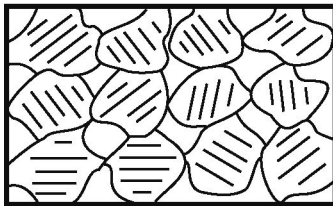


Электрический каротаж на постоянном токе

Удельное электрическое сопротивление

$R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ - 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
ρ , 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

CaCl₂ 0.626 Ом

MgCl₂ 0.580 Ом

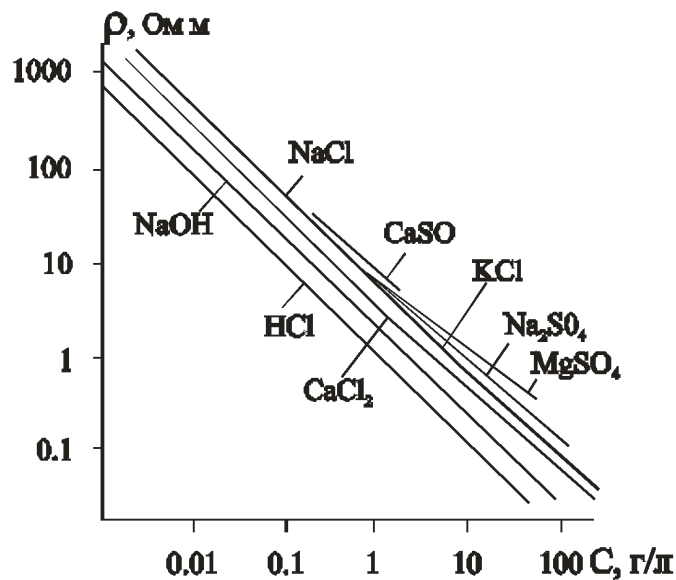
C_{NaCl} [г/л]	ρ [Омм]
0	$20 \cdot 10^4$
0,01	516
0,1	52,5
1,0	5,5
10,0	0,625
50,0	0,149
100,0	0,08

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

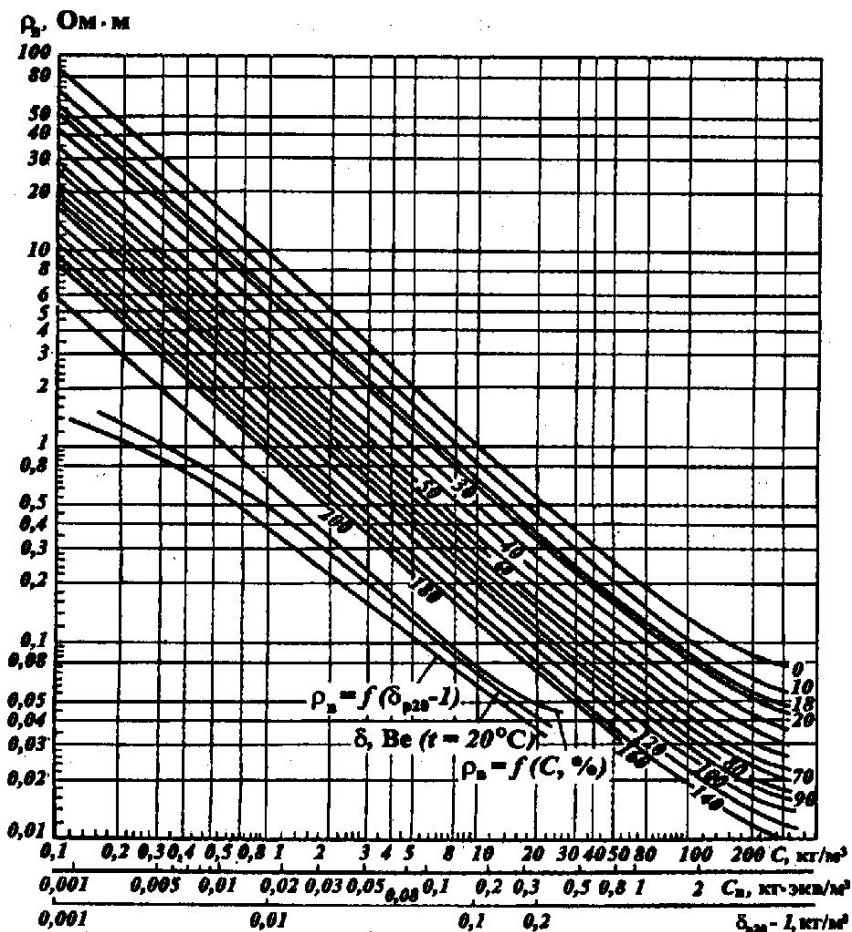
$$\Delta\rho = -\alpha\rho\Delta t,$$

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

$$P = \frac{\rho_{вп}}{\rho_v}$$

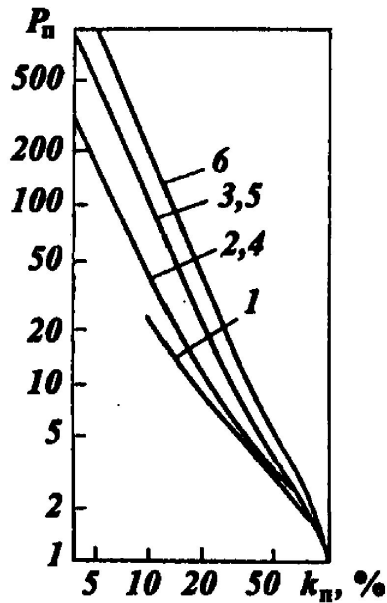
$\rho_{вп}$ - сопротивление водяного пласта
 ρ_v - сопротивление пластовой воды

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

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

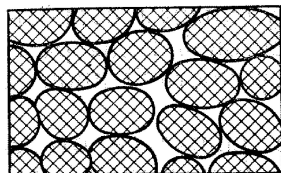
6 – известняки и доломиты плотные

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

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

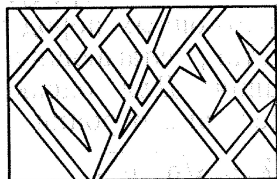
Для постоянной пористости

Гранулярная пористость



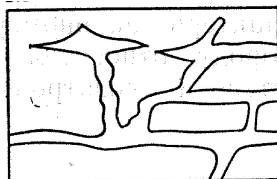
Чем более окатанные зерна, тем меньше сопротивление

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.

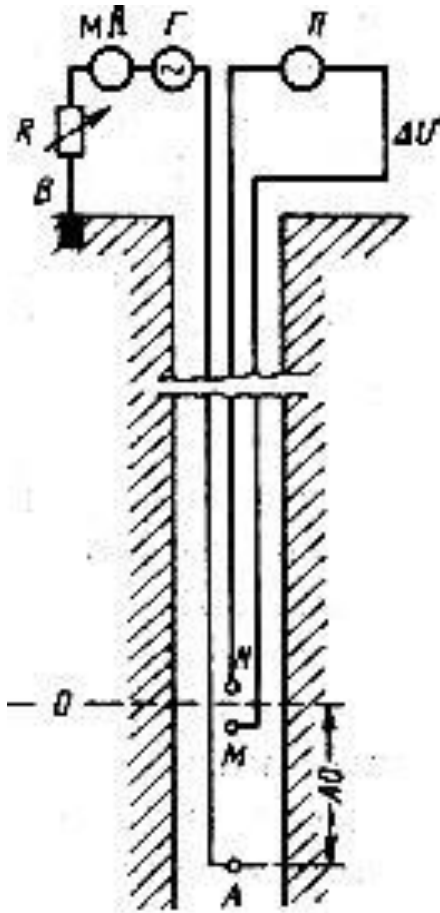
$$K_{нг} + K_v = 1,$$

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



Метод КС
(каротаж сопротивлений)

Установка для измерения УЭС



A, B – питающие электроды;

M, N – приемные (измерительные)
электроды;

Г – генератор;

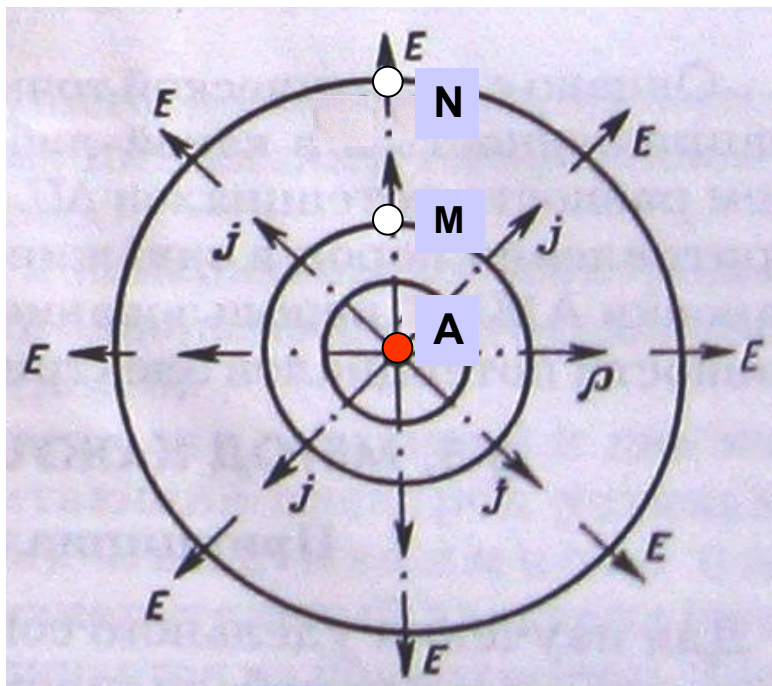
R – переменное сопротивление;

МА – прибор для измерения силы тока;

O – точка записи;

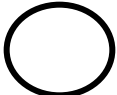
AO – длина зонда.

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; ρ, σ – удельное электрическое сопротивление и
удельная электропроводность среды.*

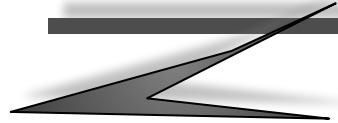

$$j = \frac{I}{4\pi \cdot r^2}, \quad dU = -\frac{\rho I dr}{4\pi r^2},$$

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

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

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

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



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

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

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

ρ_n - удельное сопротивление пласта;

h_n - мощность пласта;

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

ρ_c - удельное сопротивление бурового раствора;

d_c - диаметр скважины;

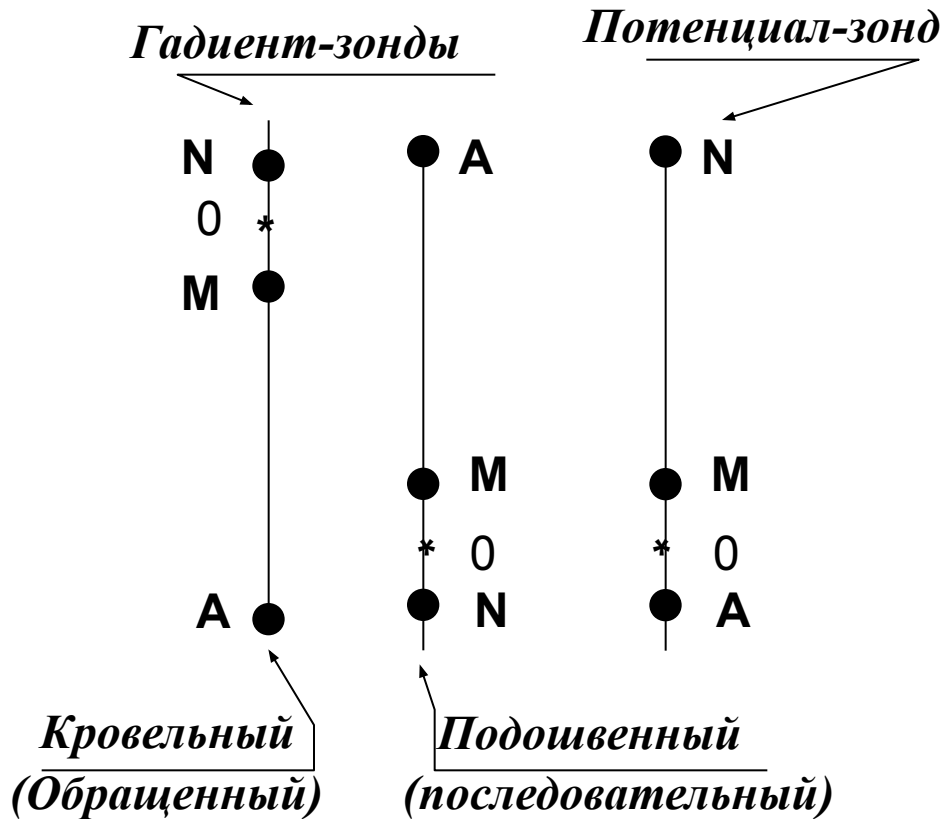
$\rho_{зн}$ - удельное сопротивление зоны проникновения;

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 $N \rightarrow \infty$

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

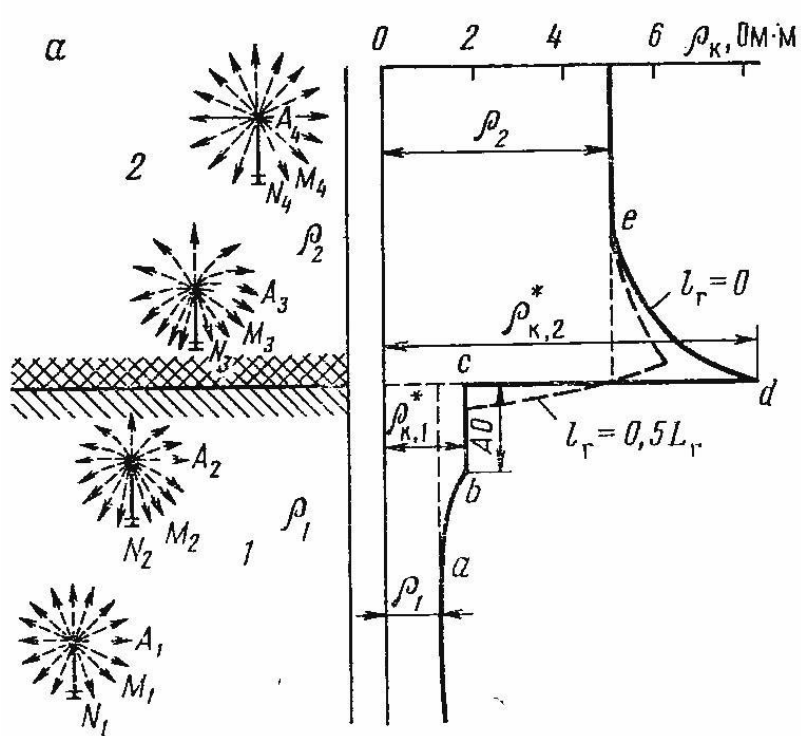
Радиус исследования:

Градент-зонд $\approx AO$

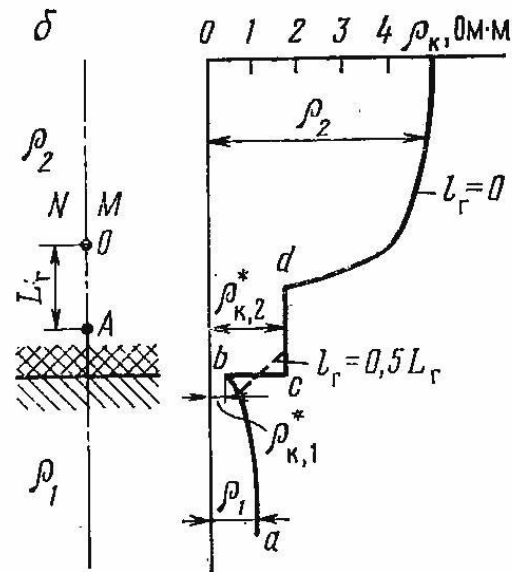
Потенциал-зонд $\approx 2AM$

Кривые КС

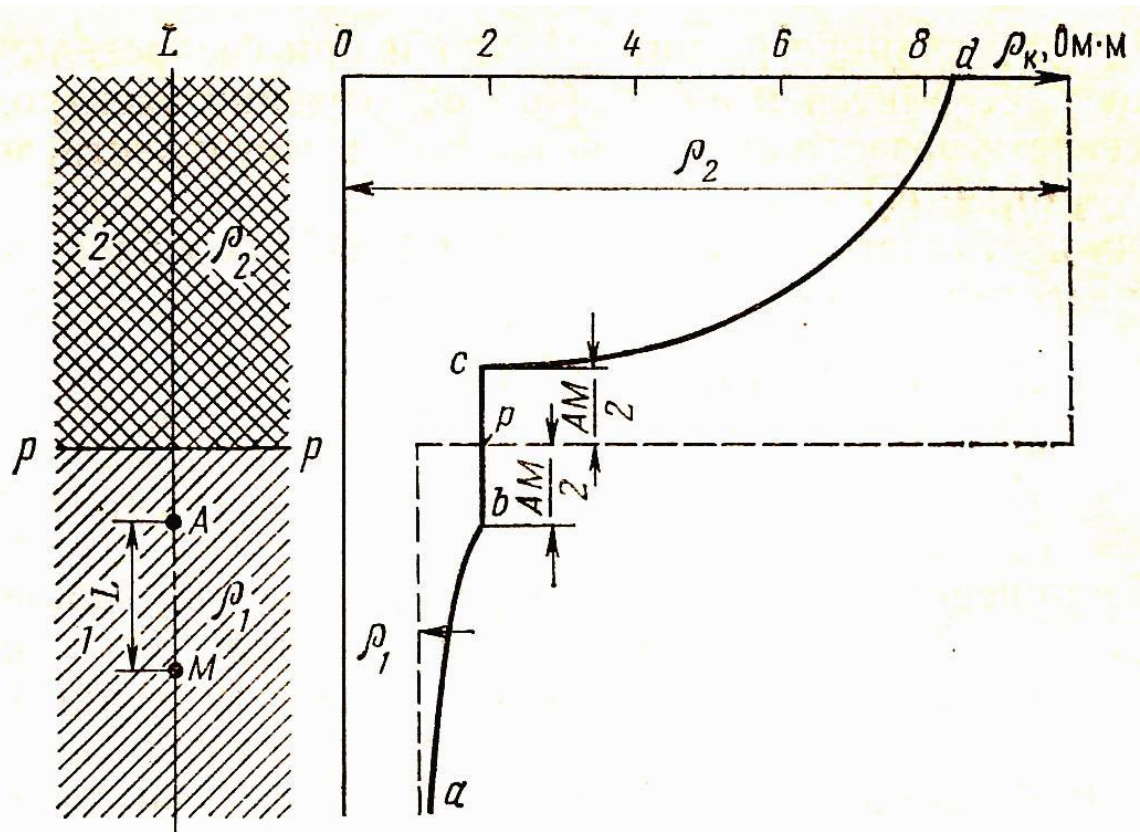
Два однородных и изотропных полупространства



последовательный (подошвенный)
градиент-зонд

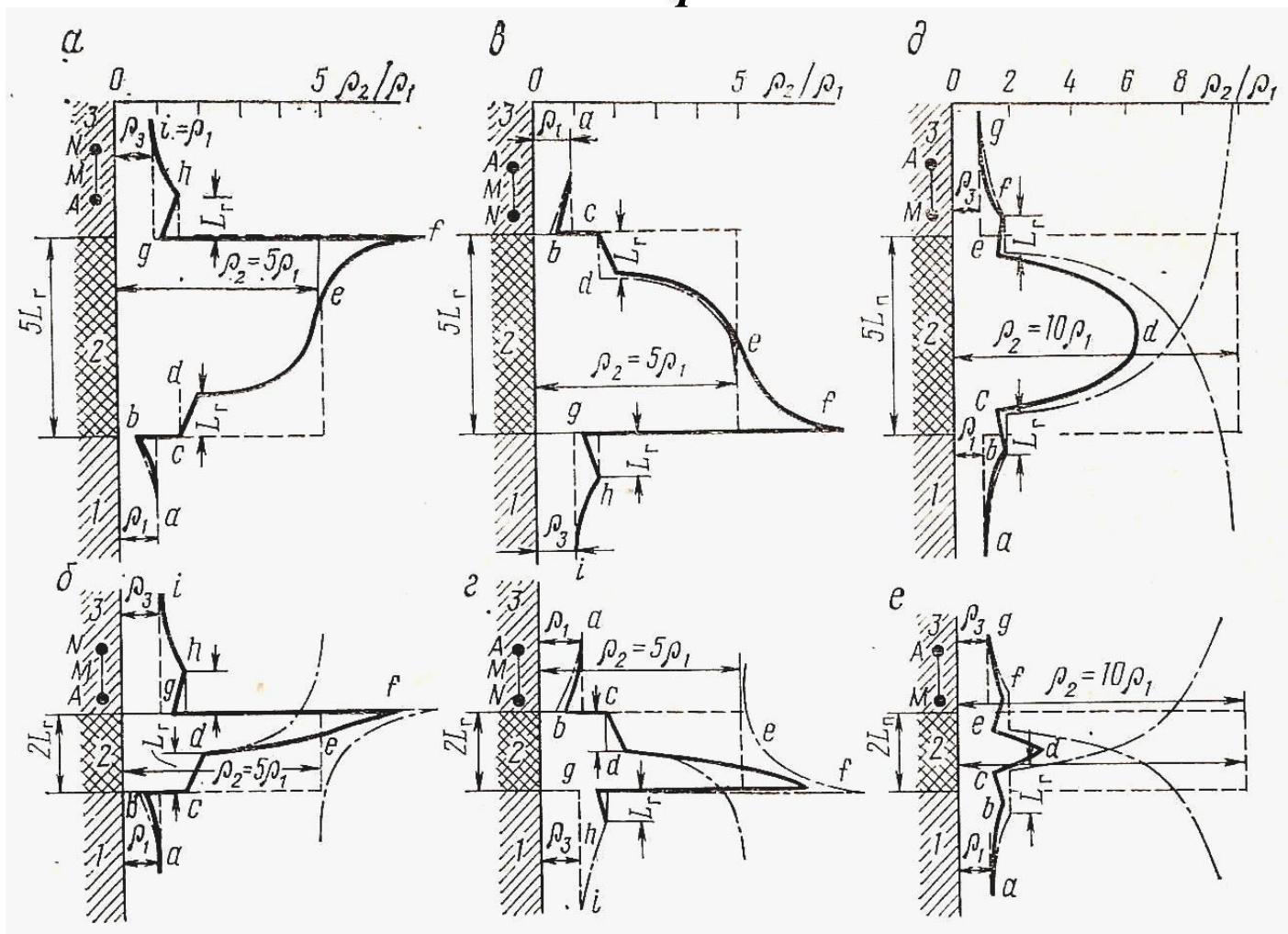


обращенный (кровельный)
градиент-зонд



потенциал-зонд

Кривые КС для мощного пласта высокого сопротивления

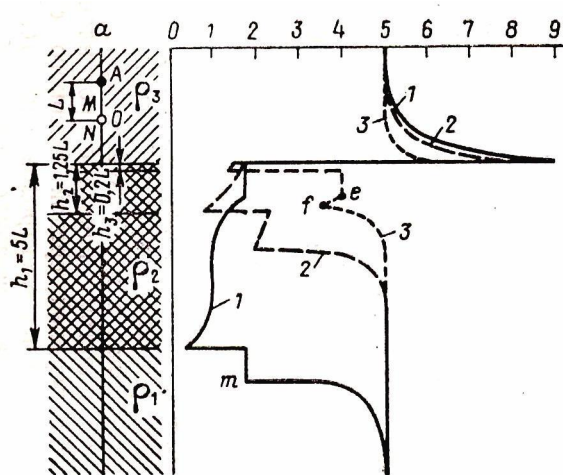


**кровельный
градиент-зонд**

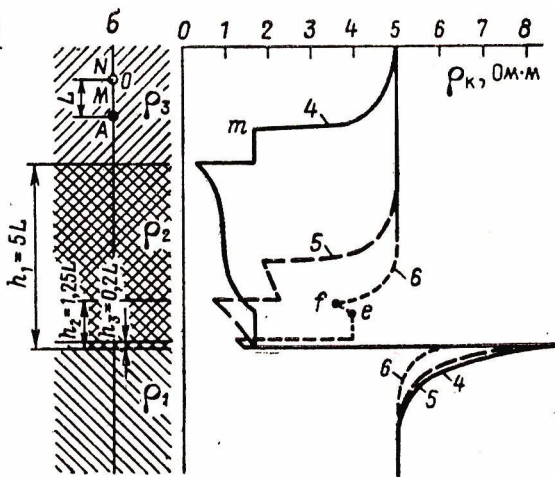
**подовшенный
градиент-зонд**

**потенциал
-зонд**

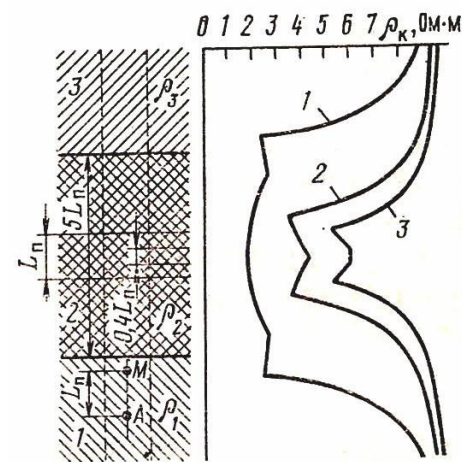
Кривые КС для мощных пластов низкого сопротивления



*крювельный
градиент-зонд*

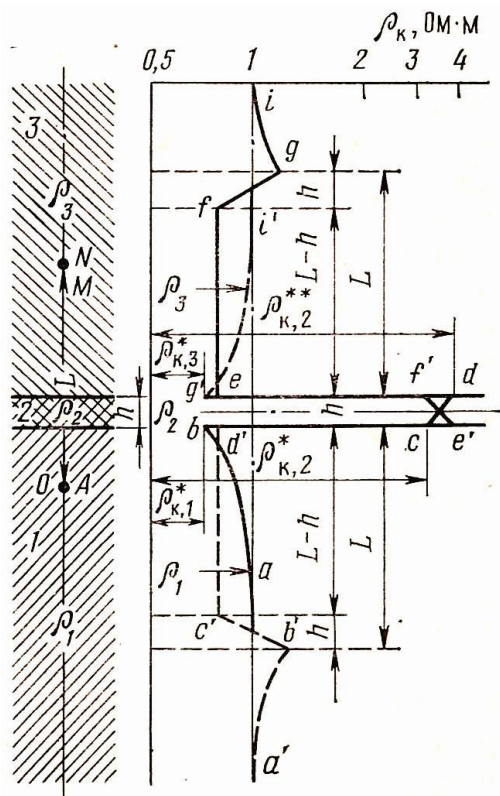


*подошвенный
градиент-зонд*

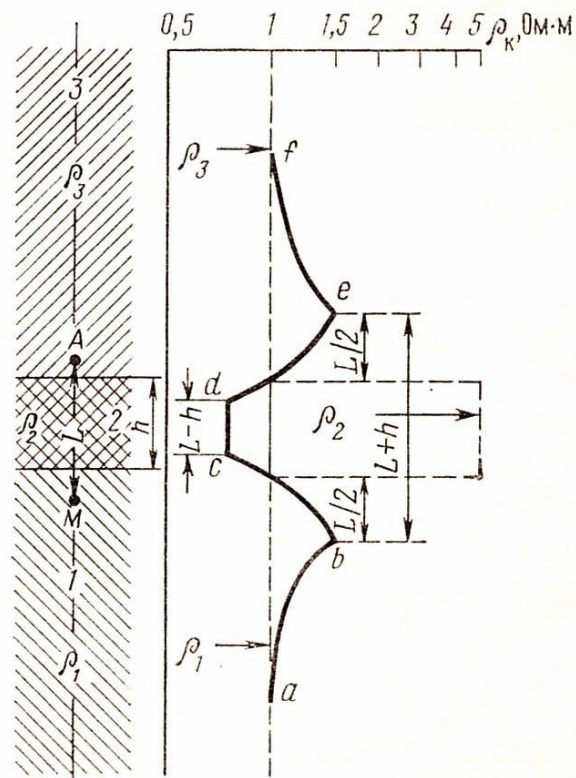


*потенциал
-зонд*

Кривые КС для тонкого пласта



градиент-зонд



потенциал-зонд

Правила определения границ

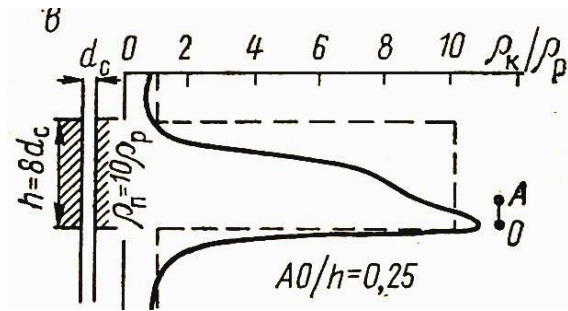
градиент-зонд

потенциал-зонд

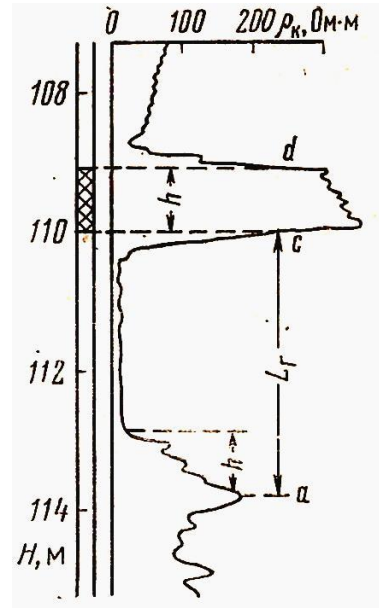
Мощный пласт

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

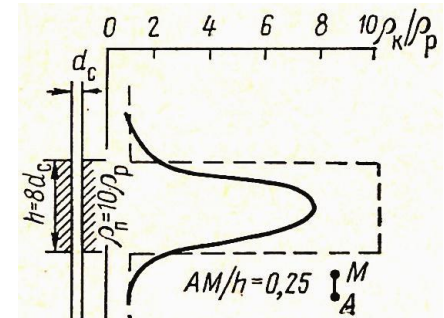
кровельный: подошва $h_n = h_{min} - MN/2$
 кровля $h_k = h_{max} - MN/2$

