U (и образующийся из него Ra), Th и K .
- Каждая из разновидностей горных пород характеризуется своим диапазоном изменения содержаний ЕРЭ и, соответственно, своим диапазоном естественной радиоактивности.

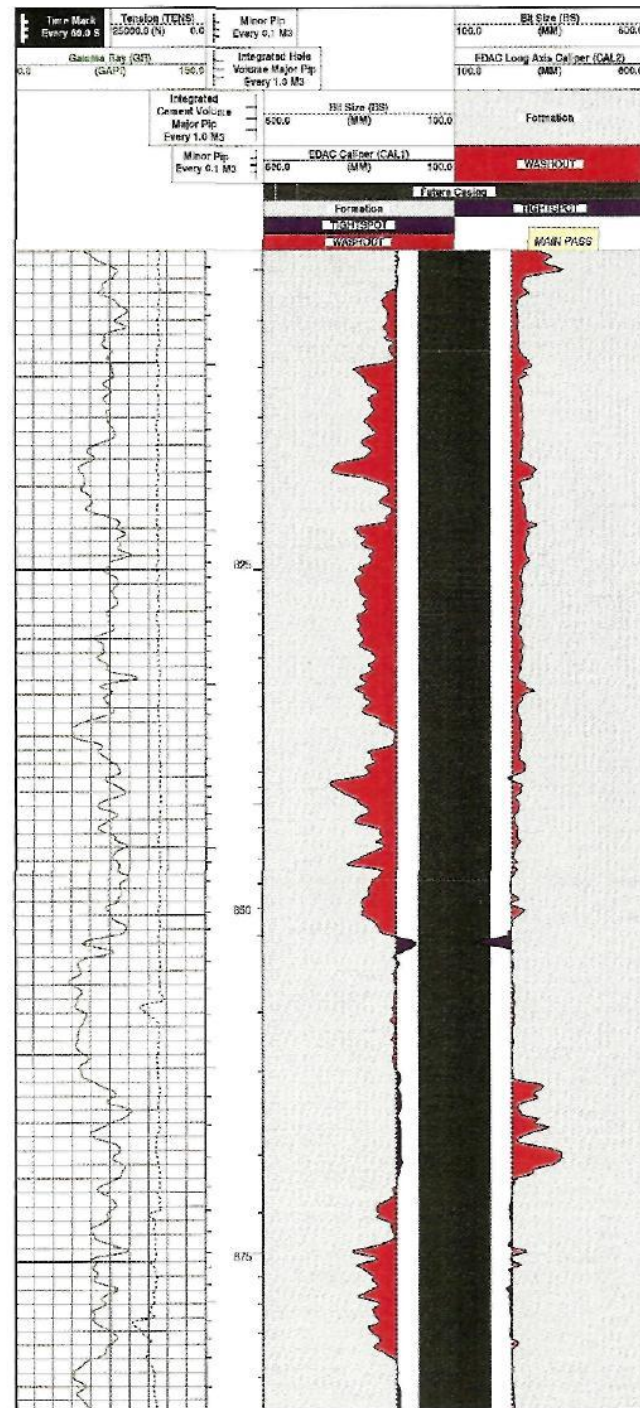
Гамма каротаж

GAMMA RAY LOG

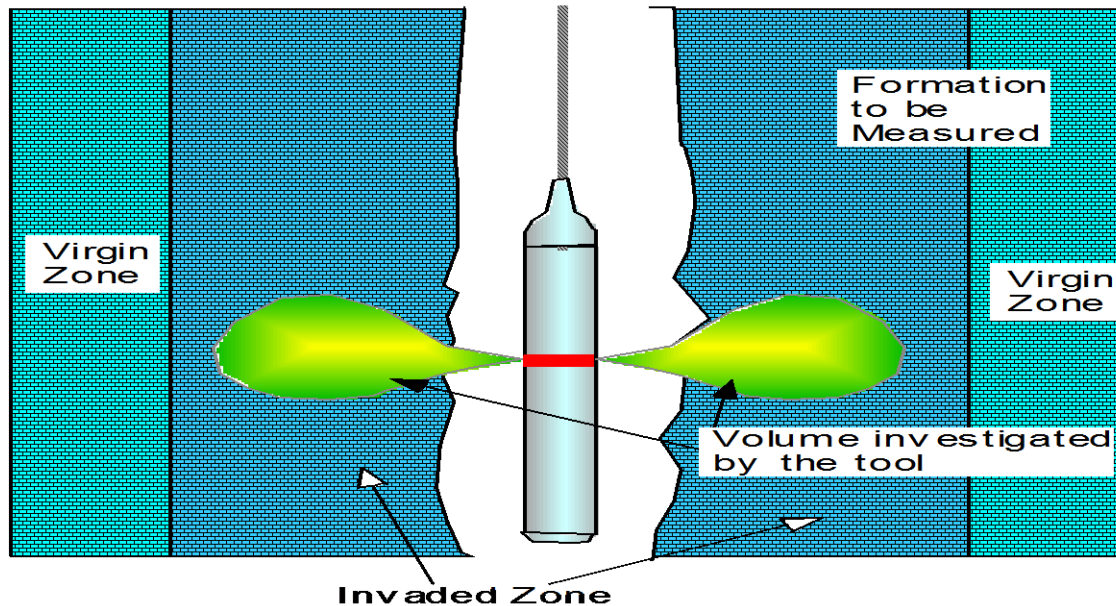
- Простой индикатор глин
- Обычный инструмент корреляции
- Может выполняться в открытых и обсаженных скважинах.
- Обычно выполняется на керне для глубинной привязки к каротажам.
 - Проблемы ГК...
- Геологами предполагается абсолютно непогрешимым (методом).
- Регулярно искажает содержание глин (не может дифференцировать глины от радиоактивных минералов).
- Плохое вертикальное разрешение (новые приборы имеют лучшее разрешение).

Гамма-каротаж

- Прибор гамма-каротажа записывает естественное гамма излучение в пластах прилегающих к скважине.
- Эти замеры регистрируют естественную радиоактивность пласта.
- Гамма-каротаж применяется при любых промывочных жидкостях и является стандартным методом при корреляции данных в обсаженных и в необсаженных скважинах.
- Прибор обычно применяется в комбинации с другими методами и заменяет кривую ПС в скважинах, пробуренных на соленом, нефтяном растворе, или воздухе.
- **Основное применение:**
 - контроль по глубине
 - индикатор глинистости
 - определение продуктивных пластов



Volume of Investigation



Инструменты, показанные здесь измеряют все вокруг буровой скважины. Они всенаправленные.

Часть "сигнала" находится в буровой скважине.

Большая часть сигнала прибывает из захваченной зоны.

Аппаратура ГК имеет, в принципе, такое же устройство, как и полевые радиометры.

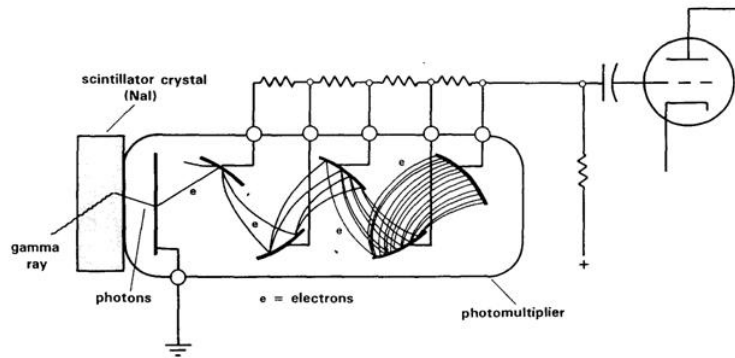


Figure 7.5 Schema of a gamma ray tool (re-drawn from Serra, 1979 after a Lane Wells document).

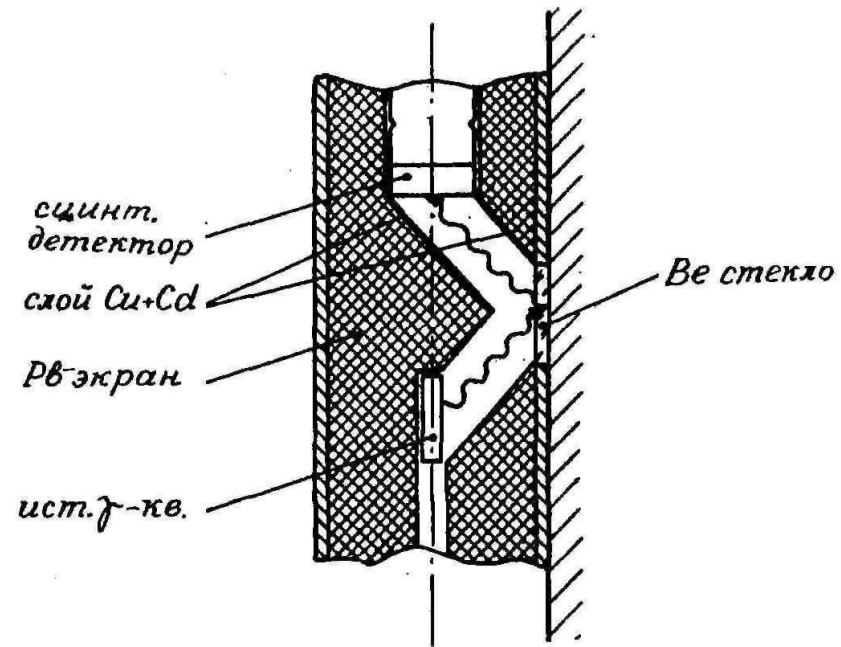
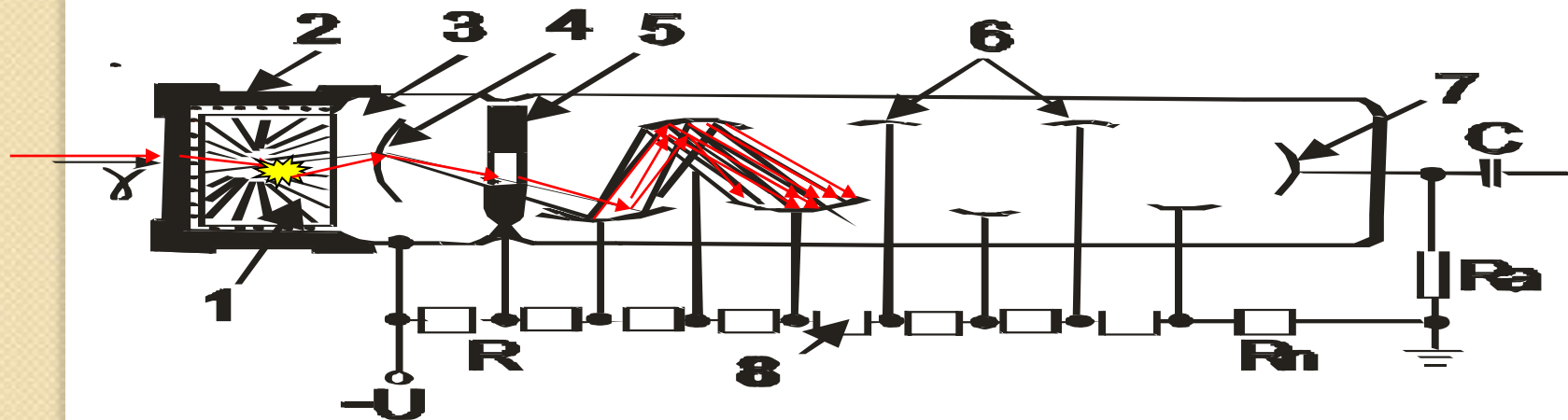


Рис. 13.1. Устройство зонда рентген-радиометрического каротажа

В каротажных радиометрах детектор у-квантов с источником его питания и блоками первичной обработки сигнала подсоединяется к измерительному пульту через каротажный кабель, имеющий длину до нескольких километров и в измерительном пульте предусмотрен вывод сигнала на регистратор для непрерывной записи его в функции глубины скважины.

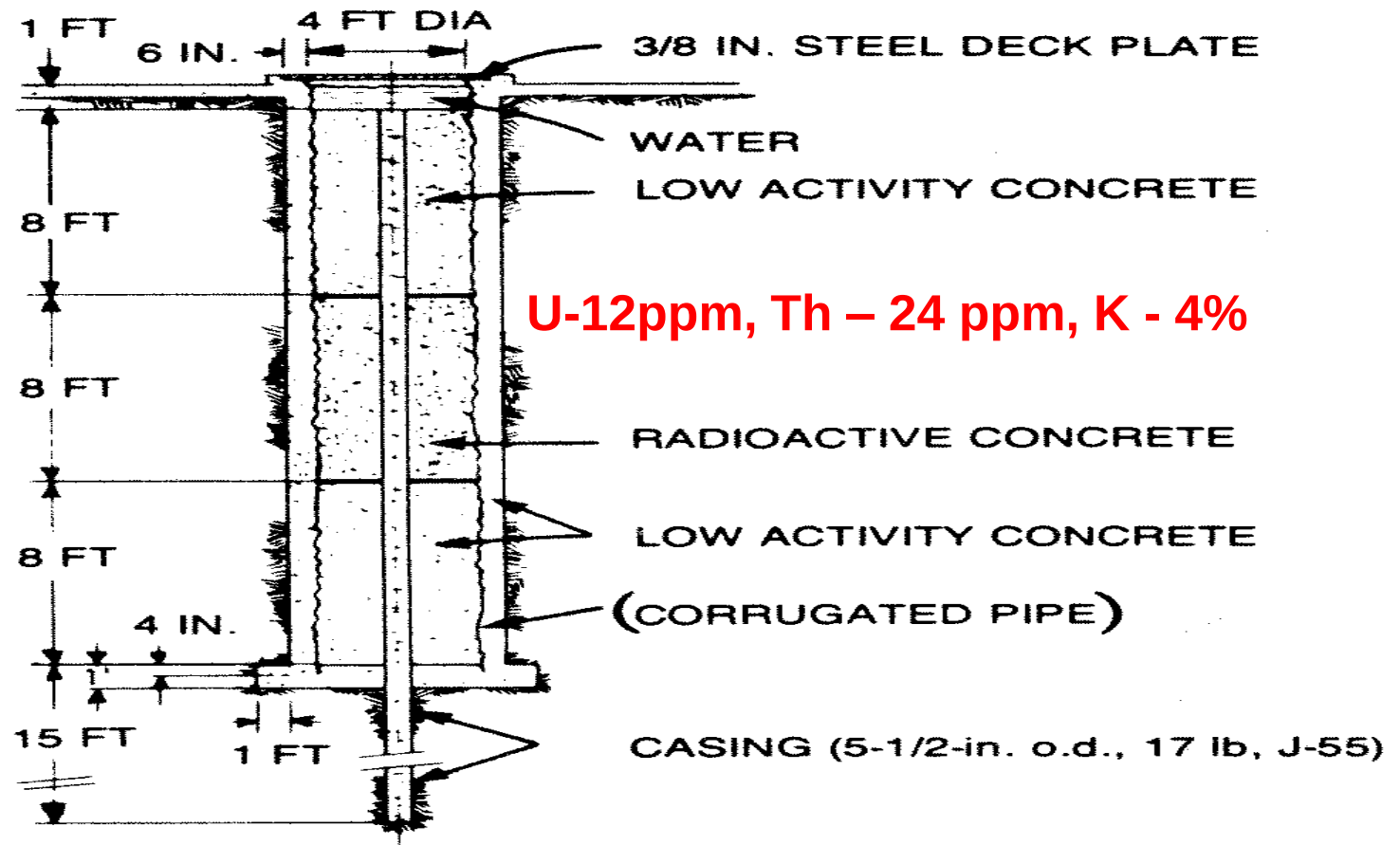
Запись показаний производится в единицах мощности экспозиционной дозы излучения (МЭД), выраженных в А/кг (единица СИ) или в мкР/час (внесистемная единица); $1 \text{ пА/кг} = 13 \text{ мкР/час}$.

Устройство сцинтилляционного счетчика



1-сцинтиллятор; 2- отражатель; 3 –ФЭУ; 4 – фотокатод; 5 – фокусирующий динод; 6 – диноды; 7 – анод; 8 – делитель напряжения; с –емкость; R_a – анодная нагрузка

Градуировка прибора в единицах API на эталонной скважине



Одна единица API равна 1/200 разницы отклонений показаний прибора между высокорadioактивной и низкорadioактивной частями скважины

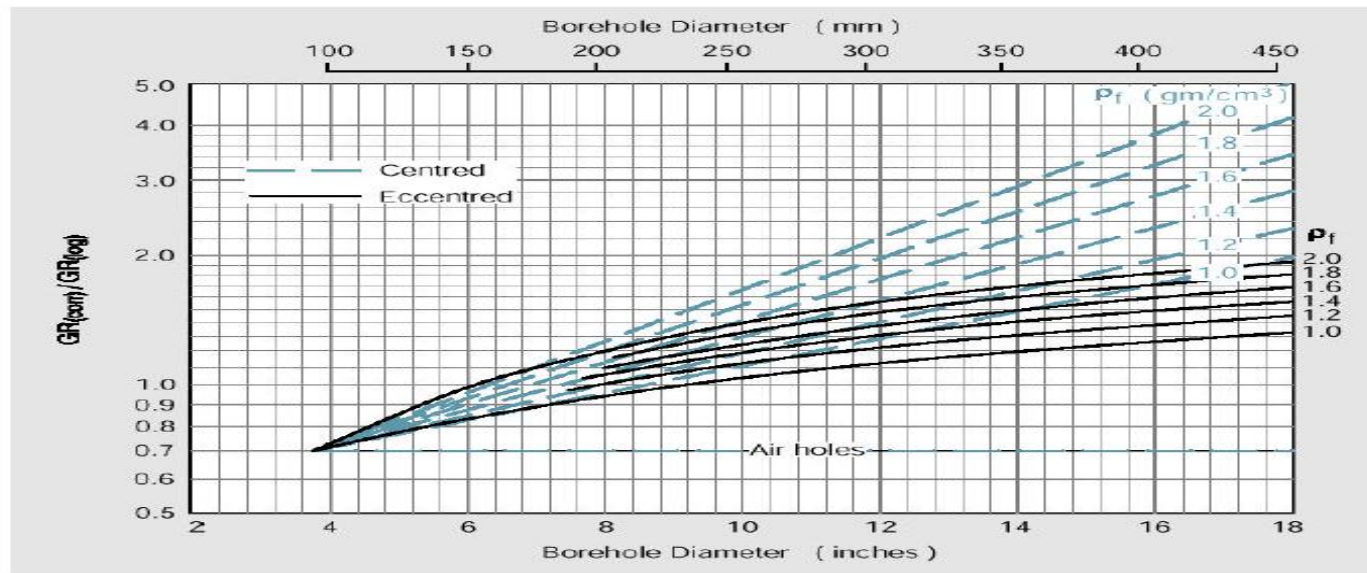
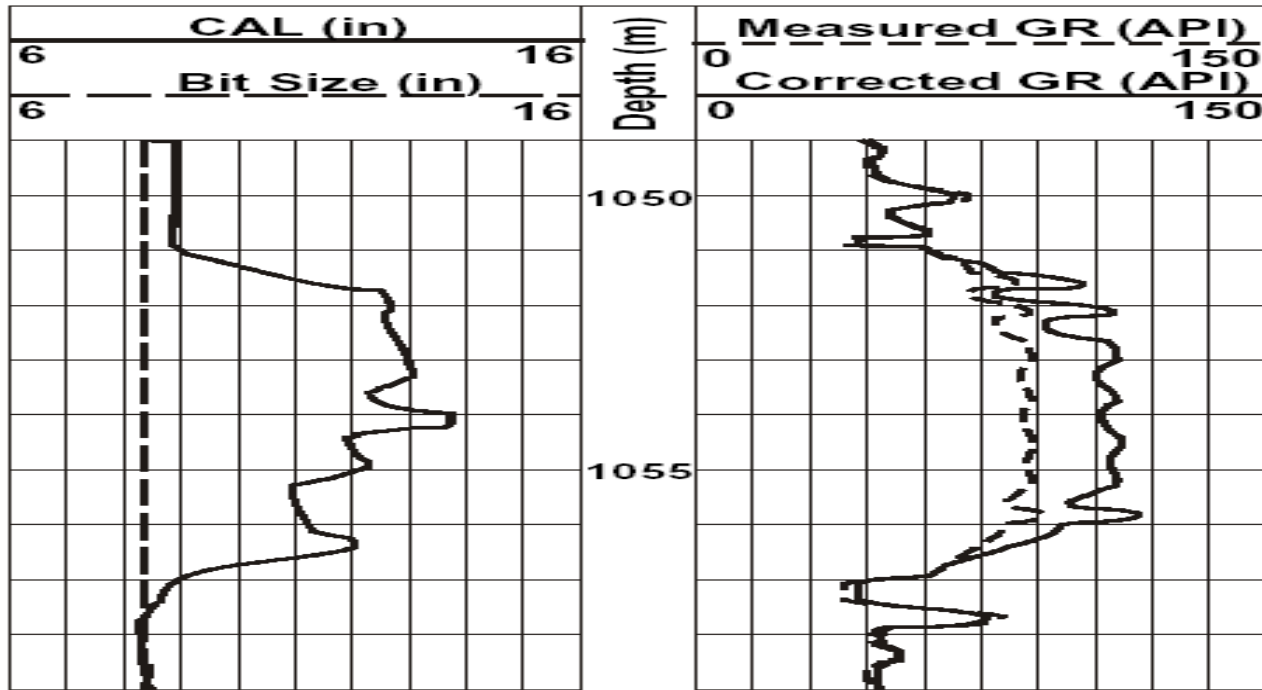
Counts	No. of Counts	Period (s)	Count Rate (per second)	No. of Counts	Period (s)	Mean Count Rate	No. of Counts	Period (s)	Mean Count Rate
	$T_c = 0.333 \text{ s}$			$T_c = 1 \text{ s}$			$T_c = 3 \text{ s}$		
• • • • •	4	0.333	12	14	1	14	39	3	13
• • • • • • •	6	0.333	18						
• • • • •	4	0.333	12						
• • • • • •	5	0.333	15	12	1	12			
• • •	3	0.333	9						
• • • • •	4	0.333	12						
• • • • • •	5	0.333	15	13	1	13			
• • •	3	0.333	9						
• • • • • •	5	0.333	15						
Mean Count Rate (per second)	-	-	13	-	-	13	-	-	13
Range of Count Rate (per second)	-	-	9 -18	-	-	12-14	-	-	13-13
Standard Deviation (per second)	-	-	3	-	-	1	-	-	-

