

Электрические методы исследования скважин

Классификация электрических методов

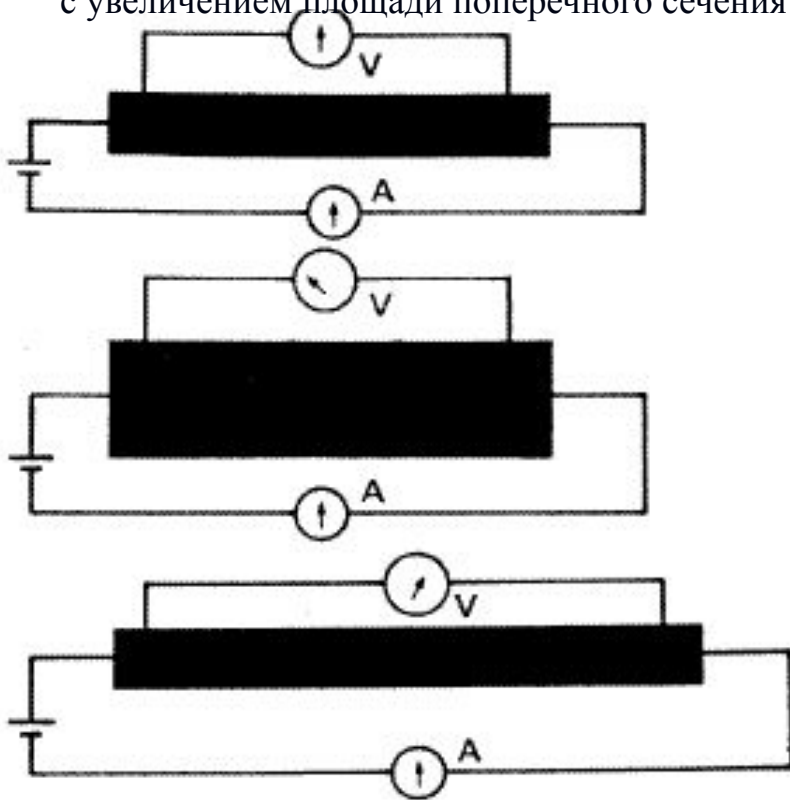
- ❑ Методы сопротивлений (conventional current logs)
 - нефокусированные методы (normal & lateral)
 - фокусированные методы (боковой каротаж - laterolog)
- ❑ Индукционные метод (Induction Logs)
- ❑ Микроэлектрические методы (Micrologs)

TOOL	DESIGNATION		MEASUREMENT	QUALITATIVE USE	QUANTITATIVE USE
Normal Res. Logs: Short Normal Long Normal Lateral	SN LN LAT		Resistivity		Determine Sw Non- Focused Severe Invasion Effect Not in conductive muds
Laterolog 3 Laterolog 7 Laterolog 9 Dual Laterolog	LL3 LL7 LL9 DLL		Deep Resistivity in salty muds		Determine Sw Focused Resolution power ca. 2-4ft Salt sat. muds
Induction Logs: Induction Electrical Survey Induction Tool Induction Spherically Focused Dual Induction	IES 6FF 40 ISF DIL		Deep Resistivity in resistive muds		Determine Sw Focused Resolution power ca. 5ft Oil Based or Freshwater muds
Microlog	ML			Mudcake Indicator	Determine Sw Thin bed detector Resolution power ca. 2"
Microresistivity Logs: Microlaterolog Proximity Log Micro spherically	MLL PL MSFL		Resistivity (Invaded Zone)		Determine Sw Poor if thick mudcake Poor if shallow invasion

**Зонды
электрических
методов.**

**Условия и
область
применения**

Сопротивление увеличивается с длиной,
уменьшается
с увеличением площади поперечного сечения



Необходимо иметь более универсальную и не зависящую
от изменений размера величину – удельное
электрическое

сопротивление – сопротивление единицы объема

$$R = \frac{ra}{L}$$

$$\frac{\text{OHM-METERS}^2}{\text{METER}}$$

R = resistivity

a = area

L = length

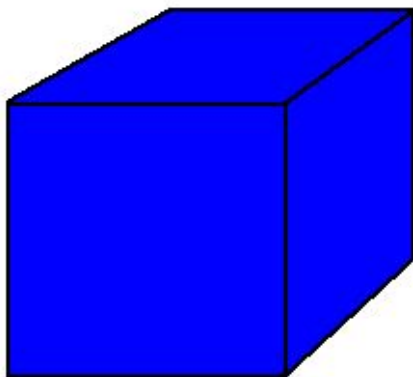
r = resistance

В большинстве
электрических
методов ГИС
измеряется
удельное
электрическое
сопротивление

Сопротивление и проводимость

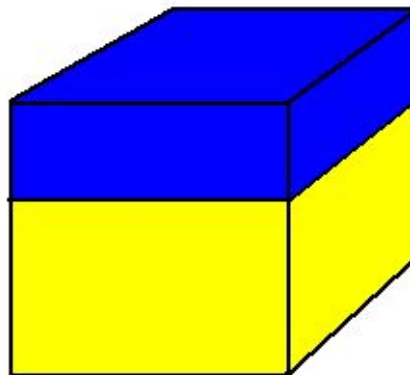
- **Удельное электрическое сопротивление**
 - $R = r * A / L$
 - Единицы измерения – Ом*м
 - Для каждого прибора имеется специальный коэффициент К, который связывает измеренное сопротивление с калиброванным удельным электрическим сопротивлением.
- **Проводимость – величина, обратная удельному электрическому сопротивлению**
 - $C = 1000 / R$ (или $R = 1000 / C$)
 - Единицы измерения – мСим/м или Сим/м

Скелет горной породы, пористость и флюиды



Единичный куб породы, насыщенный водой сопротивлением R_w

$$R_t = R_w$$



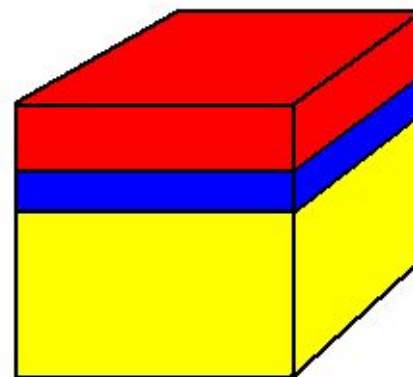
Единичный куб породы с пористостью 40%, насыщенный водой сопротивлением R_w - $S_w=100\%$, $BVW=40\%$

$$R_t = R_o$$

$$R_o = F R_w$$

где

$$F = a / \Phi^m$$



Единичный куб породы с пористостью 40%, насыщенный водой сопротивлением R_w - ($S_w=40\%$) и углеводородами. $S_{hy}=60\%$, $BVW=16\%$, $BV_{hy}=24\%$

