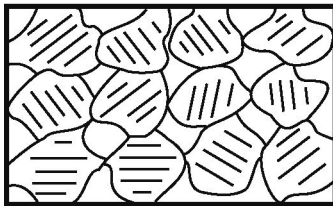


# Электрический каротаж на постоянном токе

## Удельное электрическое сопротивление

$R = \rho \frac{l}{S}$ , где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление;  
 $l$  – длина проводника;  $S$  – его поперечное сечение.

$\rho = R \frac{S}{l}$  [Ом м]      Изменяется от долей до десятков тысяч Ом м



Горная порода состоит из минерального скелета и пустот (пор) заполненных флюидом (вода, газ, нефть или их смеси)



## Сопротивление минерального скелета

Петрофиз. группа	Проводники	Полупроводники	Диэлектрики
$\rho$ , Омм	$<10^{-6}$	$10^{-6}-10^8$	$>10^8$
Носители тока	Электроны	Электроны (дырки)	Ионы
Зависимость от температуры	прямая	обратная	обратная
Группы минералов	Самородные металлы	Сульфиды и оксиды металлов, графит, антрацит	Остальные минералы

*У большинства горных пород минеральный скелет является диэлектриком*

## Сопротивление водных растворов

Сопротивление воды зависит от

- концентрации солей;
- химического состава;
- температуры.

*УЭС растворов различных солей  
при концентрации 10 г/л и  $t=18^{\circ}\text{C}$*

*NaCl 0.625 Ом*

*KCl 0.641 Ом*

*CaCl<sub>2</sub> 0.626 Ом*

*MgCl<sub>2</sub> 0.580 Ом*

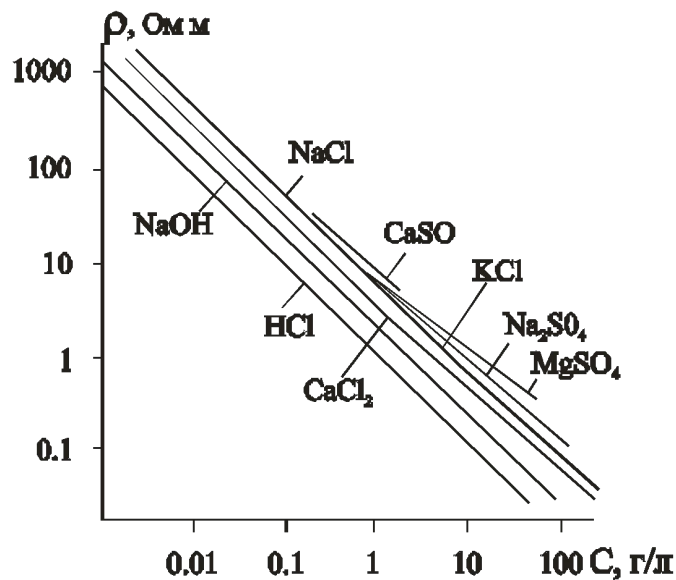
$C_{\text{NaCl}}$ [г/л]	$\rho$ [Омм]
0	$20 \cdot 10^4$
0,01	516
0,1	52,5
1,0	5,5
10,0	0,625
50,0	0,149
100,0	0,08

*При увеличении температуры УЭС  
снижается. Это связано с  
увеличением подвижности ионов  
и уменьшением вязкости.*

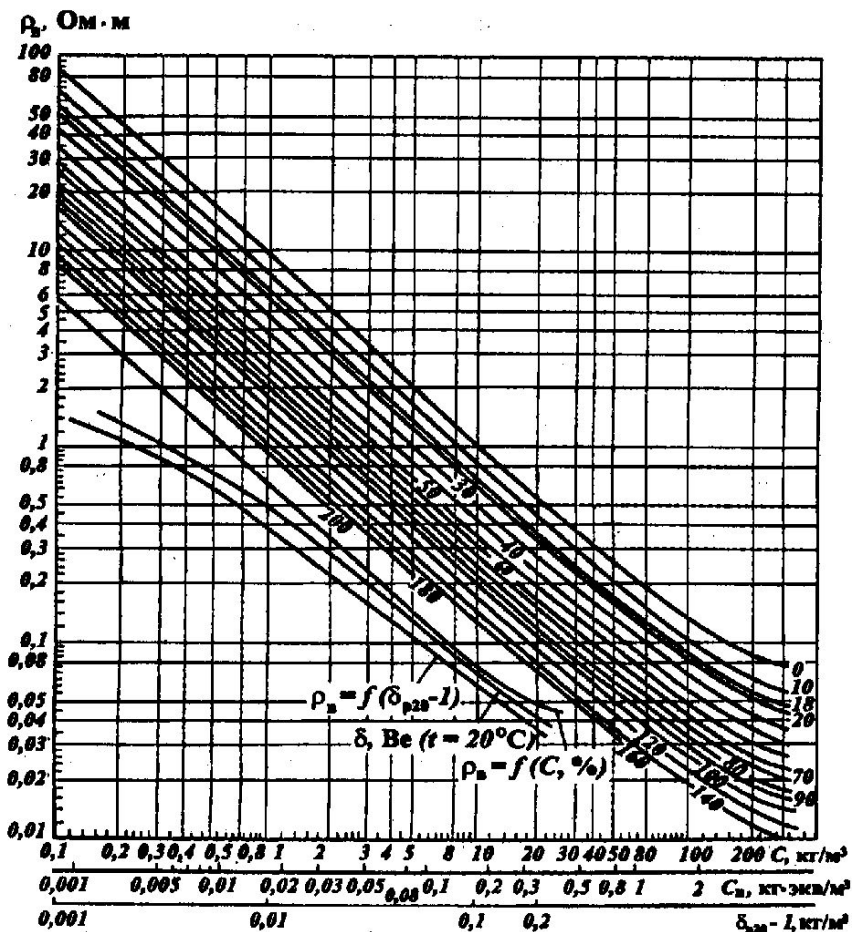
$$\Delta\rho = -\alpha\rho\Delta t,$$

*где  $\alpha = 0.0236$  – температурный  
коэффициент*

Зависимость удельного  
электрического сопротивления  
водных растворов солей  
от концентрации раствора (по В.  
Н. Дахнову)



Зависимость удельного  
электрического сопротивления  
раствора NaCl от температуры  
и концентрации



*Сопротивление минерального скелета  $> 10^8$  Омм*

*Сопротивление пластовой воды – доли Омм*

*Сопротивление горных пород – от долей до первых тысяч Омм*

*Следовательно, сопротивление горных пород в основном зависит от содержания токопроводящей воды, т.е. от пористости*

$$P = \frac{\rho_{вп}}{\rho_v}$$

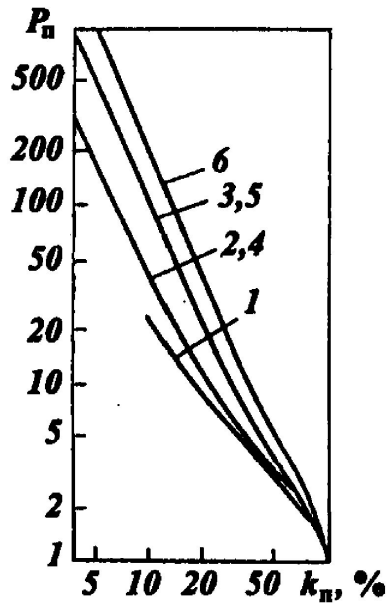
$\rho_{вп}$  - сопротивление водяного пласта  
 $\rho_v$  - сопротивление пластовой воды

$$P = \frac{a}{K_n^b}$$

$a$ - литологический коэффициент (0,9 – 1,2)  
 $b$  – коэффициент цементации (1,3 – для песков  
2,3 – для сцементированных пород)

**$P$  – параметр пористости**

$$K_n = \sqrt{1/P}$$



*1 – пески*

*2 - песчаник слабосцементированный*

*3 - песчаник среднесцементированный*

*4 - известняки глинистые и ракушечные*

*5 – известняки и доломиты среднесцементированные*

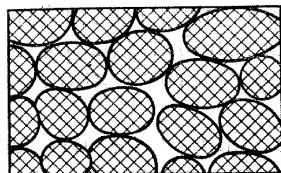
*6 – известняки и доломиты плотные*

***Чем можно объяснить неоднозначную связь между коэффициентом пористости и  $P$  – параметром?***

*На величину удельного электрического сопротивления оказывает существенное влияние тип пористости и ее структура*

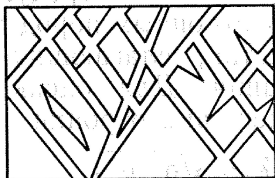
*Для постоянной пористости*

*Гранулярная пористость*



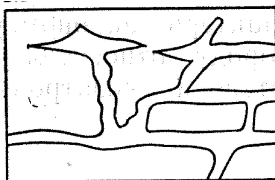
*Чем более окатанные зерна, тем меньше сопротивление*

*Трещинная пористость*

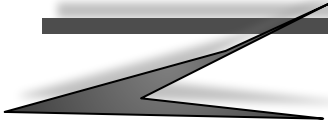


*Чем тоньше трещины, тем меньше сопротивление*

*Трещинно-кавернозная пористость*



*Наличие “тупиковых” пор обуславливает наибольшее сопротивление*



*При повышении давления удельное сопротивление увеличивается.  
Это связано с уменьшением пористости и увеличением  
извилистости поровых каналов.*

*Для слоистых горных пород удельное сопротивление различно в  
разных направлениях. Коэффициент анизотропии определяется из  
выражения*

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}} \quad \text{где } \rho_{\perp} \text{ и } \rho_{\parallel} \text{ - удельные сопротивления в}$$

*двух ортогональных направлениях*

*Для анизотропных сред вычисляют среднее удельное электрическое  
сопротивление*

$$\rho_{cp} = \sqrt{\rho_{\perp} * \rho_{\parallel}}$$



*При замещении воды нефтью или газом удельное электрическое сопротивление увеличивается*

$$P_{нг} = \frac{\rho_{нп}}{\rho_{вп}} = \frac{\rho_{нп}}{P_n \rho_v},$$

где  $P_{нг}$  – коэффициент увеличения сопротивления (параметр насыщения),  
 $\rho_{нп}$  – сопротивление нефтегазового пласта,  
 $\rho_{вп}$  – сопротивление водяного пласта,  
 $P_n$  – параметр пористости.

$$P_{нг} = \frac{a}{k_v^n},$$

где  $a$  – коэффициент ( $a = 1 \div 1,3$ , по умолчанию  $a = 1$ ),  
 $n$  – показатель смачиваемости (по умолчанию  $n = 2$ ),  
 $k_v$  – коэффициент водонасыщенности.

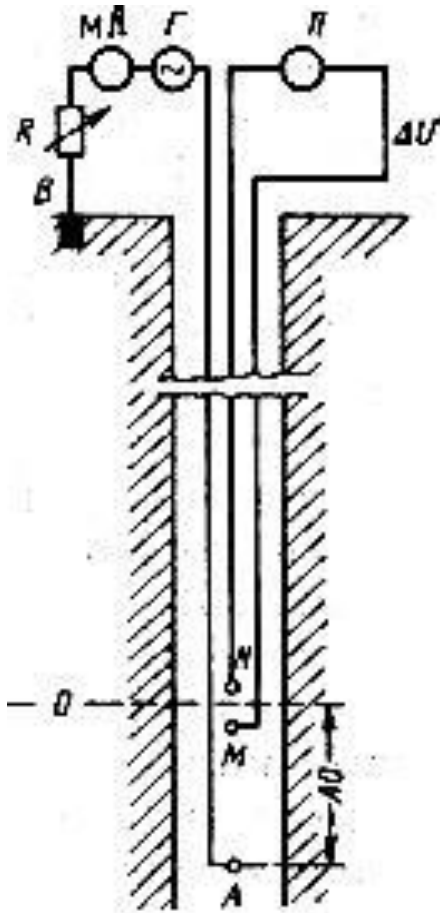
$$K_{нг} + K_v = 1,$$

$$K_{нг} = 1 - \sqrt{\frac{1}{P_{нг}}}.$$



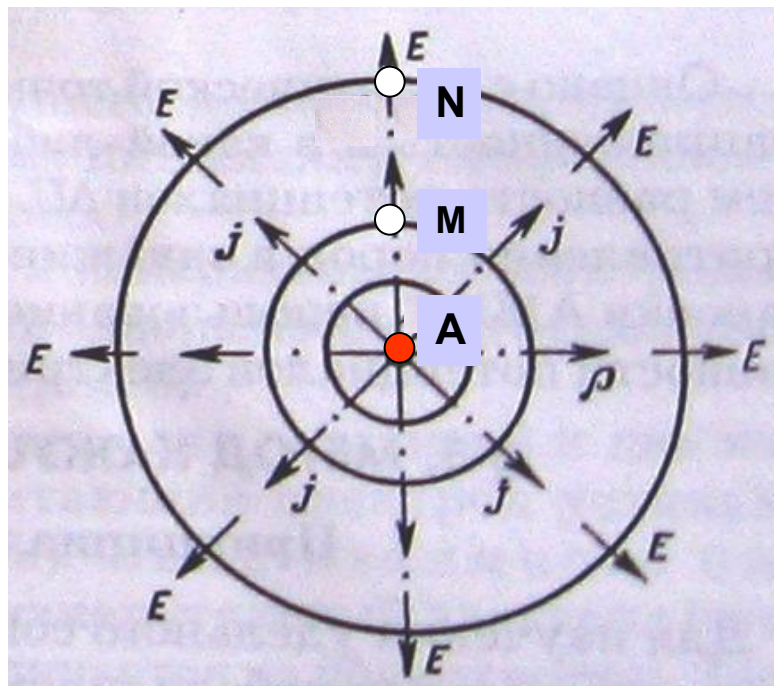
*Метод КС*  
*(каротаж сопротивлений)*

## Установка для измерения УЭС



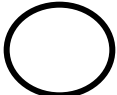
- A, B* – питающие электроды;  
*M, N* – приемные (измерительные) электроды;  
*Г* – генератор;  
*R* – переменное сопротивление;  
*МА* – прибор для измерения силы тока;  
*O* – точка записи;  
*AO* – длина зонда.

## Поле точечного источника в однородной среде



*A – питающий электрод;*

*M, N – измерительные электроды*

 - *линии равного потенциала;*

 - *токовые линии.*

$$E = -\text{grad}U;$$

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma E;$$

$$\text{div}j = 0,$$

*где  $U, E$  - потенциал и напряженность электрического поля в данной точке;  
 $j$  – плотность тока;  $\rho, \sigma$  – удельное электрическое сопротивление и  
удельная электропроводность среды.*

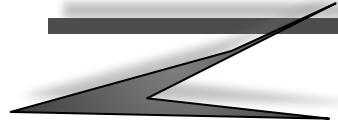

$$j = \frac{I}{4\pi \cdot r^2}, \quad dU = -\frac{\rho I dr}{4\pi r^2},$$

$$U = \int dU = -\frac{\rho I}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{4\pi \cdot r} + C.$$

$$U_M = \frac{\rho I}{4\pi \cdot \overline{AM}}, \quad U_N = \frac{\rho I}{4\pi \cdot \overline{AN}}.$$

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{\overline{MN}}{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}.$$

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad K = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}}.$$



$\rho = K \frac{\Delta U}{I}$  – удельное электрическое сопротивление  
в однородной изотропной среде.