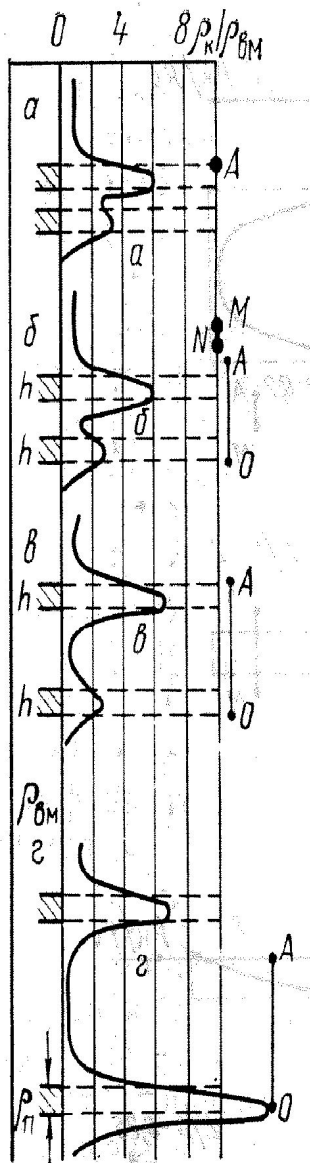


Тонкий пласт



Мощный пласт



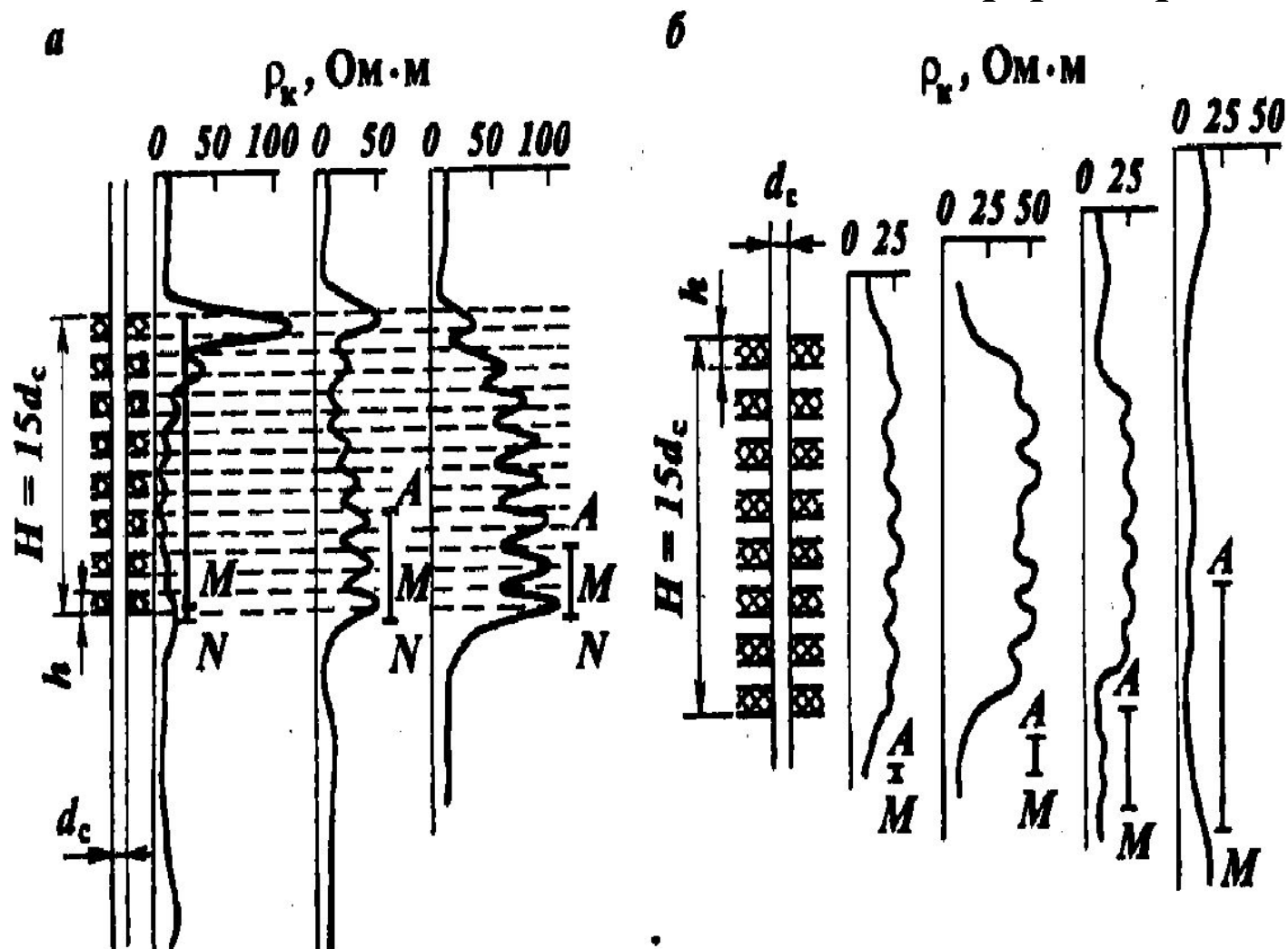


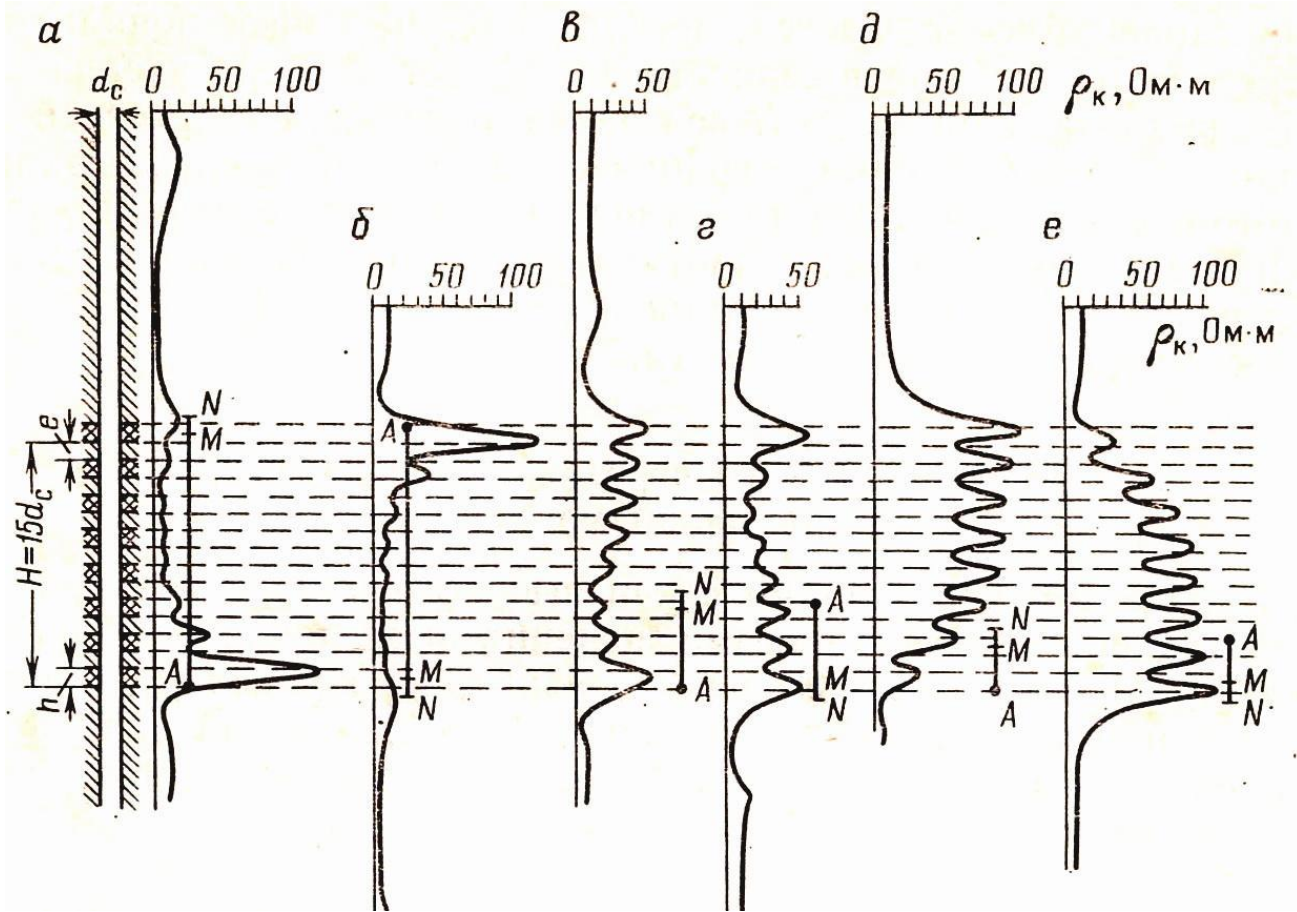
Кривые ρ_k для двух пластов высокого сопротивления, мощность которых h меньше длины подошвенного градиент-зонда.

а, б и в – занижающее экранирование

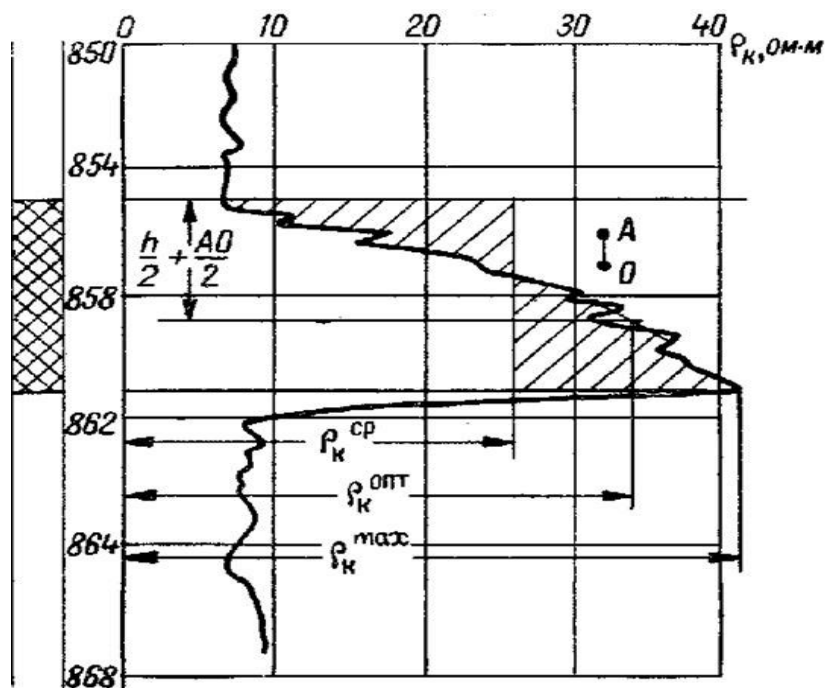
г – завышающее экранирование

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

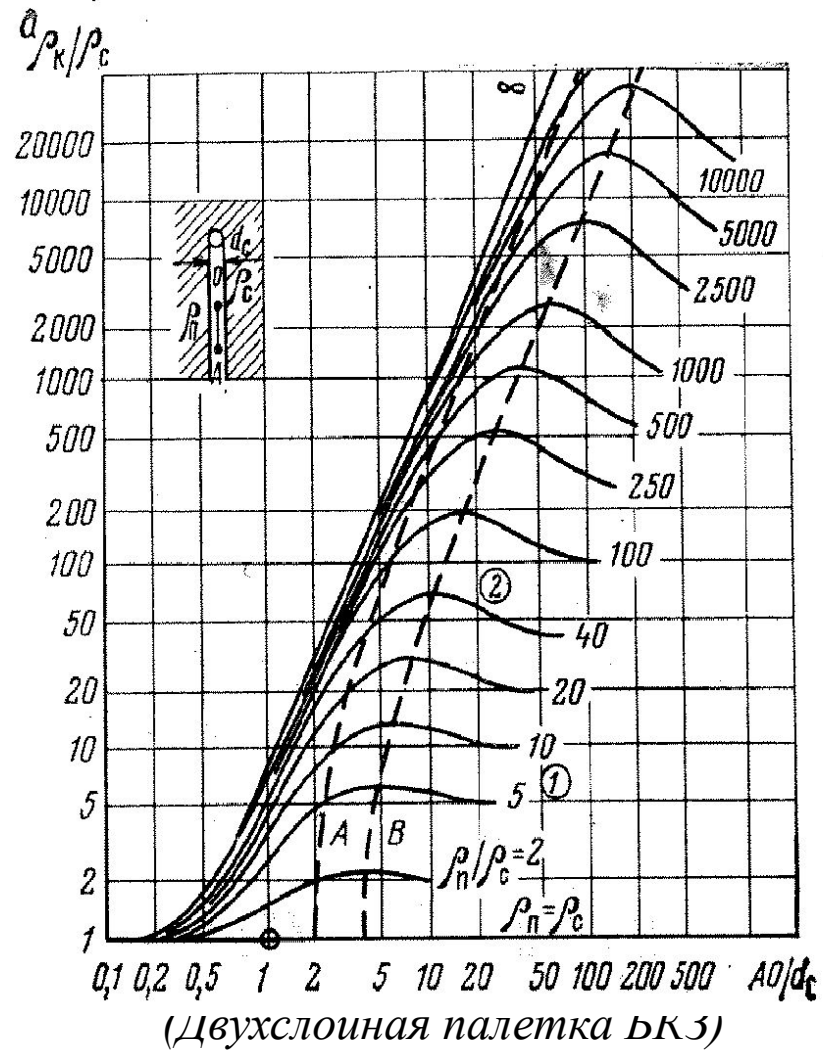


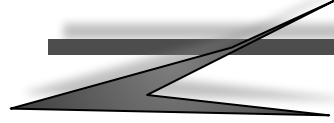


Кажущееся удельное сопротивление ρ_k различно против разных точек пласта. В качестве существенных наиболее характерных значений УЭС принято считать среднее $\rho_{k,ср}$, максимальное $\rho_{k,мах}$ или минимальное $\rho_{k,мин}$ и оптимальное $\rho_{k,опт}$