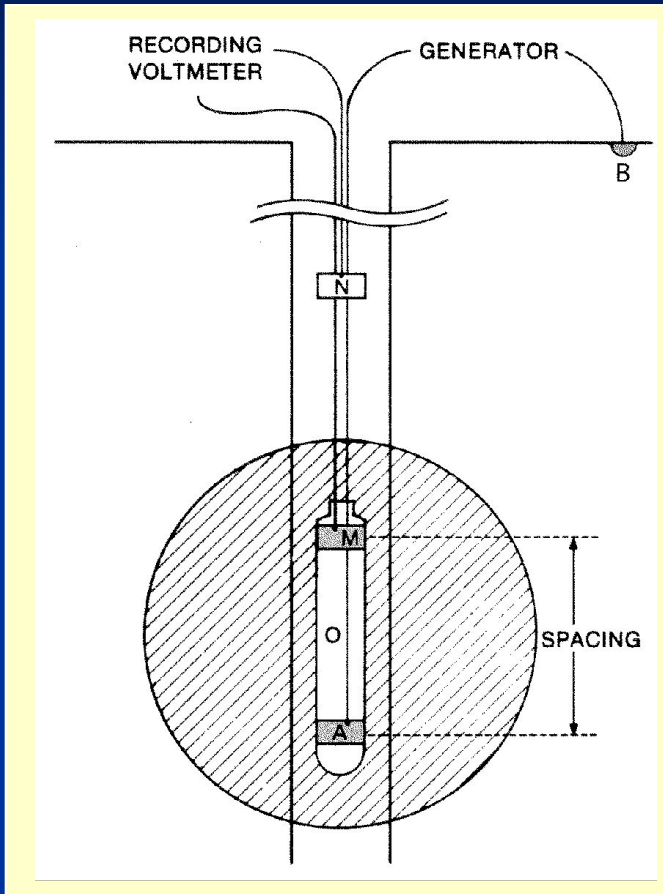
$$R_t = F R_w / S_w^2$$

Удельное электрическое сопротивление и литология - насыщение

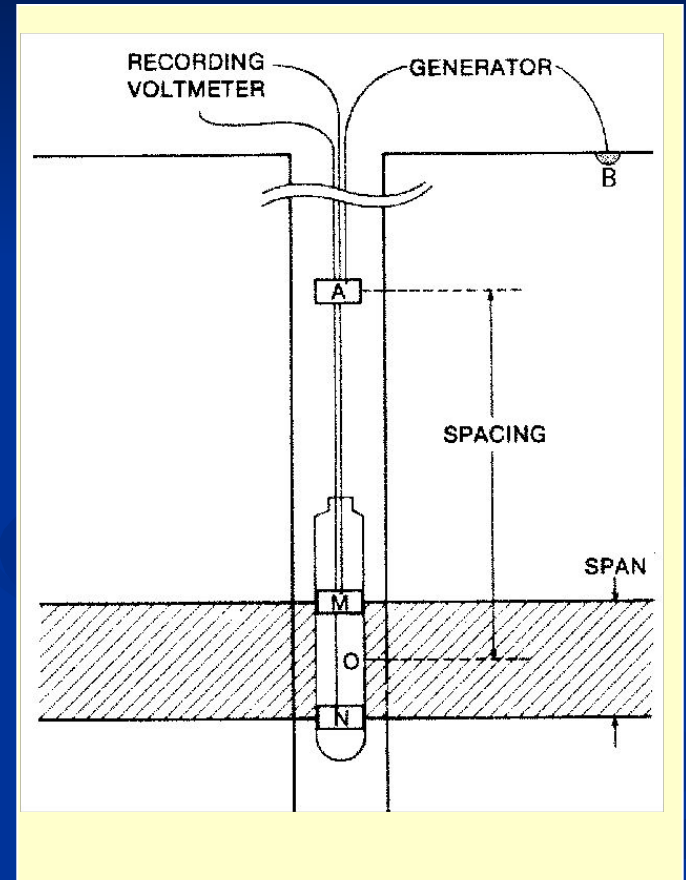
- Низкое удельное сопротивление имеют водосодержащие породы.
 - Влажные пески/Карбонаты
 - Глины
- Высокое сопротивление имеют безводные породы.
 - Низкая пористость – нет пластовой воды
 - Наличие углеводородов – малый объем пластовой воды (Swirr)
 - Или, в коллекторе ОЧЕНЬ ПРЕСНАЯ вода

Электрические методы ГИС

Метод КС - Conventional Current Logs – принцип измерений



The Normal Electric Tool
Schematic – потенциал-зонд



The Lateral Electric Tool
Schematic – градиент-зонд

Электрические методы ГИС

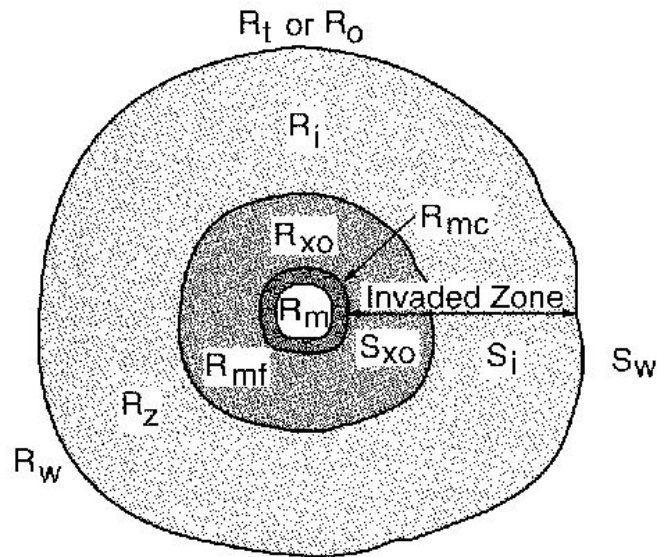
Factors Affecting Measurement

- 1) Hole diameter - d
- 2) Mud resistivity - R_m
- 3) Bed thickness
- 4) Resistivity of surrounding bed - R_s
- 5) Resistivity of invaded zone - R_i
- 6) True resistivity of uninvaded zone - R_t
- 7) Diameter of invaded zone - d_i