$\rho_k = K \frac{\Delta U}{I}$  – кажущееся удельное электрическое  
сопротивление в неоднородной среде.

$$\rho_k = F[\rho_n, h_n, \rho_{вм}, \rho_c, d_c, \rho_{зн}, D, L]$$

$\rho_n$  - удельное сопротивление пласта;

$h_n$  - мощность пласта;

$\rho_{вм}$  - удельное сопротивление вмещающих пород;

$\rho_c$  - удельное сопротивление бурового раствора;

$d_c$  - диаметр скважины;

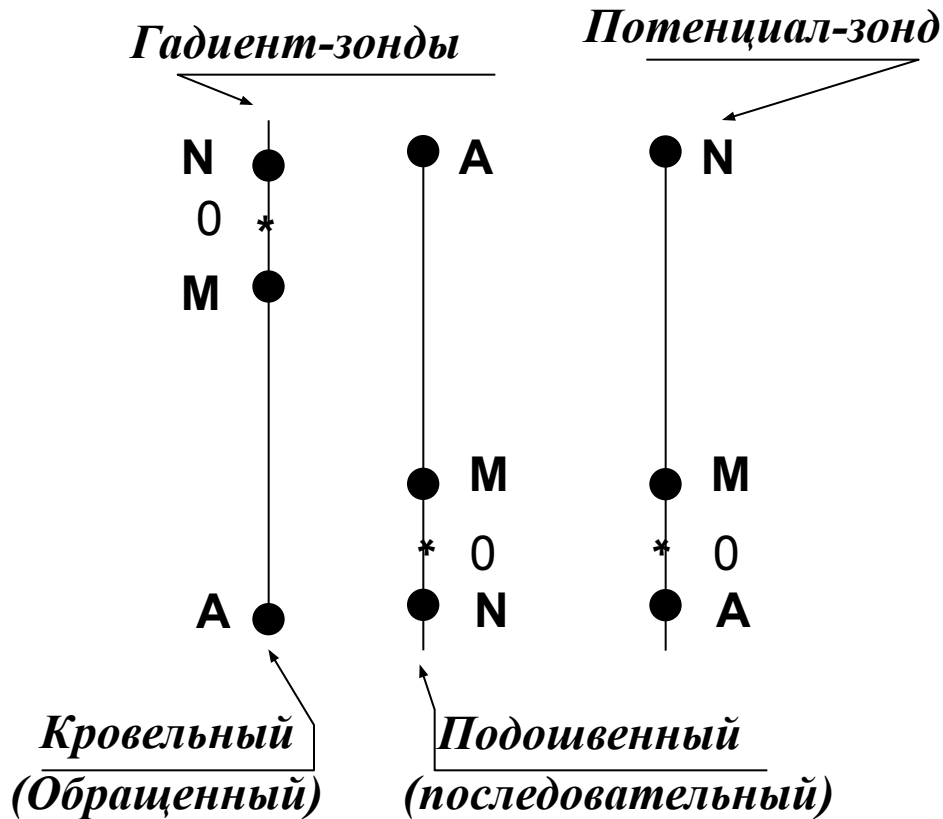
$\rho_{зн}$  - удельное сопротивление зоны проникновения;

$D$  – диаметр зоны проникновения;

$L$  – длина зонда.

# Метод КС

## Типы зондов



Зонд записывается сверху вниз – А2М0,5N

### Градент-зонд

$$MN < AM$$

AO – длина зонда.

при  $MN \rightarrow 0$

$$\rho_k = 4\pi(AO)^2 \frac{E}{I}$$

### Потенциал-зонд

$$AM < MN$$

AM – длина зонда.

при  $N \rightarrow \infty$

$$\rho_k = 4\pi AM \frac{U}{I}$$

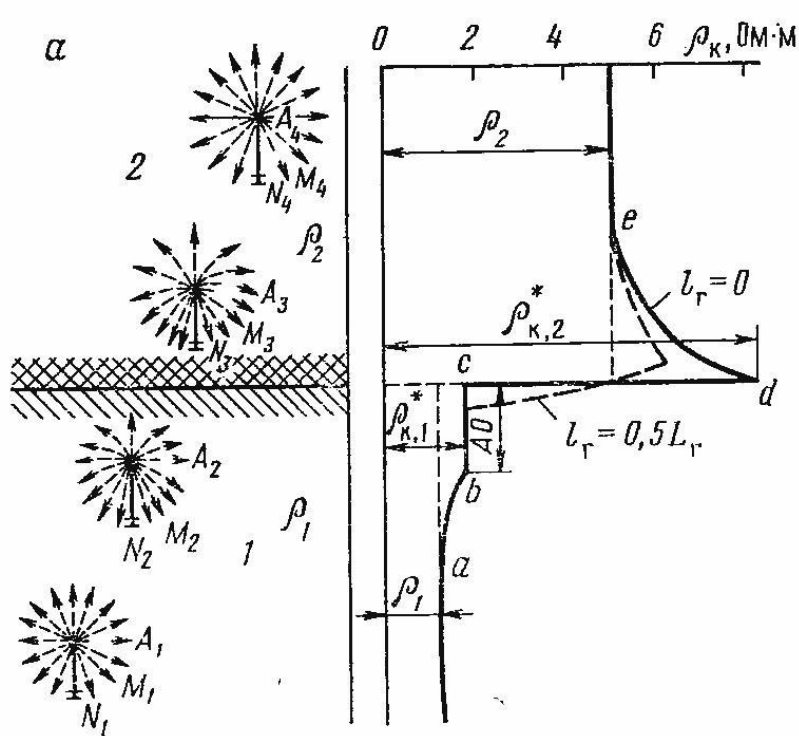
**Радиус исследования:**

Градент-зонд  $\approx AO$

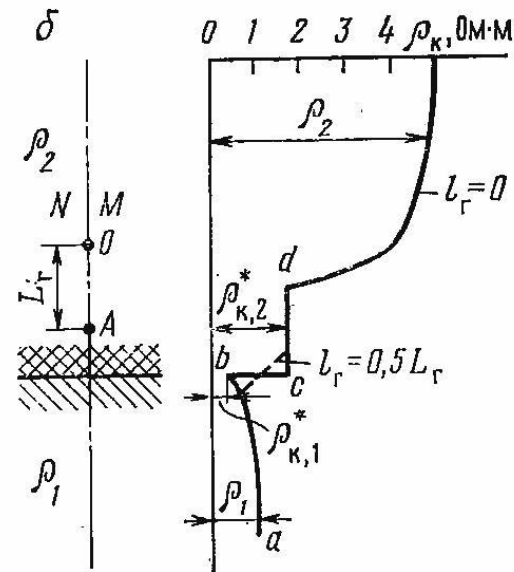
Потенциал-зонд  $\approx 2AM$

# Кривые КС

## Два однородных и изотропных полупространства

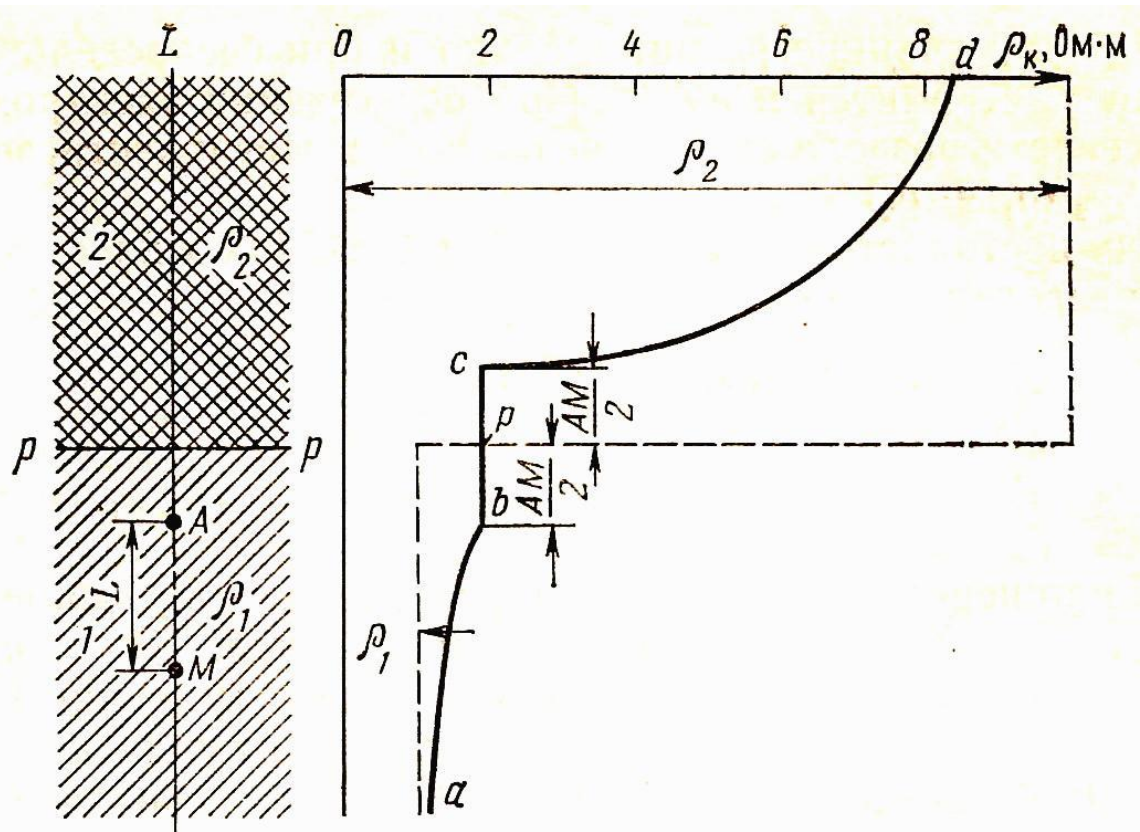


**последовательный (подошвенный)  
градиент-зонд**



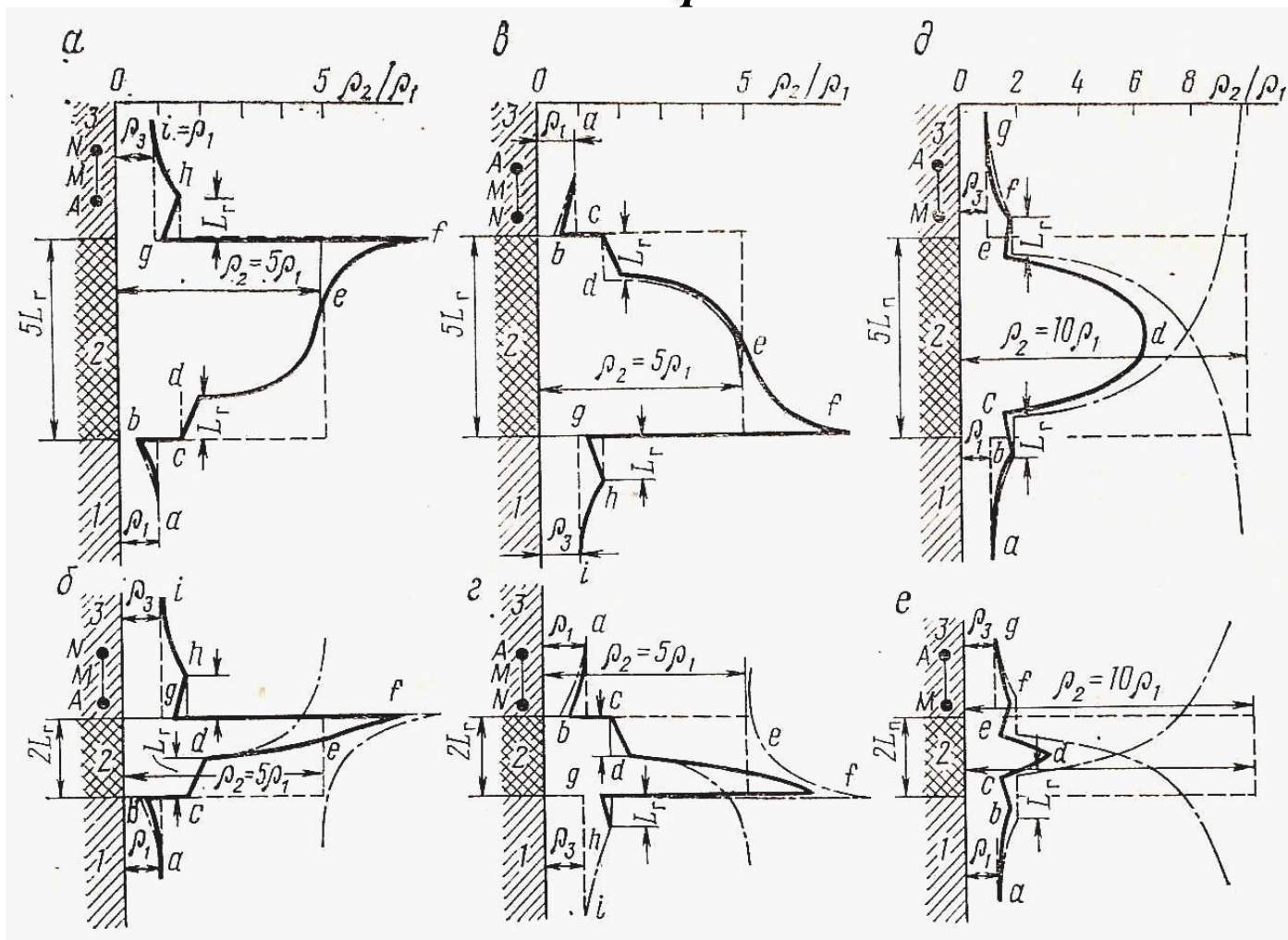
**обращенный (кровельный)  
градиент-зонд**





*потенциал-зонд*

# Кривые КС для мощного пласта высокого сопротивления

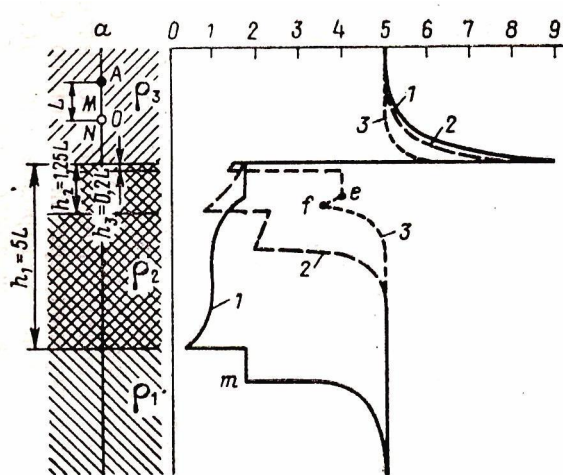


**кровельный  
градиент-зонд**

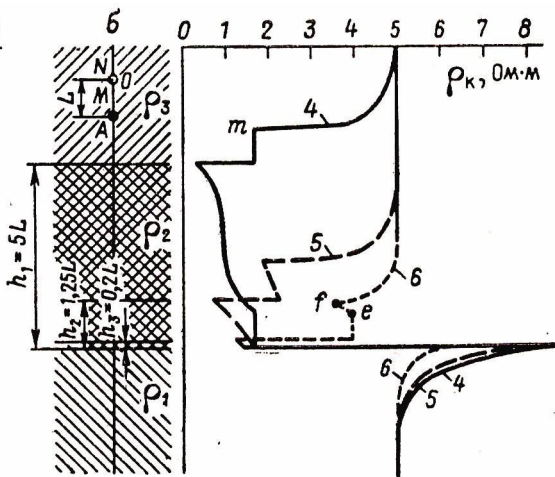
**подшвенный  
градиент-зонд**

**потенциал  
-зонд**

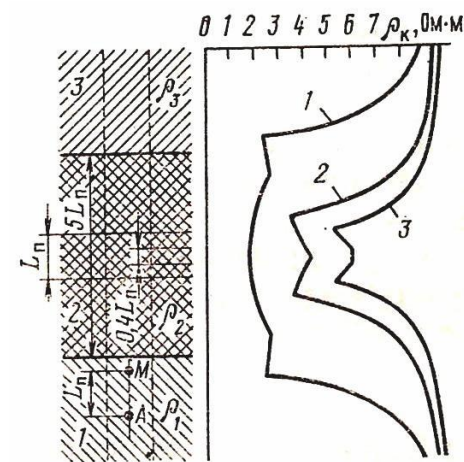
## Кривые КС для мощных пластов низкого сопротивления