Скорость подъема прибора – 1 фут/с Экспериментальные данные наглядно показывают, что оптимальное время регистрации в интегрирующей ячейке– 1 с.

Гамма-каротаж



Коррекция кривой GR



Интерпретация результатов ГК

- **Качественная** интерпретация диаграмм ГК - литологическом расчленении разреза.
- **Наиболее эффективен** ГК при поисках и разведке руд ЕРЭ, например, урановых руд или калийных солей.
- При **количественной** интерпретации диаграмм ГК получают мощность рудных интервалов и содержание радионуклида для подсчета запасов радиоактивных руд.
- При этом ГК дает более достоверные результаты, чем опробование керна за счет своей большей представительности.
- **Количественная интерпретация** диаграмм ГК основывается на зависимости площади аномалии S от мощности радиоактивного интервала h и содержания в нем радиоактивного элемента q , выражаемой уравнением:

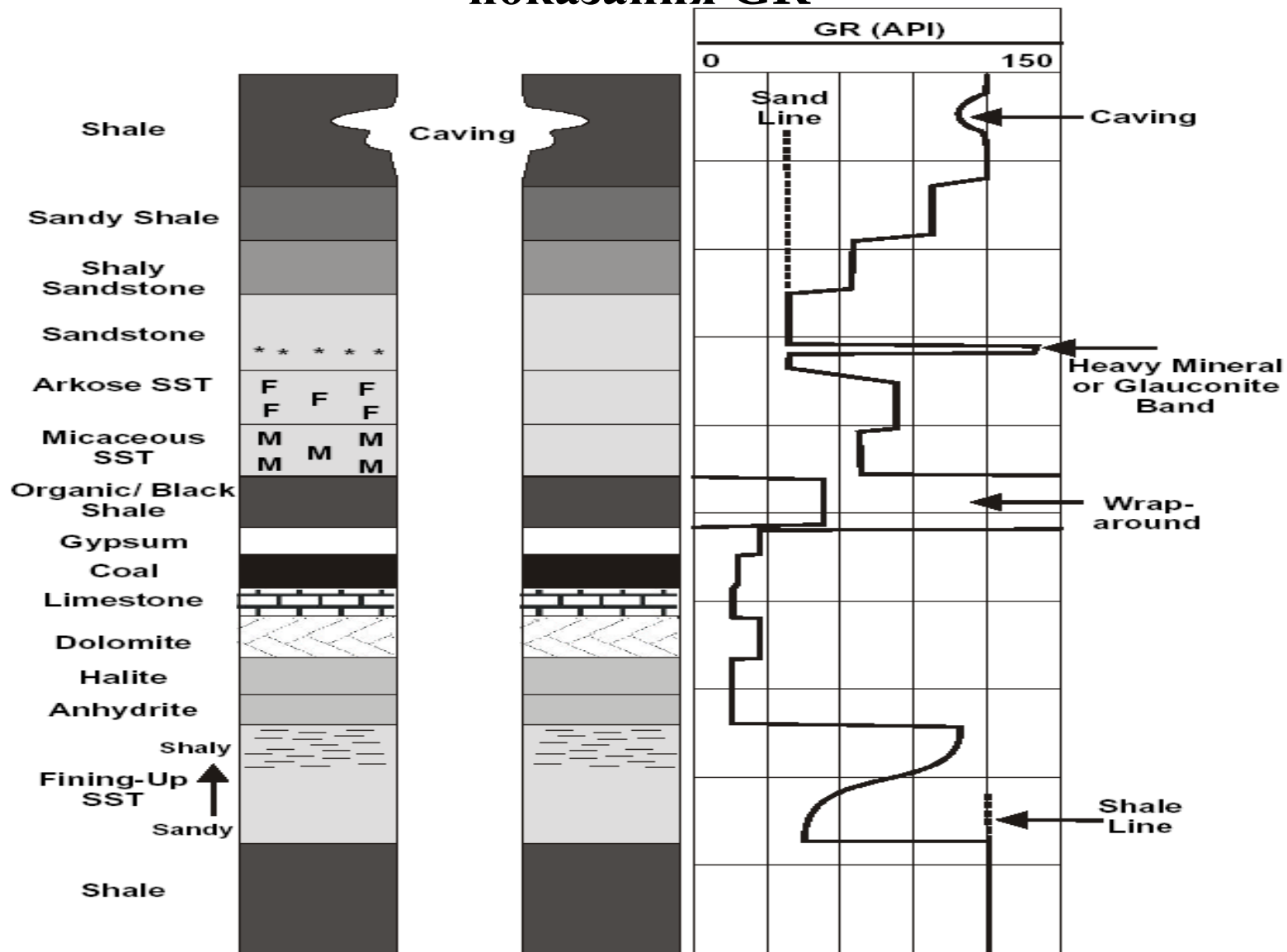
$$S = K_0 \cdot qh$$

где K_0 - коэффициент пропорциональности, определяющий интенсивность γ -излучения пласта насыщенной мощности при единичном содержании в нем радиоактивного элемента.

Величина K_0 зависит от типа и размеров детектора, а также от плотности и зэф руды. Поскольку учесть все эти факторы аналитически весьма сложно, то величину K_0 определяют экспериментально по измерениям на моделях пластов с известным содержанием радионуклида.

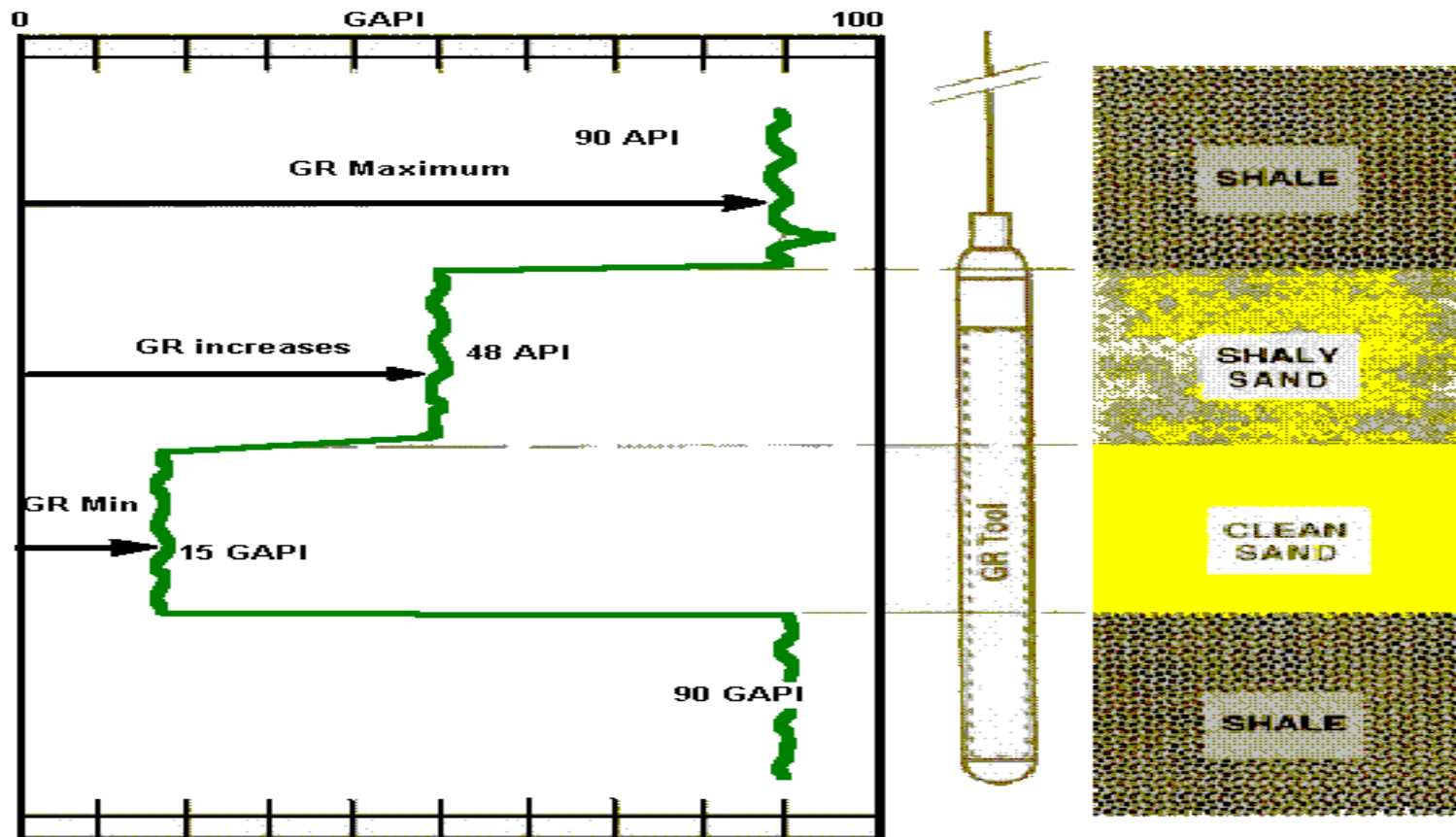
- Например, для урановых руд гидрогенного типа и счетчика МС-13 $K_0 = 115$ мкР/час на 0,01 % U.

Влияние различных литологических разностей на показания GR



Гамма каротаж в песчано-глинистом разрезе

Типичная диаграмма ГК



$$VshGR = (GR_{log} - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min})$$

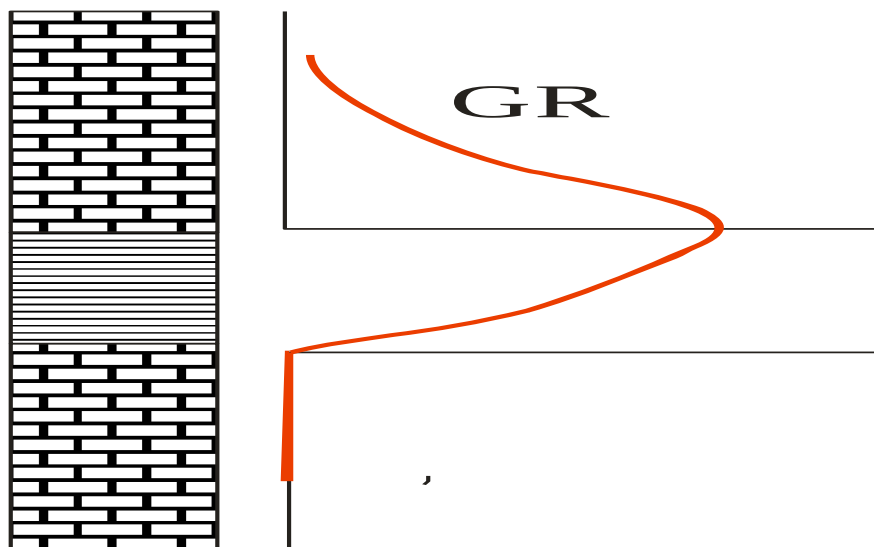
GRmin: Sand = 15; LS = 12; Dolomite = 10

Определение границ пласта

скорость подъема прибора должна быть 500 м/ч.

С удовлетворительной для практики точностью определение границ можно делать точкам, соответствующим началу подъема и началу спада кривой против пласта повышенной интенсивности излучения. GR

Разрешающая способность метода-90 см.



Определение мощности

- Для определения мощности рудного интервала используют способ $1/2 I_{r\max}$ и $4/5 I_{r\max}$
- Выбор способа зависит от мощности рудного тела и равномерности оруденения и некоторых других факторов.
- Способ $1/2 I_{r\max}$ применяют при условии насыщенной по у-излучению мощности рудных тел ($h > 0,6\text{ м}$) и при равномерном оруденении.
- Амплитуду аномалии $I_{r\max}$ отсчитывают от уровня у-фона вмещающих пород с учетом разности показаний над перекрывающими и подстилающими породами.

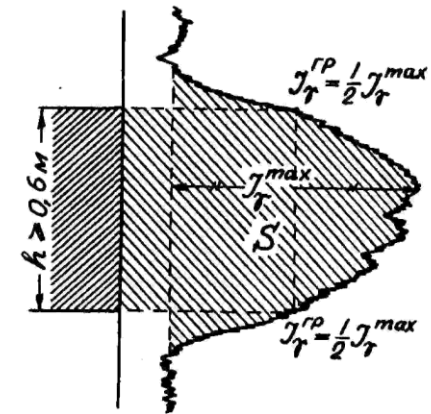


Рис. 12.2. Определение контактов пласта большой мощности и расчет площади аномалии по диаграмме ГК

Определение содержаний

- Определение содержания для всех видов аномалий производится по формуле:

$$q = \frac{S}{100 K_0 \cdot h} \%,$$

где h - мощность интервала, м.

- Значение площади S в см-мкР/час определяется по замкнутому контуру, ограниченному кривой ГК, осью глубин и контактами пласта

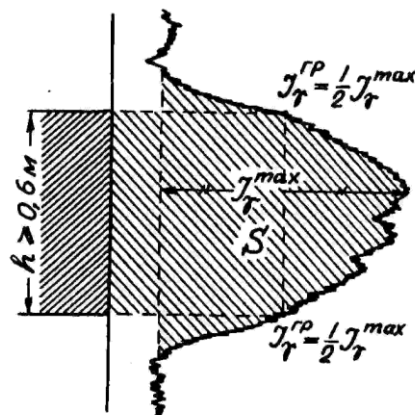


Рис. 12.2. Определение контактов пласта большой мощности и расчет площади аномалии по диаграмме ГК

Определение содержаний

- При определении по ГК содержания U необходимо вводить поправку на состояние радиоактивного равновесия между ураном и радием, поскольку сам уран γ -квантов практически не дает, а все γ -излучение идет от радия и продуктов его распада.

Состояние радиоактивного равновесия определяют по содержанию в руде U и Ra, которые находят по лабораторным анализам керна.

В равновесной руде содержание Ra в $3,4 \cdot 10^{-7}$ раз меньше, чем U. Соответственно, в неравновесной руде

$$K_{pp} = \frac{q_{Ra}}{q_U \cdot 3,4 \cdot 10^{-7}}$$

С поправкой на состояние радиоактивного равновесия содержание U:

$$q_{исп} = \frac{q}{K_{pp}}.$$

Определение глинистости по показаниям кривой GR

- В скважинах нефтяных и газовых месторождений по диаграммам ГК определяют глинистость коллекторов.
- На диаграммах ГК проводят одну линию, соответствующую глинам, другую - соответствующую чистым кварцевым пескам.
- Величину отклонения I_y от этих линий на исследуемом пласте полагают линейно связанной с глинистостью
- коллектора C_{gn} .
- По мнению других источников, $lg C_{gn} = aI_y - b$,
где a и b - постоянные, величину которых определяют для каждого месторождения на основе лабораторного анализа кернa.

Интерпретация ГК

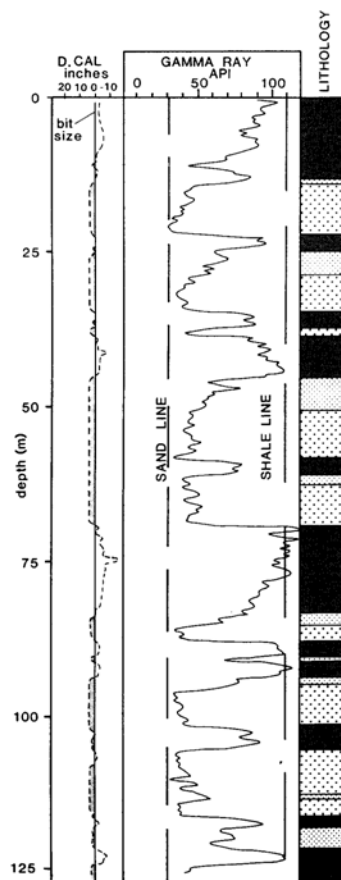


Figure 7.14 Sand line and shale line defined on a gamma ray log. These 'baselines' are for the quantitative use of the log, and may be reasonably constant in any one zone.

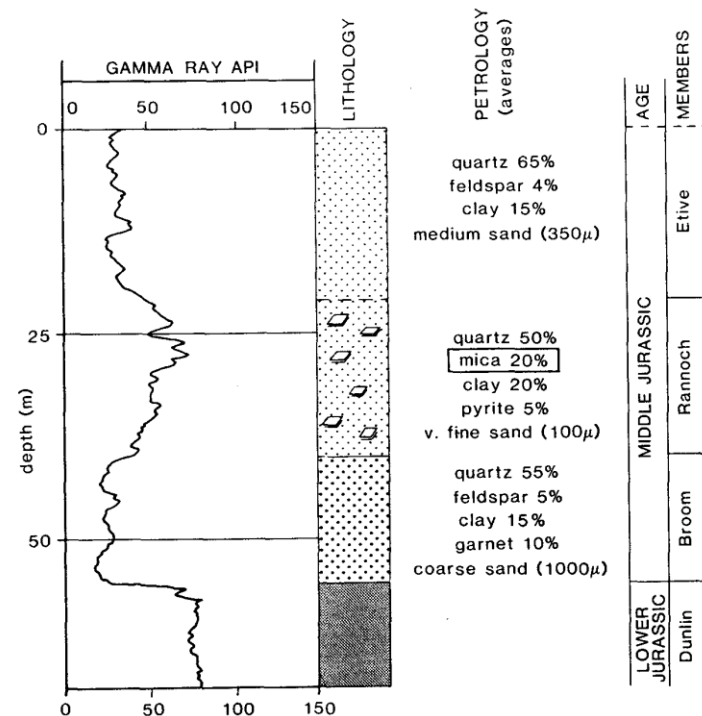


Figure 7.17 Radioactive sand, the 'mica sands' of the North Sea Jurassic. They are fine-grained shallow marine sandstones with perhaps 20% clay but 15 – 30% mica, mainly muscovite, which causes the radioactivity.