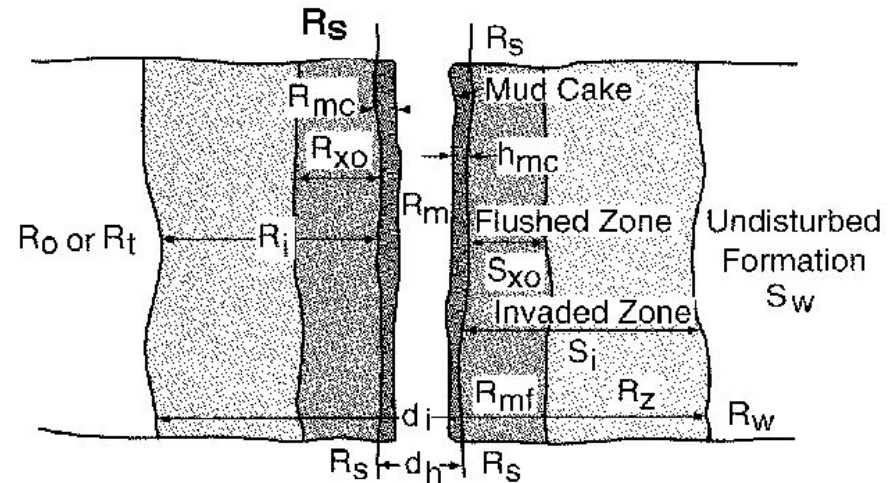
The response equation and relationships are most correct in homogeneous, uniform material. Since the material surrounding the electrode system is not uniform, the logs read only an **apparent resistivity**.

Электрические методы ГИС

Влияние скважинных условий



View Down Borehole



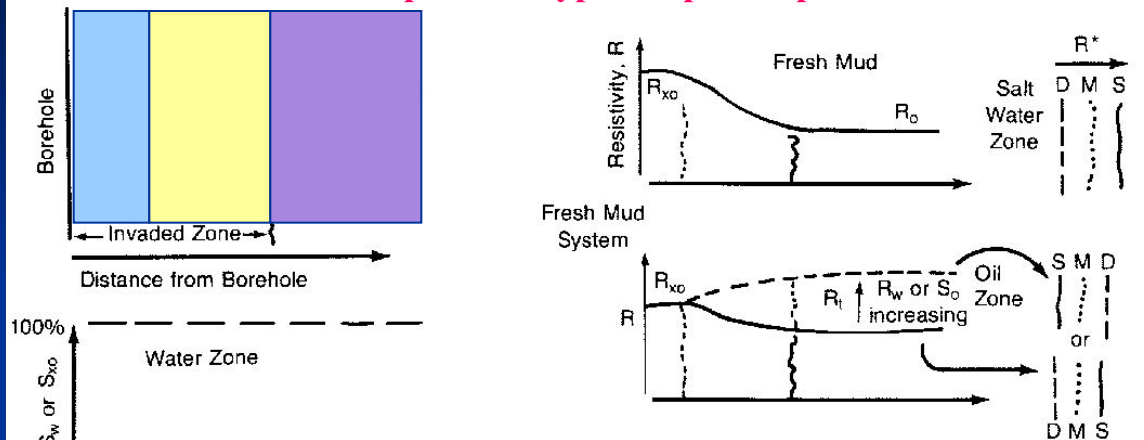
Lateral View Across Borehole

R - Resistivity
 S - Saturation
 s - Shoulder bed
 i - Invaded zone
 t - Non-invaded zone
 o - 100% Water saturated
 non-invaded zone

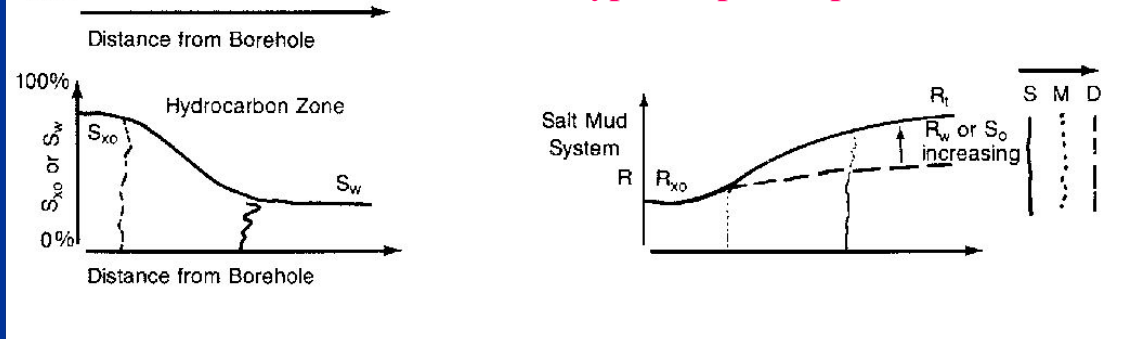
xo - Flushed zone
 mc - Mud cake
 h - Thickness
 w - Formation water
 d - Diameter
 z - Mixed water