Определить истинное сопротивление горных пород ρ_n можно с помощью специальных палеток





Метод БКЗ

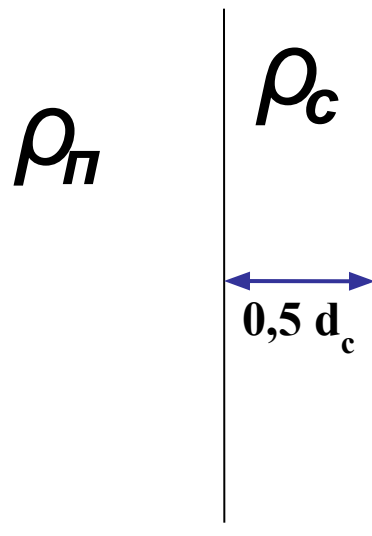
(Боковое каротажное зондирование)

Определение истинного сопротивления пласта

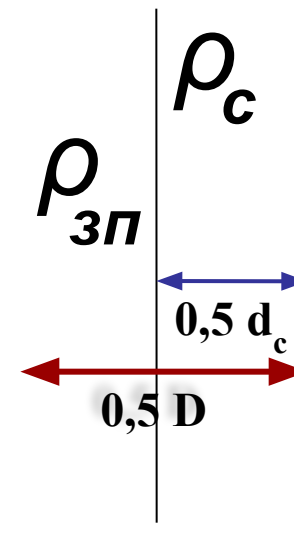
БКЗ (БЭЗ) – боковое каротажное зондирование –
измерение ρ_k однотипными зондами разной длины

- | | | |
|------------------|------------------|------------------|
| 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 |

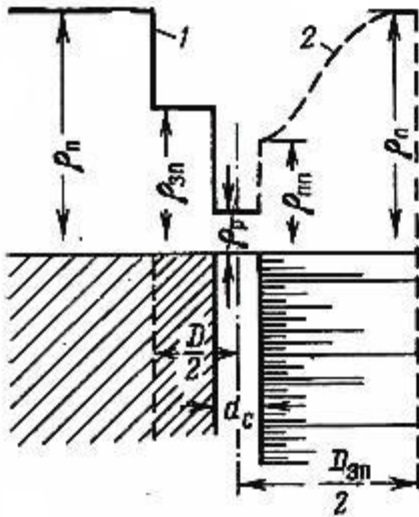
Двухслойный разрез



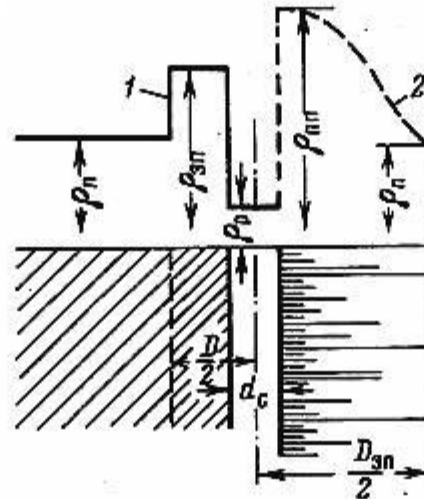
Трехслойный разрез



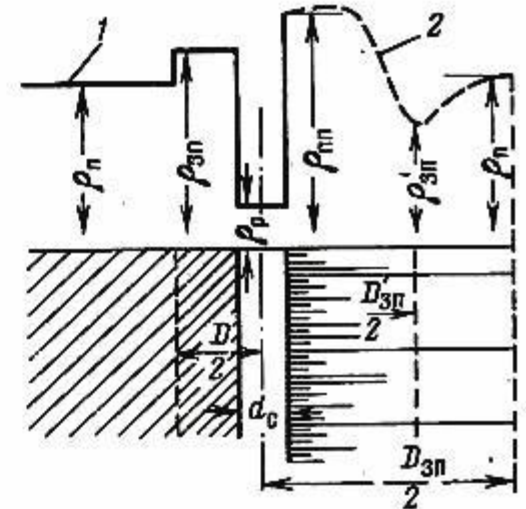
Зона проникновения



*Понижающее
проникновение*

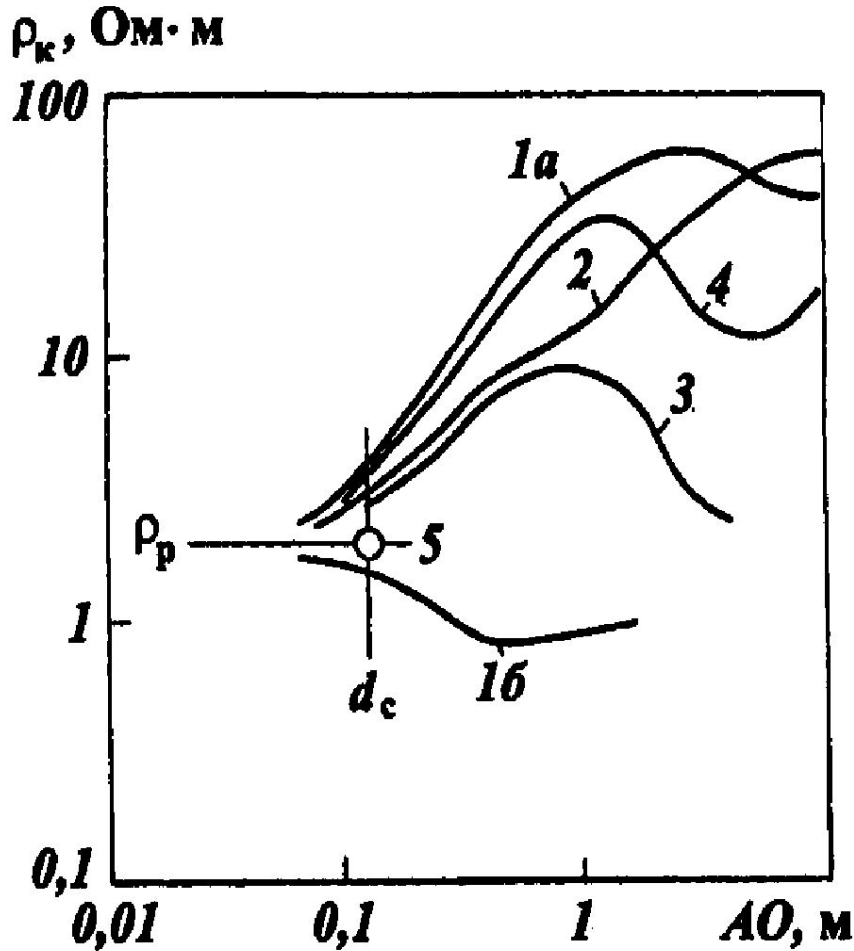


*Повышающее
проникновение*



*Повышающее
проникновение
нефтяной пласт*

Типы кривых БКЗ



1a — $\rho_c < \rho_n$

1б — $\rho_c > \rho_n$

2 — $\rho_c < \rho_{zn} < \rho_n$

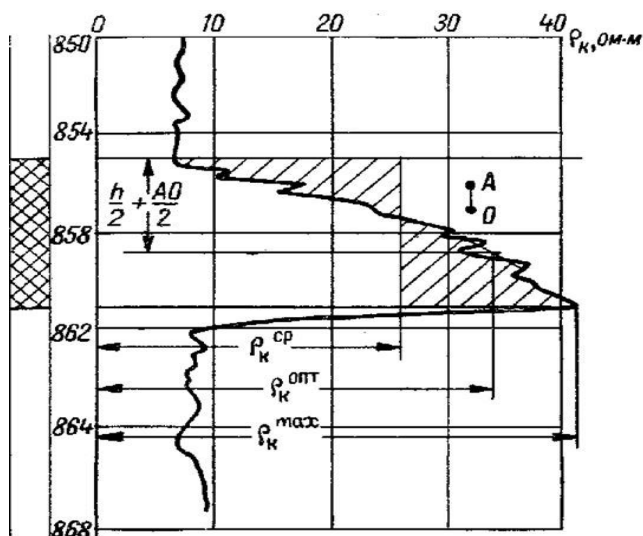
3 — $\rho_c < \rho_{zn} > \rho_n$

4 — тонкий пласт высокого сопротивления

5 — крест кривой

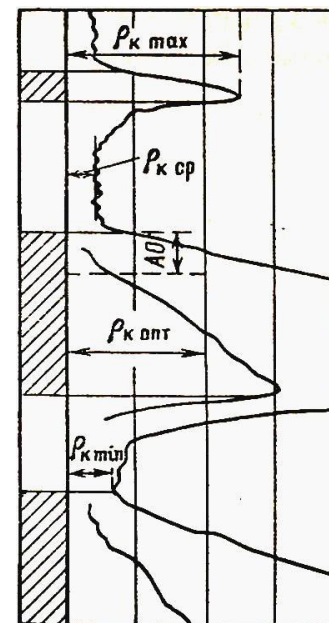
Обработка данных БКЗ

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

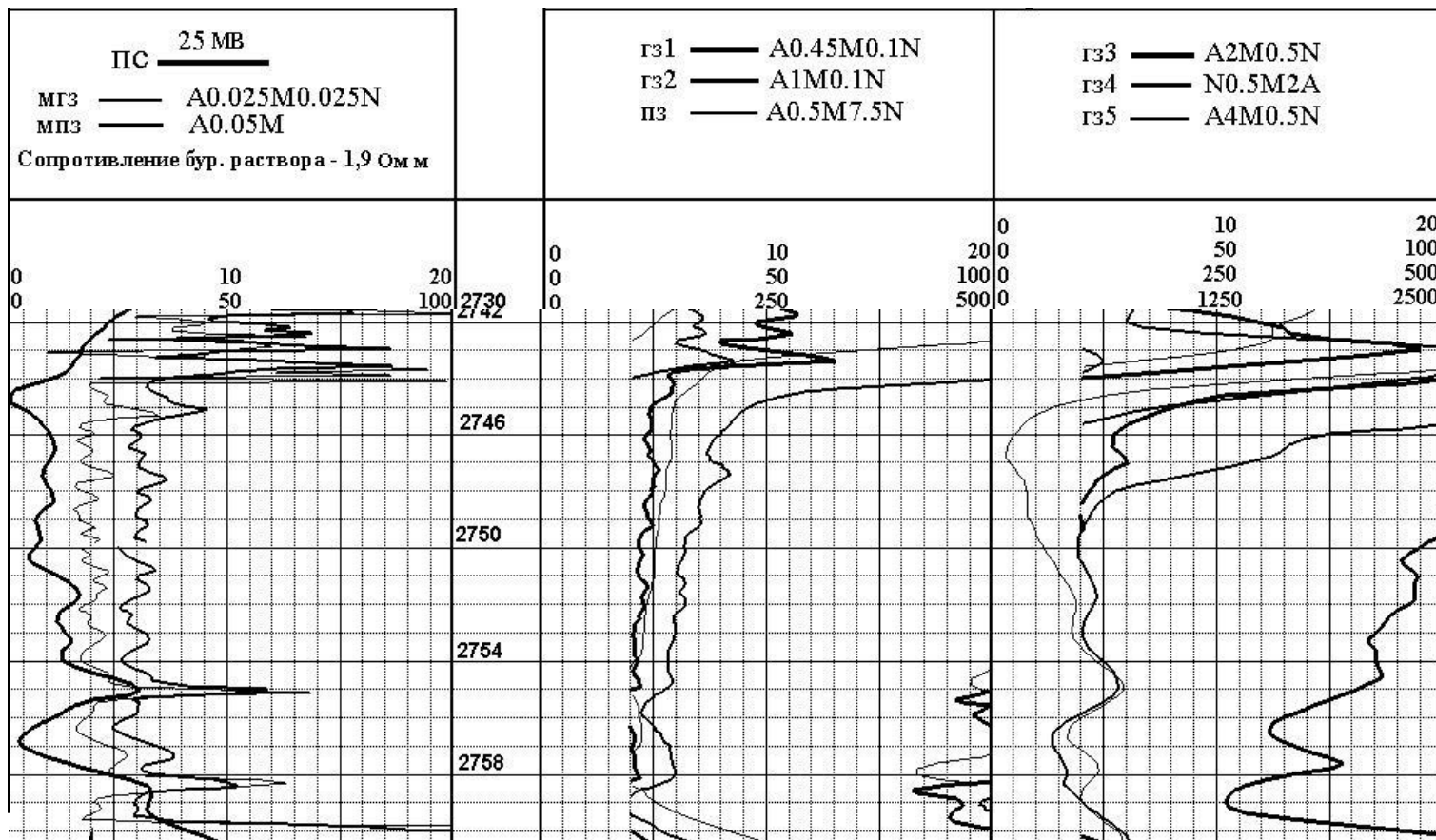


Существенные значения:

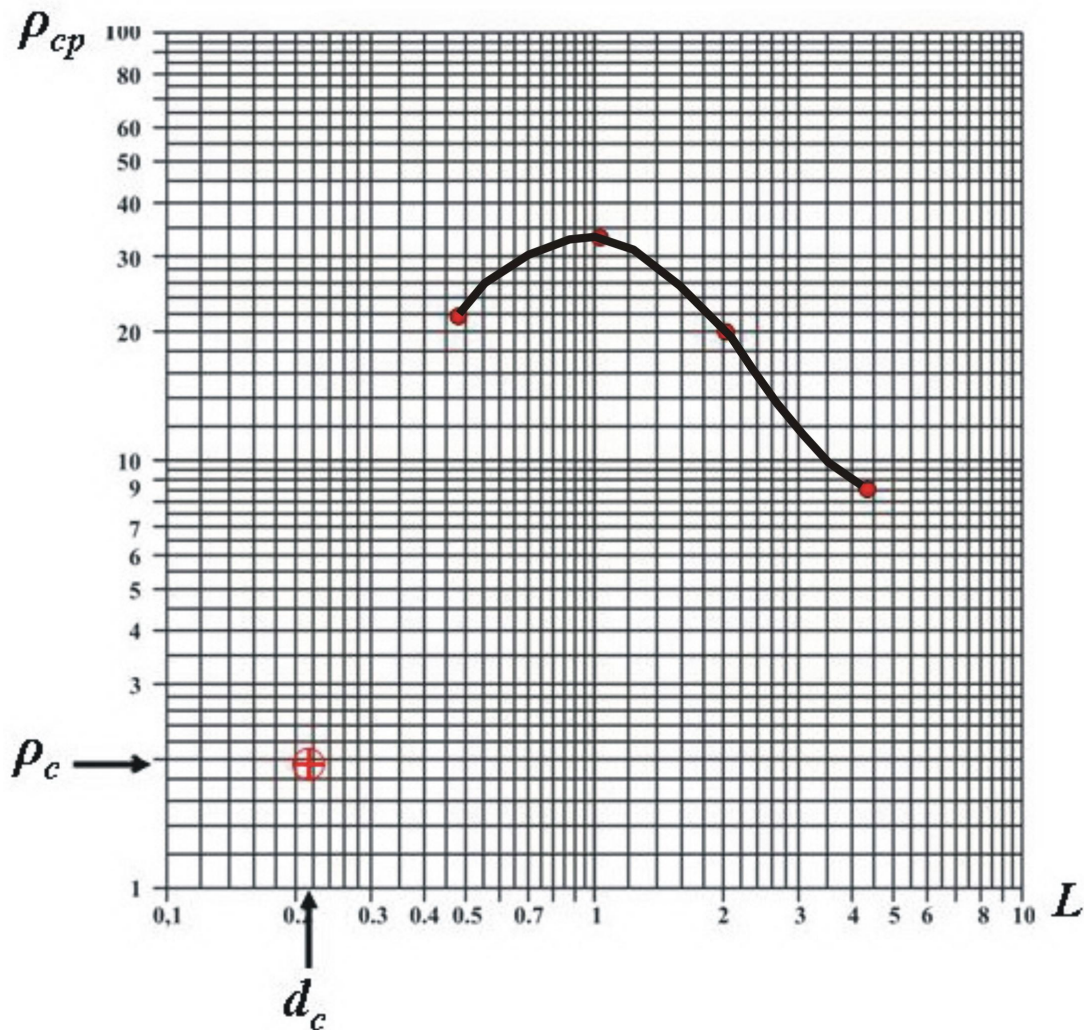
- среднее,
- оптимальное,
- экстремальное.