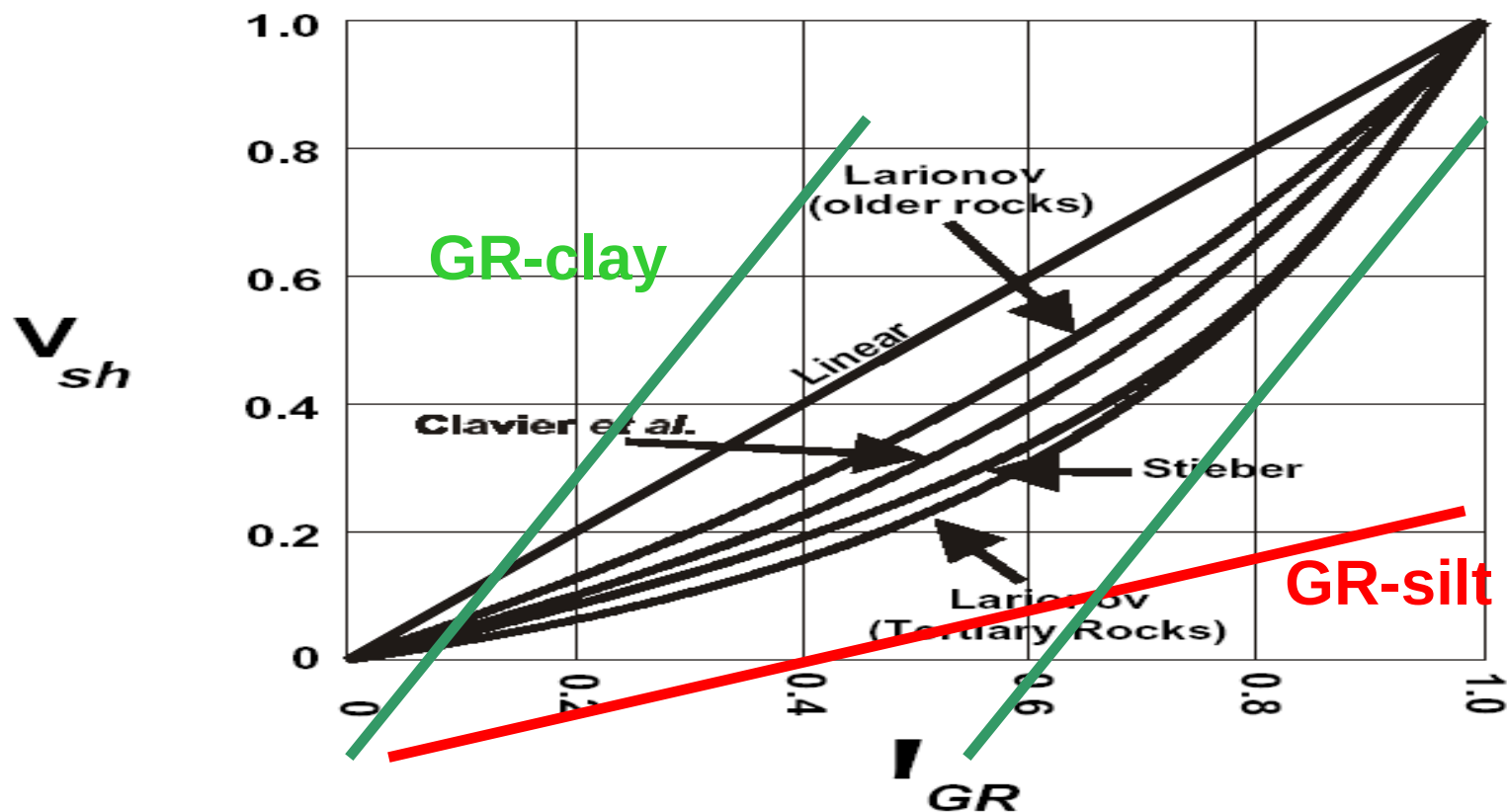
Радиоактивность песков,

Линия песка и линия глины определенные по кривой гамма-каротажа.

Эти «базовые» линии используются для количественной оценки при каротажах.

Они могут быть основой для констант этой зоны.

Определение глинистости по показаниям кривой GR



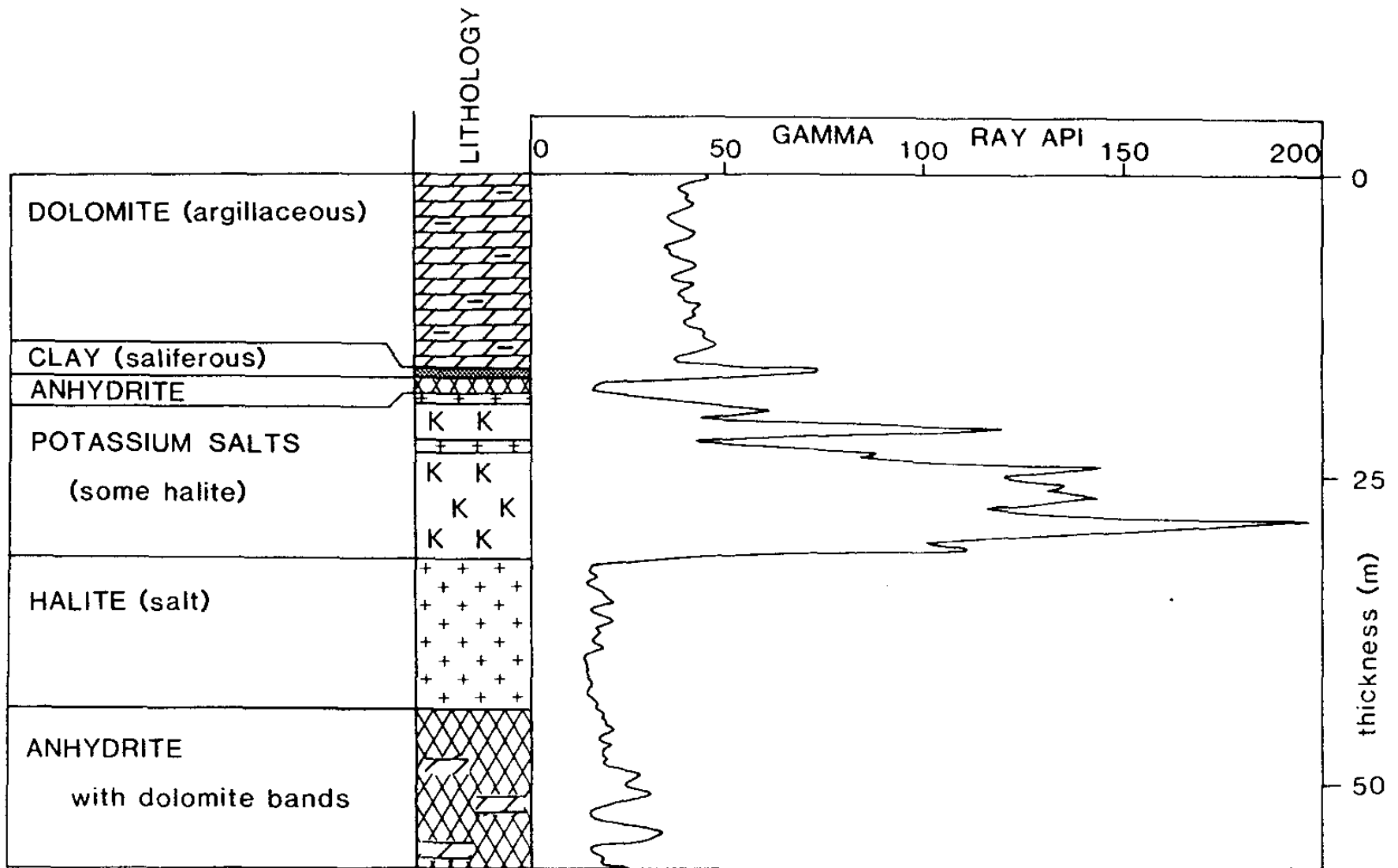
$$I_{gr} = (GR - GR_{cl}) / (GR_{sh} - GR_{cl})$$

GR - измеренное гамма-излучение

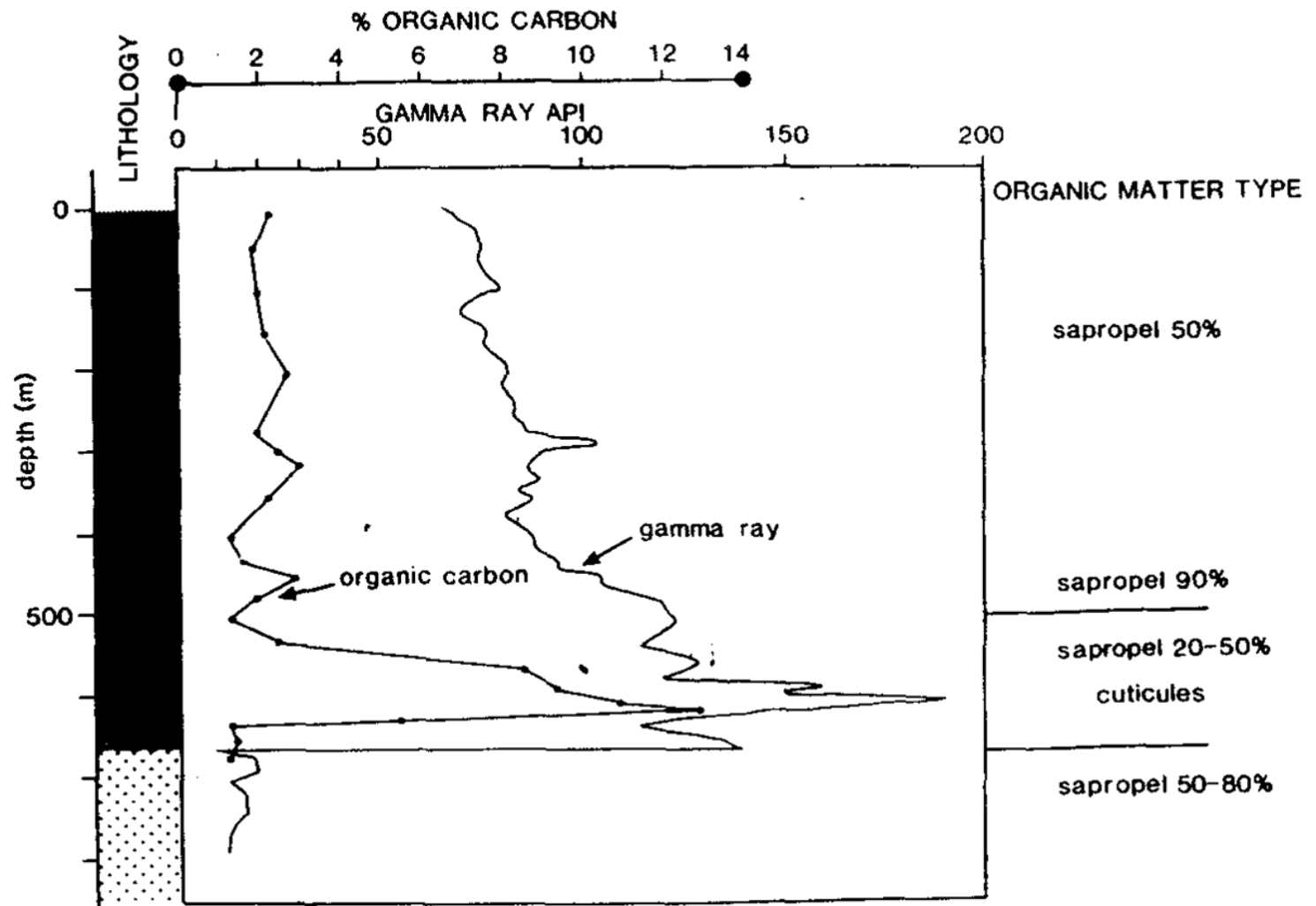
GR_{cl} - гамма-излучение песчаника

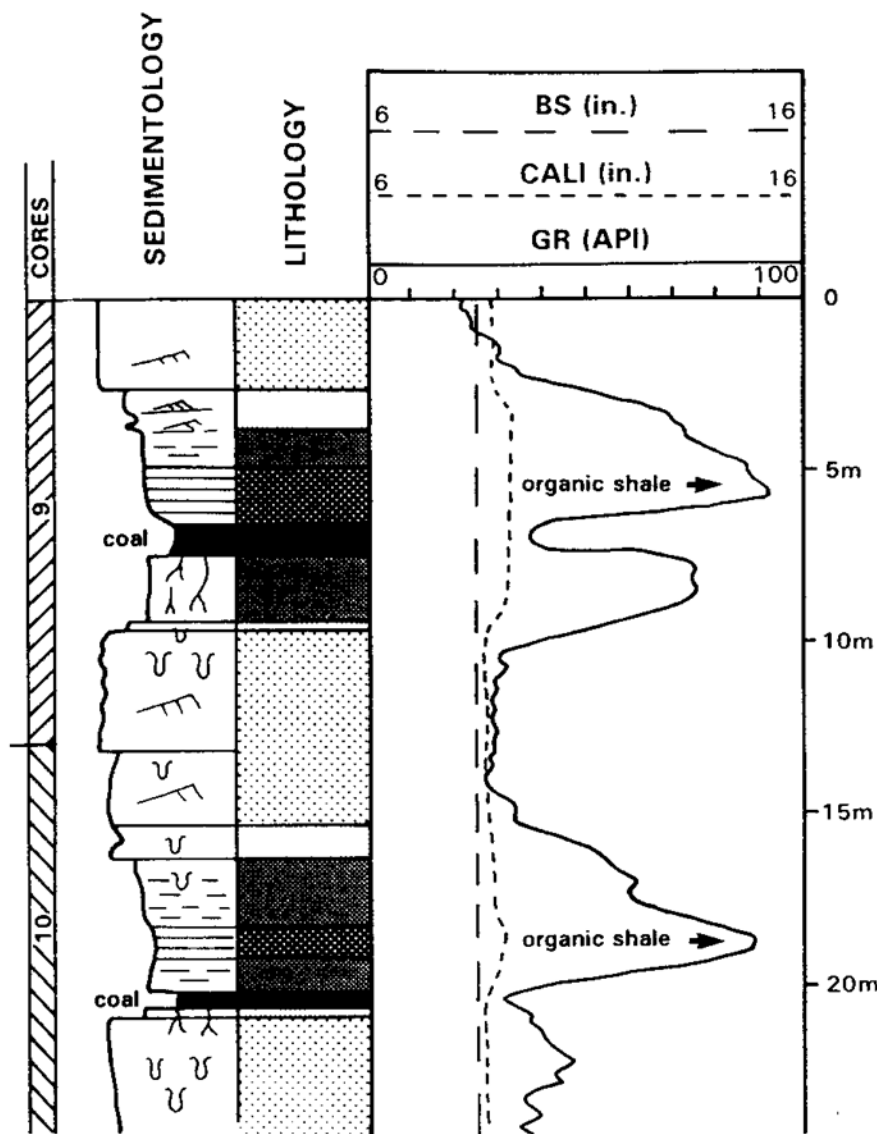
GR_{sh} - гамма-излучение глин

Калийные соли, дающие очень высокие пики радиоактивности в evaporite



Высоко органические углеродистые соединения и полные гамма-лучи, дающие хорошую корреляцию, в этом случае из-за урана, связанного с органическим веществом.





Характеристика гамма-лучей угля (очень низко значения) и органическая богатая глина (очень высоко значения) в дельтообразной последовательности.

Figure 7.23 Gamma ray characteristics of coal (very low values) and organic rich shale (very high values) in a deltaic sequence.