Влияние зоны проникновения и профили сопротивления в пласте с проникновением

Пресный буровой раствор



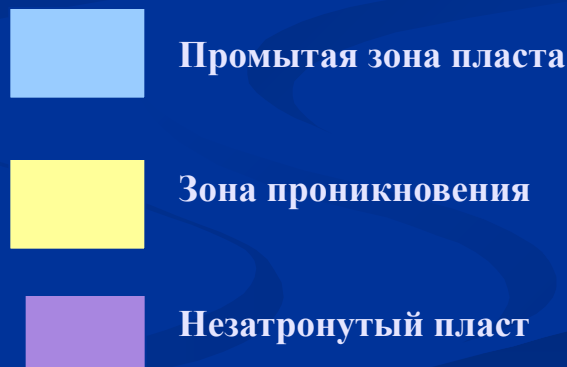
Соленый буровой раствор



S – зонд малой глубинности

M – зонд средней глубинности

D – зонд большой глубинности



Зондами измеряется кажущееся удельное электрическое сопротивление

Измерения потенциал-зондом

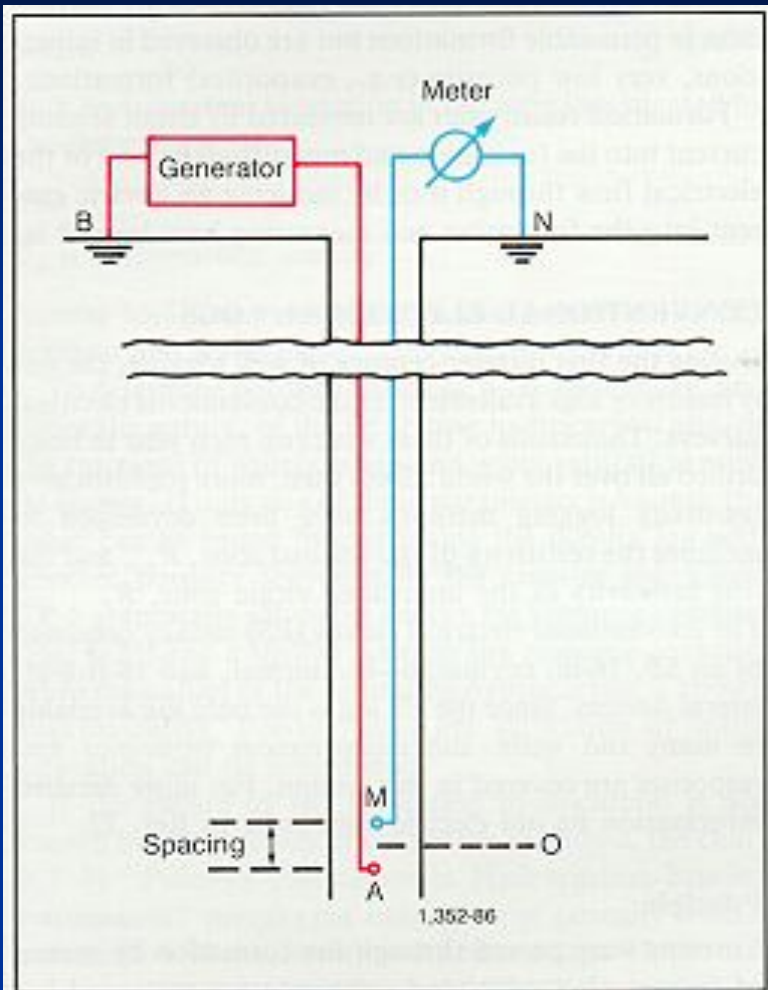
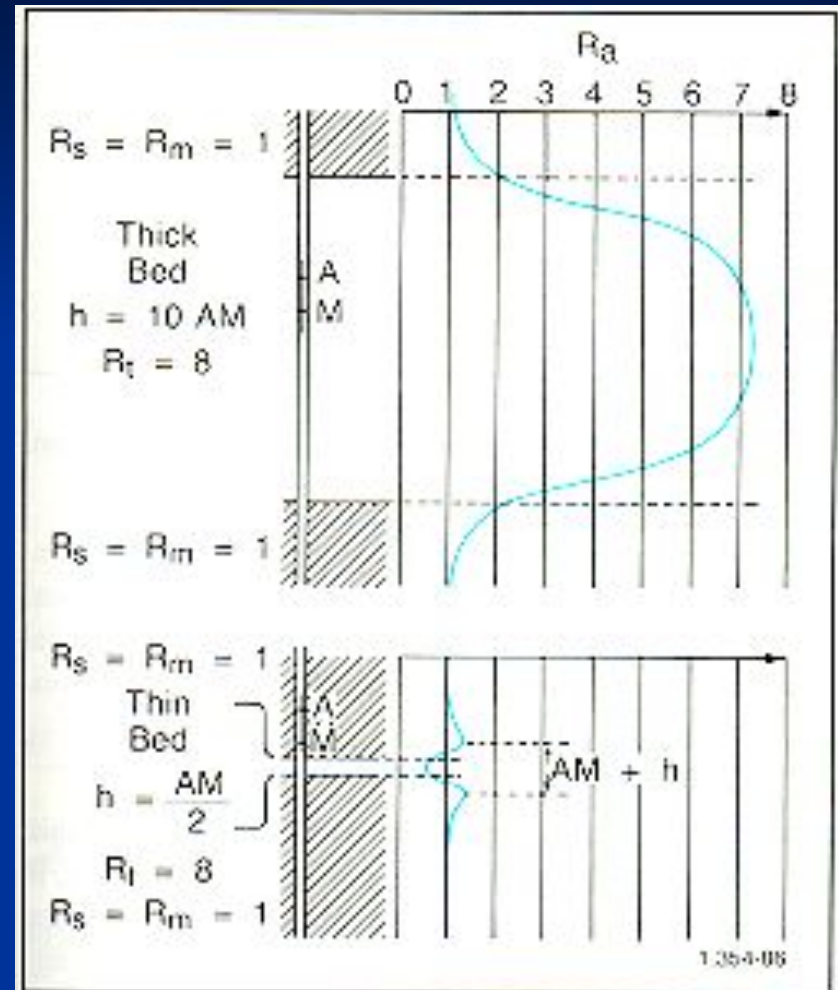