*крювельный  
градиент-зонд*

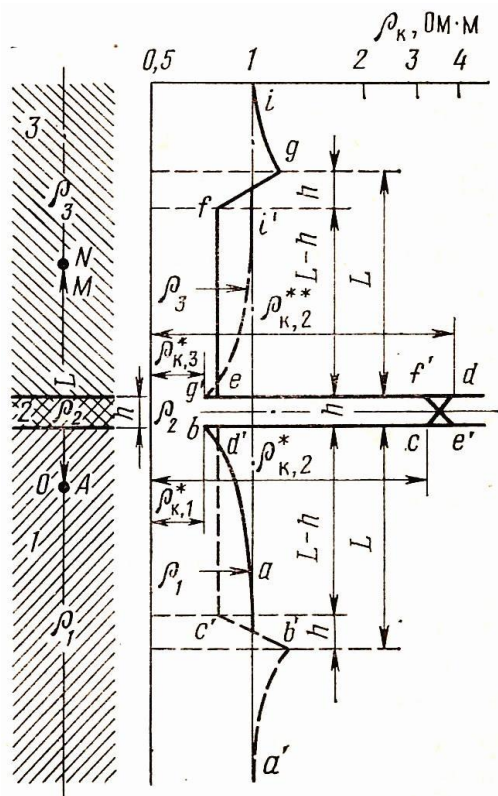


*подошвенный  
градиент-зонд*

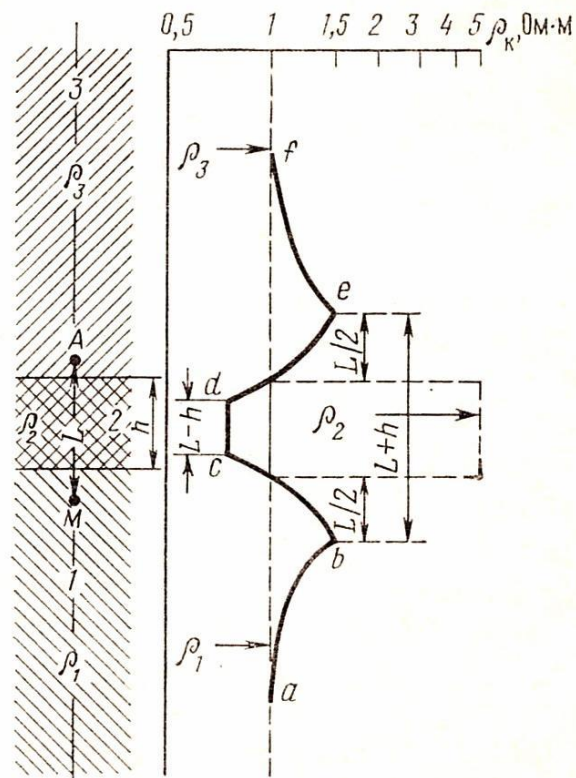


*потенциал  
-зонд*

# Кривые КС для тонкого пласта



градиент-зонд



потенциал-зонд

# Правила определения границ

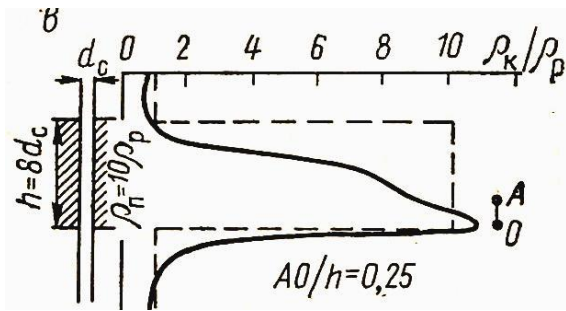
градиент-зонд

потенциал-зонд

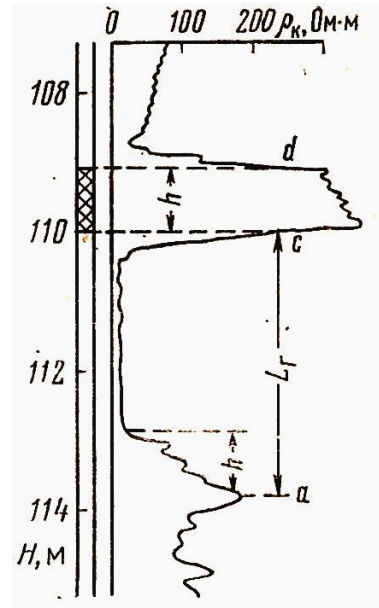
## Мощный пласт

подошвенный: подошва  $h_n = h_{max} + MN/2$   
 кровля  $h_k = h_{min} + MN/2$

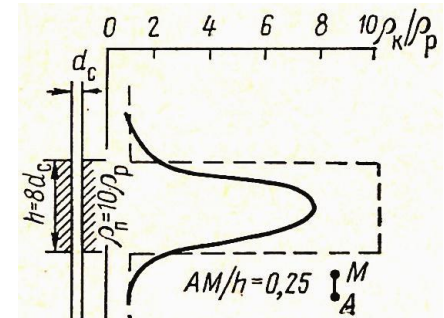
кровельный: подошва  $h_n = h_{min} - MN/2$   
 кровля  $h_k = h_{max} - MN/2$

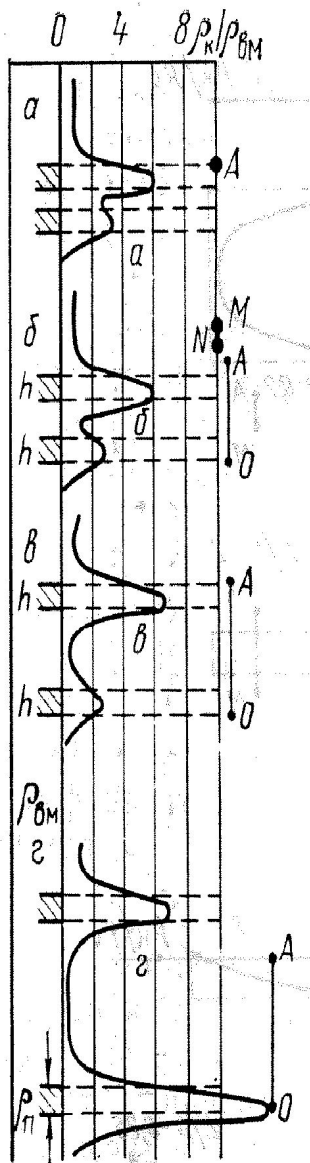


## Тонкий пласт



## Мощный пласт



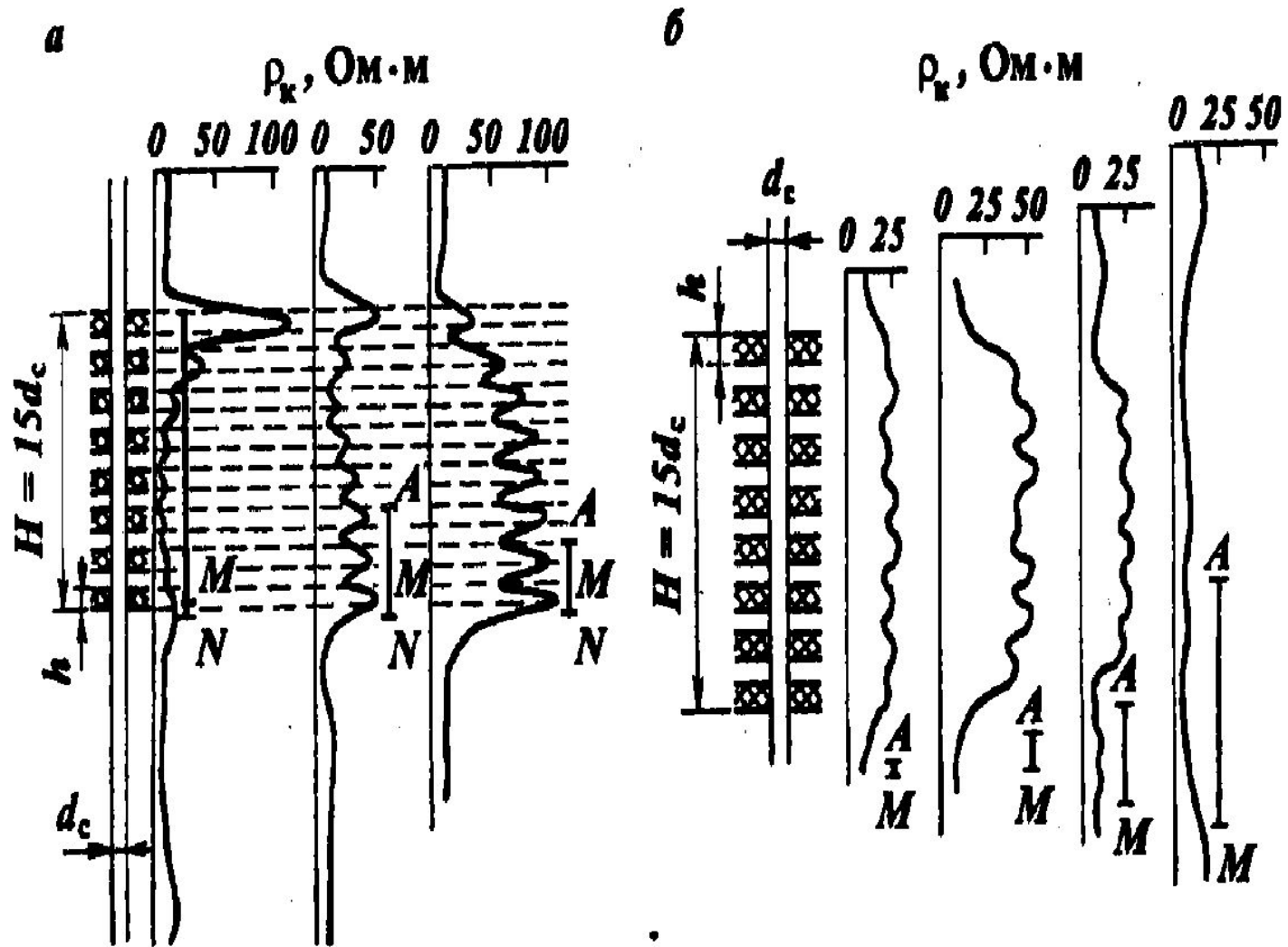


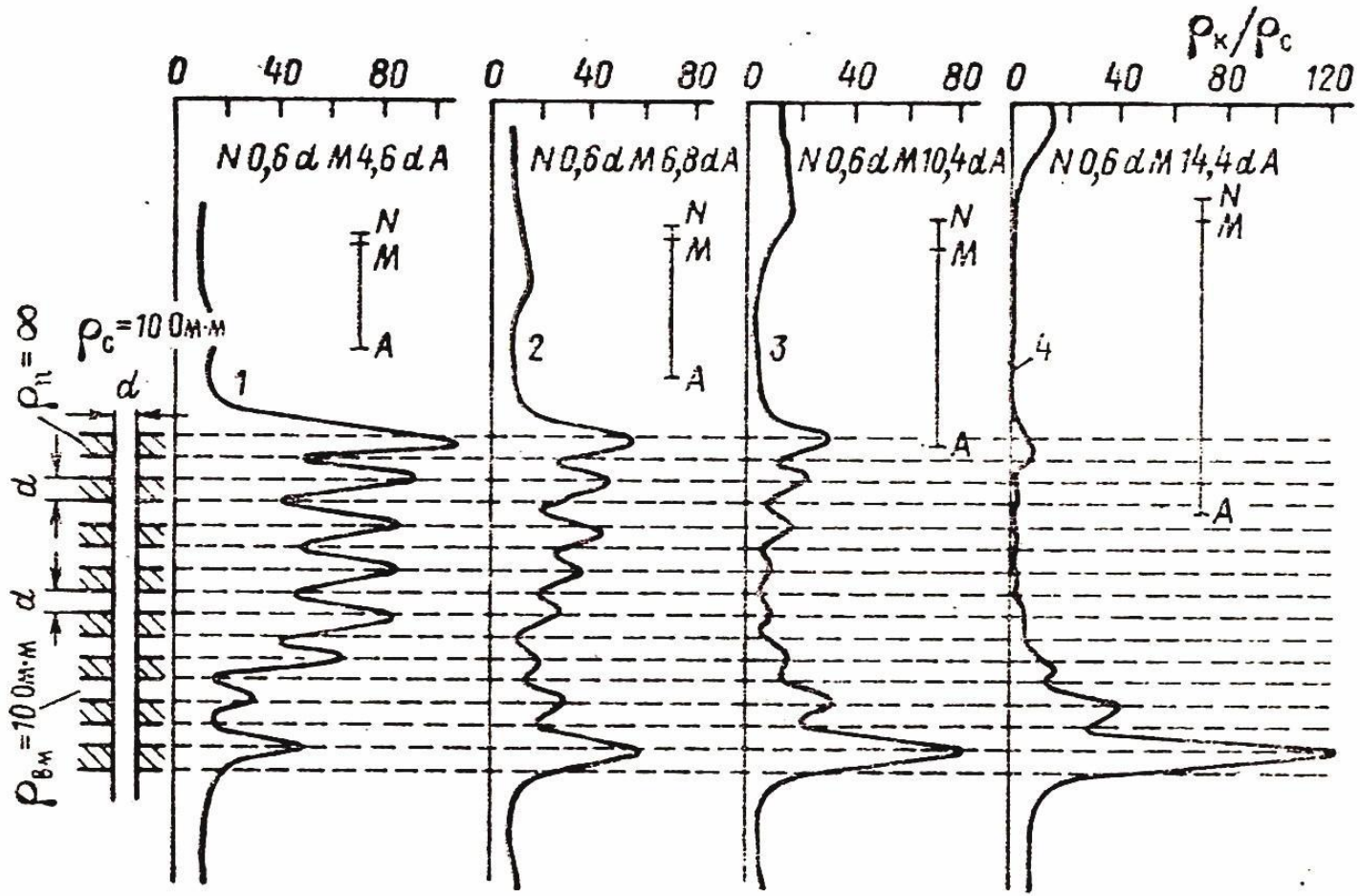
*Кривые  $\rho_k$  для двух пластов высокого сопротивления, мощность которых  $h$  меньше длины подошвенного градиент-зонда.*

*а, б и в – занижающее экранирование*

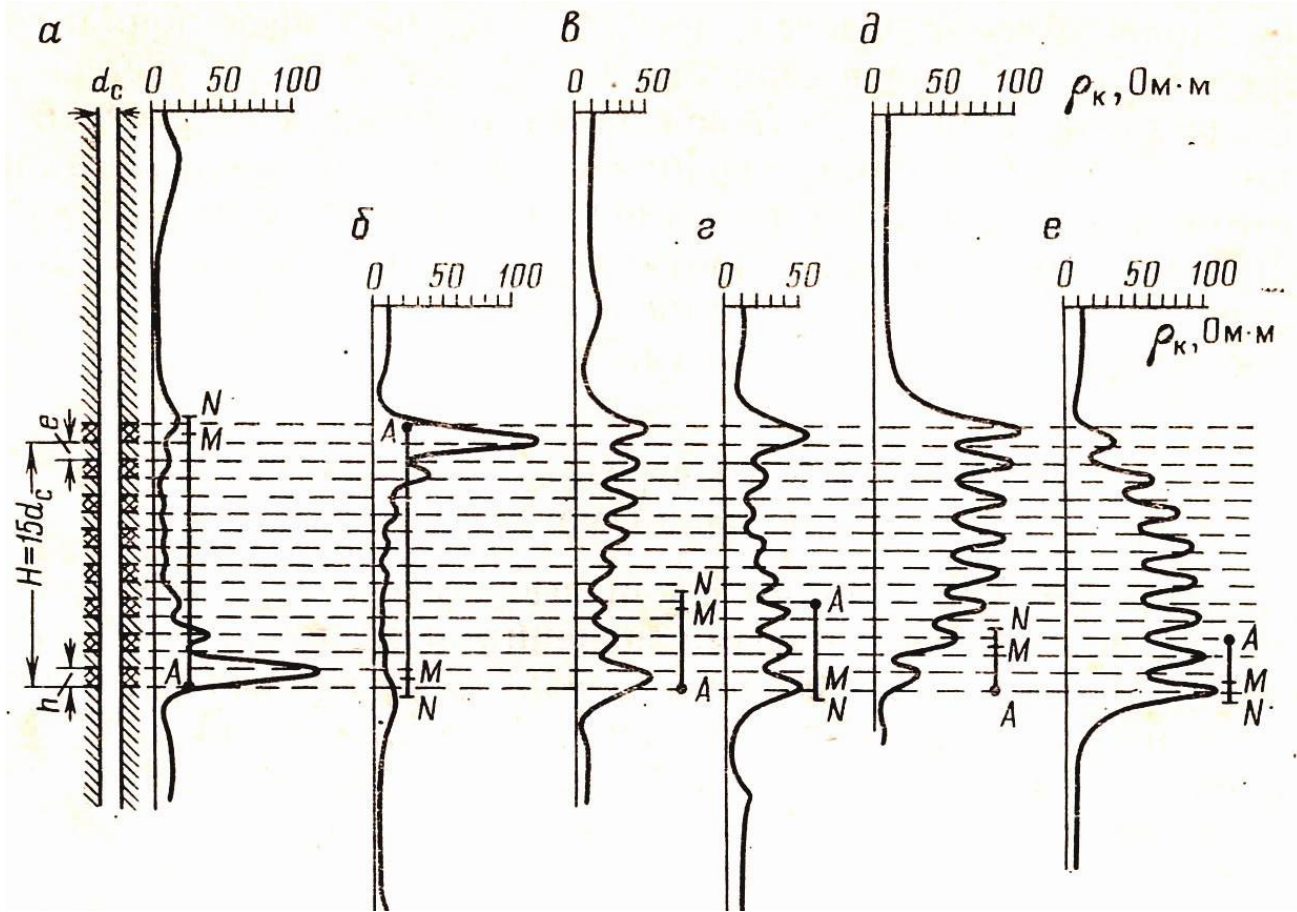
*г – завышающее экранирование*

При исследовании переслаивающихся тонких пластов высокого и низкого сопротивления экранный эффект приводит к искажению не только величины УЭС, но и самой формы кривой.