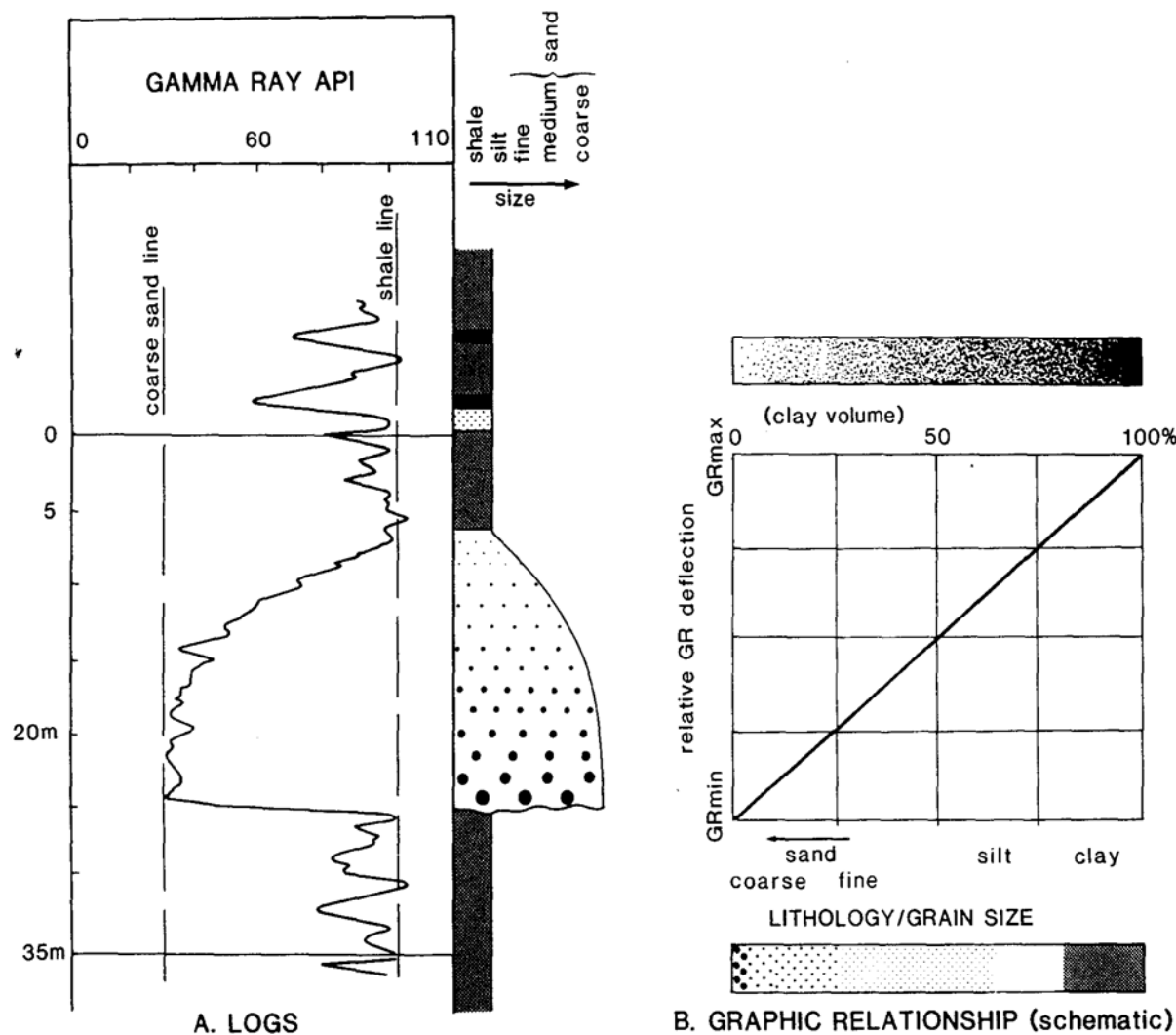
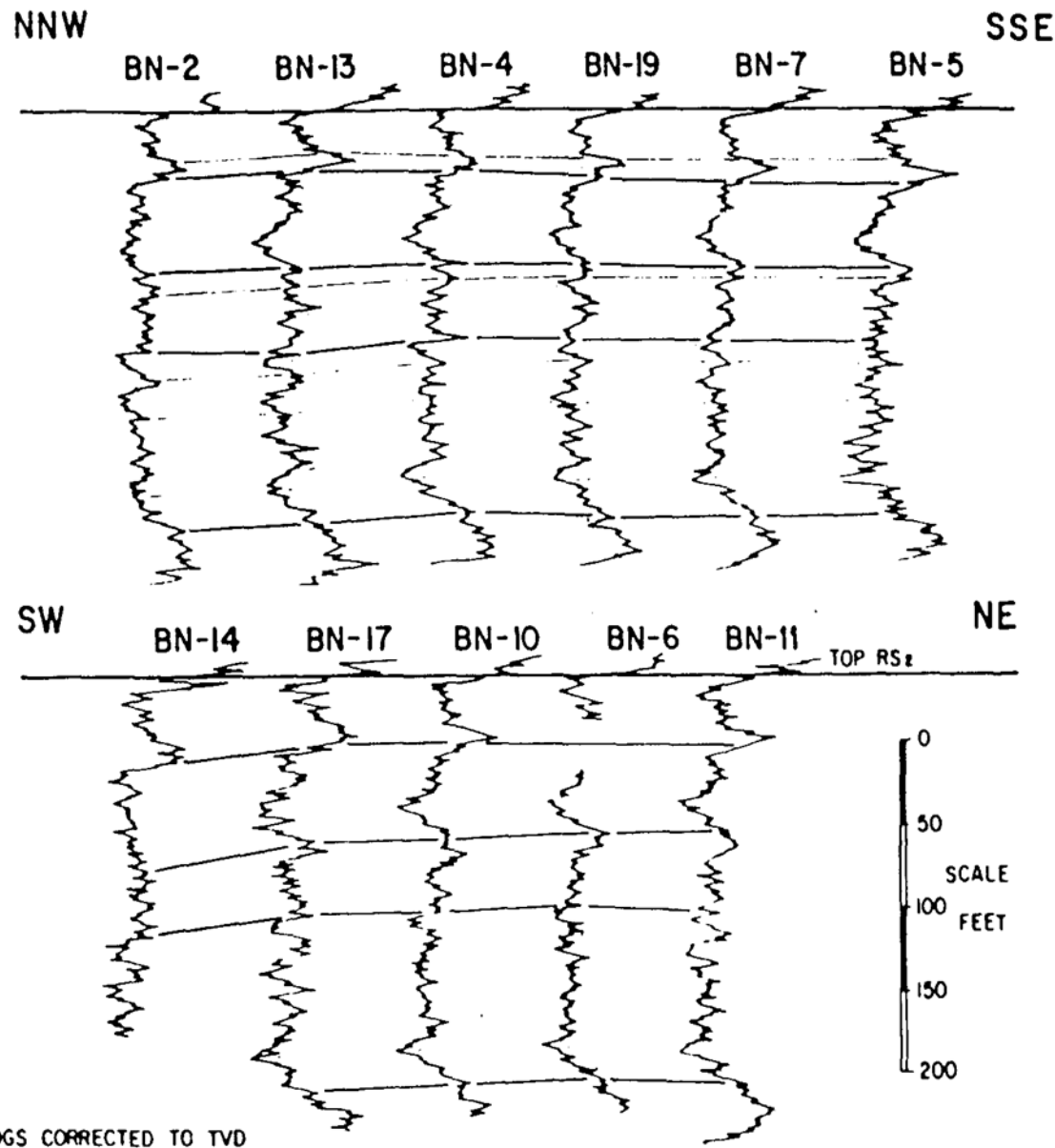


Figure 7.25 Facies from the gamma ray log. (A) The changes in sandstone grain size are reflected in changes in the gamma ray value. This allows a facies to be suggested. (B) Graphic representation of the variation of grain size with gamma ray value. Here it is expressed as a straight line but the relationship is very variable. It should parallel the clay volume change.

Фации по гамма каротажу. (А) изменения в размере зерна песчаника отражены в изменениях в значении гамма-лучей. Это позволяет фациям быть предложенным. (В) Графическое представление изменения (разновидности) размера зерна со значением гамма-лучей. Здесь это выражено как прямая линия, но отношения очень переменные.

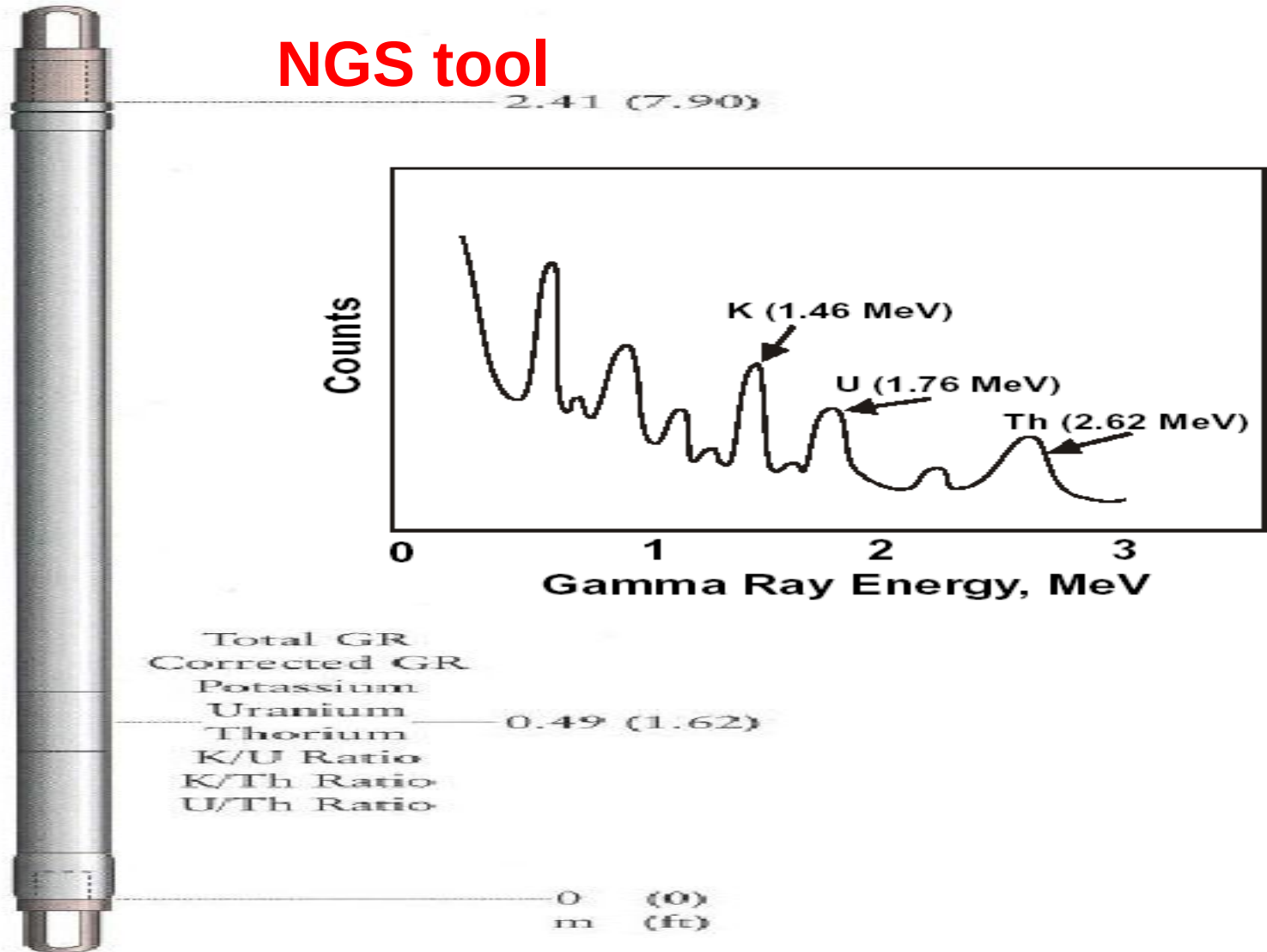


Корреляция,
использующая
гамма- каротаж.
Baronia поле, Sarawak.
(От Scherer, 1980).

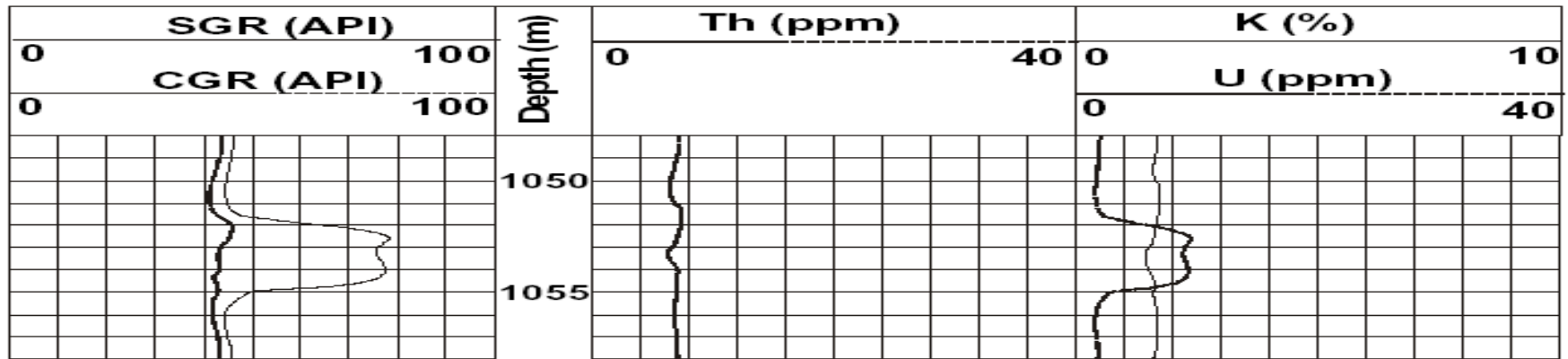
Figure 7.26 Correlation using the gamma ray log. Baronia field, Sarawak. (From Scherer, 1980).

Гамма-спектрометрический каротаж- более информативный индикатор содержания глин, чем ГК

NGS tool



Пример представления результатов гамма-спектрометрии



SGR- суммарная кривая радиоактивности

CGR = SGR – concentration U (вычисленная гамма активность без учета концентрации урана)

Глубина исследования - около 1 фута (как для GR)

Скорость подъема прибора – 300 м/ч (в 2-3 раза медленнее GR)

Вертикальное разрешение – 1 фут

Поправки за скважину – аналогично GR



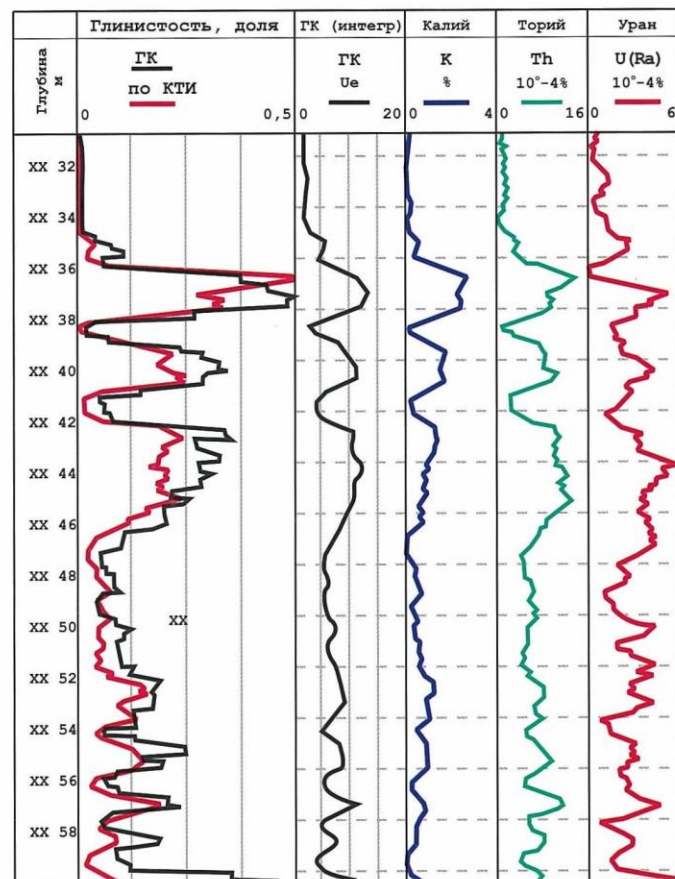
Спектриметрический гамма-каротаж (СГК) позволяет определять в породах концентрации отдельных естественных радиоактивных элементов: К, Th, U(Ra) и, тем самым, резко увеличивает информационные возможности стандартного ГК, расширяет круг решаемых задач, повышает надежность и однозначность геолого-геофизической интерпретации.

Включение СГК в комплекс ГИС существенно повышает его эффективность для решения поисково-разведочных и нефтепромысловых задач, особенно в сложных геологических условиях:

- детального литологического расчленения;
- структурной и стратиграфической корреляции;
- выделения трещиноватых зон и продуктивных интервалов в карбонатных отложениях;
- выделения трещиноватых и нефтеперспективных зон в глинистых сланцах;
- оценки минерально-компонентного состава горных пород (МКСП) и уточнения коллекторских свойств песчано-глинистых коллекторов, в том числе для:
- оценки открытой пористости;
- определения общей глинистости, особенно в пластах с повышенной радиоактивностью, которая не подтверждается другими методами, например:
- в присутствии торийсодержащих минералов;
- в пластах с большим содержанием органики;
- в пластах с повышенным содержанием калиевых полевых шпатов;

- определения состава глинистых минералов, их ассоциаций, включая разбухающую фазу;
- оценки содержания твердого органического вещества и битумов;
- прогнозирования изменений фильтрационных свойств пласта различными методами интенсификации добычи;
- оценки загрязнений техногенными радионуклеидами и решения других радиоэкологических задач.

Перспективным является использование ГК-С в комплексе с ИНК для оценки текущей нефтенасыщенности пласта.



Основные параметры прибора:

Энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов:	
ГК-С	от 50 до 3000 кэВ
НГК-С	от 150 до 8000 кэВ
Энергетическое разрешение спектрометрических детекторов по линии Cs ¹³⁷ :	
ГК-С	менее 10%
НГК-С	менее 8%
Давление, МПа	60
Температура, °С	120
Диаметр, мм	90
Длина, мм	3500

Каротаж гамма-лучей и спектральный каротаж гамма-лучей:

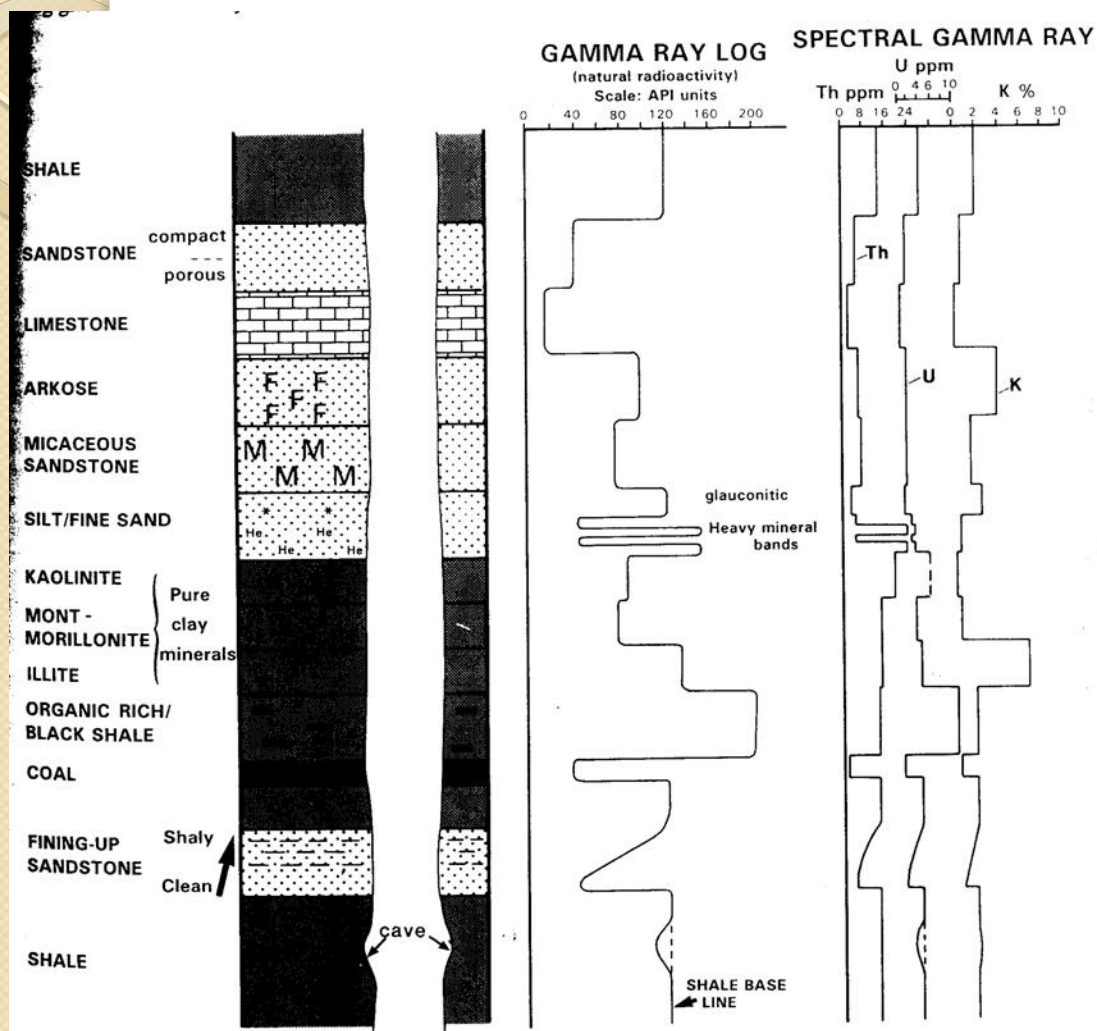
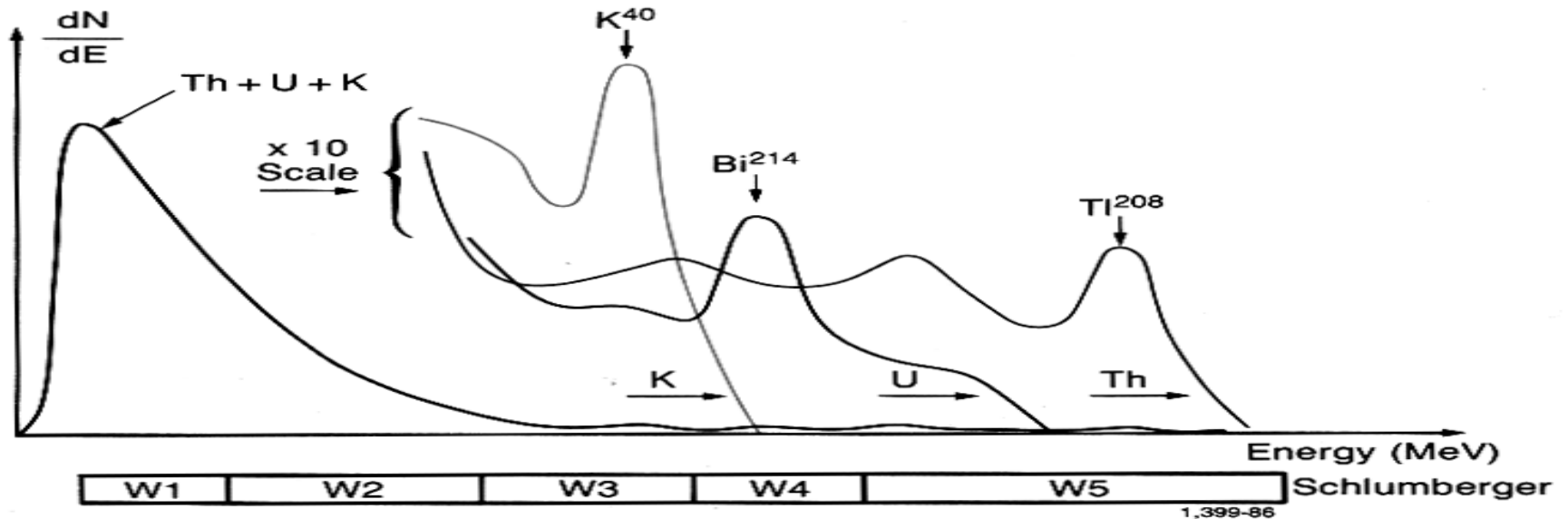