Схема измерений



Кривые потенциал-зонда для пластов
высокого сопротивления

Измерения градиент - зондом

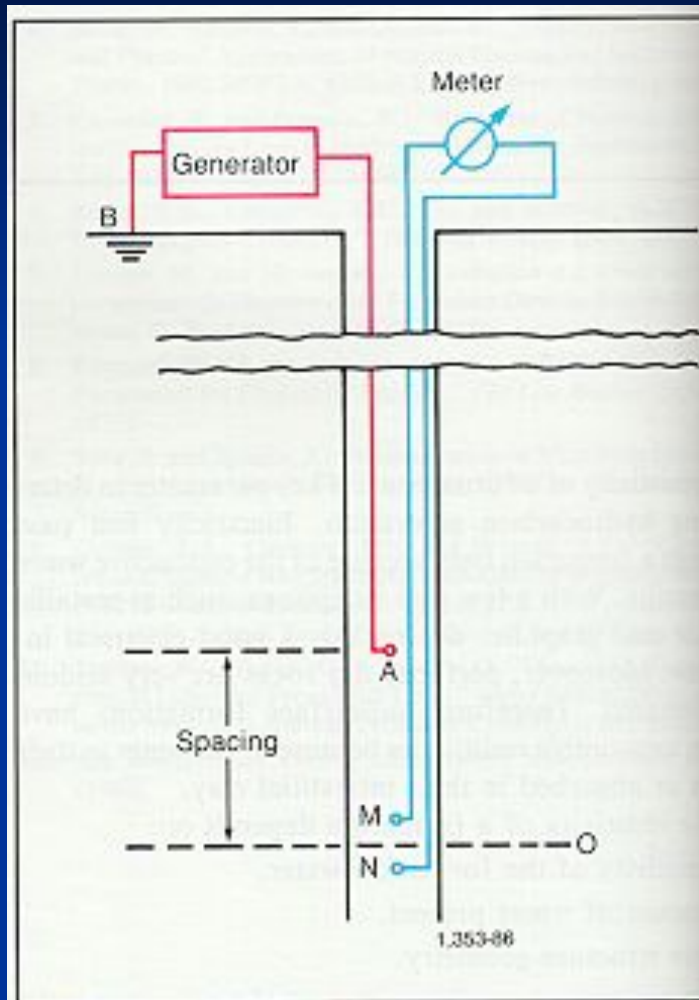
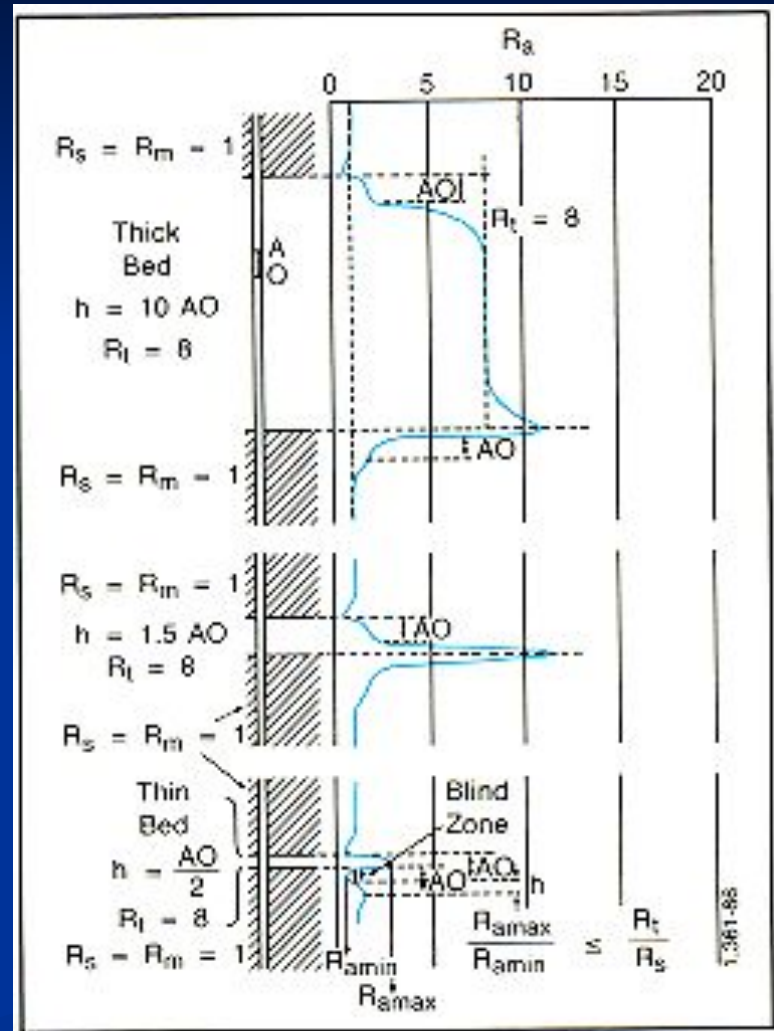


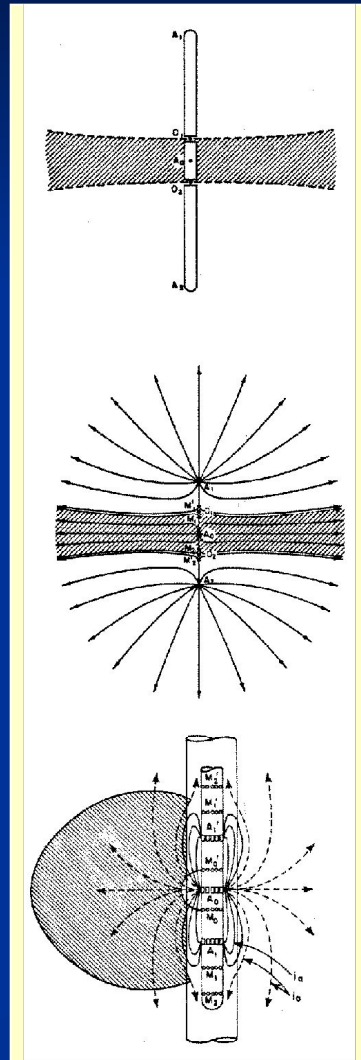
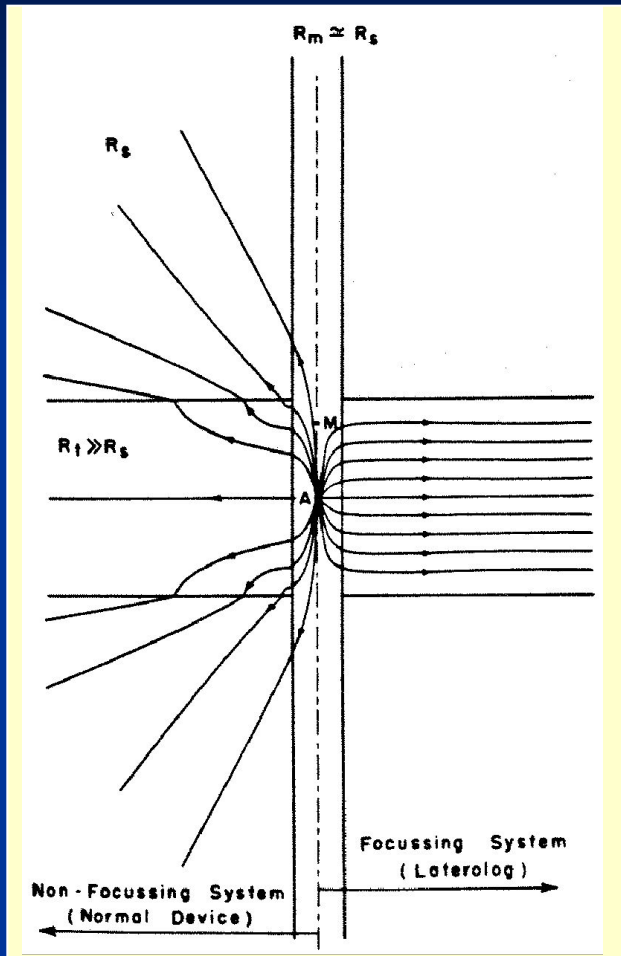
Fig. 7.2—Lateral device—basic arrangement.