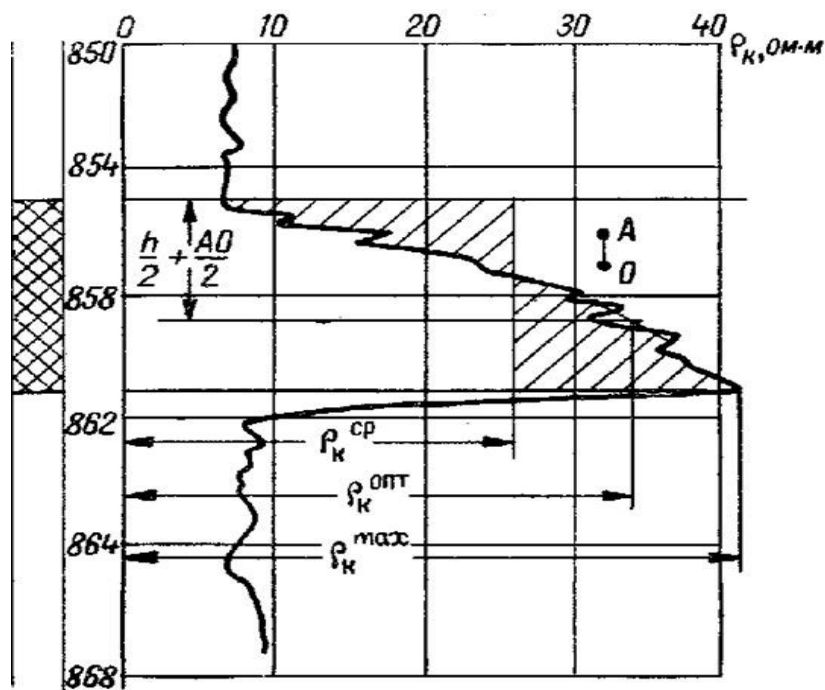




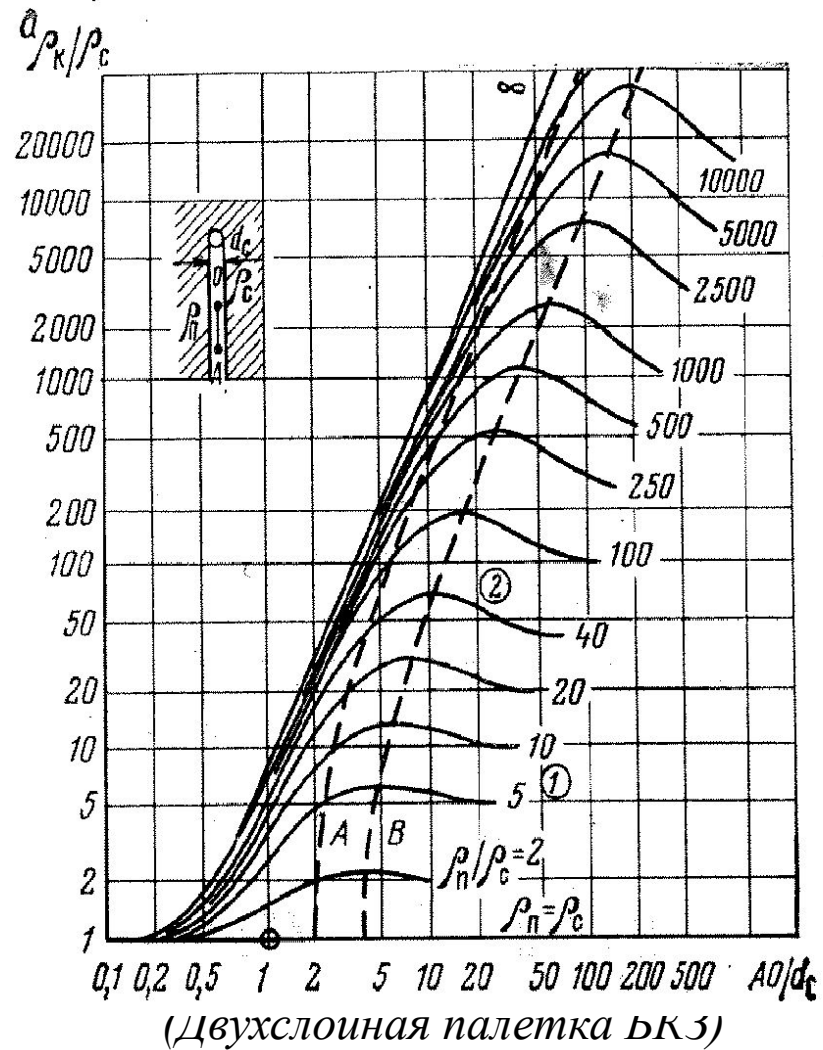


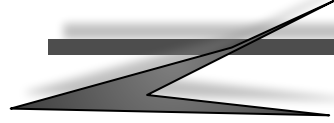


Кажущееся удельное сопротивление  $\rho_k$  различно против разных точек пласта. В качестве существенных наиболее характерных значений УЭС принято считать среднее  $\rho_{k, \text{ср}}$ , максимальное  $\rho_{k, \text{max}}$  или минимальное  $\rho_{k, \text{min}}$  и оптимальное  $\rho_{k, \text{опт}}$



Определить истинное сопротивление горных пород  $\rho_n$  можно с помощью специальных палеток





*Метод БКЗ*

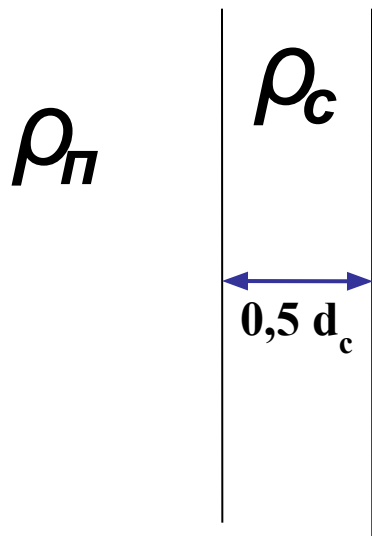
*(Боковое каротажное зондирование)*

## Определение истинного сопротивления пласта

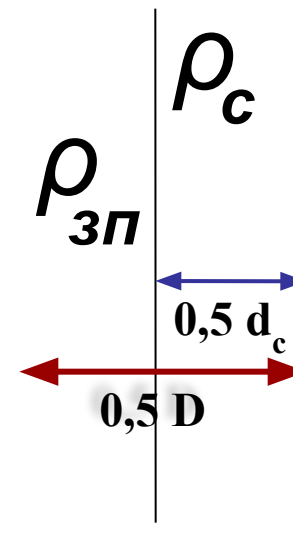
БКЗ (БЭЗ) – боковое каротажное зондирование –  
*измерение  $\rho_k$  однотипными зондами разной длины*

- |                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|
| 1) А 0.4 М 0.1 N | 3) А 2.0 М 0.5 N | 5) А 6.0 М 1.0 N |
| 2) А 1.0 М 0.1 N | 4) А 4.0 М 0.5 N | 6) N 0.5 М 2.0 А |

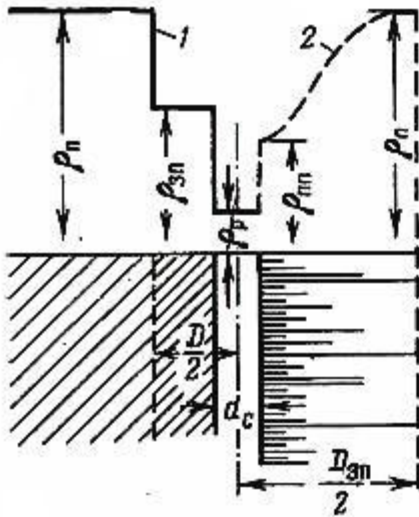
Двухслойный разрез



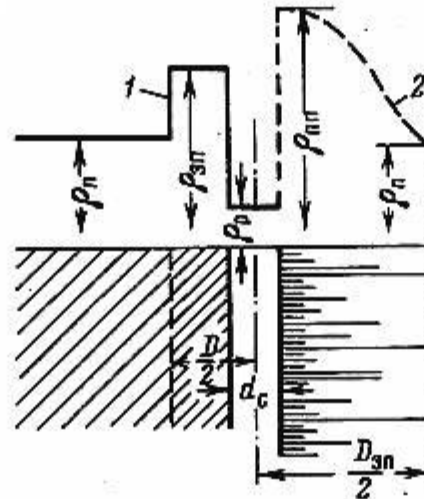
Трехслойный разрез



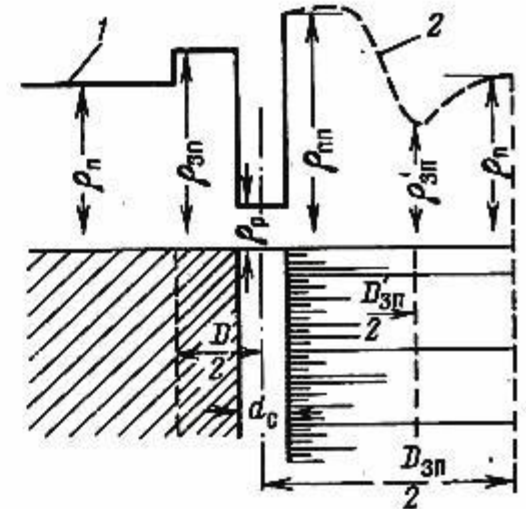
## Зона проникновения



*Понижающее  
проникновение*

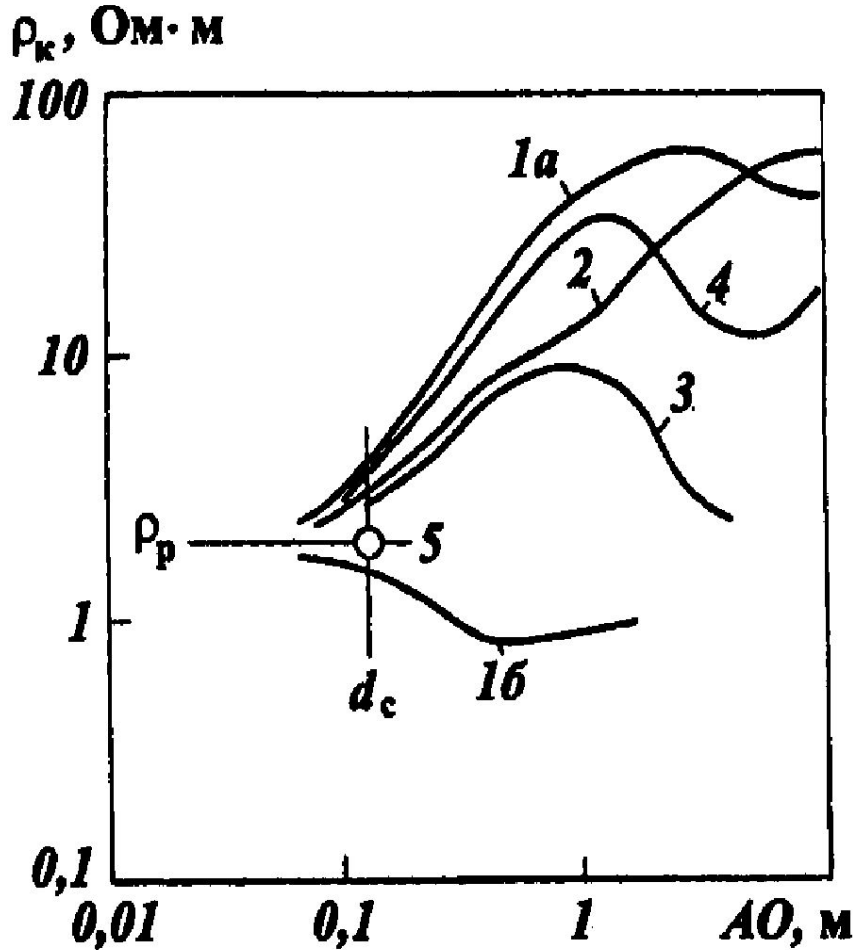


*Повышающее  
проникновение*



*Повышающее  
проникновение  
нефтяной пласт*

## Типы кривых БКЗ



*1a* —  $\rho_c < \rho_n$

*1б* —  $\rho_c > \rho_n$

*2* —  $\rho_c < \rho_{zn} < \rho_n$

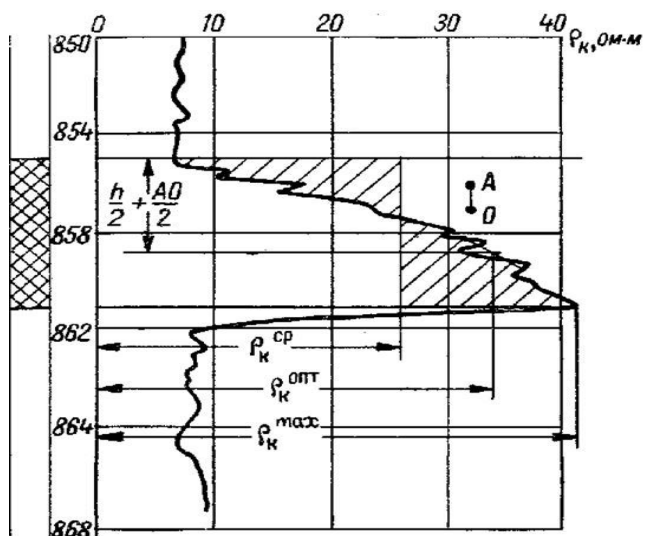
*3* —  $\rho_c < \rho_{zn} > \rho_n$

*4* — тонкий пласт высокого  
сопротивления

*5* — крест кривой

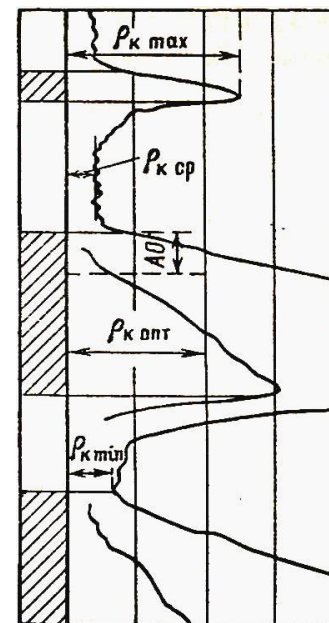
## Обработка данных БКЗ

1. Расчленение разреза;
2. Снятие существенных значений и построение фактических кривых БКЗ;
3. Сравнение фактических кривых БКЗ с теоретическими и вычисление искомых параметров.



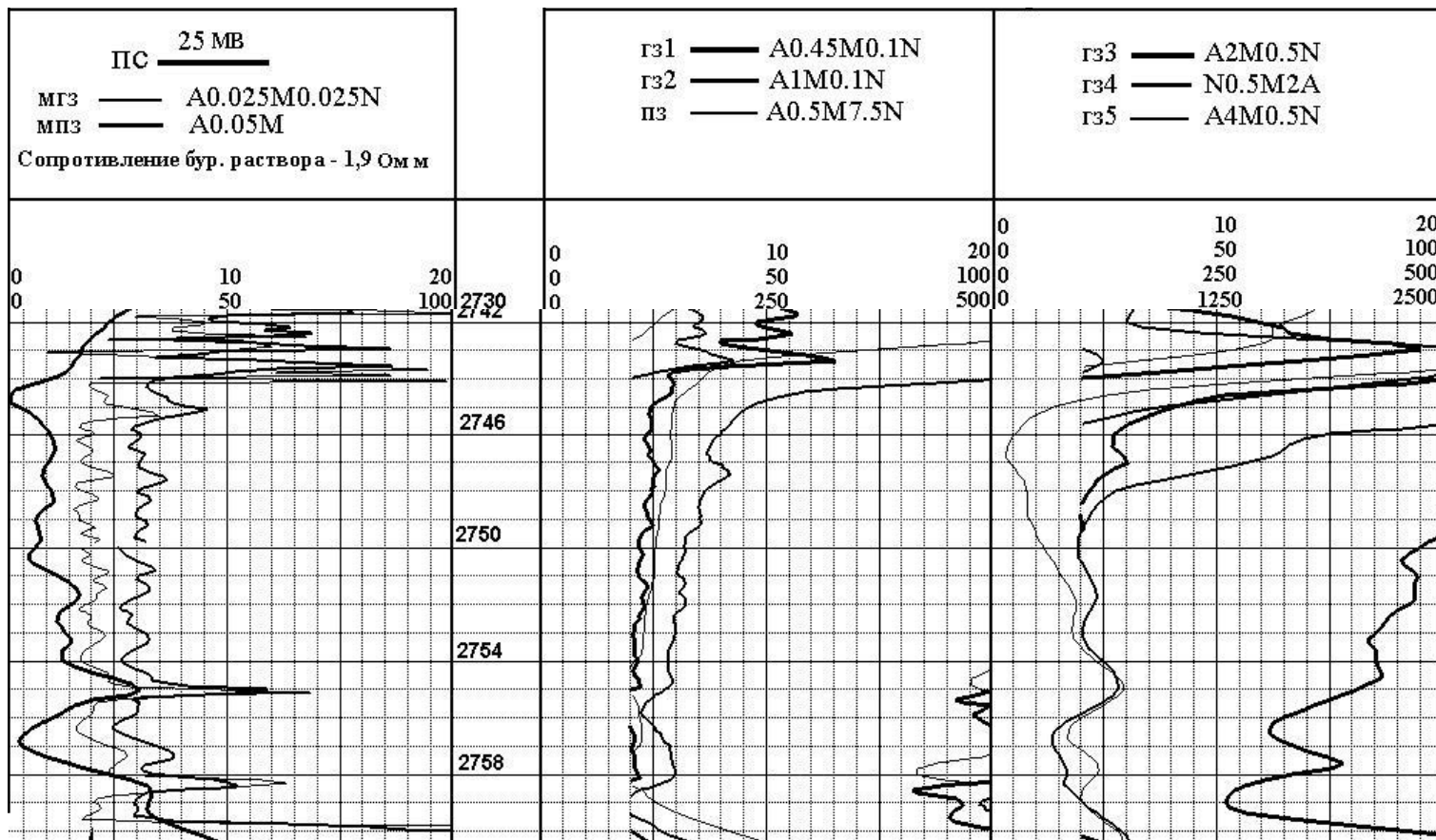
Существенные значения:

- среднее,
- оптимальное,
- экстремальное.