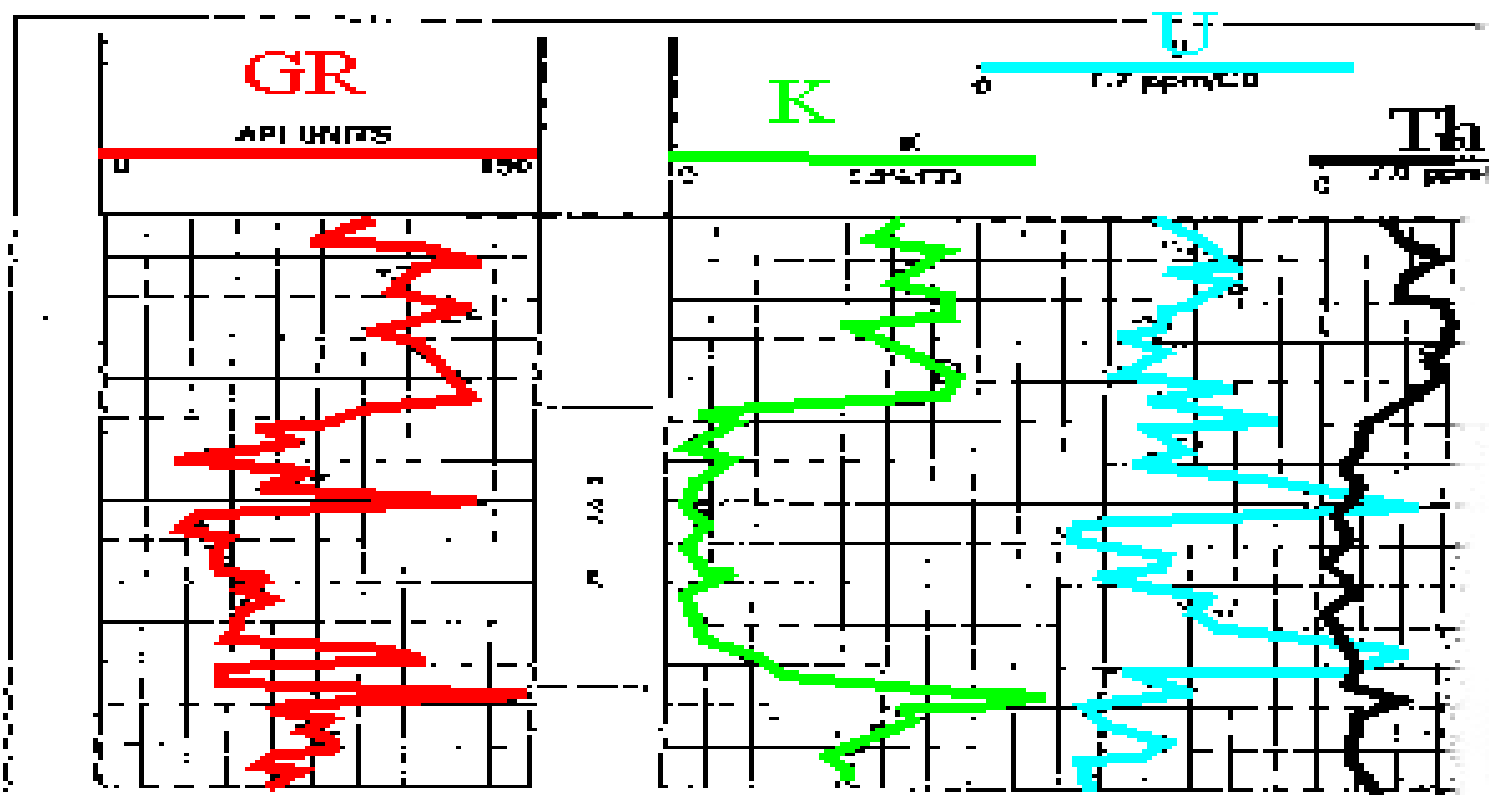
Figure 7.1 The gamma ray log and spectral gamma ray log: some typical responses. The gamma ray log shows natural radioactivity. The spectral gamma ray log gives the abundances of the naturally radioactive elements, thorium, Th and uranium, U in parts per million (ppm) and potassium, K in %. F - feldspar, M = mica, * = glauconite.

Каротаж гамма-лучей показывает естественную радиоактивность. Спектральный каротаж гамма-лучей дает содержание естественно радиоактивных элементов: тория, Th и урана, U в частях в миллион (ppm) и калий, K в %. F - полевые шпаты, M = слюда, * = глауконит.

Potassium, Thorium, and Uranium Response Curves



Spectral GR log. Alberta



Один проницаемый пласт, по GR можно выделить три.

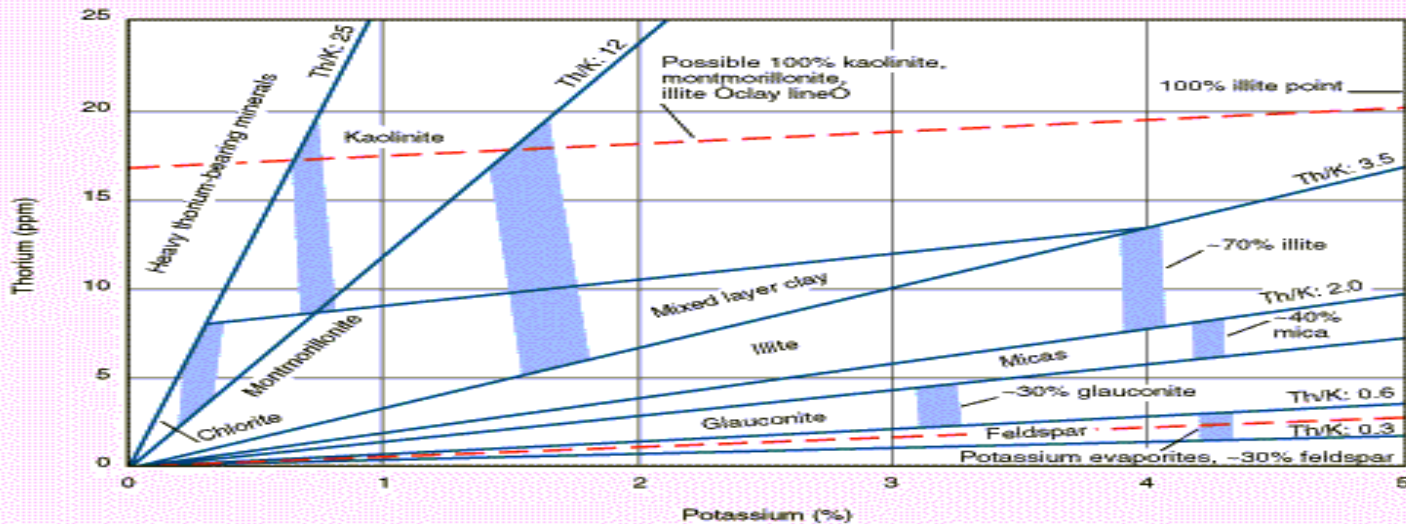
Определение типа глин по гамма-спектрометрии

Crossplots for Porosity, Lithology and Saturation

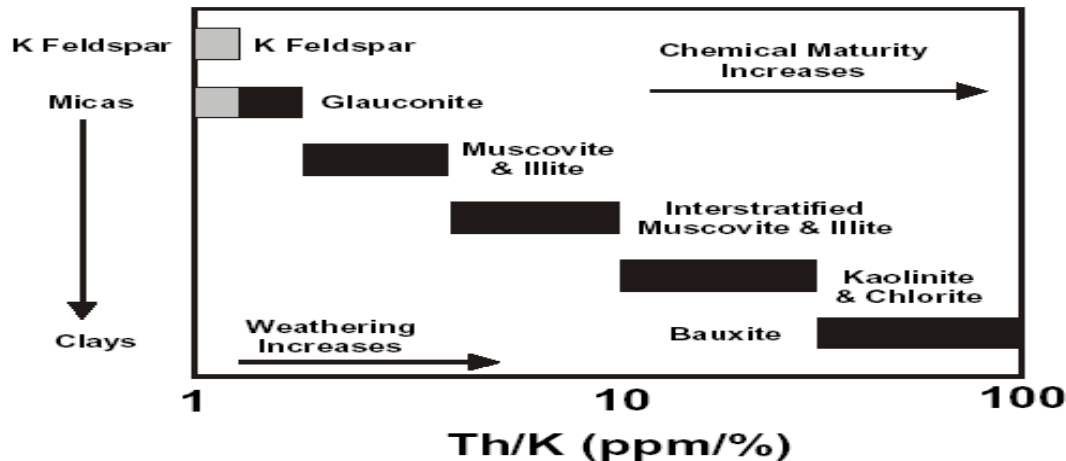
Schlumberger

Mineral Identification from
NGS* Natural Gamma Ray Spectrometry Log

CP-19



*Mark of Schlumberger
© Schlumberger



Выводы

1. Минимальной радиоактивностью обладают известняки, несколько большей – доломиты, песчаники обычно еще более радиоактивны, самые радиоактивные среди осадочных пород – глины

2 GR применяется для определения глинистости и корреляции, для увязки каротажных кривых

$$I = \frac{GR - GR_{clean}}{GR_{shale} - GR_{clean}}$$

4 Гамма-спектрометрия применяется для определения типа глин и их природы, определения условий осадконакопления и выделения несогласий. (Th/K отношение стабильно в последовательном накоплении осадков)

5.Измерения проводятся в единицах API

6. Основные источники радиоактивности K^{40} , Th^{232} , U^{238} .

7 Глубинность метода – 30 см, разрешающая способность – 90 см.

Гамма-гамма-каротаж

- Заключается в облучении горных пород γ -квантами искусственного источника и измерении рассеянного γ -излучения.
- Скважинный снаряд дополняется источником γ -квантов.
- Источник цезия используется в нескольких снарядах Schlumberger для подсчета объемной плотности горной породы.
- Цезий 137 самопроизвольно испускает бета и гамма радиации высокой энергии.

Существуют 3 основных процесса взаимодействия излучения с веществом

Процессы взаимодействия γ -излучения с веществом

```
graph TD; A[Процессы взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом] --> B[Фотопоглощение (Фотоэффект)]; A --> C[Комптоновское рассеяние]; A --> D[Образование пар];
```

Фотопоглощение
(Фотоэффект)

Комптоновское
рассеяние

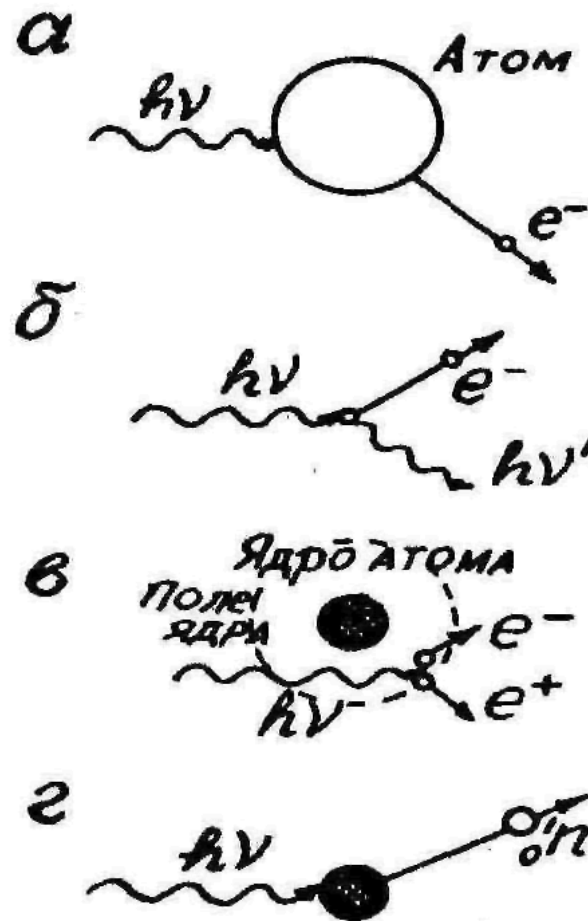
Образование пар

Вероятность появления каждого из них определяется энергетическим уровнем гамма излучения

Фотопоглощение (фотоэффект)

заключается в поглощении γ -кванта атомом вещества, его энергия уходит на отрыв от атома электрона и сообщение последнему импульса энергии (а). Атом остается возбужденным и переходит в нормальное состояние, испуская фотон рентгеновского излучения.

- **Комptonовское рассеяние** (комpton-эффект) - это неупругое рассеяние γ -квантов на электронах вещества, в результате которого γ -квант теряет часть своей энергии и меняет направление движения (рис. 6). Наблюдается комpton-эффект при более высоких энергиях, условно можно считать $E_{\gamma} > 0,5 \text{ МэВ}$.
- **Образование пар** (рождение пар) - происходит при взаимодействии γ -кванта с полем ядра атома, γ -квант прекращает свое существование, вместо него образуется пара: электрон и позитрон (в).



Фотоэффект

Механизм

- Заключается в поглощении γ -кванта атомом вещества, его энергия уходит на отрыв от атома электрона и сообщение последнему импульса энергии. Атом остается возбужденным и переходит в нормальное состояние, испуская фотон рентгеновского излучения.

Условия протекания

- Наблюдается при самых малых энергиях γ -квантов. Условно можно считать $E_\gamma < 0,5 \text{ МэВ}$.

Вероятность протекания

$$\tau_{\phi} = c \cdot \frac{Z^4 \epsilon_{\phi}}{E_{\gamma}^m},$$

Комптон-эффект

Механизм

- Неупругое рассеяние γ -квантов на электронах вещества, в результате которого γ -квант теряет часть своей энергии и меняет направление движения

Compton Scattering

Условия протекания

- Наблюдается при более высоких энергиях, условно можно считать $E_\gamma > 0,5$ МэВ.

Вероятность протекания

$$\tau_k = \sigma_k \cdot n_e = \sigma_k \frac{N_0 \rho \cdot z}{A},$$

Аппаратура ГГК устроена так же, как и аппаратура ГК, но скважинный снаряд дополняется источником γ -квантов.

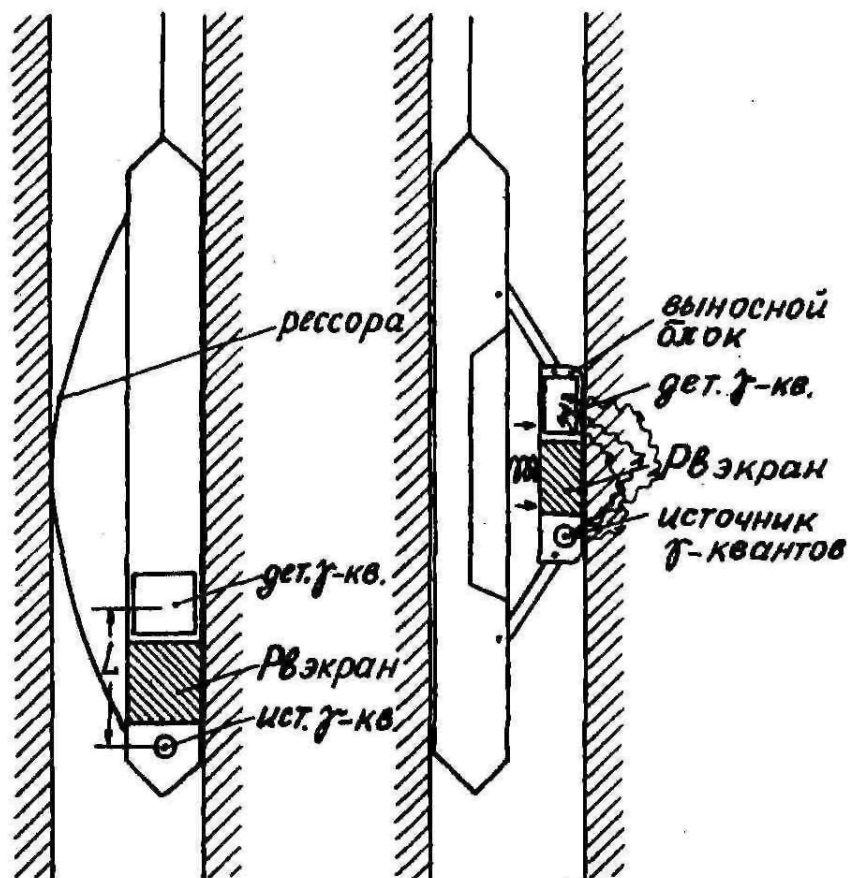
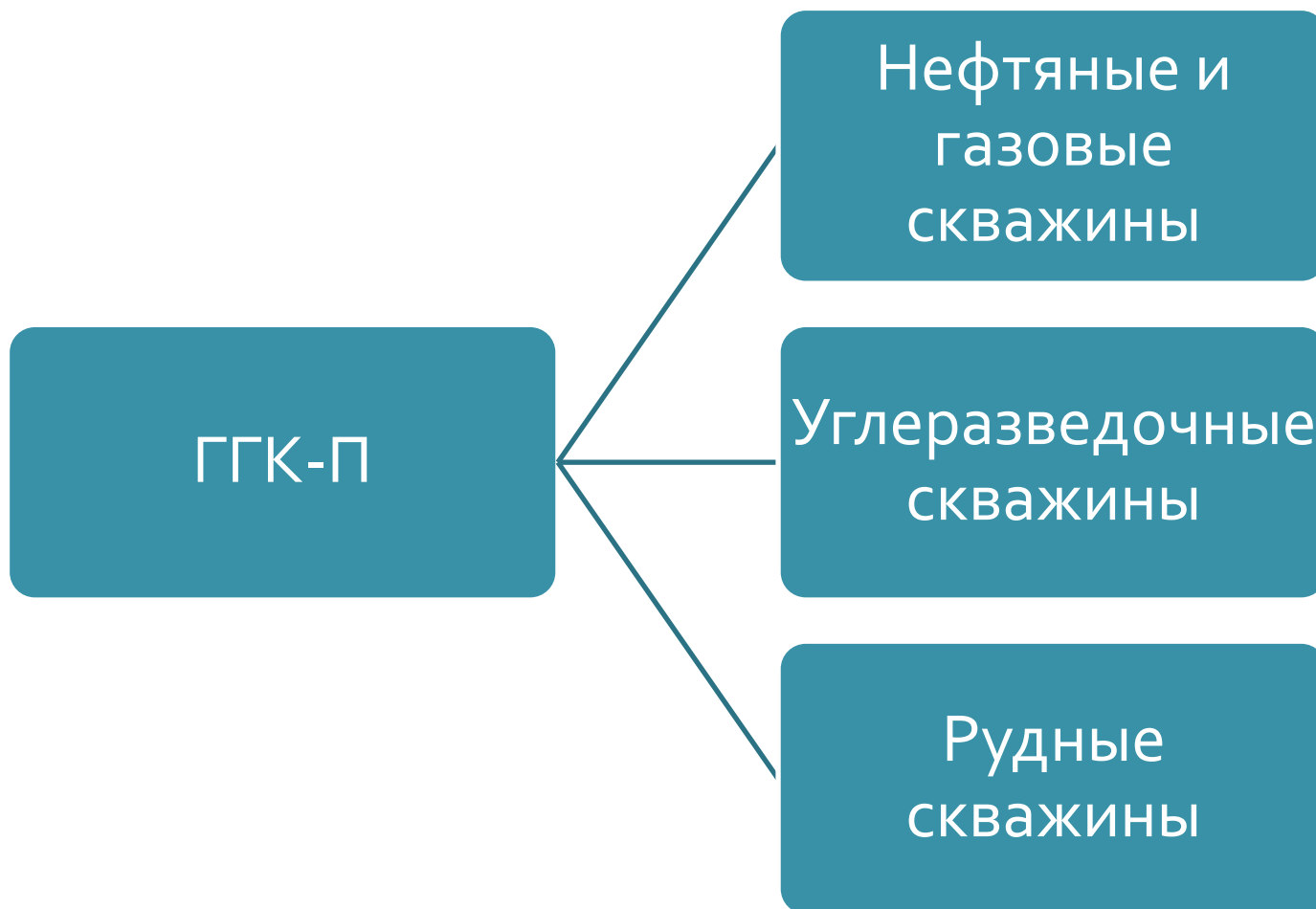