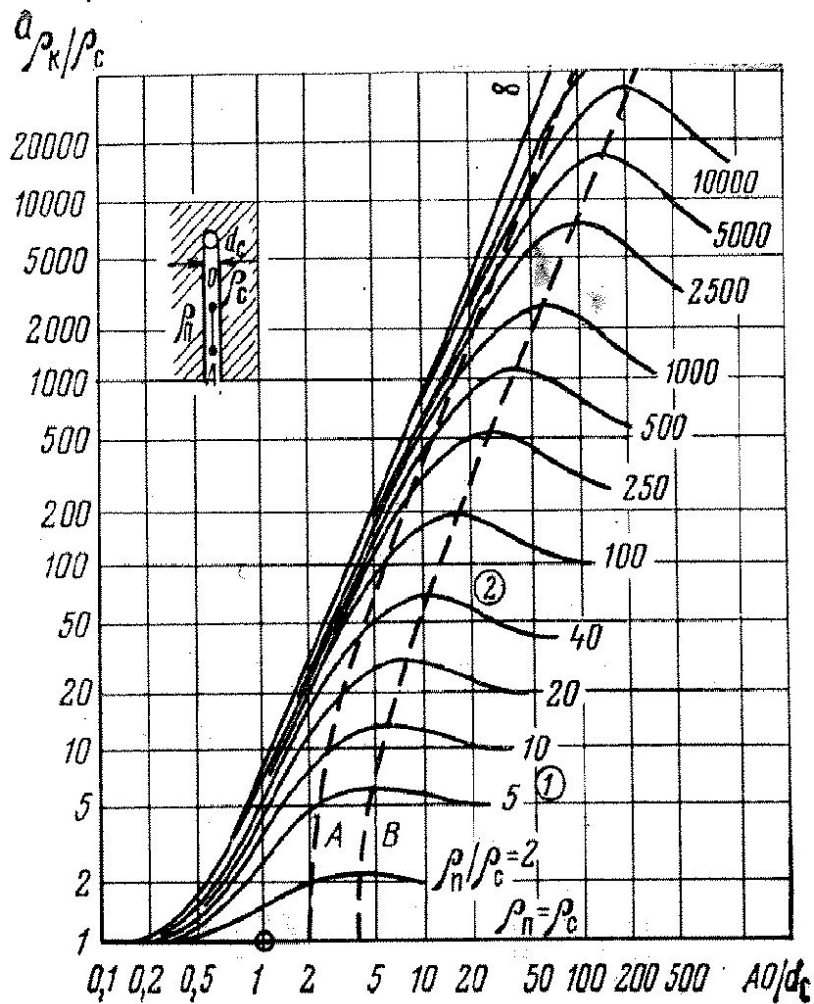
Запись кривых БКЗ



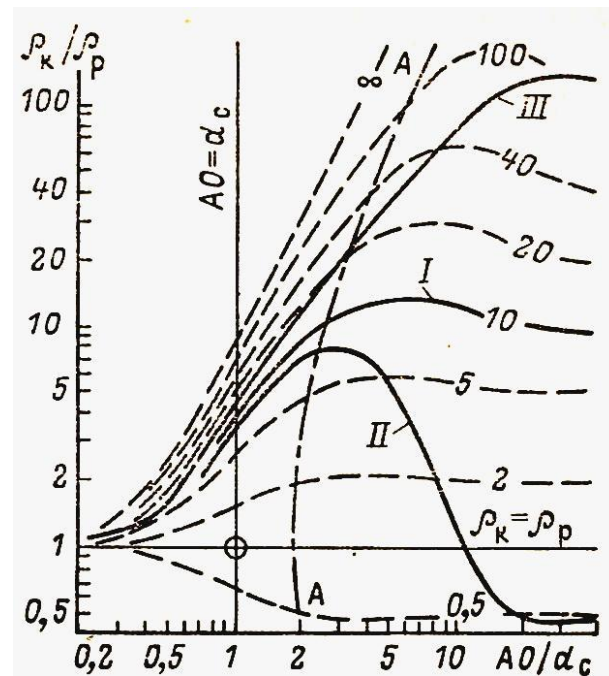
Построение фактической кривой БКЗ



Фактическую кривую БКЗ совмещают с 2-х слойной палеткой БКЗ

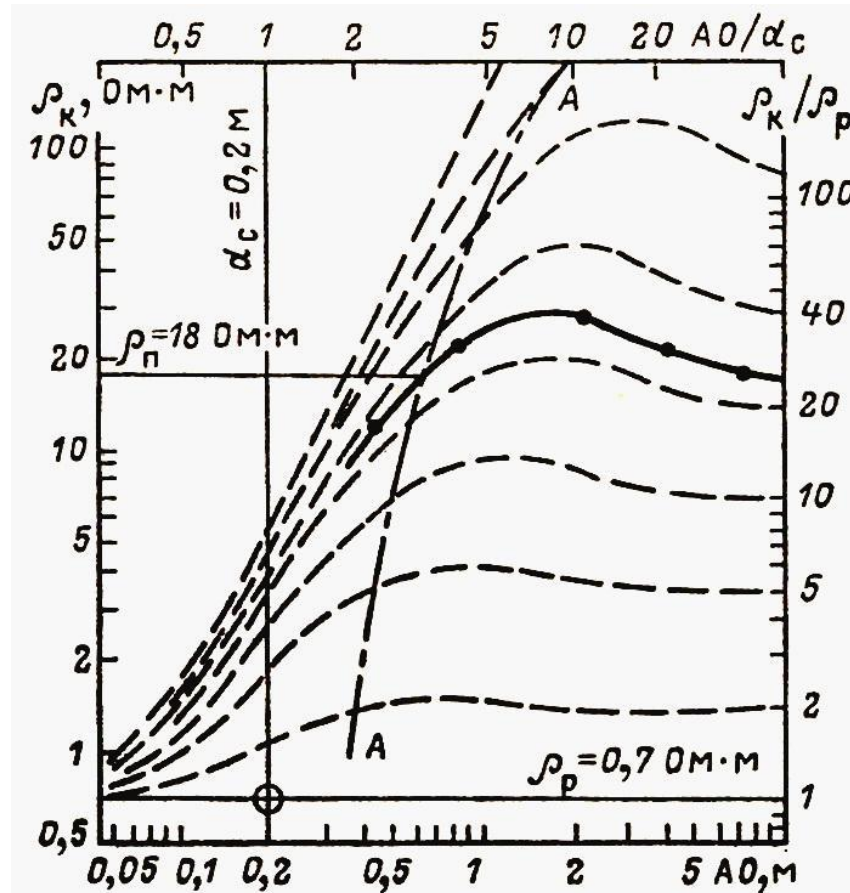


Шифр кривых ρ_n/ρ_c



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

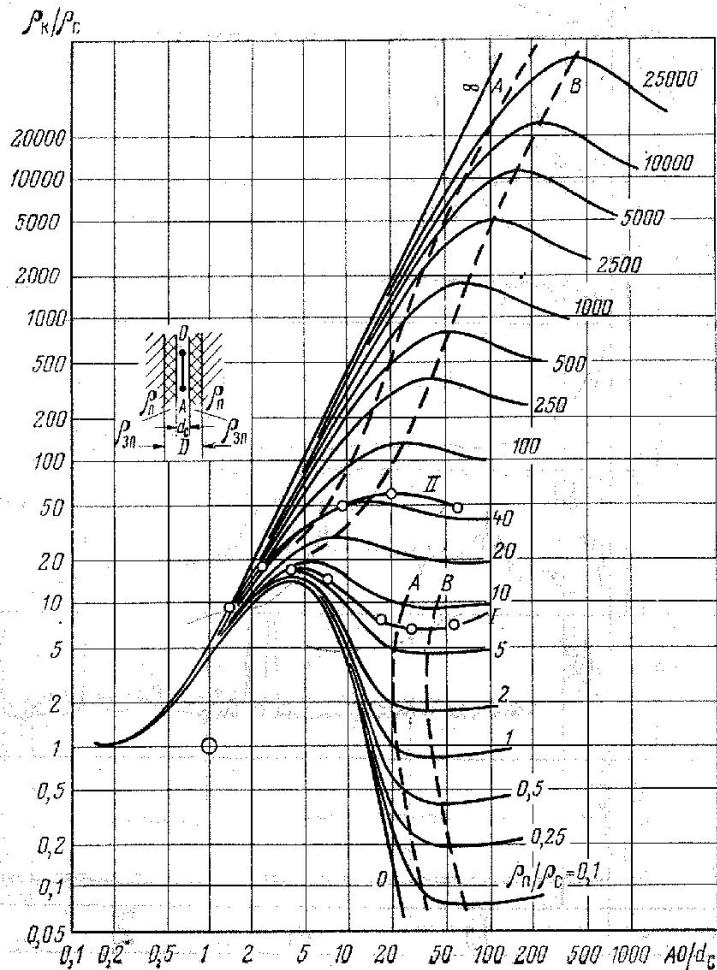
Совмещение фактической и теоретической кривых БКЗ на 2-х слойной палетке



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 - $\mu_3 = \rho_n / \rho_c$

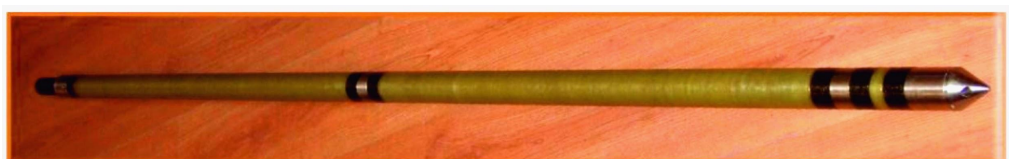
$\rho_{zn} \approx \rho_n$ из 2-х слойной палетки
 ρ_c ρ_c

$$\rho_{zn} = \mu_2 \rho_c$$

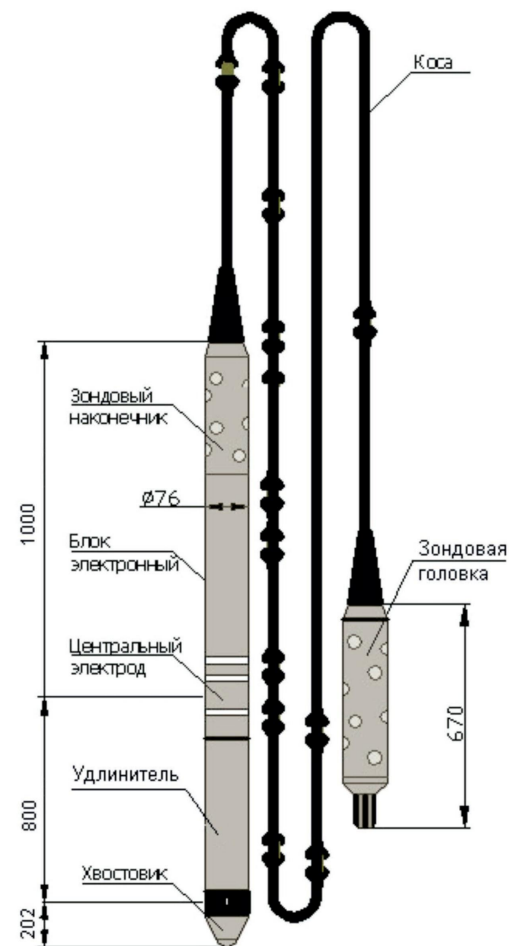
$$\rho_n = \mu_3 \rho_c$$

$$d_c = D/d_c \cdot d_c$$

Общий вид зондов КС + ПС



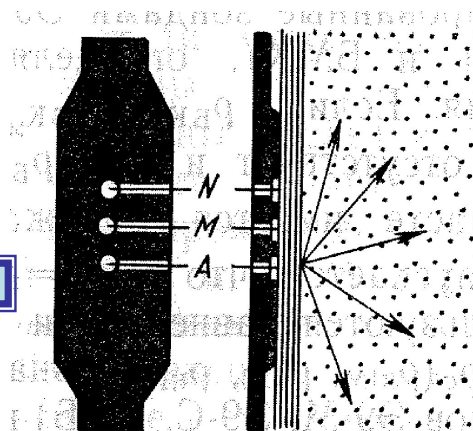
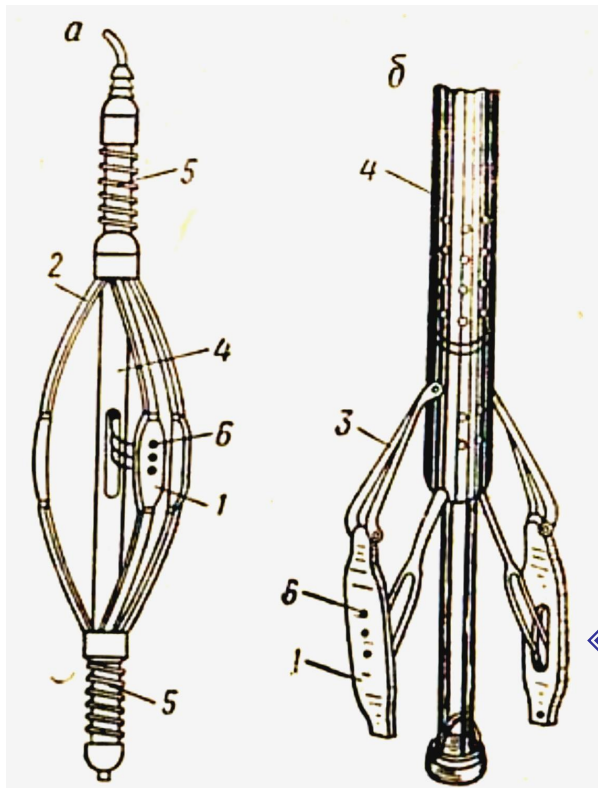
ЭК2-НН (БКЗ+2БК+ПС)