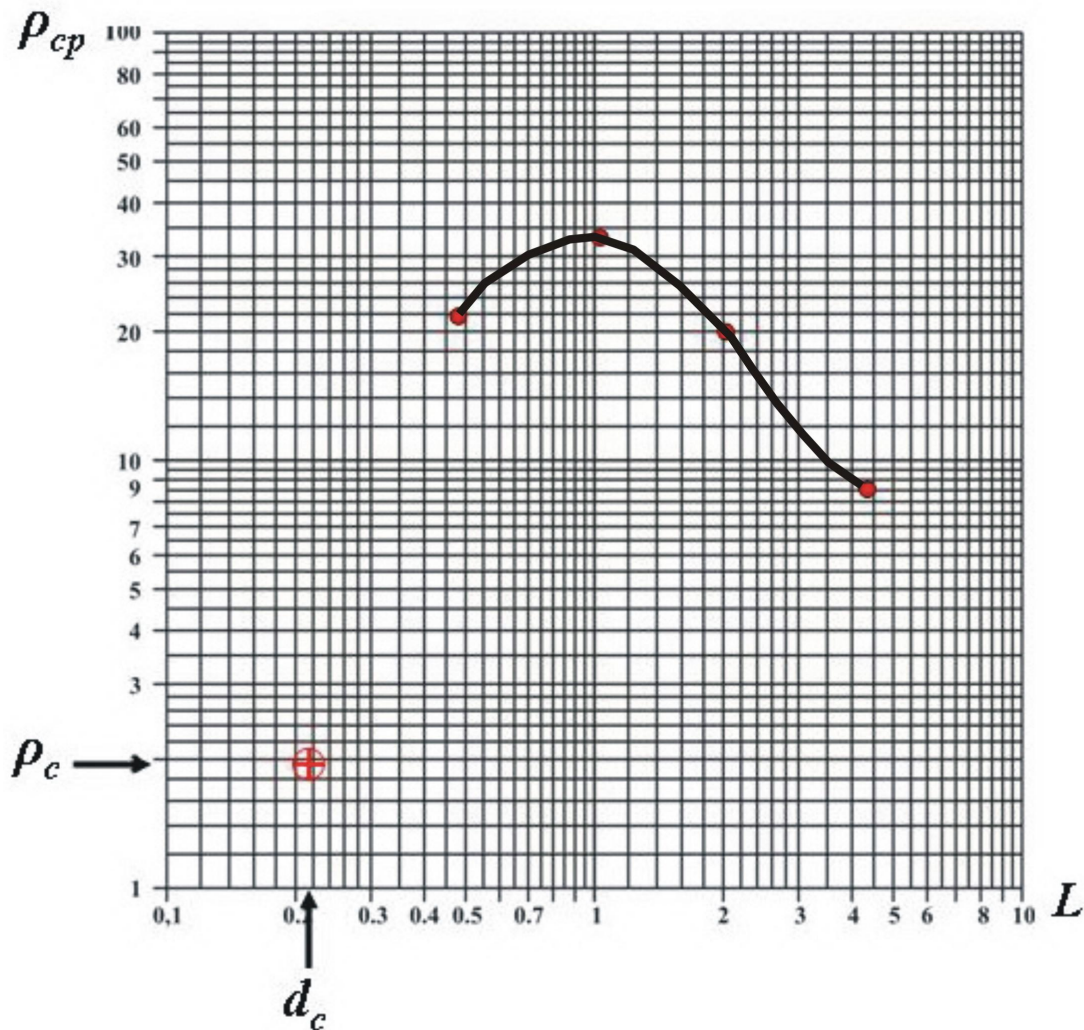




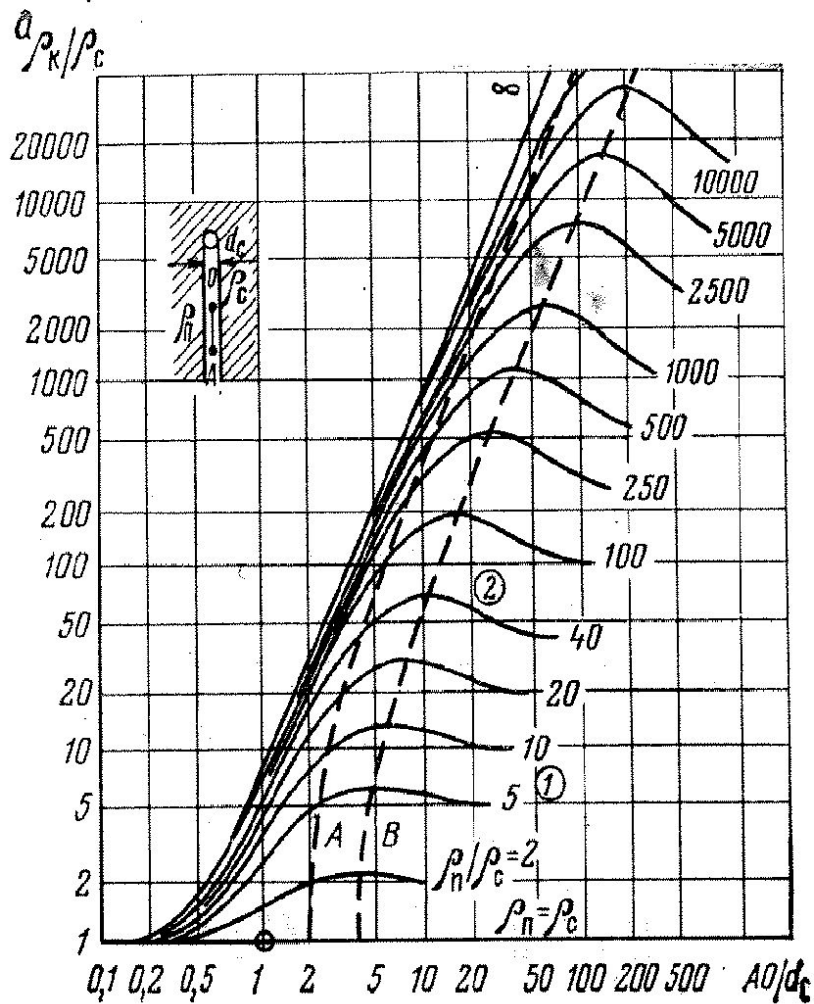
# Запись кривых БКЗ



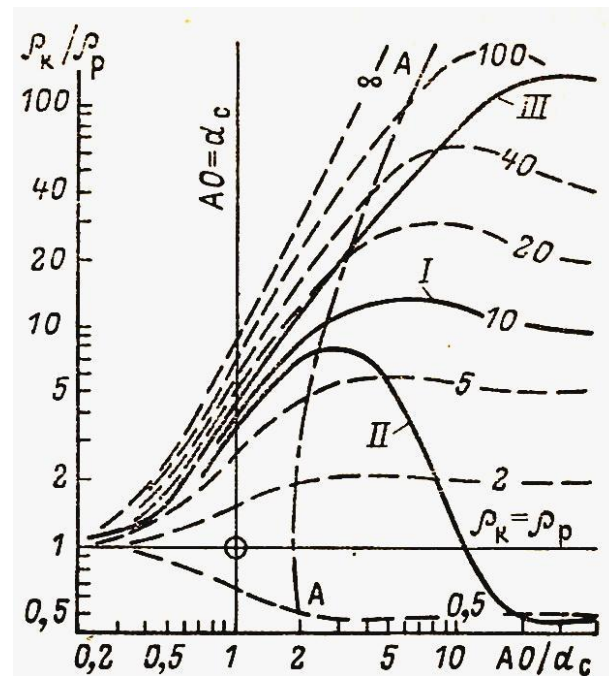
## Построение фактической кривой БКЗ



## Фактическую кривую БКЗ совмещают с 2-х слойной палеткой БКЗ

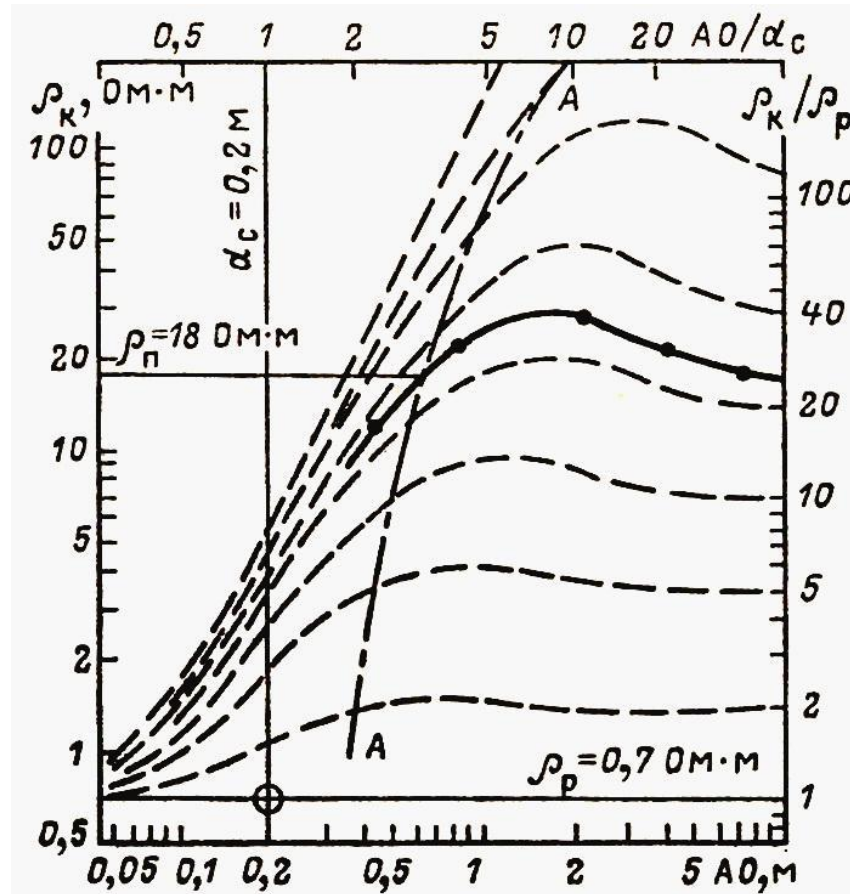


Шифр кривых  $\rho_n/\rho_c$



- I – двухслойная кривая БКЗ,
- II – трехслойная кривая с повышающим проникновением
- III – трехслойная кривая с понижающим проникновением

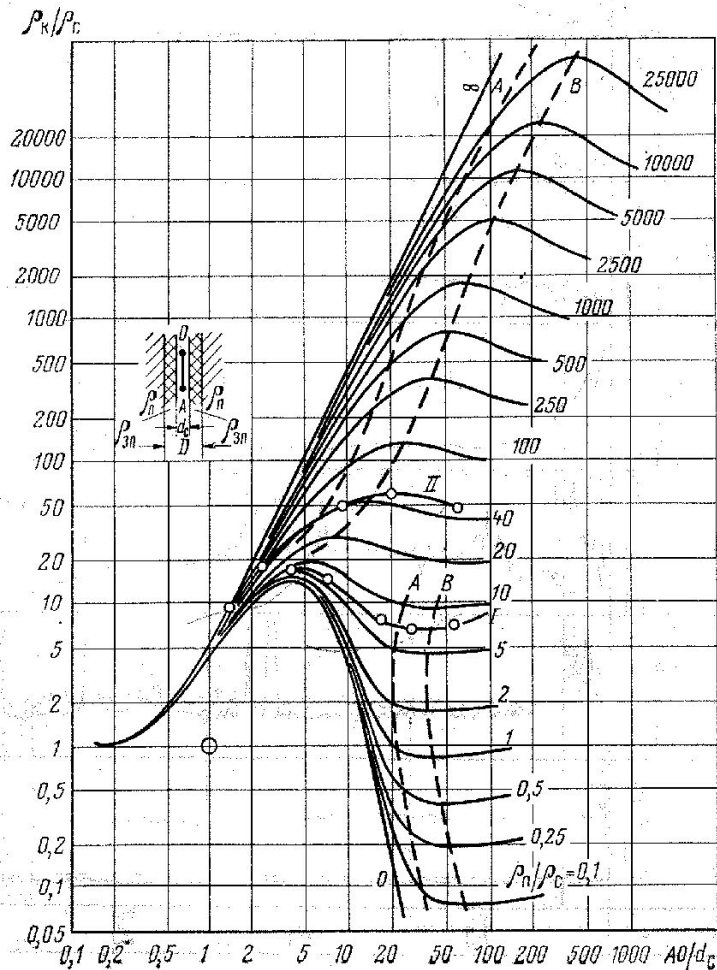
**Совмещение фактической и теоретической кривых  
БКЗ на 2-х слойной палетке**



Шифр кривых  $\rho_n/\rho_c = \mu_2$

# Трехслойная палетка

БКЗ ( $\rho_{zn} / \rho_c, D/d_c$ )



Шифры палетки:

$\rho_{zn} / \rho_c - 5, 10, 20, 40 \dots$

$D/d_c - 2, 4, 8, 16$

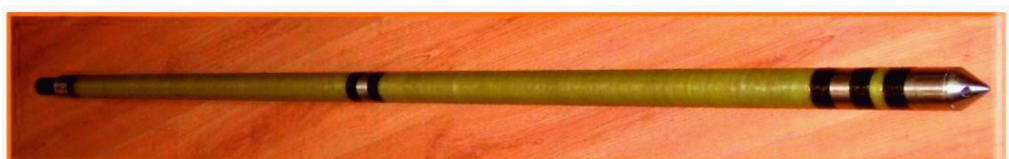
Шифр кривых -  $\mu_3 = \rho_n / \rho_c$

$$\frac{\rho_{zn}}{\rho_c} \approx \frac{\rho_n}{\rho_c}$$

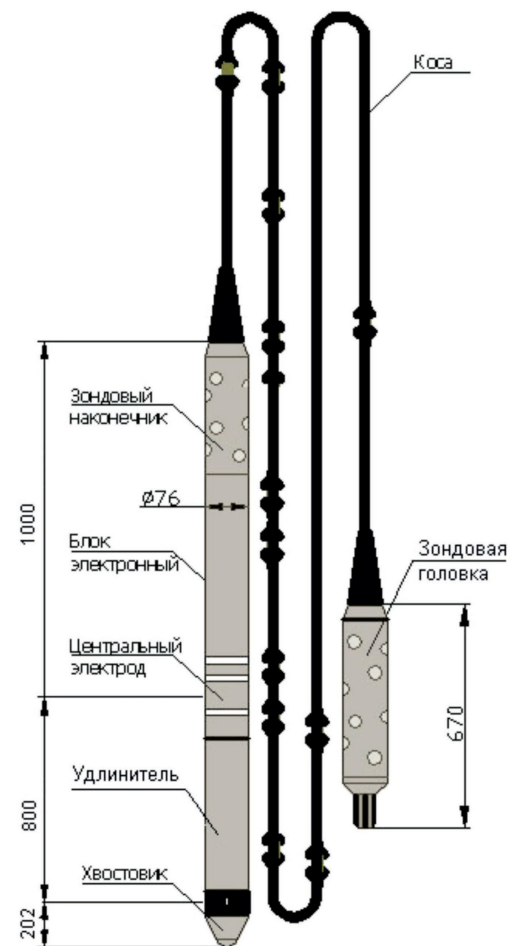
из 2-х слойной палетки

$$\begin{aligned} \rho_{zn} &= \mu_2 \rho_c \\ \rho_n &= \mu_3 \rho_c \\ d_c &= D/d_c \cdot d_c \end{aligned}$$