Рис. 12.4. Устройство скважинных снарядов для гамма-гамма-каротажа

Область применения ГГК



Плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П) **FORMATION DENSITY LOG**

- Плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П) основан на изучении комптоновского рассеяния γ -квантов в горных породах.
- Поскольку этот эффект наблюдается при достаточно высокой энергии γ -квантов, то в ГГК-П используют источники с энергией $E_{\gamma} > 0,5$ МэВ. Такими источниками являются искусственные изотопы
- Co^{60} ($E_{\gamma} = 1,17$ МэВ и $1,33$ МэВ), Cs^{137} ($E_{\gamma} = 0,66$ МэВ) и естественный
- ЕРЭ - Ra^{226} , который дает целый спектр γ -квантов с энергиями от $0,35$ до $1,76$ МэВ. Длина зондов от 20 до 50 см.
- **Область применения.** ГГК-П находит применение при исследовании нефтяных и газовых, углеразведочных и рудных скважин.
- На нефтяных и газовых месторождениях ГГК-П применяют для дифференциации разрезов скважин по плотности и для определения пористости пород-коллекторов. Как известно, плотность породы σ_p , и коэффициент пористости K_n связаны функциональной зависимостью

$$\sigma_n = (1 - K_n) \cdot \sigma_{ск} + K_n \cdot \sigma_{жс}$$

Одна из характеристик лучей гаммы - то, что, когда они проходят через любой материал, их энергия прогрессивно поглощается.

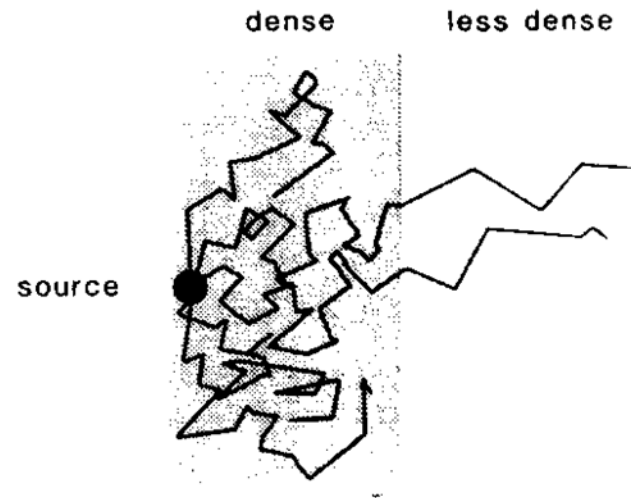


Figure 7.3 Schematic drawing of the Compton scattering of gamma rays. The effect is more marked in denser matter (cf. Lavenda, 1985).

Эффект, известный как рассеивание Комптона, из-за столкновения между гамма-лучами и электронами, которые вызывают снижение энергии.

Чем выше общая плотность, через которую проходят гамма-лучи, тем более быстрая потеря энергии.

В действительности она зависит от электронной плотности материала, которая является очень близкой к общей плотности.

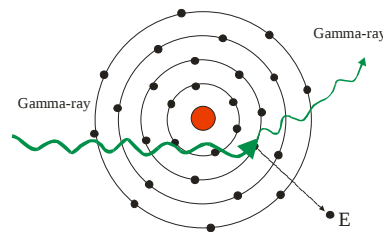
The formation density log

Измеряется общая плотность.

Цель – вычисление пористости,

Выделение газонасыщенных интервалов.

Комптон эффект



Процесс является преобладающим при высокой энергии гамма квантов 0.5-3 МэВ **Комптовское рассеяние - основной вид взаимодействия при определении плотности.**

Плотностной метод

- **Использует гамма-лучи для измерения общей плотности пород в г /см³**
- **Плотность осадочных пород меняется в диапазоне 2-3 г /см³**
- **В основном флюиды имеют меньшую плотность между 0.2 и 1.0 г /см³**
- **Используется для определения пористости и литологии**

Плотностная модификация (RHOV)

Величина измеряемого гамма-излучения определяется в основном электронной плотностью среды., окружающей прибор, и не зависит от изменений ее вещественного состава.

В единице объема вещества количество электронов составляет:

$$Ne = N * \frac{Z}{A} * \rho b$$

N-число Авогадро ($6.02 \cdot 10^{23}$)

Z-заряд ядра

A-атомный вес

ρb -плотность вещества

Для элементов, составляющих горные породы, отношение $2Z/A$ ($Z < 30$) является достаточно постоянным и практически равно 1. Соответственно, число электронов в единице объема пропорционально плотности среды. Исключение составляет водород ($2Z/A = 1,98$)

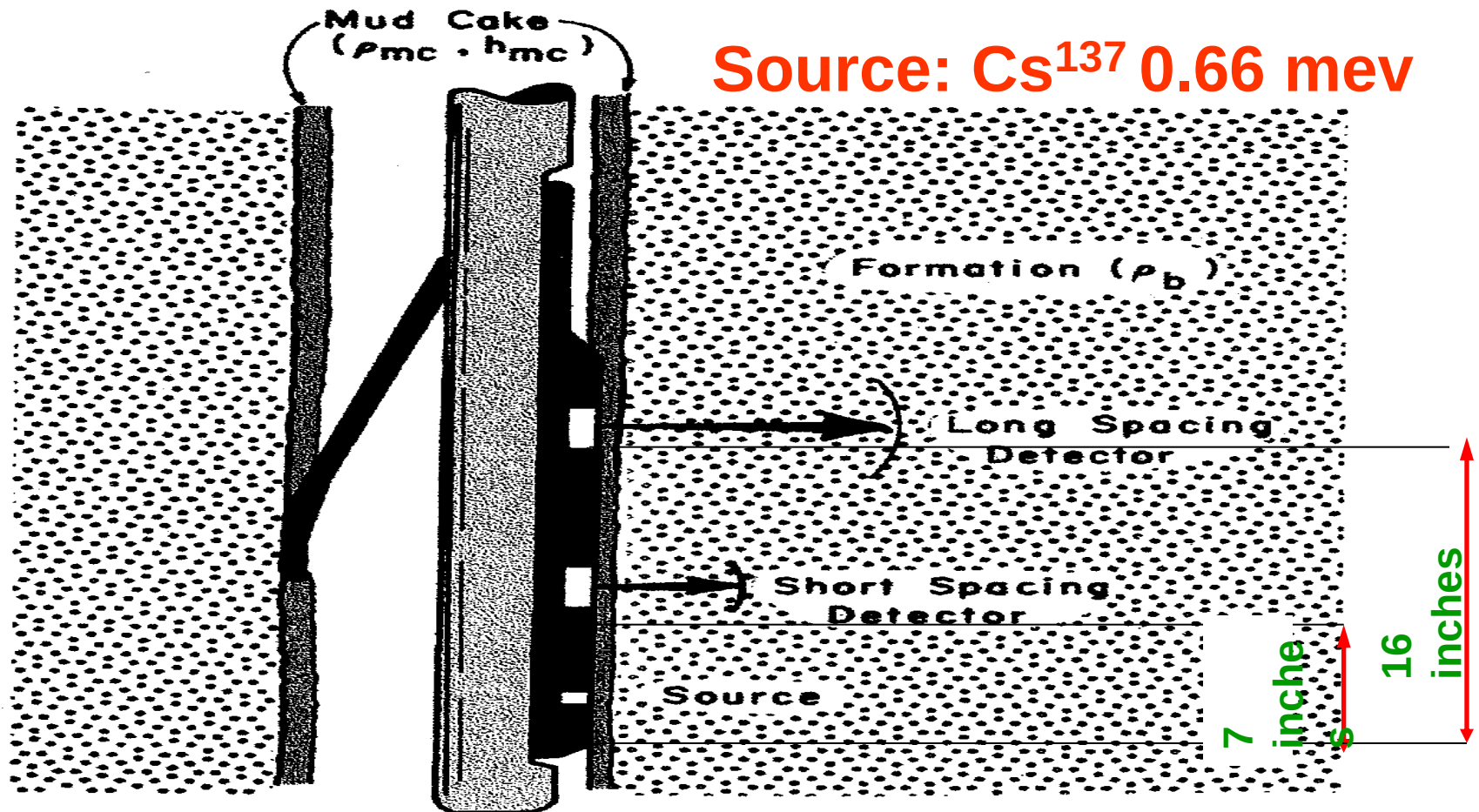
$$pe = \frac{2Ne}{N}$$

$$pe = pb * \frac{2Z}{A}$$

ре-электронная плотность

Чем больше плотность – тем больше рассеяние.

Схема прибора FDC (Compensated formation density tool - FDC)



Глубина исследования - около 13 см (5 дюймов)

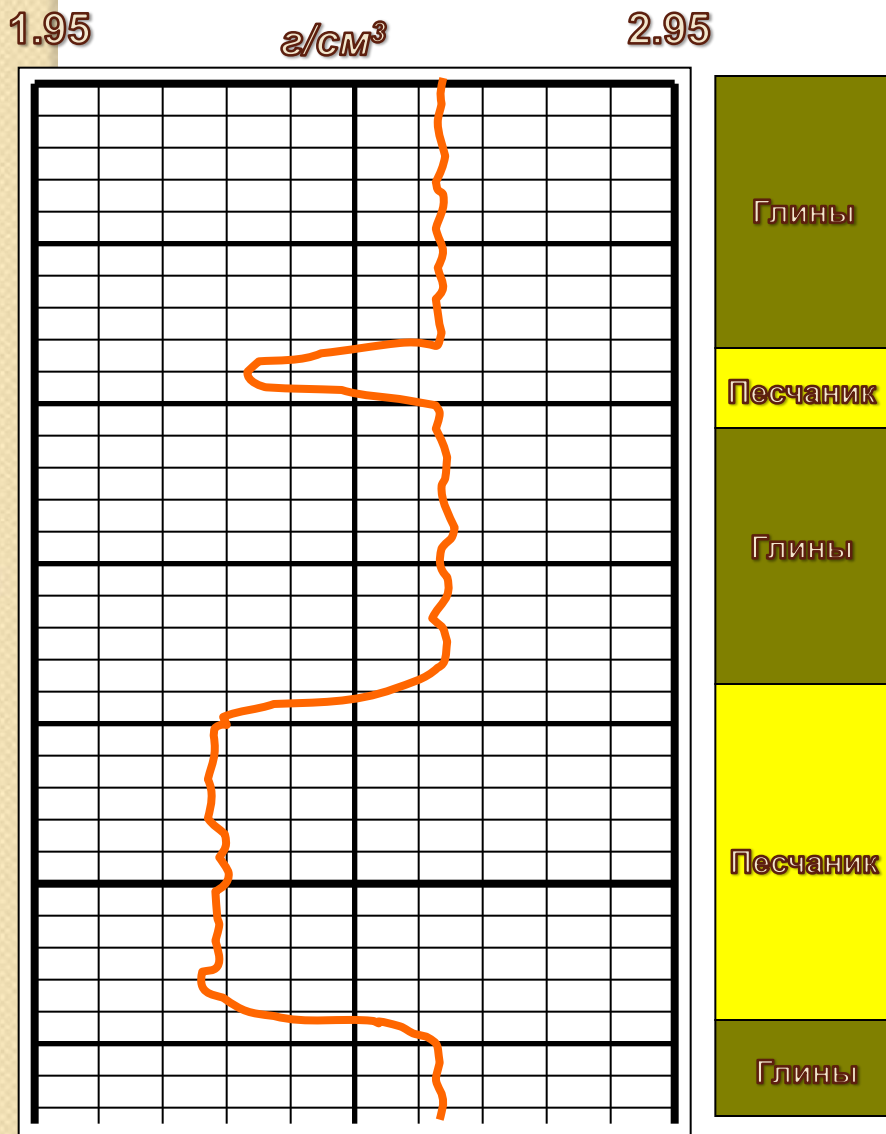
Скорость исследования - 500 м/ч

Вертикальное разрешение – 26 см (10 дюймов)

Journal of Interpersonal Violence 28(10)



Пористость по плотностному методу



Общая плотность $\rho_o =$

Объем флюида x Плотность Флюида
+
Объем породы x Плотность Породы

$$\rho = (\phi \times \rho_{\phi}) + (\rho_{ск} \times (1 - \phi))$$

$$\phi = \frac{\rho_{ск} - \rho_o}{\rho_{ск} - \rho_{\phi}}$$

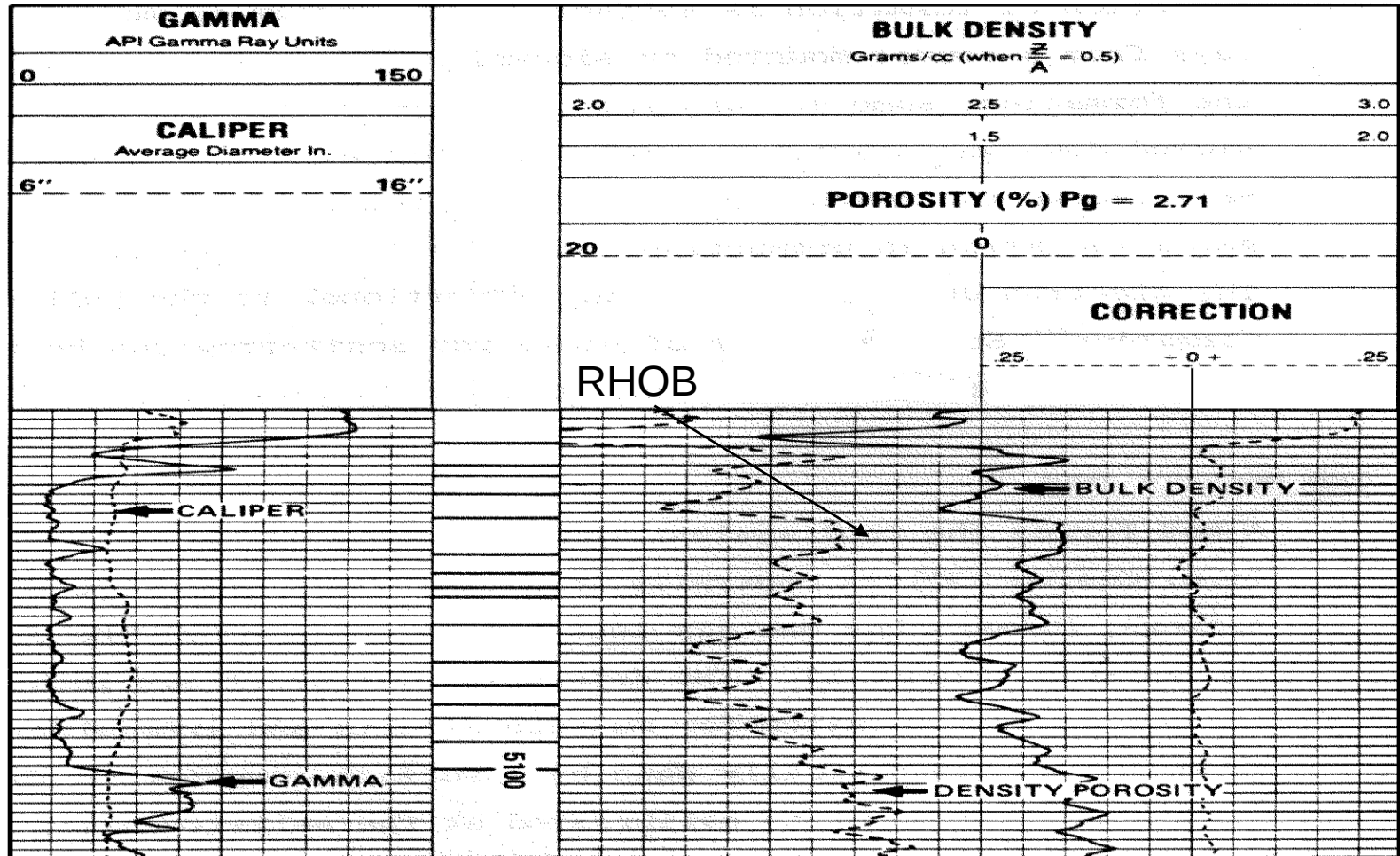
Плотность песчаника = 2.65

Плотность воды = 1.0

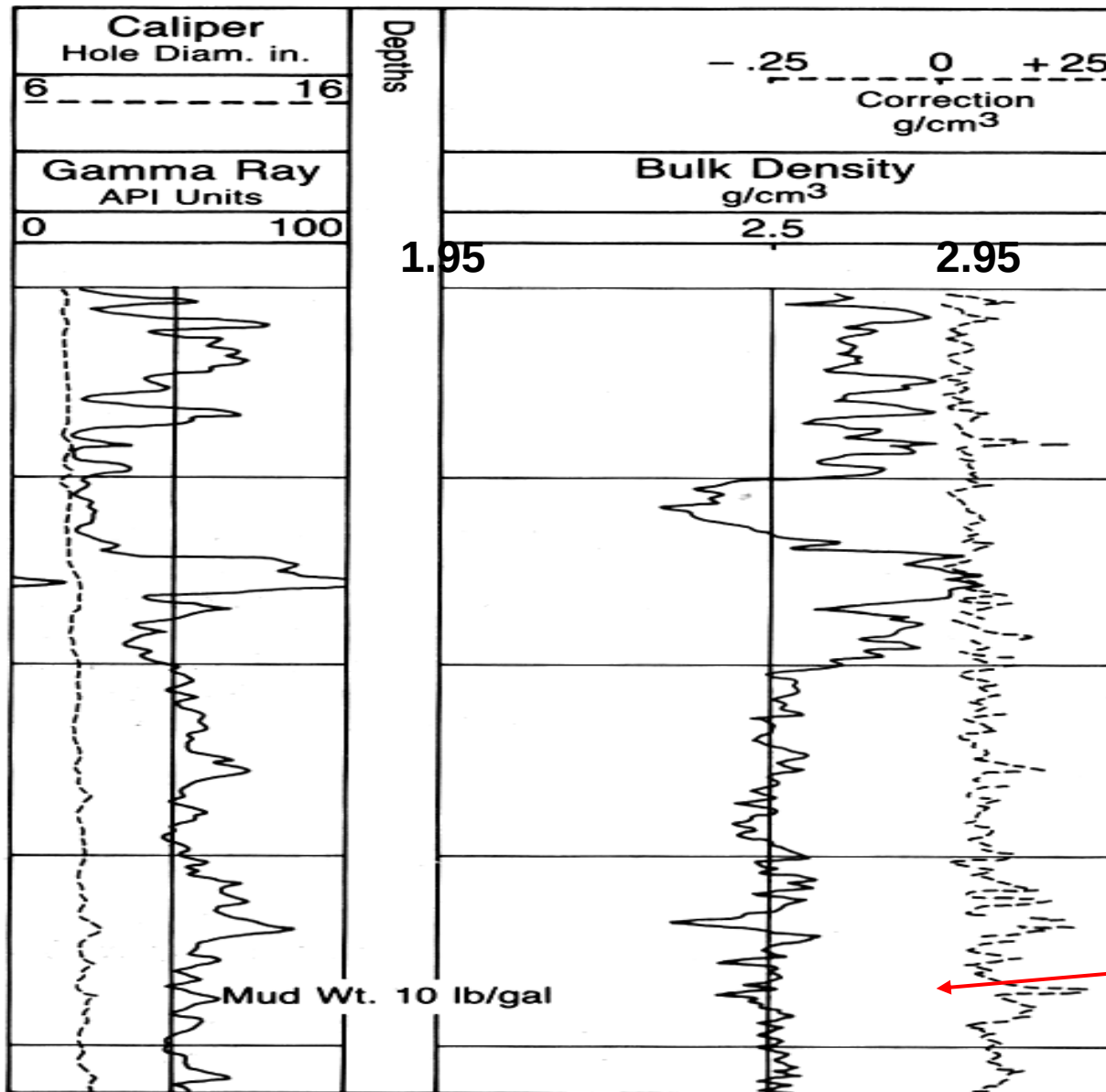
Плотность -> пористость = %

Пример диаграммы плотностного каротажа

Density Log FDC



Typical FDC log



На треке присутствует кривая $\Delta\rho$ Она контролирует качество регистрируемой кривой. Качество кривой зависит от равномерности прижима ближнего и дальнего детектора. В скважине с ровными стенками отклонения кривой $\Delta\rho$ равны нулю.