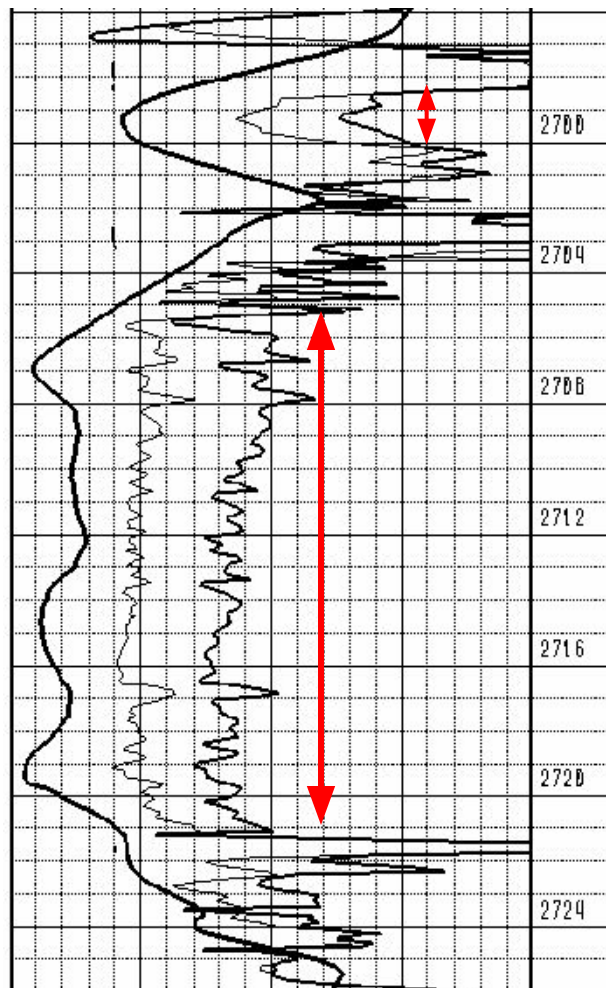
Микрокаротажное зондирование (МКЗ)

*A0,025M0,025N – микроградиент-зонд.
Радиус исследования ≈ 3 см.*

*A0,05M – микропотенциал-зонд.
Радиус исследования ≈ 12 см.*



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

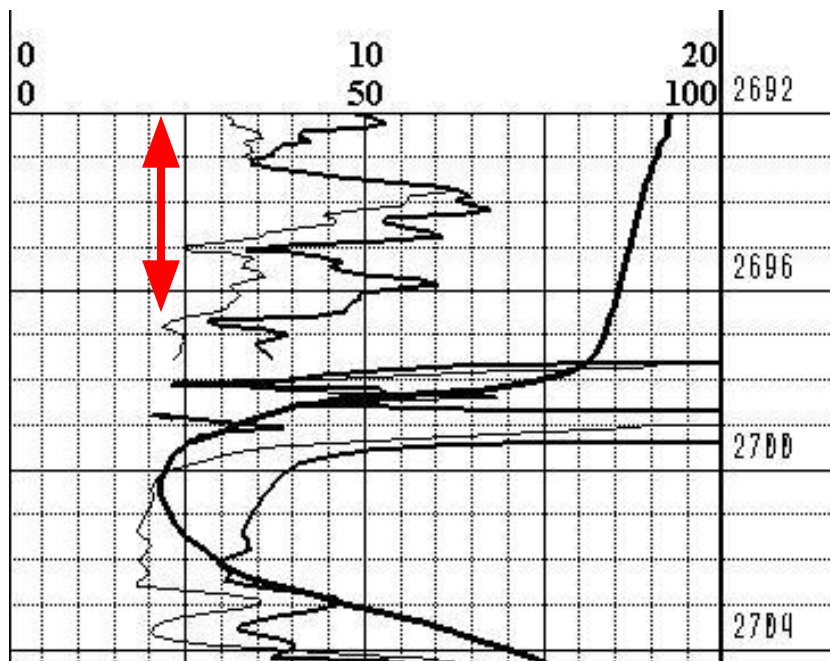


*Положительное
расхождение*



*Проницаемые
горные породы*

— МПЗ
— МГЗ

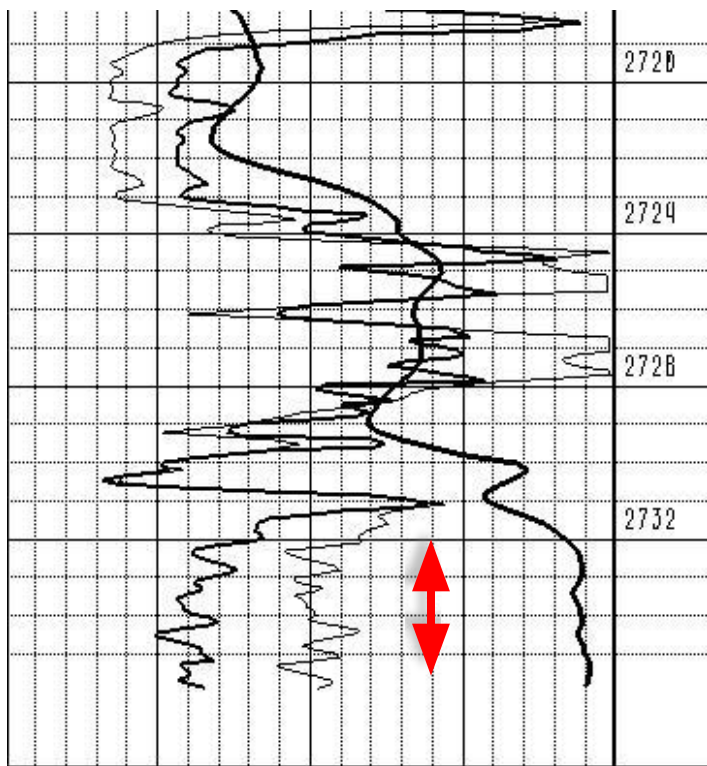


*Положительное
расхождение,
ПС – большое,
 ρ_k - большое*



*Непроницаемые
горные породы
большого сопротивления*

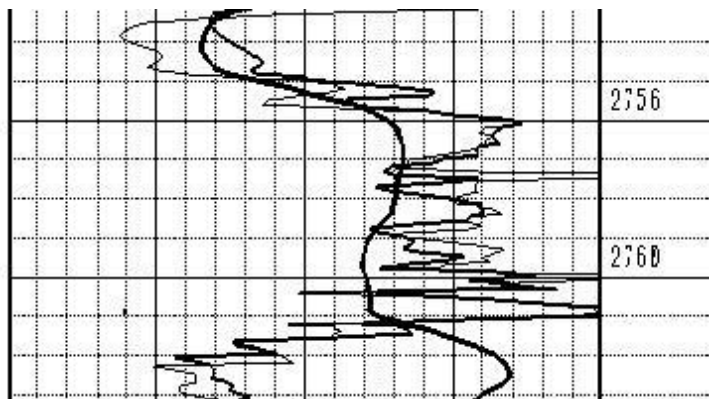
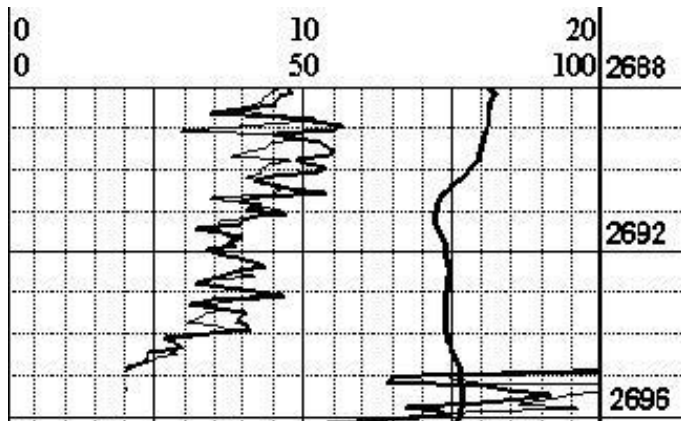
$\rho_{МПЗ} < \rho_{МГЗ}$ - отрицательное расхождение



*Отрицательное
расхождение*



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



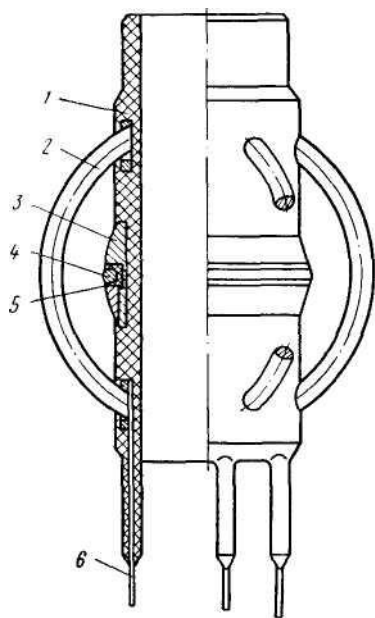
Нет расхождения



*Плотные, непроницаемые
горные породы*

Резистивиметрия

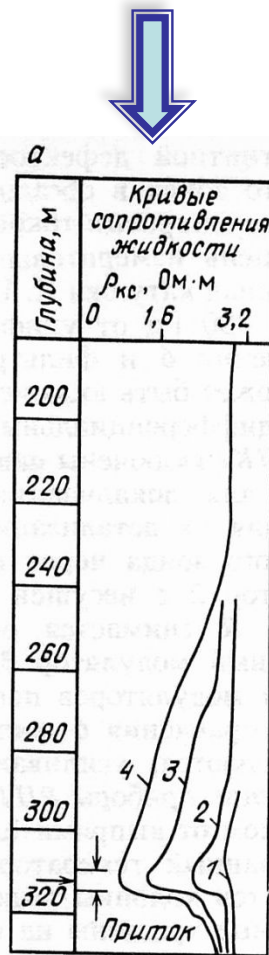
Резистивиметрия применяется для определения удельного электрического сопротивления промывочной жидкости.



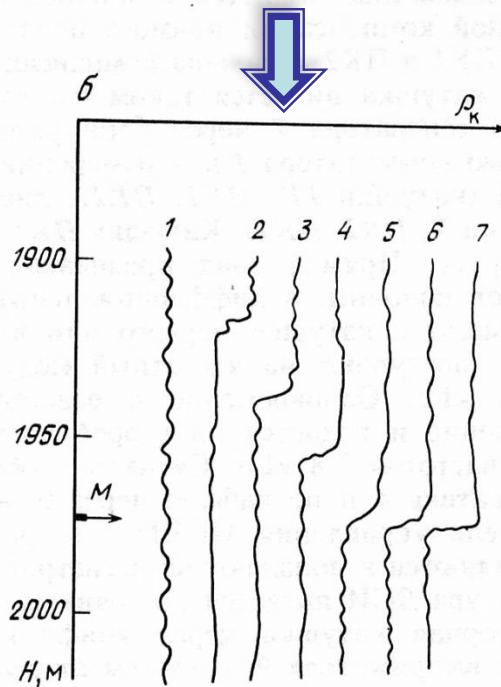
ρ_c - необходимо при обработке и интерпретации данных геофизических методов, при изучении технического состояния скважины, при гидрогеологических исследованиях.

- 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 ($\rho_c < \rho_{дв}$)

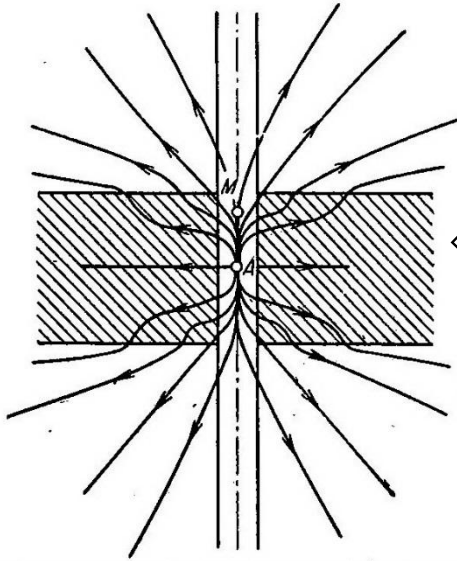


ρ_c - сопротивление промывочной жидкости;

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

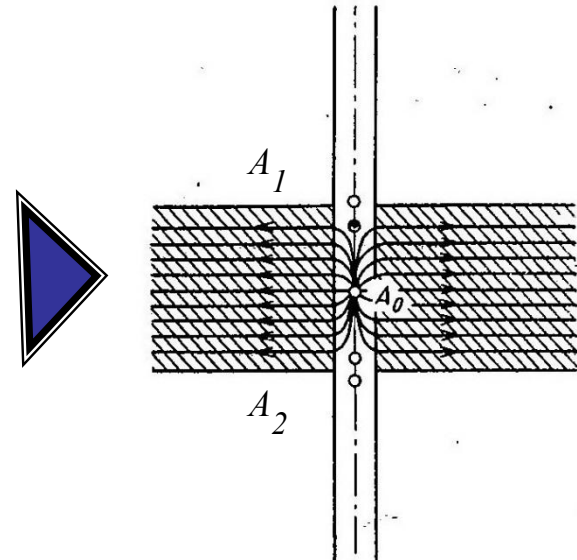
$\rho_{дв}$ - сопротивление доливаемой воды.