Кривые градиент-зонда для пластов
высокого сопротивления

Электрические методы ГИС

Метод БК – Laterologs- LLD, LLM, SFL



Laterolog 3

Laterolog 7

Spherically Focused
Log

Современные фокусированные зонды

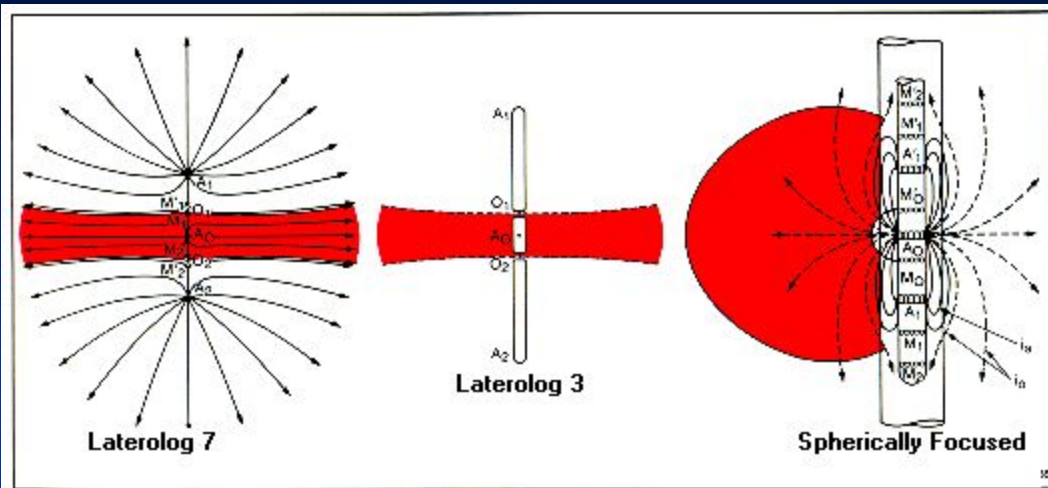


Fig. 7-10—Schematics of focusing electrode devices.

Фокусирование достигается применением экранирующего тока вокруг главного A_0 электрода, ток которого в пласт усиливается. Глубина исследования определяется размером набора электродов и путем возвратного тока для каждого набора. Наложенные (одновременные) измерения DLL (Dual Laterolog – двойной фокусированный зонд) получаются на тех же электродах использованием различных частот для каждого набора