$-.25 \Delta\rho +.25$

Сравнительная характеристика истинной плотности и плотности, полученной по прибору

Compound	Composition	Actual Bulk Density, ρ_b	2 Z/A	Effective Electron Density, ρ_e	Apparent Bulk Density, ρ_a
Quartz	SiO ₂	2.654	0.9985	2.650	2.648
Calcite	CaCO ₃	2.710	0.9991	2.708	2.710
Dolomite	CaCO ₃ ·MgCO ₃	2.870	0.9977	2.863	2.876
Anhydrite	CaSO ₄	2.960	0.9990	2.957	2.977
Sylvite	KCL	1.984	0.9657	1.916	1.863
Halite	NaCl	2.165	0.9581	2.074	2.032
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.320	1.0222	2.372	2.351
Anthracite (low)		1.400	1.030	1.442	1.355
Anthracite (high)		1.800	1.030	1.852	1.796
Coal (Bituminous)		1.200	1.060	1.272	1.173
Coal		1.500	1.060	1.590	1.514
Pure Water	H ₂ O	1.000	1.1101	1.110	1.000
Salt Water	200,000 ppm NaCl	1.146	1.0797	1.237	1.135
Oil	(CH ₂) _n	0.850	1.1407	0.970	0.850
Methane	CH ₄	ρ_m	1.247	1.247 ρ_m	1.335 ρ_m - 0.188
Gas	C _{1.1} H _{4.2}	ρ_g	1.238	1.238 ρ_g	1.325 ρ_g - 0.188

$$\rho_a = 1.07 \cdot \rho_e - 0.188$$

ρ_a – Кажущаяся плотность (показания прибора)

ρ_a откалибровано на матрице, насыщенной водой.

Плотности точно известны

Определение пористости по данным FDC

$$pb = (\phi) * (pf) + (1 - \phi) * (pma)$$

$$\phi = \frac{pma - pb}{pma - pf}$$

pb=Плотность породы (по каротажу)

pf=Плотность жидкости, заполняющей поровое пространство

Ø=Пористость

(1- Ø)=Объем матрицы горной породы

P=плотность матрицы горной породы

Плотность матрицы

Обычно принимается равной: (в г/см³)

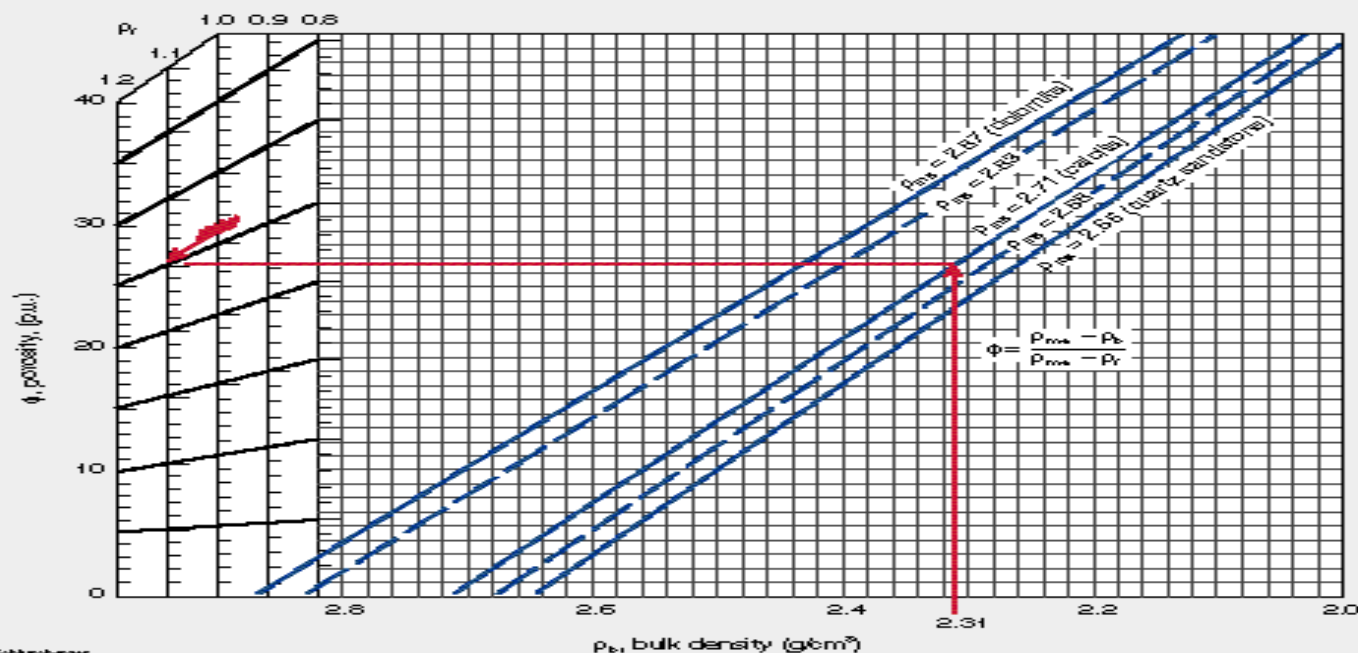
Sandstone 2.65

Limestone 2.71

Dolomite 2.87

Formation Density Log Determination of Porosity

Por-5

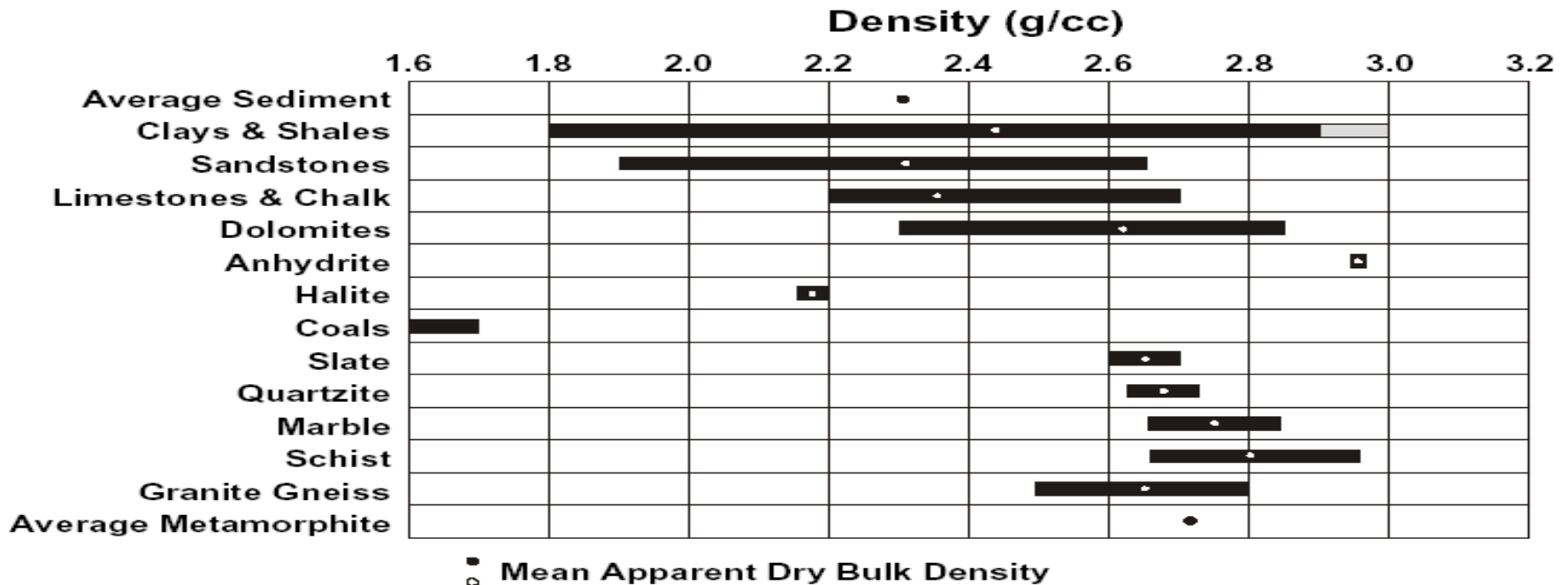


Bulk density, ρ_b , as recorded with the FDC® Compensated Formation Density or Litho-Density® logs, is converted to porosity with this chart. To use, enter bulk density, corrected for borehole size, in abscissa; go to the appropriate reservoir rock type and read porosity on the appropriate fluid density, ρ_f , scale in ordinate. (ρ_f is the density of the fluid saturating the rock immediately surrounding the borehole—usually mud filtrate.)

Example: $\rho_b = 2.31 \text{ g/cm}^3$ in limestone lithology
 $\rho_{ms} = 2.71$ (calcite)
 $\rho_f = 1.1$ (salt mud)
 Therefore, $\phi_D = 25 \text{ p.u.}$

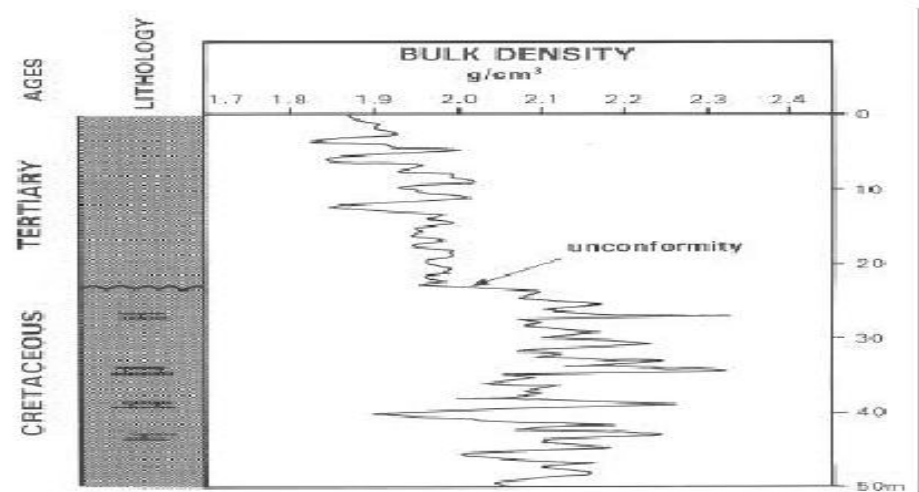
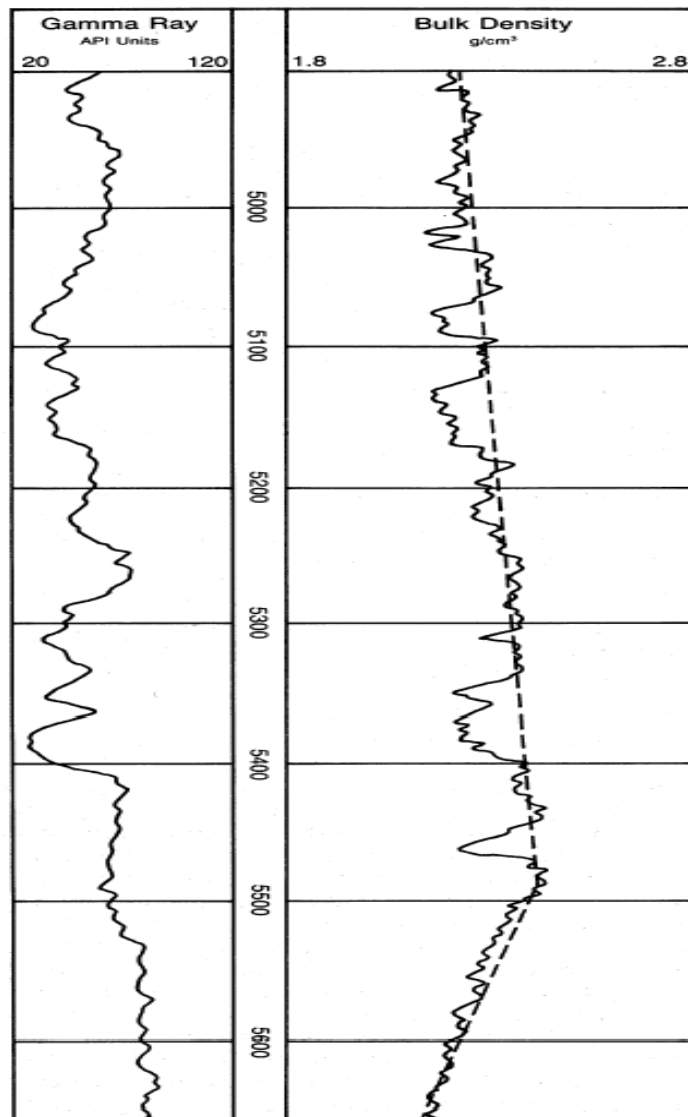
Por

Плотность литологических разностей может меняться в широких пределах



В глинистых коллекторах необходимо учитывать плотность и объем глин для точного определения пористости.

$$(\rho_b)_{corr} = (\rho_b)_{clean} (1 - V_{sh}) + (\rho_b)_{shale} V_{sh}$$



Возможно выделение несогласий

**С помощью density log возможно выделение зон
АВПД**

Применение ГГК-П

На нефтяных и
газовых
месторождениях

для дифференциации разрезов
скважин по плотности
для определения пористости
пород-коллекторов
при цементометрии
эксплуатационных скважин

На угольных и
рудных
месторождениях

Для выделения продуктивных
интервалов

The formation density log

Выводы

Основное назначение – определение пористости

Основной принцип – Комптоновское рассеяние.

Электронная плотность пропорциональна объемной.

Малая глубина исследования (до 13 см)

**Необходимо точно знать плотность матрицы и флюида,
если коллектор глинистый - плотность глин.**

Sandstone 2.65

Limestone 2.71

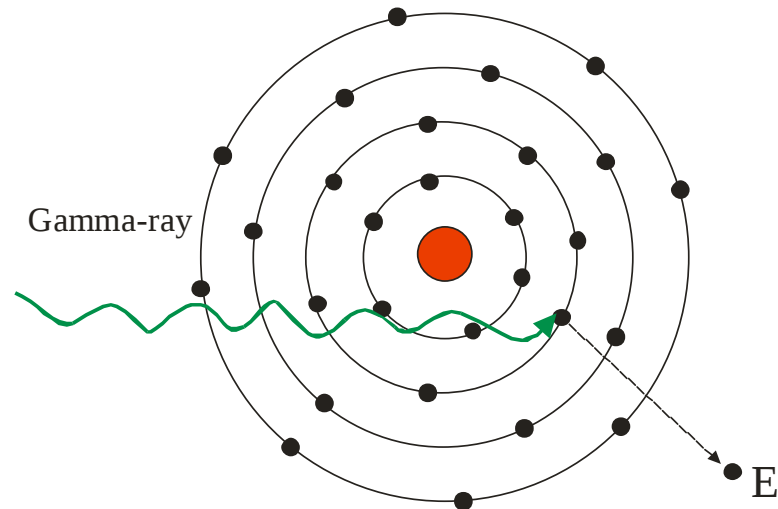
Dolomite 2.87

**Метод позволяет выявлять присутствие газа, АВПД,
стратиграфических несогласий.**

The litho-density log

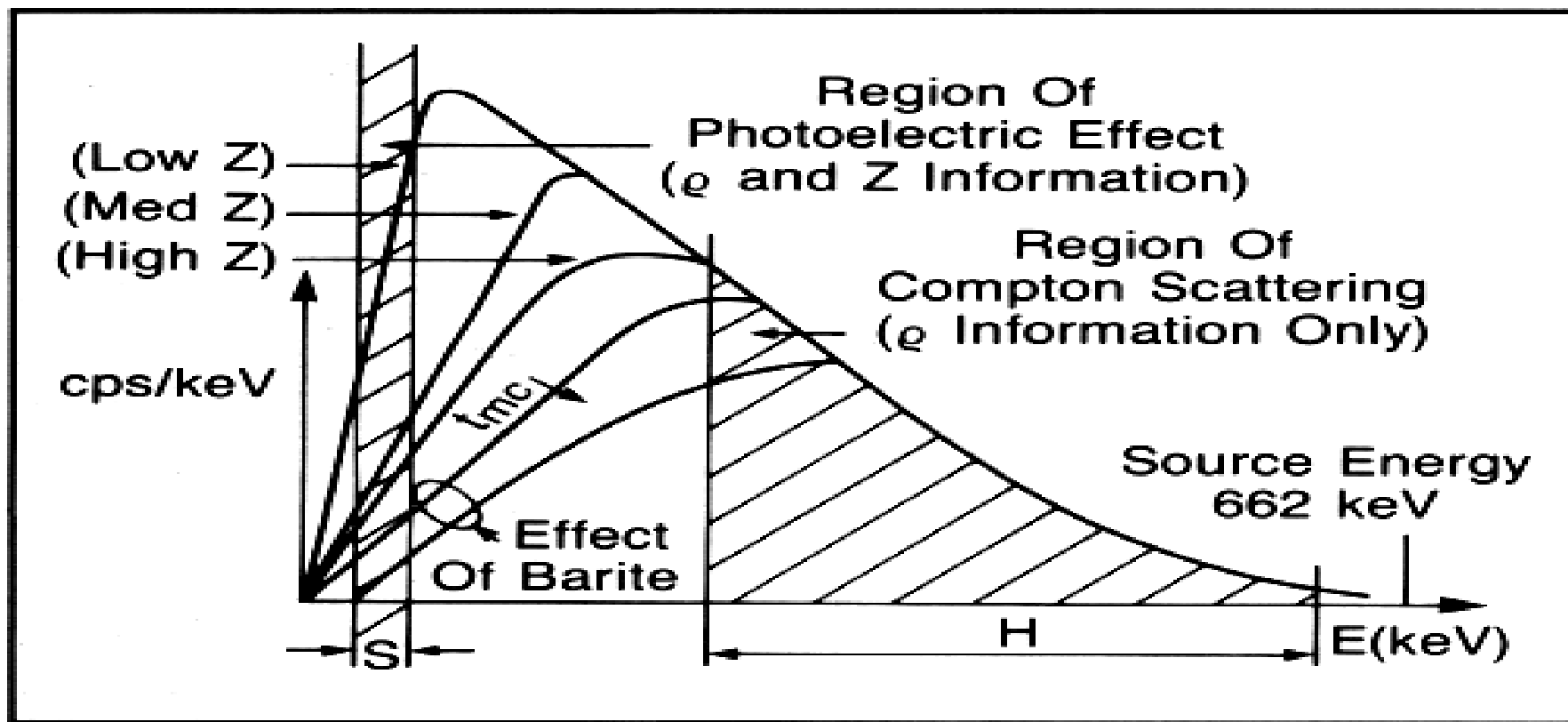
Назначение – определение литологии

Используется прибор аналогичный FDC, - **LDT** (Litho-Density tool)но детекторы более чувствительны и способны распознавать мягкое излучение (0.04-0.1 МэВ)



Основной принцип - фотоэффект

Варианты спектров гамма излучения



В энергетическом окне высоких энергий гамма кванты зависят только от электронной плотности

В окне низких энергий – гамма –кванты зависят как от электронной плотности, так и от фотоэлектрического поглощения.