Боковой каротаж (БК)

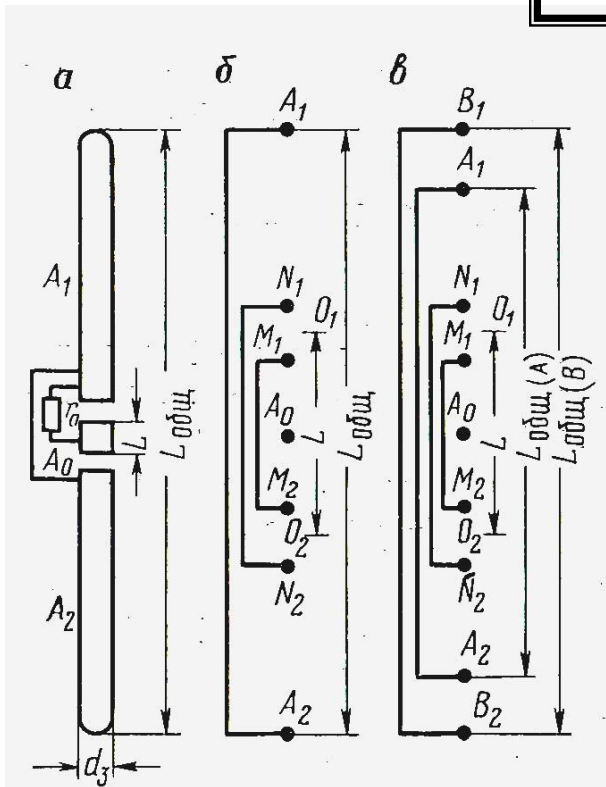


*При использовании обычных зондов,
плотность тока в каждой из сред,
пропорциональна их УЭС*

*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),

$$L_{общ} = 3,2м, L = 0,18м;$$

б – семиэлектродный зонд (БК-7),

$$L_{общ} = 3м, L = 0,6м, q = 5,$$

$$A_0, 2M_1, 0,2N_1, 1,1A_1 (L_A 3q5);$$

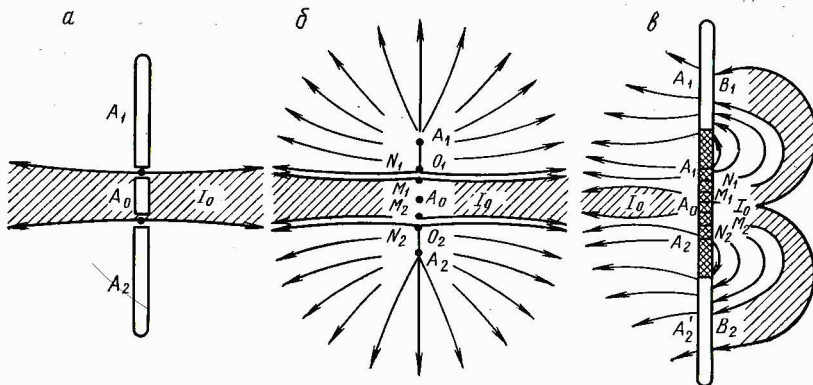
в – девятиэлектродный зонд (БК-9):

$$L_{общ} = 1,2м, L = 0,6м, q = 2,$$

$$A_0, 2M_1, 0,2N_1, 0,2A_1, 0,9B_1 (L_B 3L_A q2)$$

q – параметр фокусировки

$$q = \frac{L_{общ}}{L}$$

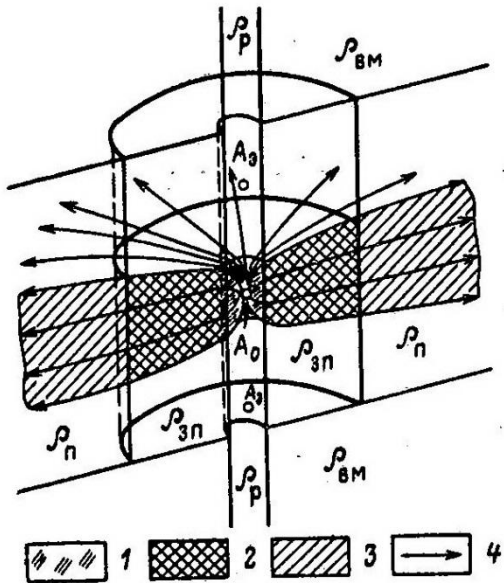


$$\rho_{\text{эф}} = G_c \rho_c + G_{3n} \rho_{3n} + G_n \rho_n + G_{\text{вм}} \rho_{\text{вм}}$$

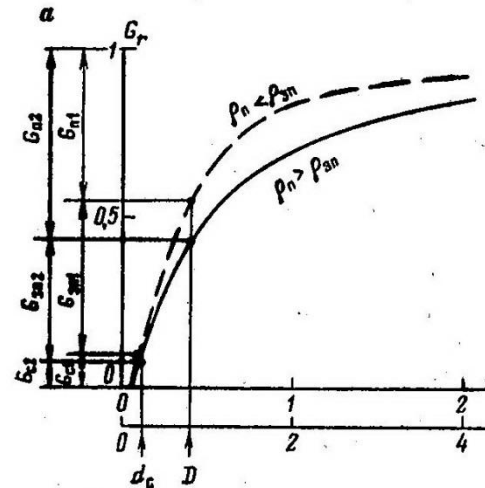
$$G_c + G_{3n} + G_n = 1$$

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

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

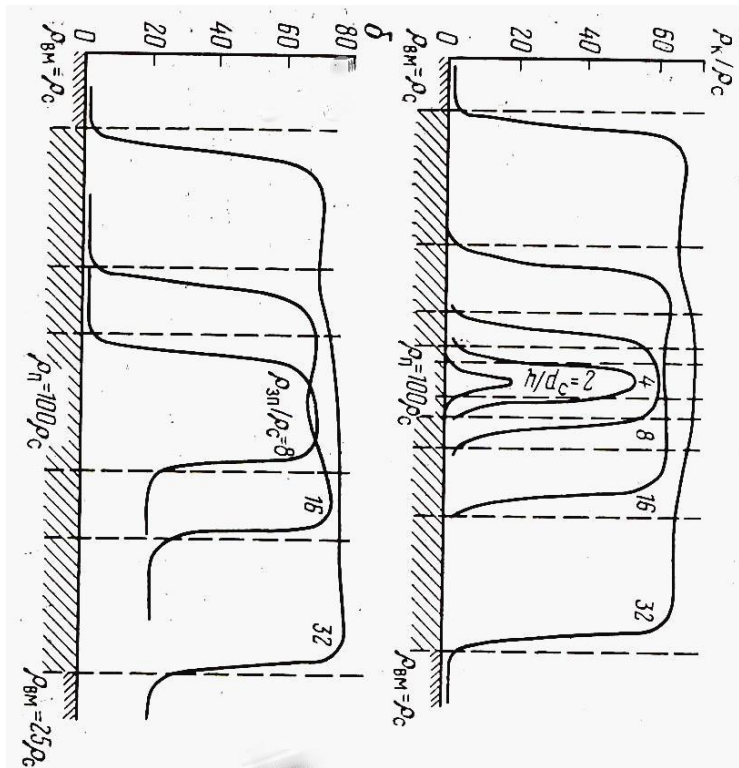


- 1 – скважина;
- 2 – зона проникновения;
- 3 – неизменная часть пласта;
- 4 – токовые линии.

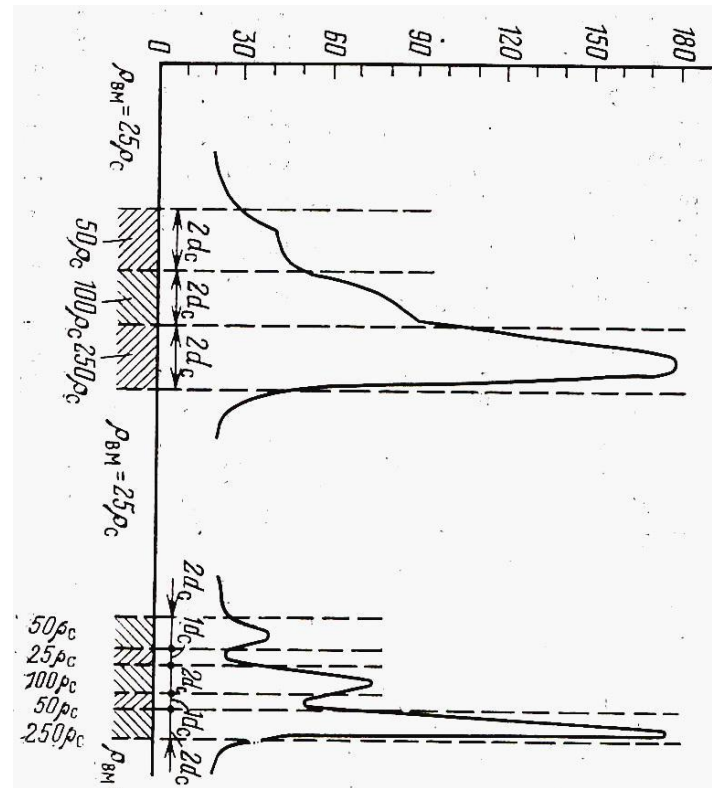


Радиальные характеристики

Кривые БК для пластов разной мощности

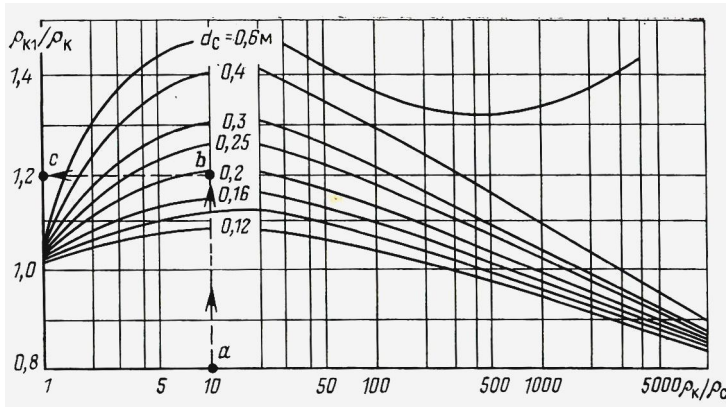


Кривые БК для пачки тонких пластов

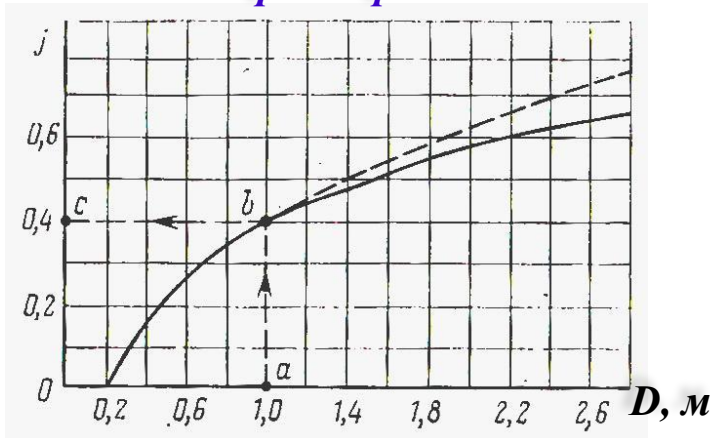


Определение удельного сопротивления по диаграммам БК

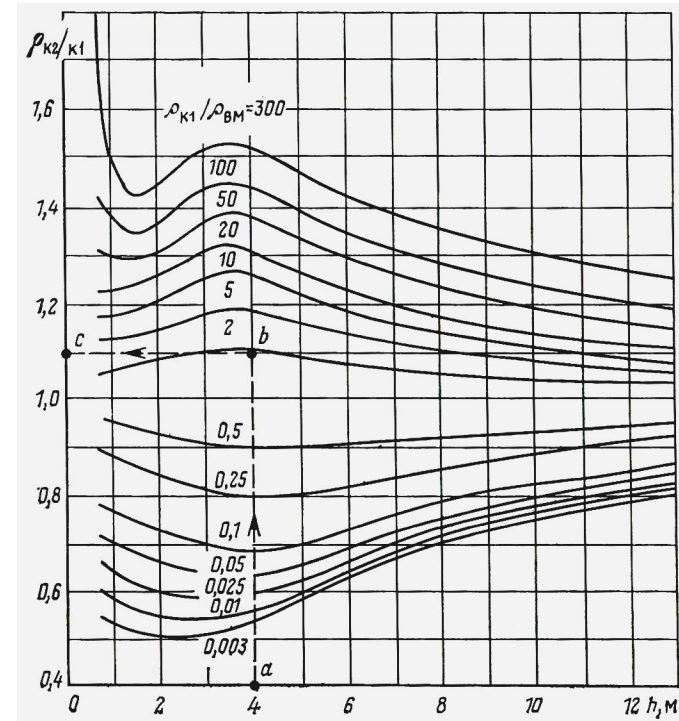
Поправка за скважину



Псевдогеометрический фактор

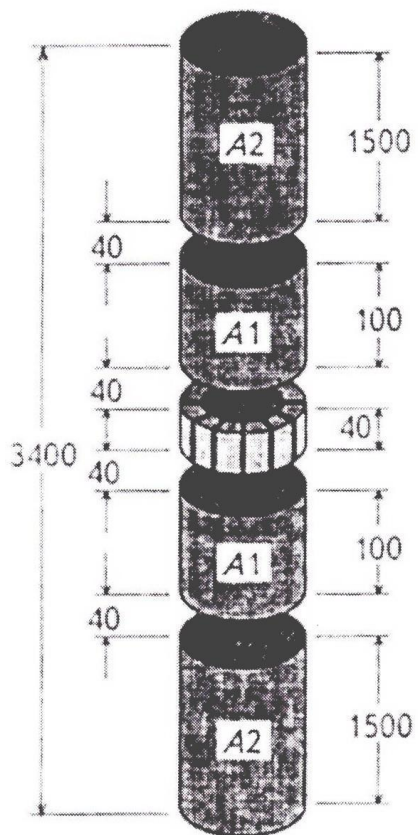


Поправка за мощность пласта

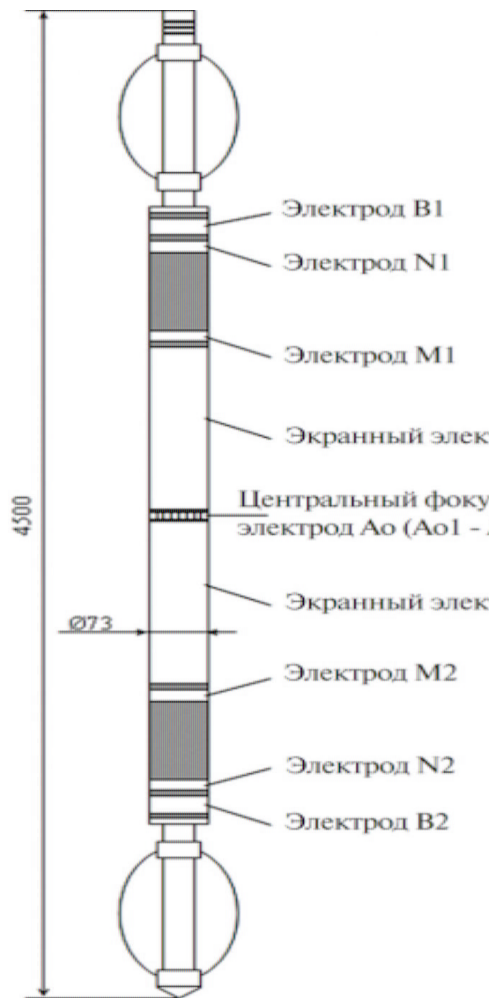


$$\rho_{k2} = j\rho_{zn} + (1-j)\rho_n$$

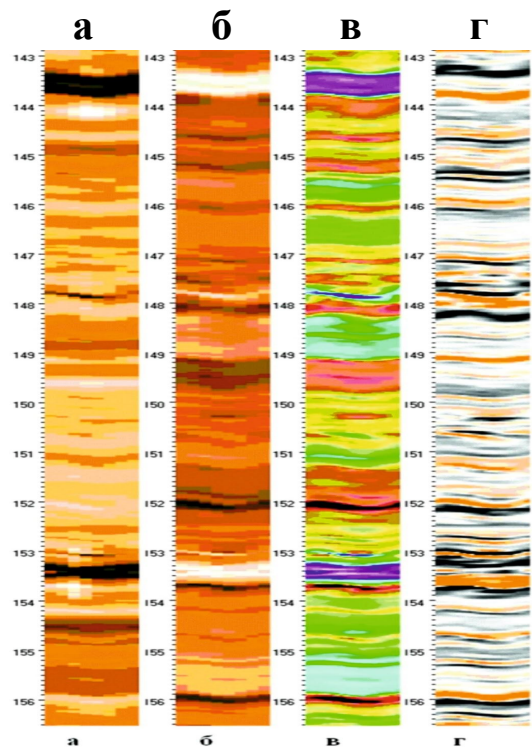
Специальные зонды БК (сканеры)