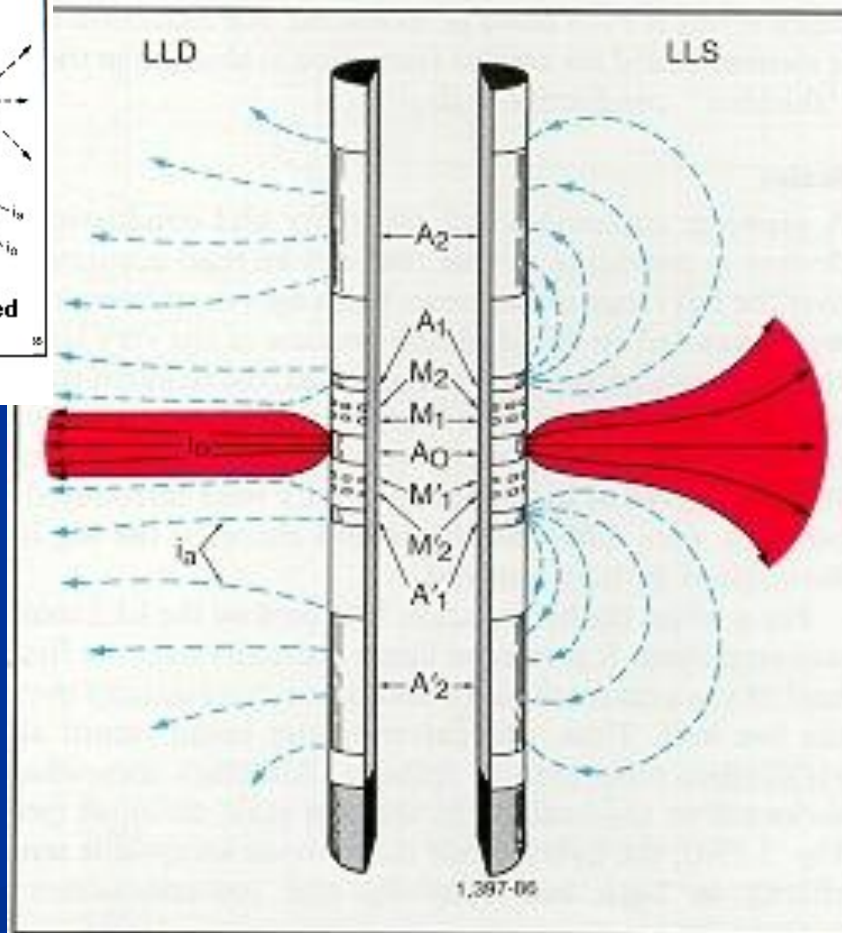
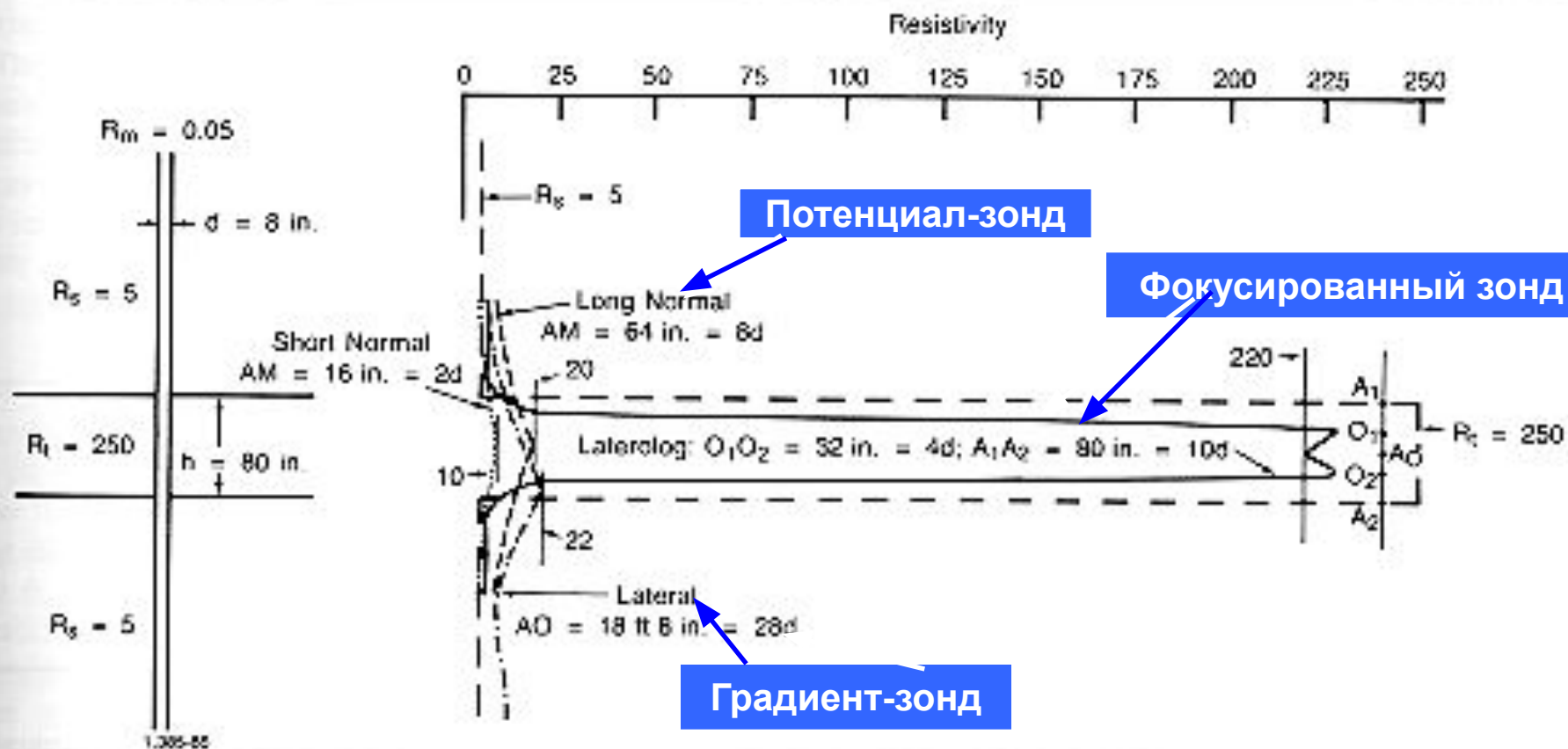


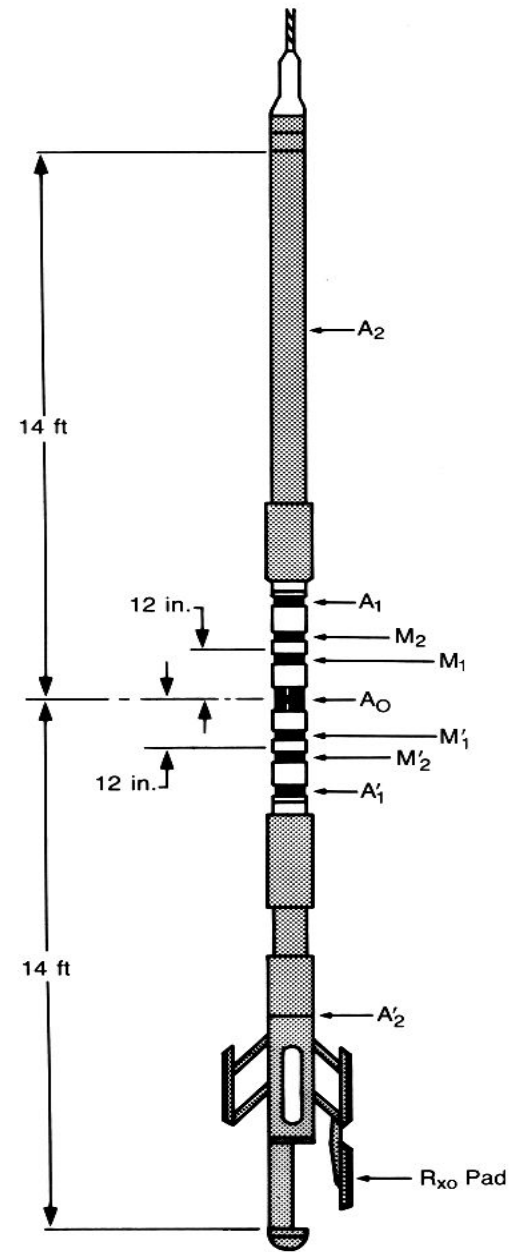
Fig. 7-13—Schematic of the Dual Laterolog.