# Общий вид зондов КС + ПС



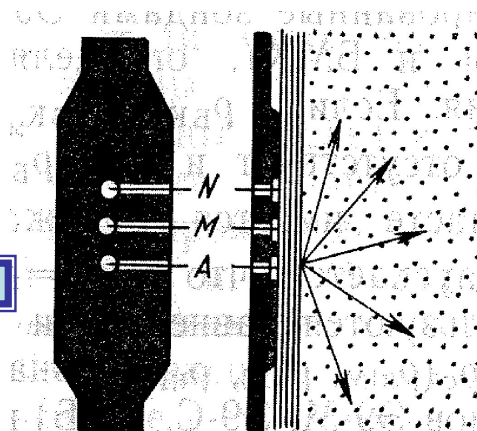
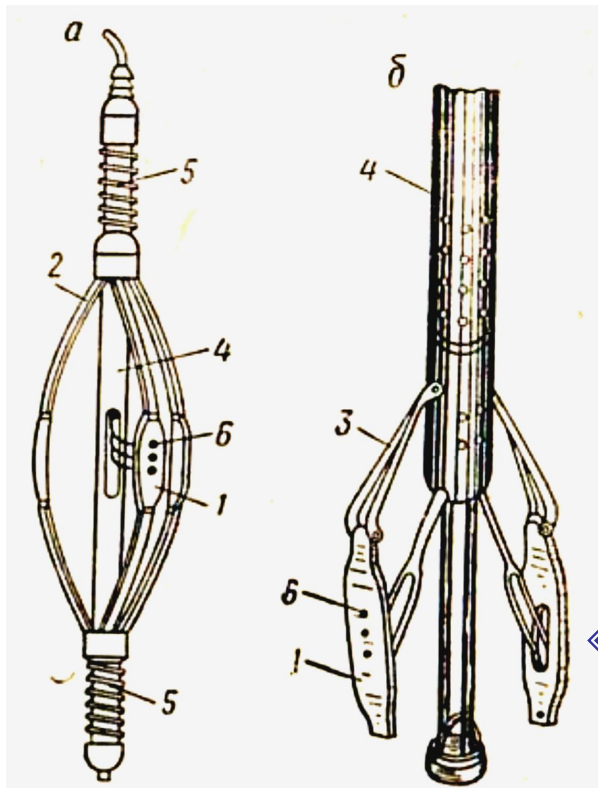
## ЭК2-НН (БКЗ+2БК+ПС)



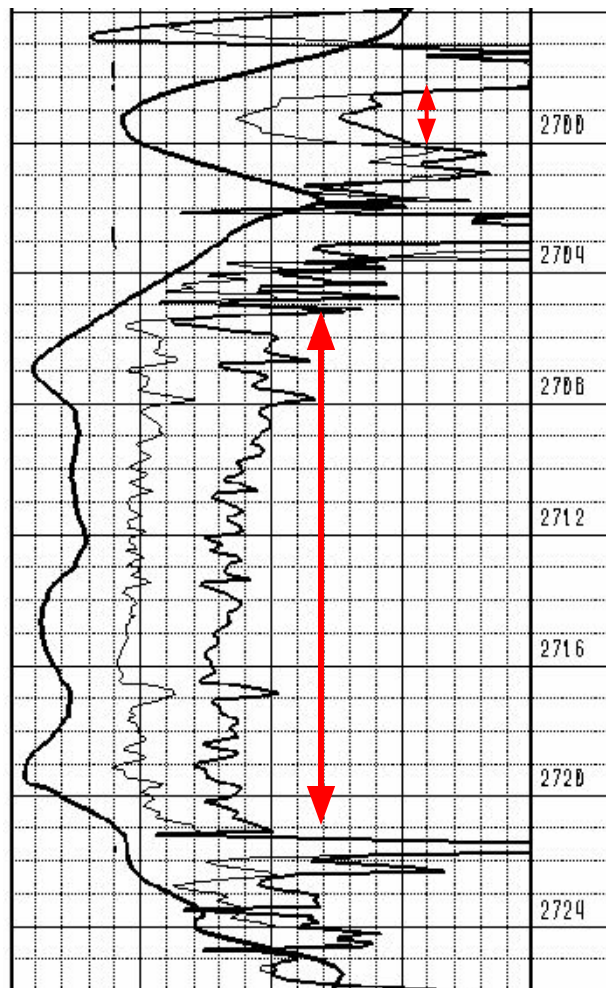
## Микрокаротажное зондирование (МКЗ)

*A0,025M0,025N – микроградиент-зонд.  
Радиус исследования  $\approx 3$  см.*

*A0,05M – микропотенциал-зонд.  
Радиус исследования  $\approx 12$  см.*



$\rho_{МПЗ} > \rho_{МГЗ}$  - положительное расхождение



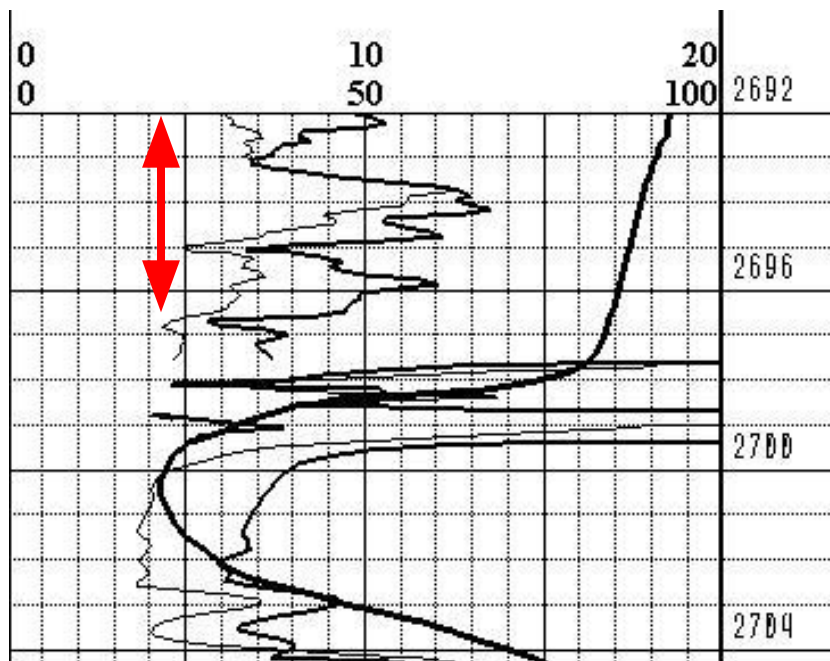
*Положительное  
расхождение*



*Проницаемые  
горные породы*

— МПЗ  
- - МГЗ



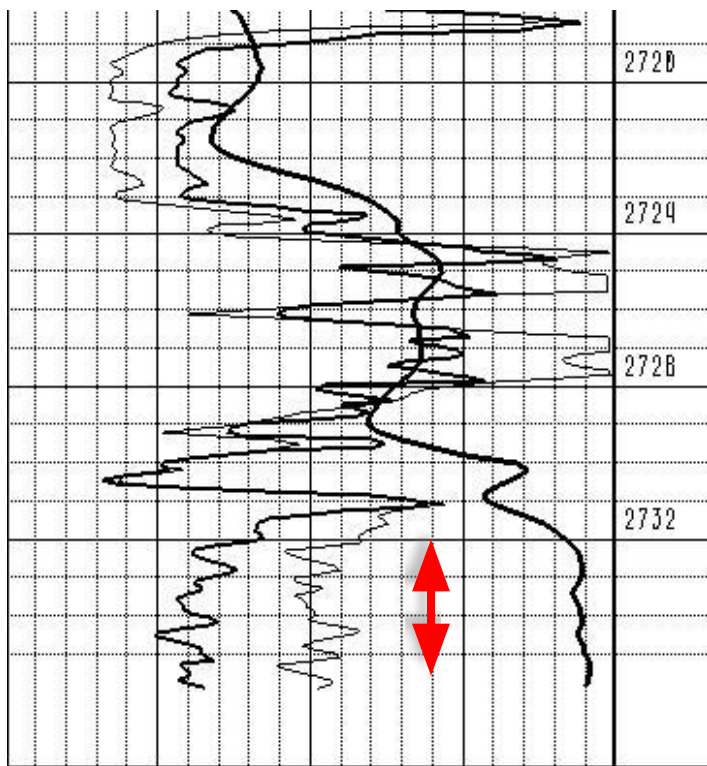


*Положительное  
расхождение,  
ПС – большое,  
 $\rho_k$  - большое*



*Непроницаемые  
горные породы  
большого сопротивления*

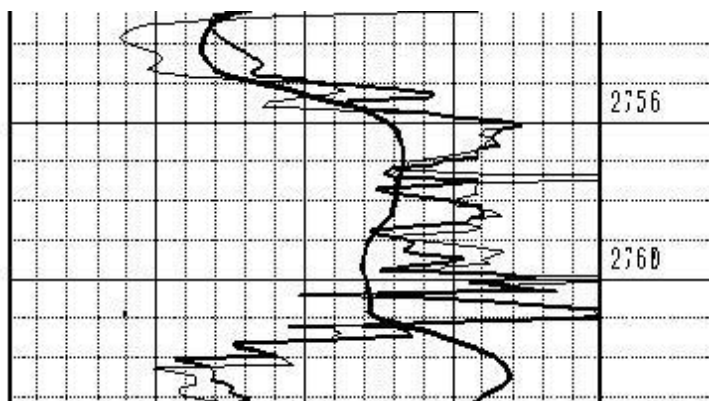
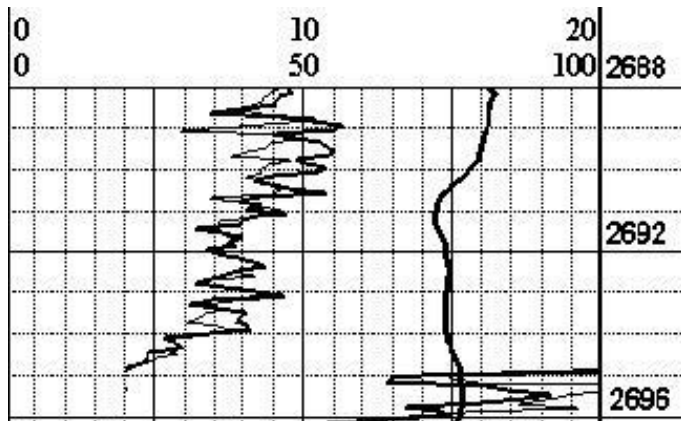
$\rho_{МПЗ} < \rho_{МГЗ}$  - отрицательное расхождение



*Отрицательное  
расхождение*



*Горные породы с  
сопротивлением  
меньшим, чем у  
бурового раствора*



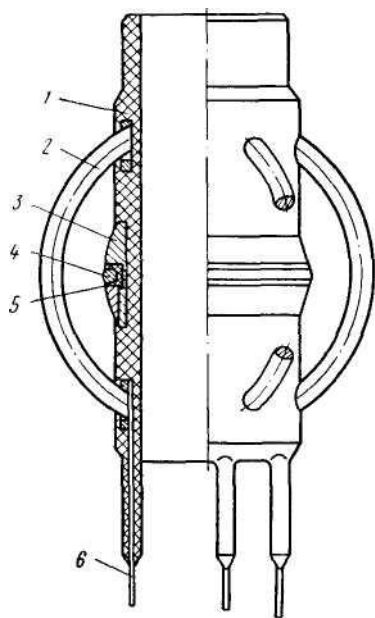
*Нет расхождения*



*Плотные, непроницаемые  
горные породы*

## Резистивиметрия

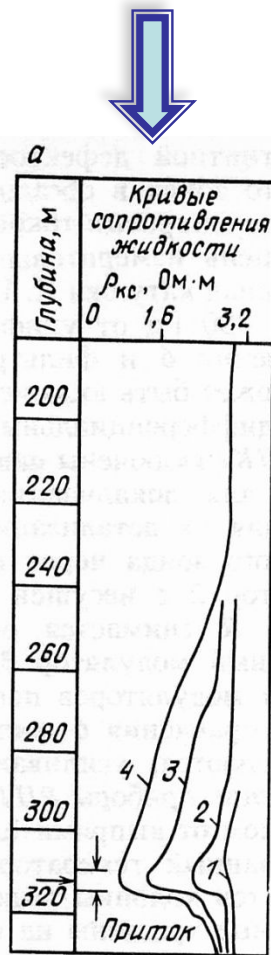
*Резистивиметрия применяется для определения удельного электрического сопротивления промывочной жидкости.*



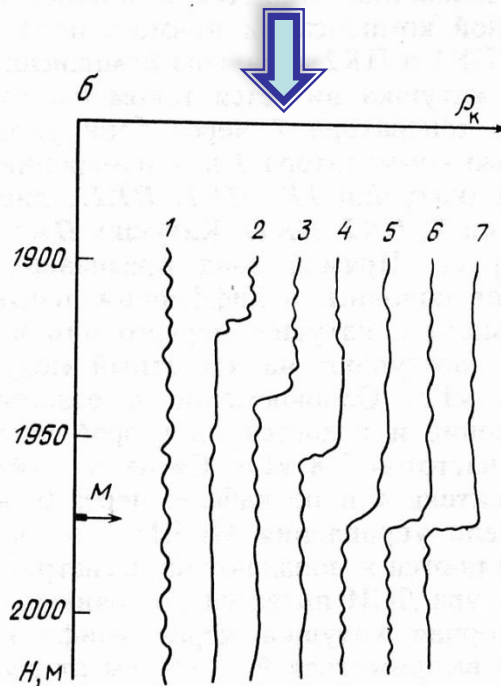
*$\rho_c$  - необходимо при обработке и интерпретации данных геофизических методов, при изучении технического состояния скважины, при гидрогеологических исследованиях.*

1 — корпус прибора; 2 — рессоры;  
3 — рессорные муфты; 4 — резиновый башимак;  
5 — электроды; 6 — электроввод.

*а – определение места притока пластовой воды в скважину ( $\rho_c > \rho_{пв}$ )*



*б – определение места поглощения промывочной жидкости ( $\rho_c < \rho_{дв}$ )*

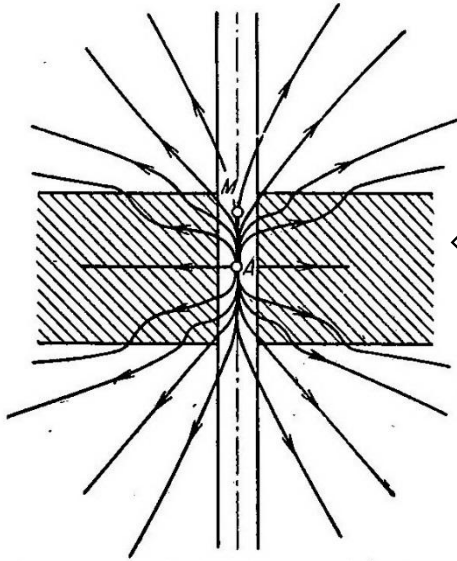


$\rho_c$  - сопротивление промывочной жидкости;

$\rho_{пв}$  - сопротивление пластовой воды;

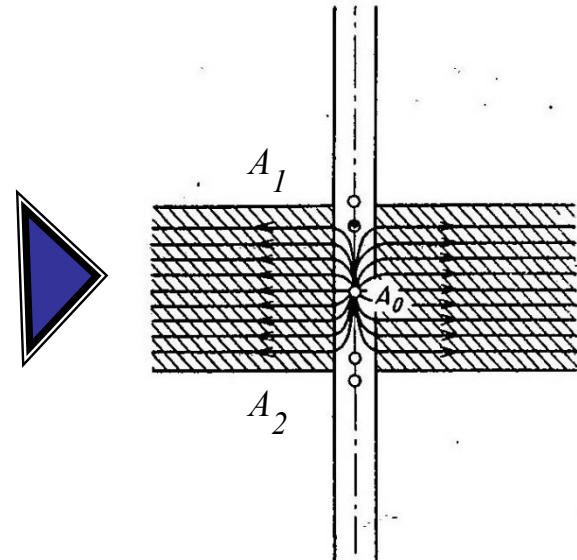
$\rho_{дв}$  - сопротивление доливаемой воды.