2БК

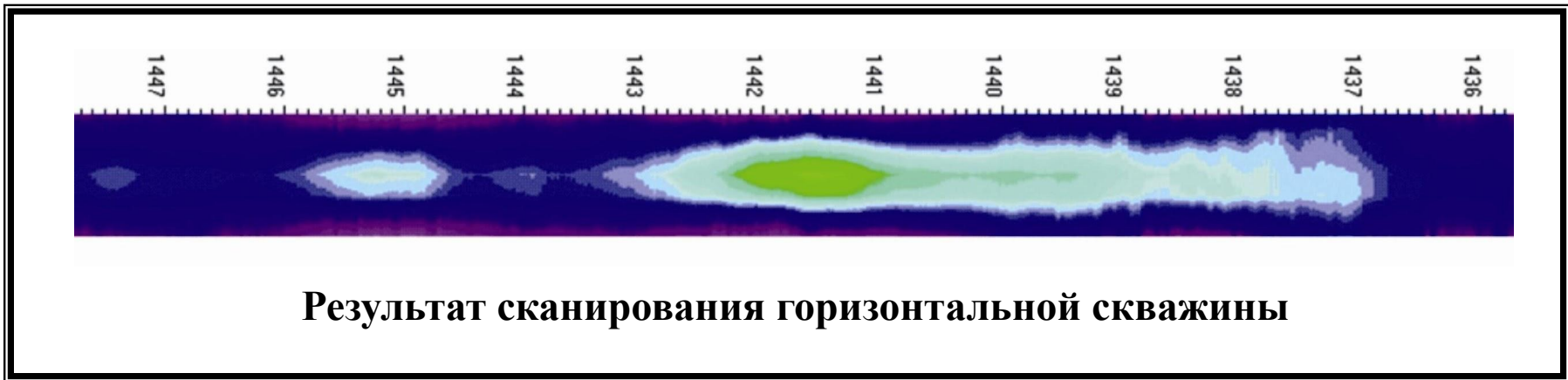


АЭСБ-73



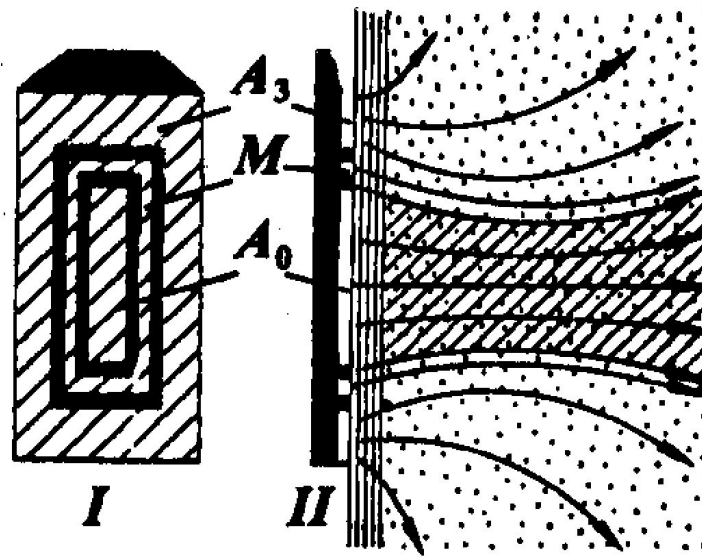
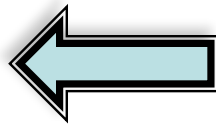
Представление результатов сканирования

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



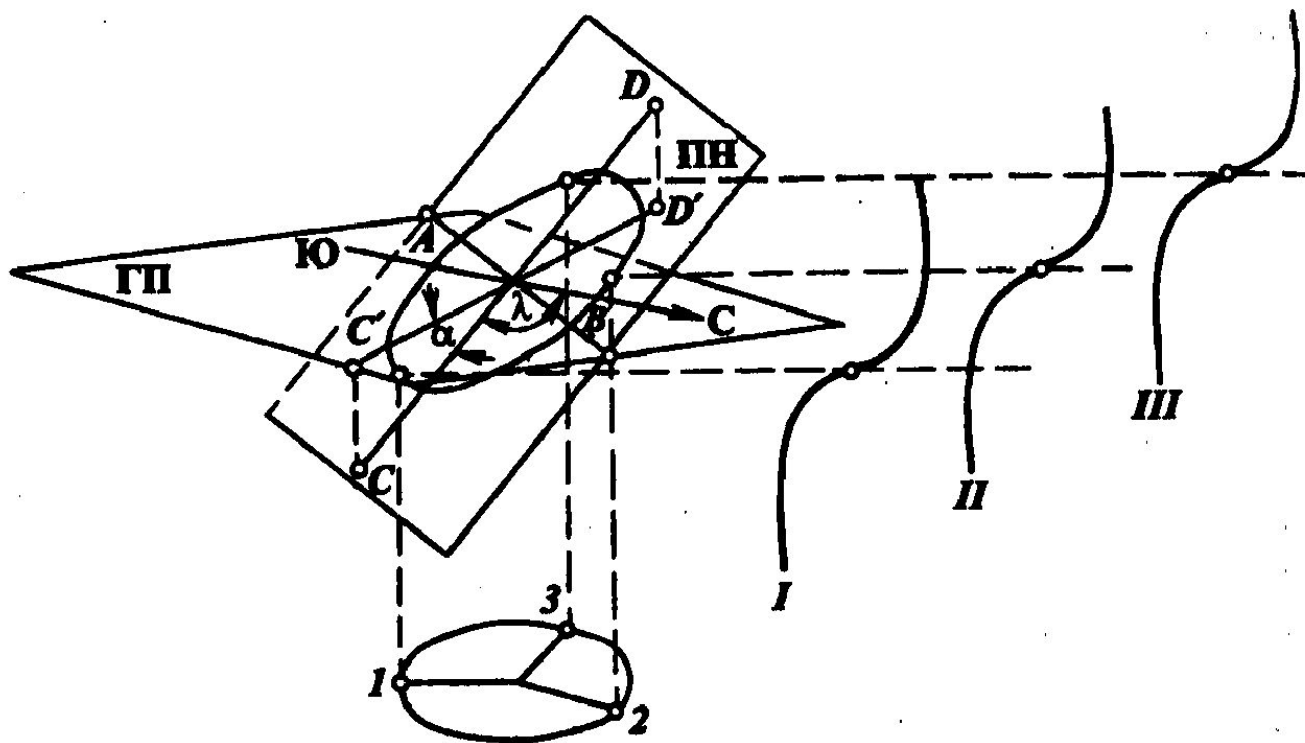
Результат сканирования горизонтальной скважины

Микробоковой каротаж (МБК)

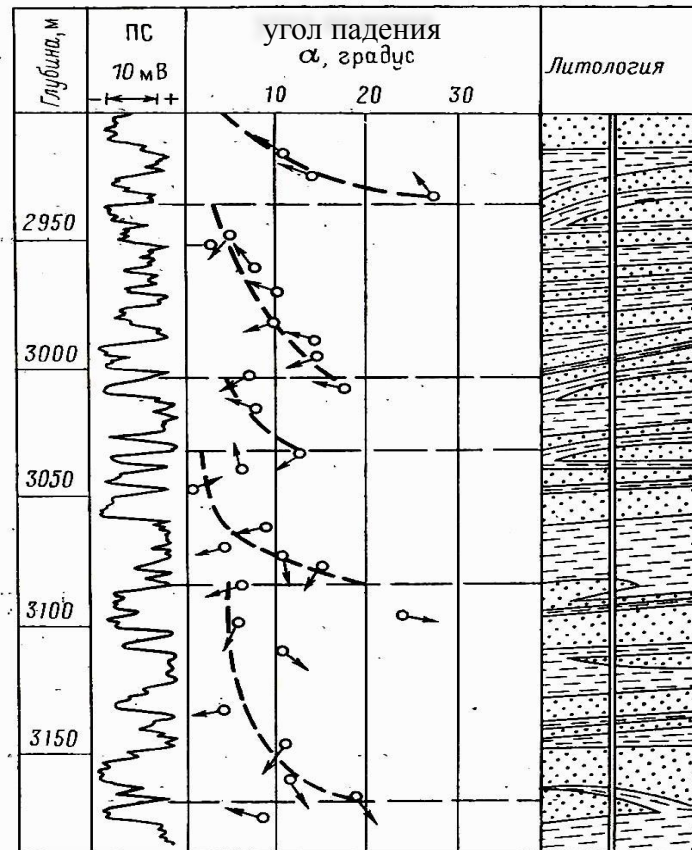


*I – трех электродный микрозонд;
II – схема токовых линий.*


Наклонометрия



Изображение результатов наклонометрии

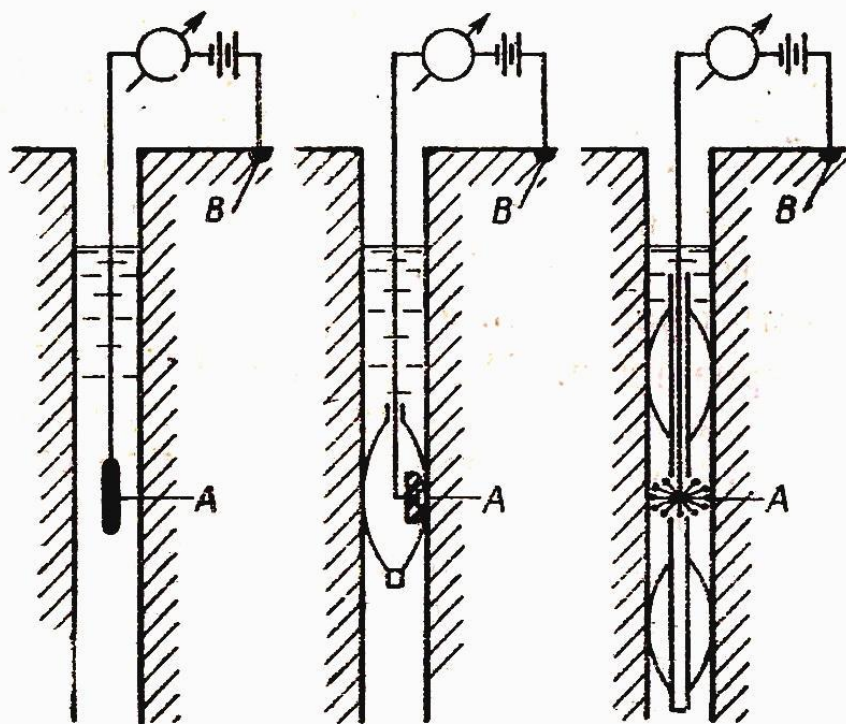


 - песчаник

 - глина

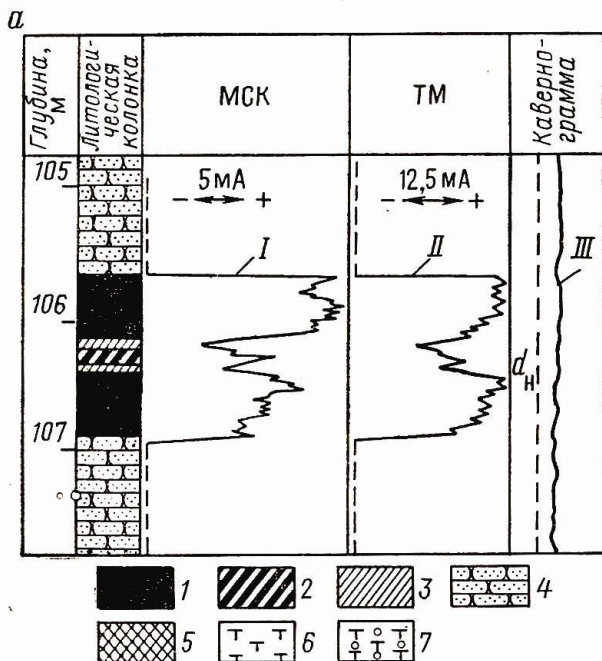
Токовый картаж (ТК)

Метод скользящих контактов (МСК)

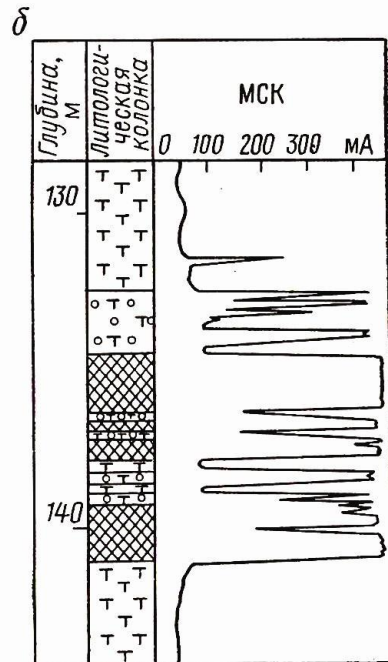


$$I = \frac{E}{(\sum R + R_A)}$$

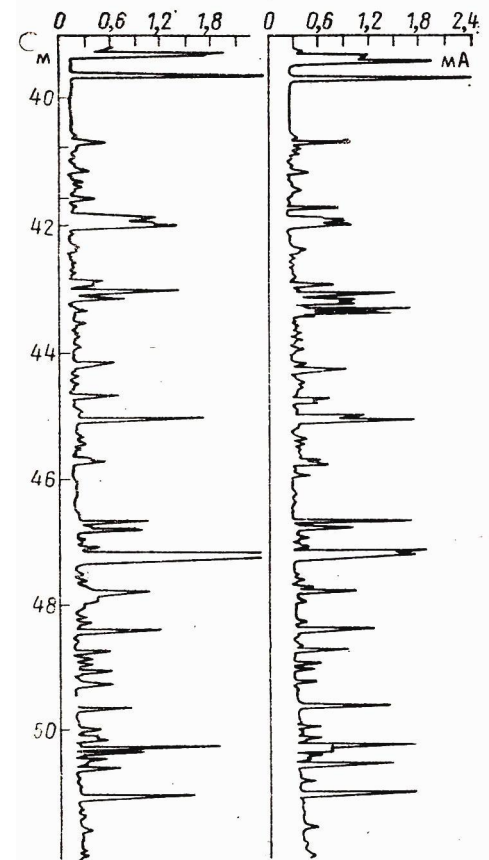
- E – напряжение источника тока;
- R – суммарное сопротивление части питающей среды (кабеля, проводов, реостата, источника питания и заземления B)
- R_A – сопротивление электрода A



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