Вероятность фотоэлектрического поглощения зависит от характеристики сечения взаимодействия σ_e . Она измеряется в барнах $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$

Фотоэлектрический индекс P_e определяется отношением:

$$P_e \equiv \frac{1}{K} \frac{\sigma_e}{Z}$$

P_e индекс фотоэлектрического поглощения

σ_e сечение взаимодействия (барн)

Z - атомный номер (число электронов)

K – коэффициент, зависящий от энергии при которой наблюдается фотоэлектрическое поглощение (безразмерн)

Эмпирическое выражение



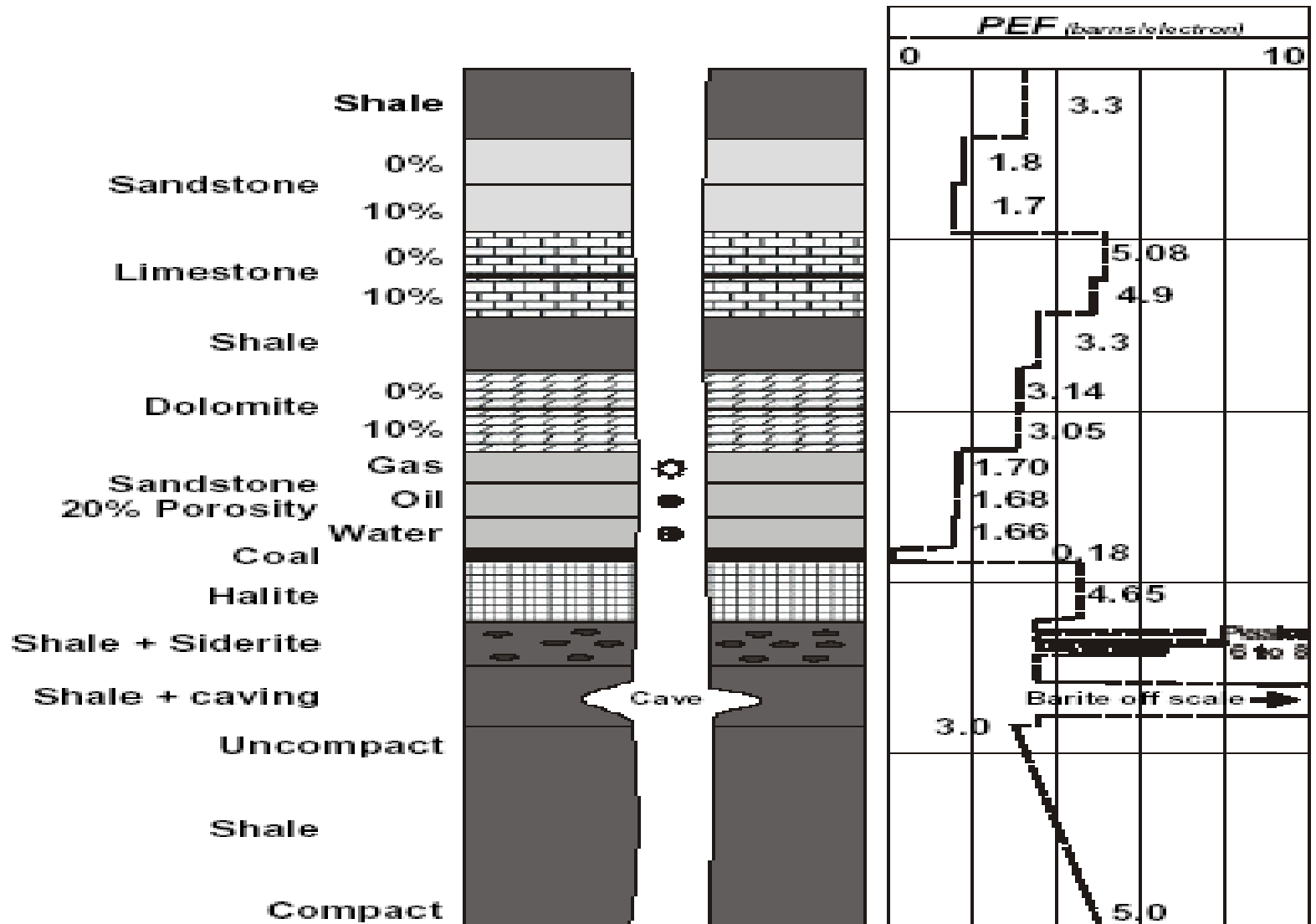
$$P_e = \left(\frac{Z}{10} \right)^{3.6}$$

Для смеси минералов



$$P_e = \frac{\sum A_i, Z_i P_i}{\sum A_i, Z_i}$$

Схематическое изображение показаний P_e для различных литологических разностей.





Литоплотностной каротаж (ЛПК) основан на облучении окружающей среды (пласт и скважина) гамма - квантами от стационарного импульсного источника на основе ^{137}Cs и регистрации двумя сцинтилляционными детекторами плотности потоков гамма - квантов различных энергий, рассеянных горной породой. Непосредственно измеряемые величины - скорости счета в импульсах в минуту (имп/мин) в интегральных и энергетических окнах. Основные расчетные величины - объемная плотность пород δ в г/см^3 , эффективный атомный номер породы $Z_{\text{эф}}$. Параметр $Z_{\text{эф}}$ зависит от литологии, а объемная плотность δ - от пористости и литологии.

ЛПК реализуется каротажным зондом ЛПК.

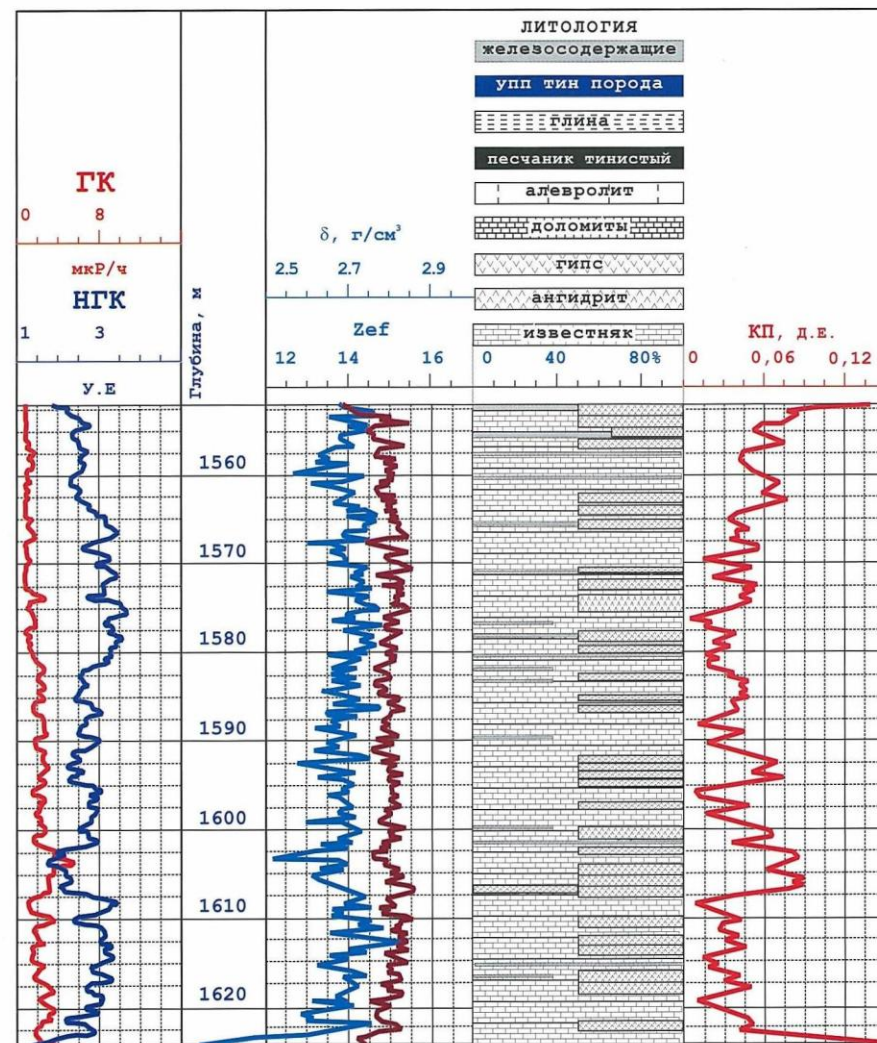
Применение:

- оценка литологии;
- оценка пористости;
- выделение газоносных пластов.

Технические характеристики:

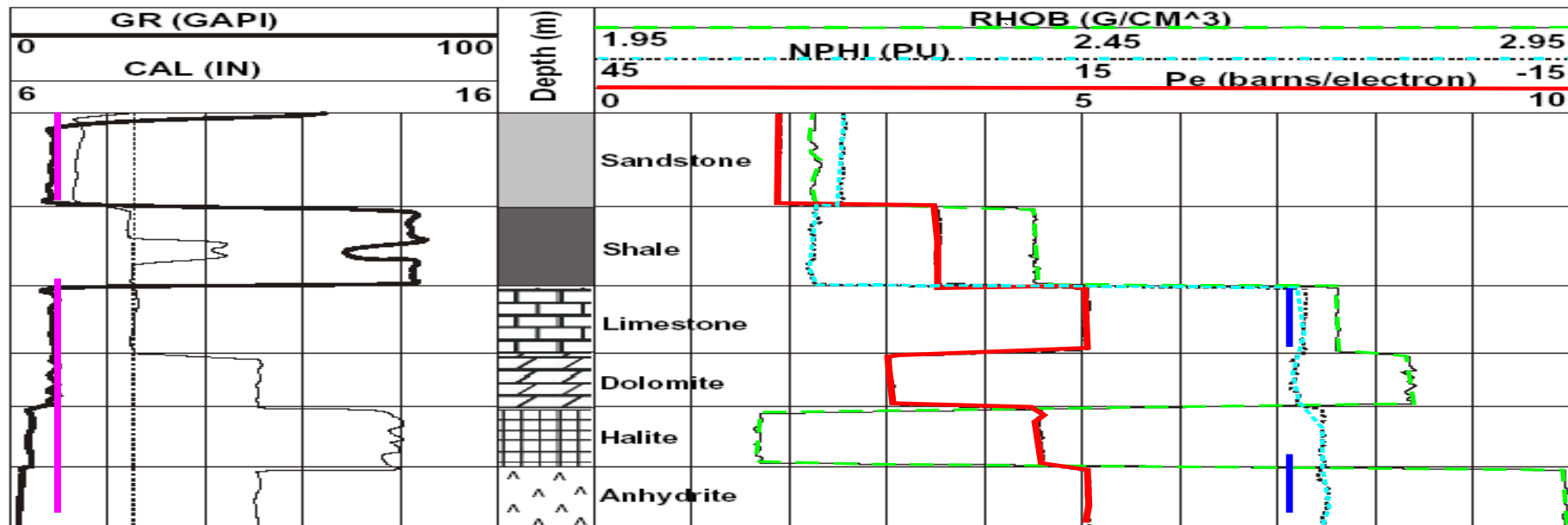
- Максимальное гидростатическое давление	60 МПа
- Максимальная глубина исследуемых скважин	5000 м
- Диаметр исследуемой скважины	150-270мм
- Диапазон измерения плотности	2-3,0 г/см^3
- Диапазон измерения эффективного атомного номера породы $Z_{\text{эф}}$	10-20 барн/эл.

ЛИТОПЛОТНОСТНОЙ КАРОТАЖ (ЛПК)



Типичное представление показаний приборов

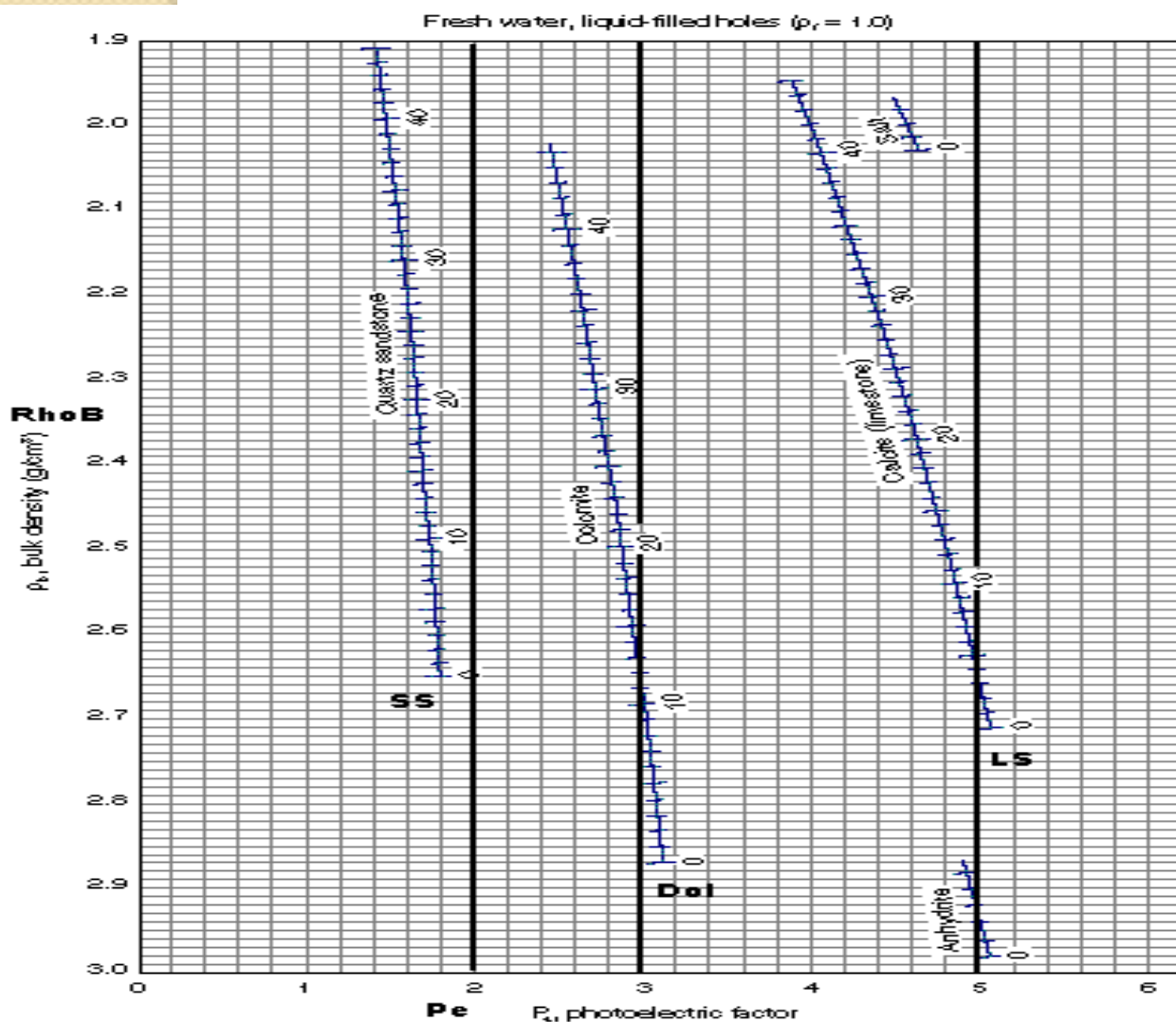
LDT-CNL-GR



$$U = Pe \rho_e$$

U – объемный индекс фотоэлектрического поглощения.
 – чувствителен как к литологии так и к электронной плотности. Часто используется для характеристики свойств пород

Определение пористости и литологии из Litho Density Log



Р_е слабо уменьшается с увеличением пористости. Ошибка определения Р_е составляет около 5%. Чем больше значение Р_е тем больше абсолютная ошибка. Барит в буровом растворе имеет большое значение Р_е порядка 237! Небольшое количество барита в буровом растворе сдвинет Р_е в сторону больших значений, особенно в зонах с глинистой коркой. Это может быть скорректировано с помощью палетки.

Выводы

The litho-density log

- 1) Назначение – определение пористости и литологии.
- 2) Принцип – фотоэлектрическое рассеяние.
- 3) Ре слабо чувствительно к пористости, но чувствительно к литологии

Sandstone – 1.8

Dolomite – 3

Limestone – 5

- 4) Добавки барита в буровой раствор не допускаются

Влияние скважины для плотностного и селективного каротажа сказывается в большей степени, чем для других методов радиоактивного каротажа.

В обсаженной скважине ГГК-П применяют при

- цементометрии эксплуатационных скважин
- для определения высоты подъема и наличия пустот в цементном камне, поскольку плотность цементного камня 2,2 г/см³, а жидкости, заполняющей пустоты в нем, 1,0-1,2 г/см³
- при дефектометрии обсадных колонн (для определения качества обсадных колонн -трещины, изъёмы, парафиновые и глинисты пробки и т.д)
- определения плотности жидкости в скважине

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность гамма-каротажа?
2. Назовите основные естественные радиоактивные элементы изучаемые при ГК. Какие магматические породы и почему обладают повышенной радиоактивностью? Какие осадочные?
3. Качественный анализ и количественная интерпретация ГК.
4. Какой способ используют для определения границ пластов большой мощности по диаграммам ГК?
5. Как определяют по ГК содержание радиоактивных элементов?
6. На каких физических явлениях основан плотностной гамма-гамма-картаж (ГГК-П)
7. Принцип регистрации сигналов в ГГК. Как устроен скважинный прибор ГГК?
8. Модификации метода ГГК
9. Какие задачи решаются с помощью ГГК-П на нефтяных и рудных месторождениях?
10. Какие параметры г.п. можно вычислить по кривым ГГК