## Боковой каротаж (БК)

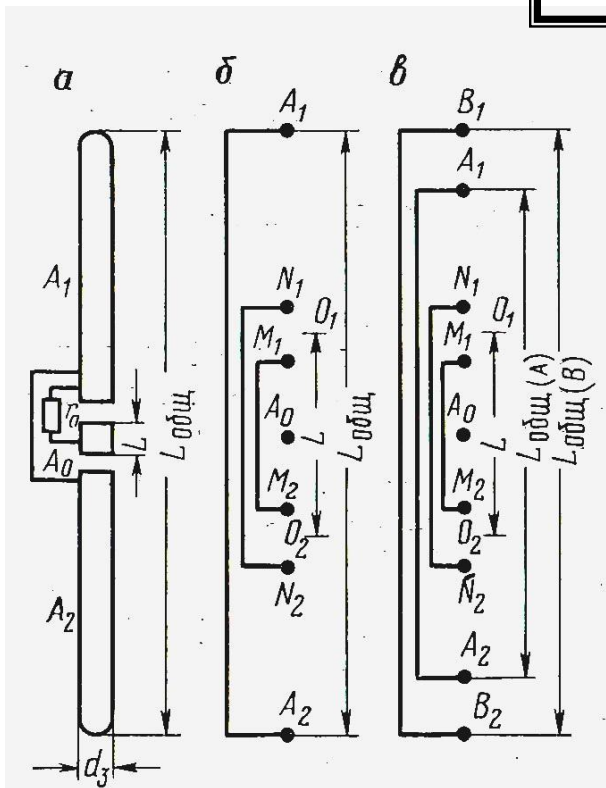


*При использовании обычных зондов,  
плотность тока в каждой из сред,  
пропорциональна их УЭС*

*Расположив однополярные  
электроды  $A_1$  и  $A_2$  симметрично  
относительно основного питающего  
электрода  $A_0$  можно направить  
токовые линии ортогонально стенке  
скважины.*



## Типы зондов БК



*а* – трехэлектродный зонд (БК-3),

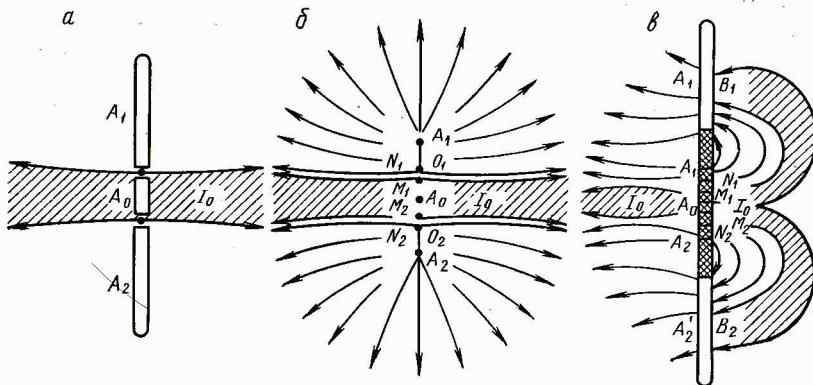
$$L_{общ} = 3,2\text{м}, L = 0,18\text{м};$$

*б* - семиэлектродный зонд (БК-7),

$$L_{общ} = 3\text{м}, L = 0,6\text{м}, q = 5, \\ A_0, 2M_1, 0,2N_1, 1,1A_1 (L_A 3q5);$$

*в* – девятиэлектродный зонд (БК-9):

$$L_{общ} = 1,2\text{м}, L = 0,6\text{м}, q = 2, \\ A_0, 2M_1, 0,2N_1, 0,2A_1, 0,9B_1 (L_B 3L_A q2)$$



$q$  – параметр фокусировки

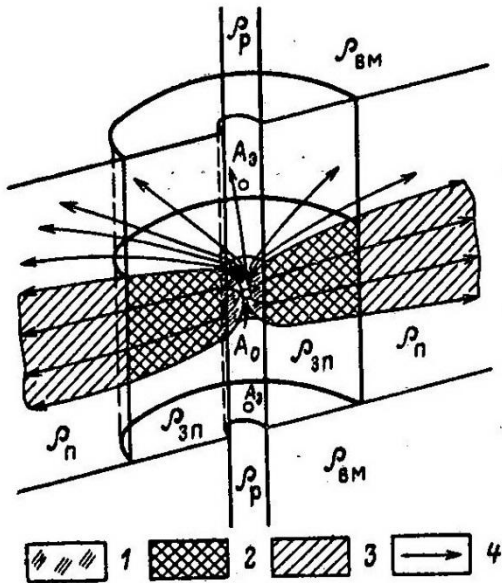
$$q = \frac{L_{общ}}{L}$$

$$\rho_{\text{эф}} = G_c \rho_c + G_{3n} \rho_{3n} + G_n \rho_n + G_{\text{вм}} \rho_{\text{вм}}$$

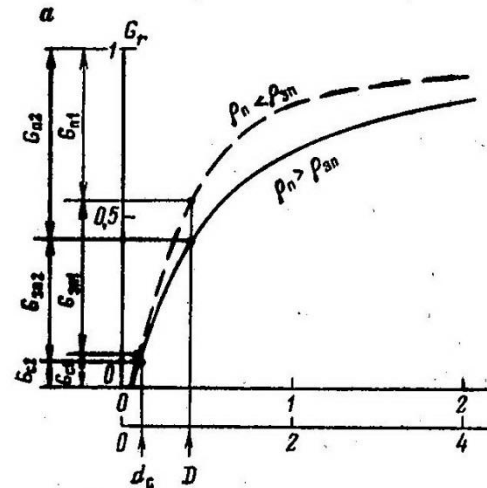
$$G_c + G_{3n} + G_n = 1$$

$G_c, G_{3n}, G_n$  - радиальные геометрические факторы;

$\rho_c, \rho_{3n}, \rho_n$  - удельные электрические сопротивления.



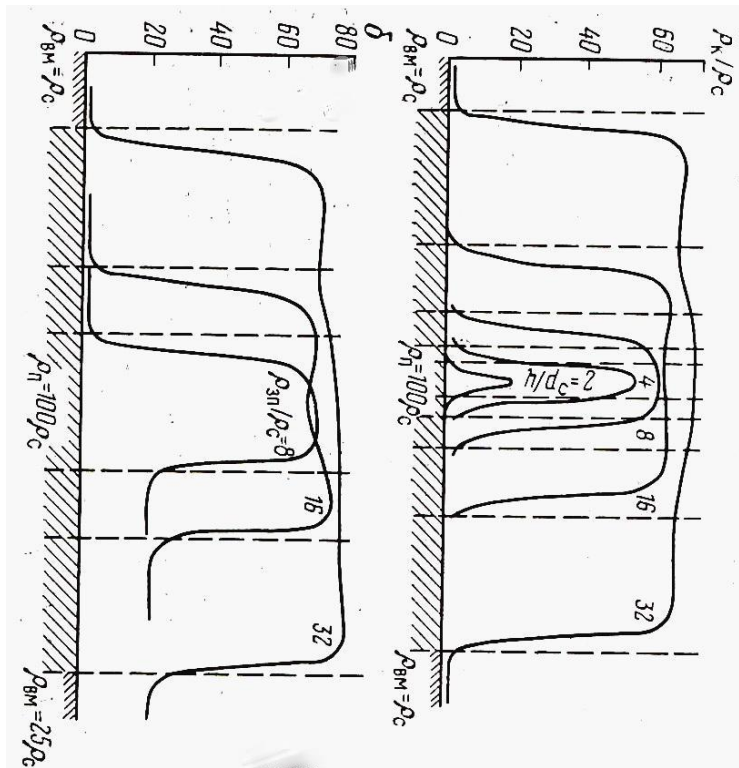
- 1 – скважина;
- 2 – зона проникновения;
- 3 – неизменная часть пласта;
- 4 – токовые линии.



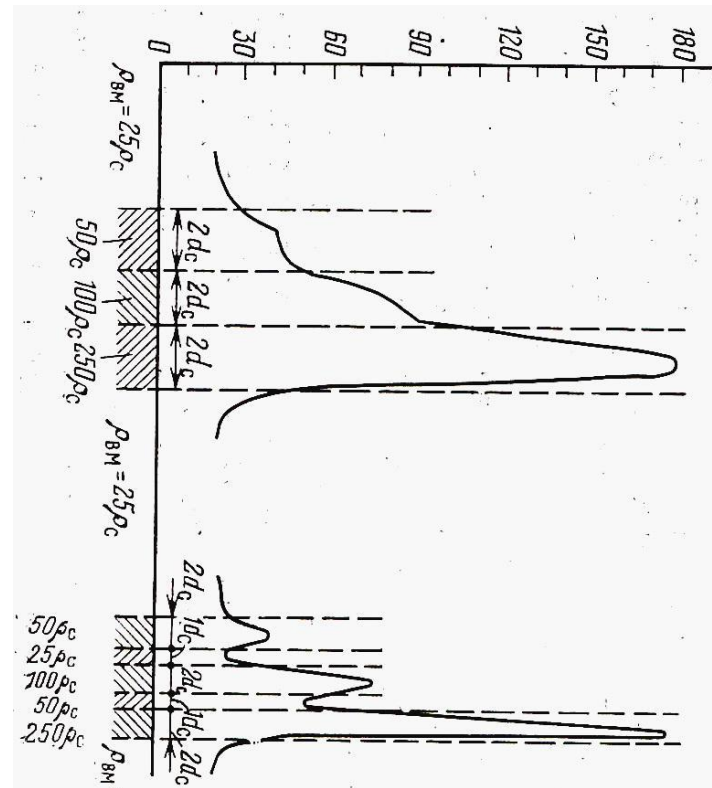
Радиальные характеристики



## Кривые БК для пластов разной мощности

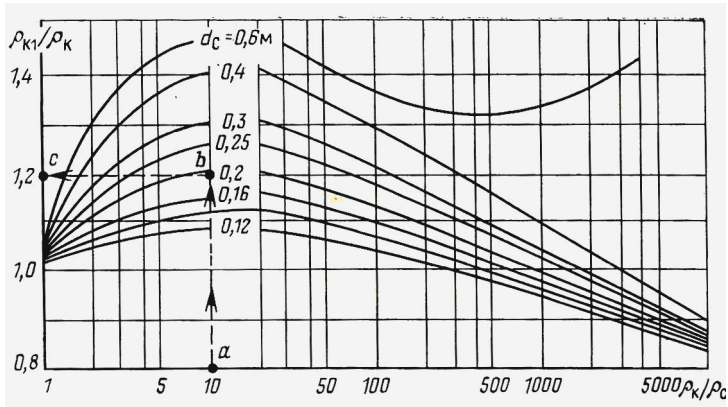


## Кривые БК для пачки тонких пластов

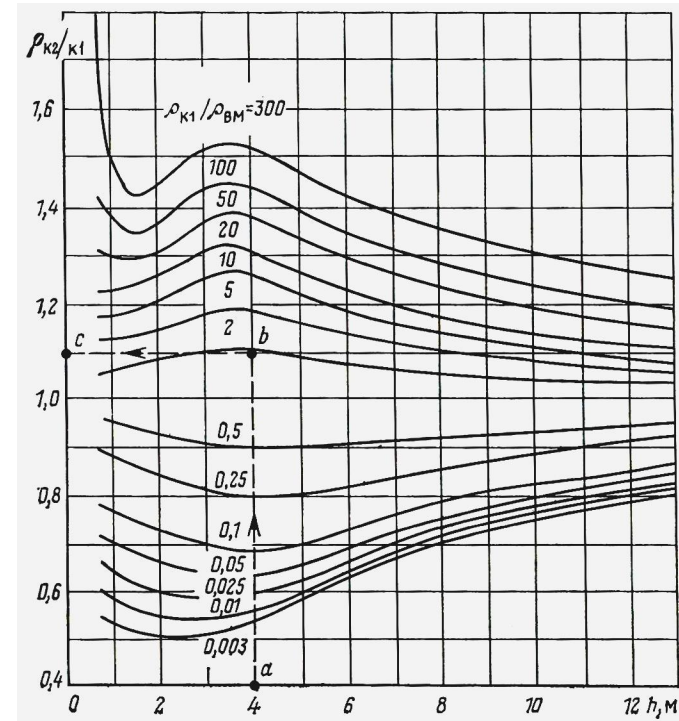


# Определение удельного сопротивления по диаграммам БК

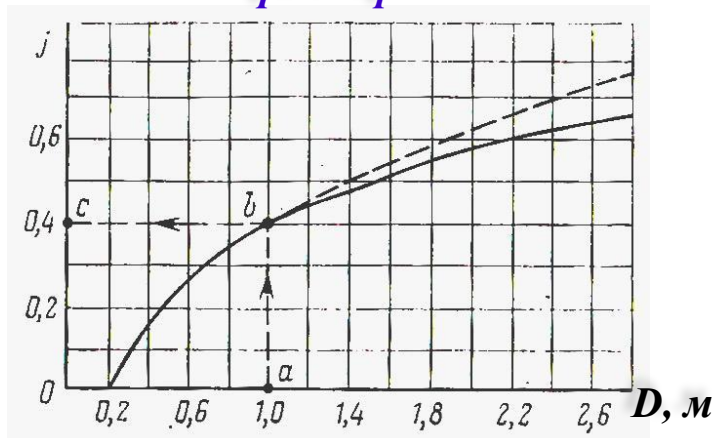
## Поправка за скважину



## Поправка за мощность пласта

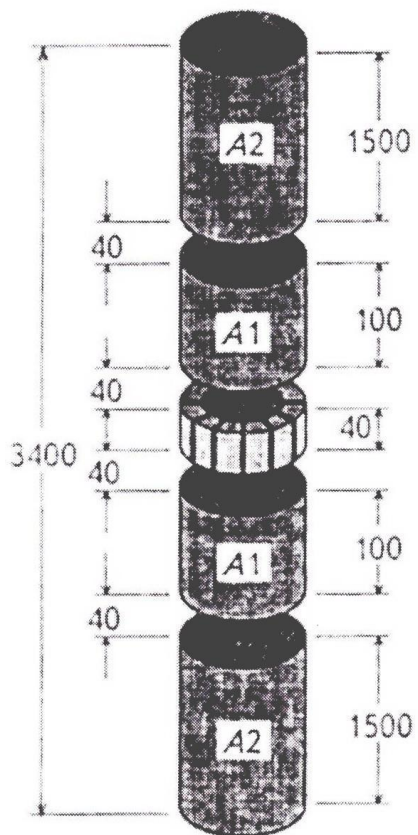


## Псевдогеометрический фактор

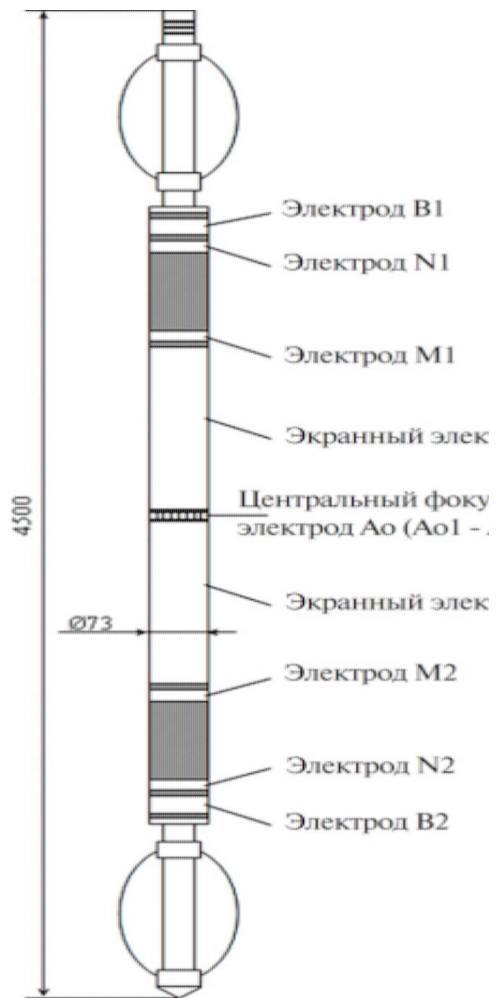


$$\rho_{k2} = j\rho_{zn} + (1-j)\rho_n$$

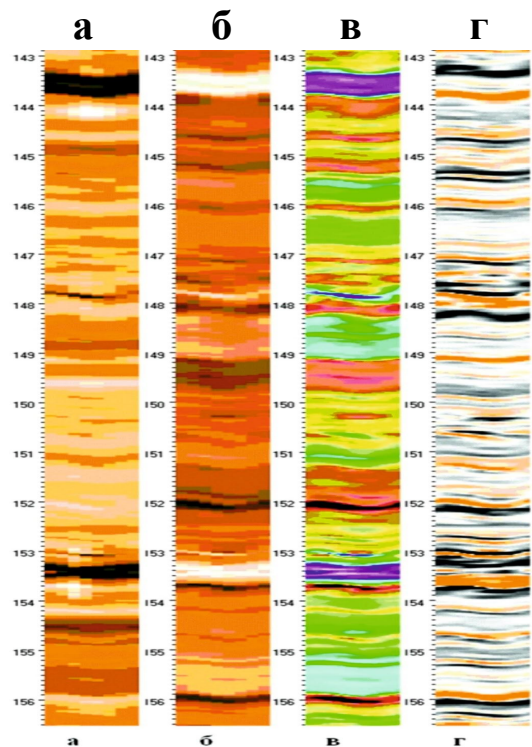
## Специальные зонды БК (сканеры)



**2БК**

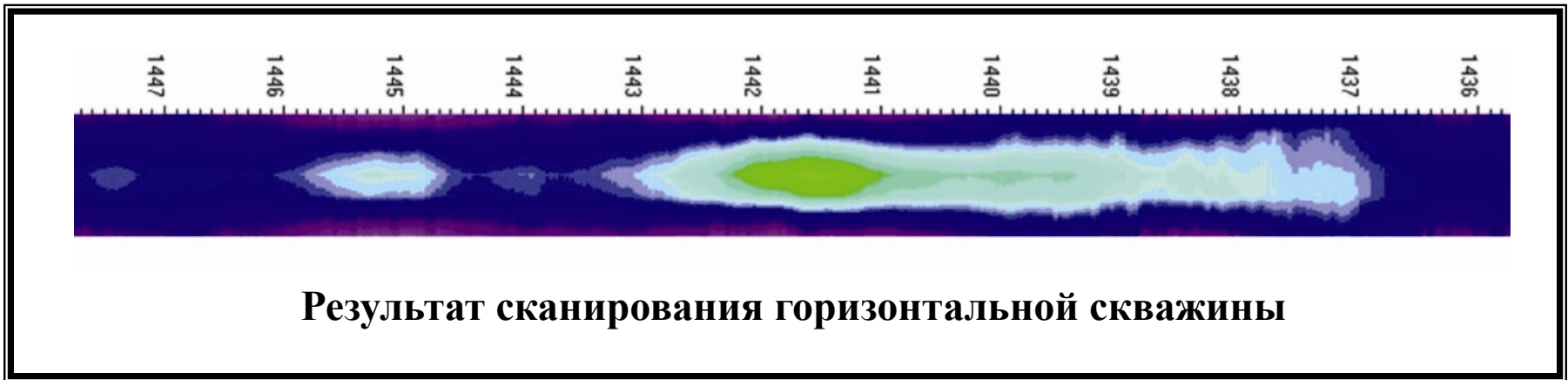


**АЭСБ-73**



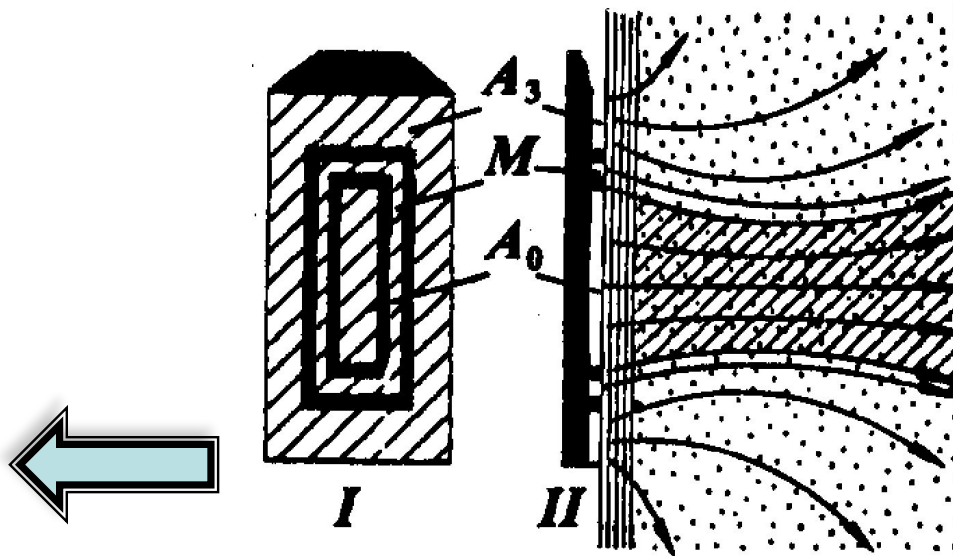
**Представление результатов сканирования**

- а** – монохромная шкала удельного сопротивления;
- б** – монохромная шкала проводимости;
- в** – многоцветная шкала;
- г** – двухцветная шкала.



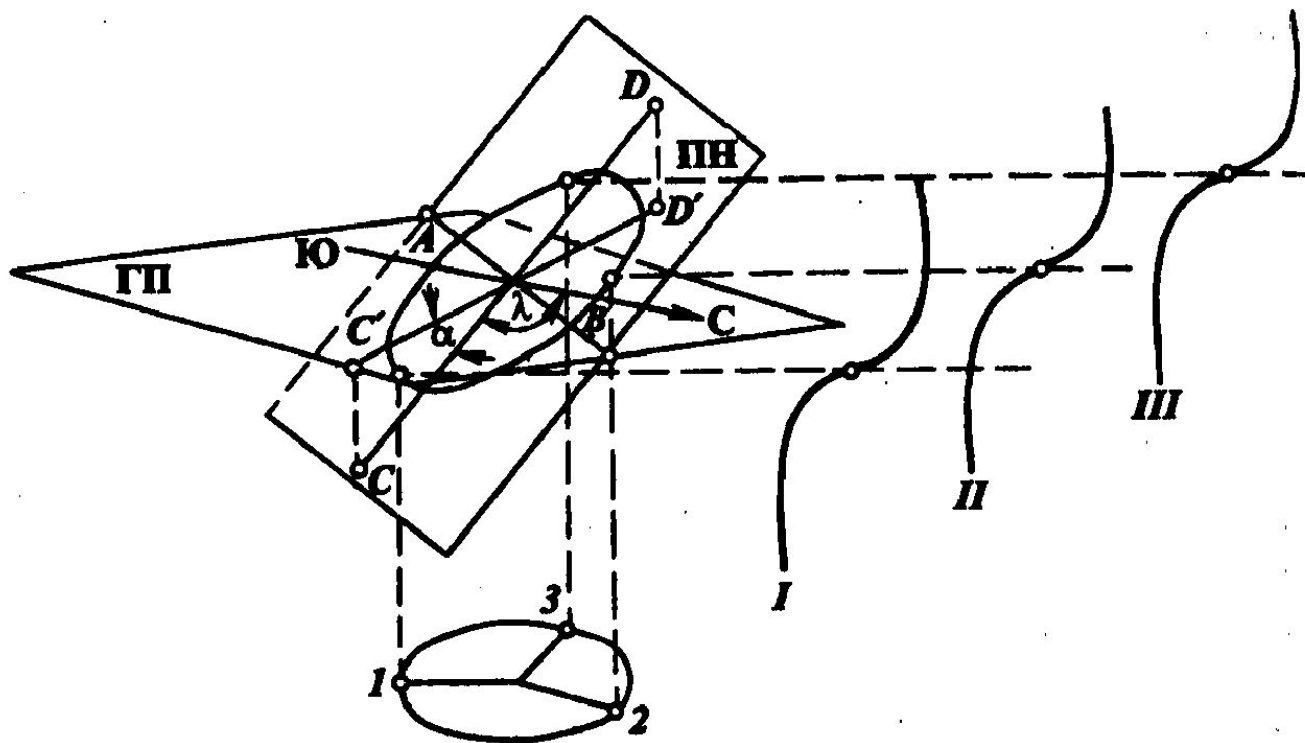
**Результат сканирования горизонтальной скважины**

## Микробоковой каротаж (МБК)

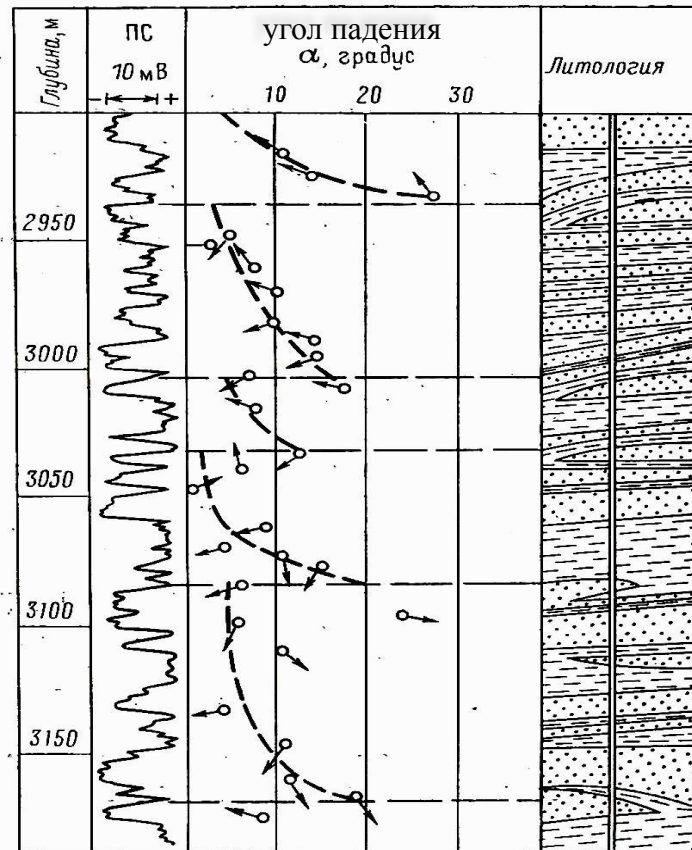


*I – трех электродный микрозонд;  
II – схема токовых линий.*


# Наклонометрия



## Изображение результатов наклонометрии

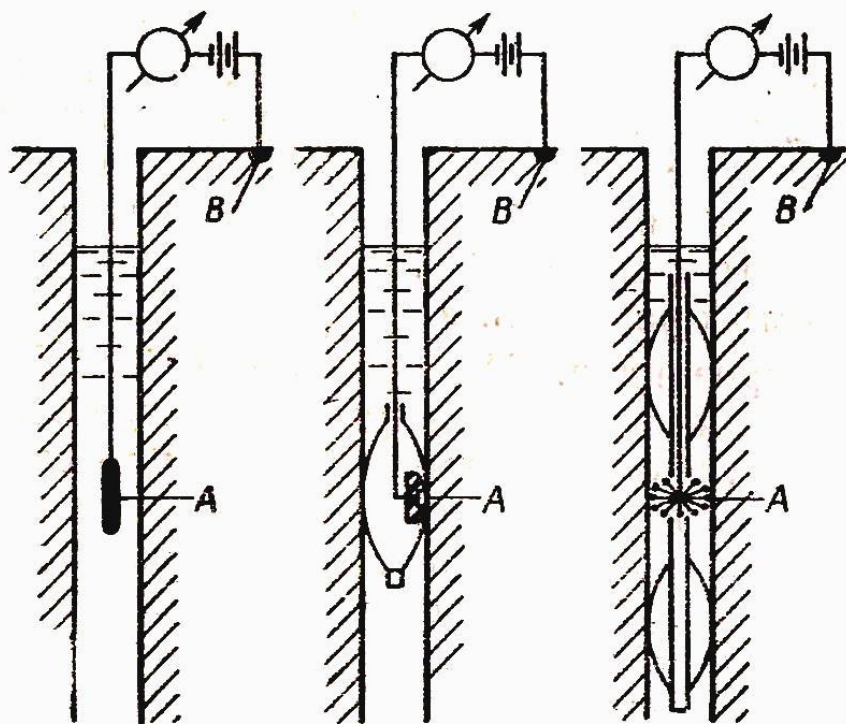


 - песчаник

 - глина

## Токовый картаж (ТК)

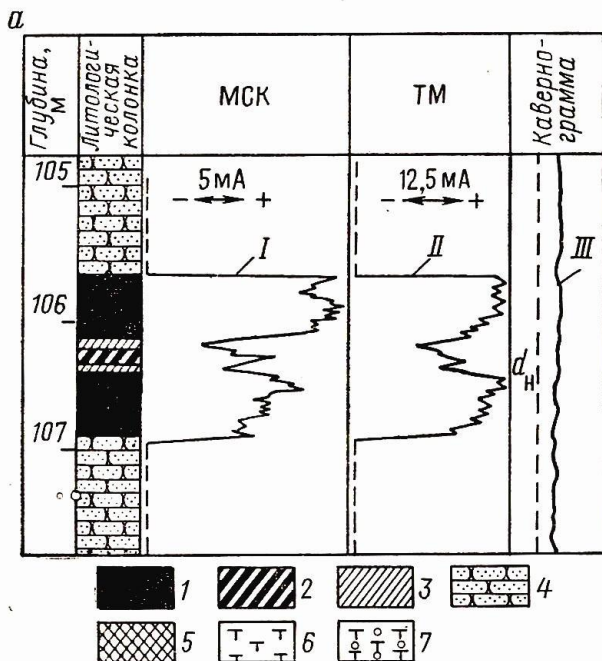
## Метод скользящих контактов (МСК)



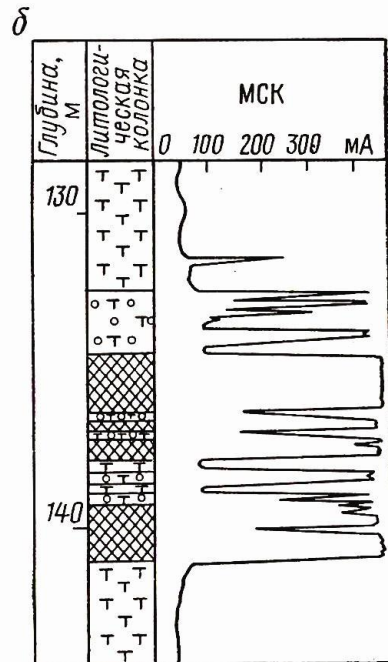
$$I = \frac{E}{(\sum R + R_A)}$$

- $E$  – напряжение источника тока;
- $R$  – суммарное сопротивление части питающей среды (кабеля, проводов, реостата, источника питания и заземления  $B$ )
- $R_A$  – сопротивление электрода  $A$

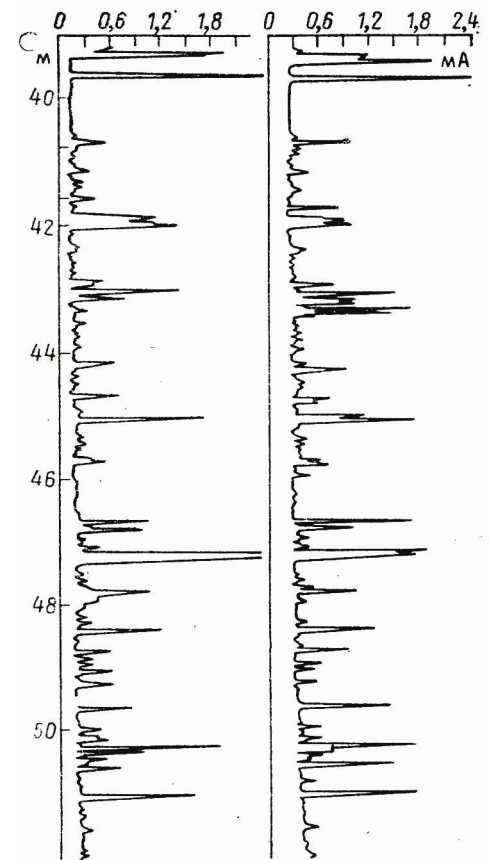




1 – антрацит; 2 – углистый аргиллит; 3 – аргиллит;  
 4 – песчаник; 5 – сульфиды; 6 – хлорито-серицитовые сланцы; 7 – вкрапленники сульфидов в сланцах.



## Выделение тонких сульфидных прожилков МСК



щеточные электроды  
 точечные электроды