Сравнение показаний фокусированного 7-электродного зонда (LL7) с градиент- и потенциал-зондами

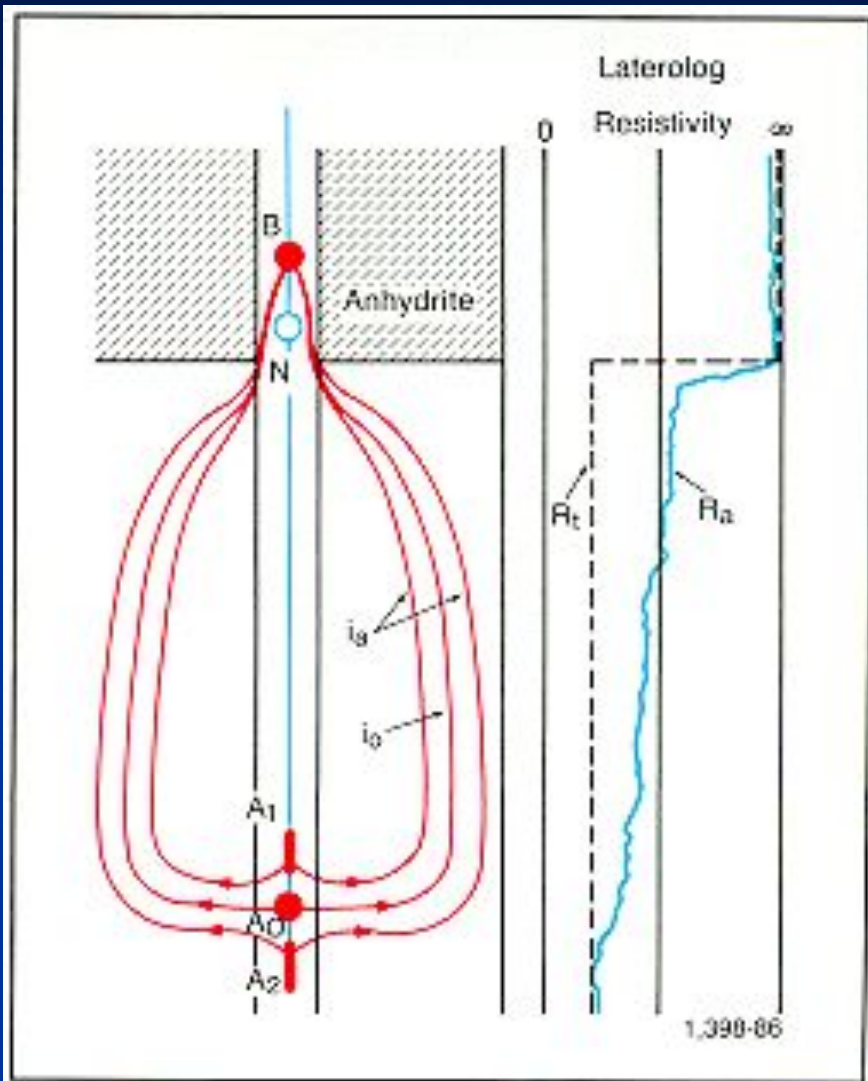


Отклики фокусированного и обычных зондов от тонкого слоя высокого сопротивления, без зоны проникновения при очень соленом буровом растворе (лабораторные исследования)

Schematic of the Dual laterolog - Rxo tool



Эффект сжатия на фокусированных зондах (Squeeze Effect on LLD)



Когда измерения глубинного фокусированного зонда (боковой каротаж) приближаются к мощной зоне высокого сопротивления, регистрируемый ток **сжимается** в проводящем стволе скважины, изменяя кажущееся сопротивление, измеряемое прибором. Это проявляется как постепенное увеличение сопротивления на фокусированном зонде, пока электрод A_0 не вводится в слой высокого сопротивления, после чего измерение снова достоверно. Верхний электрод “В” обычно выше A_0 на 28 футов или больше. Этот эффект не проявляется на фокусированных зондах малой глубинности (LLS) и может учитываться сравнением двух кривых.

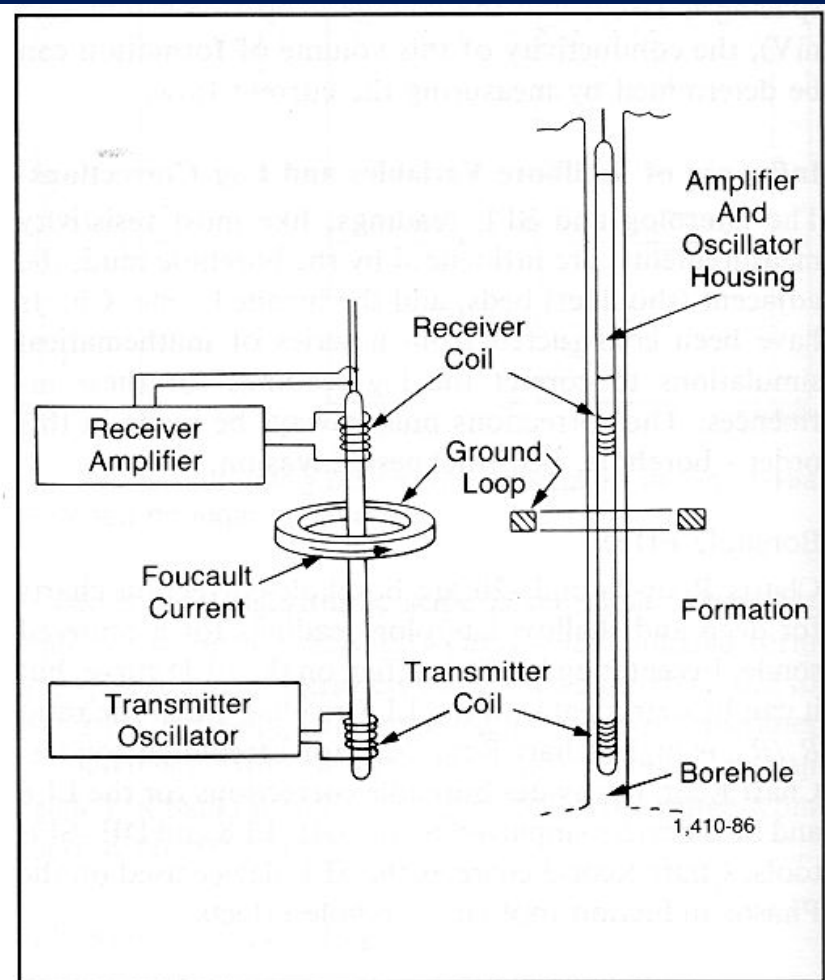
БК – оптимальные условия применения

$$\frac{R_{mf}}{R_w} < 2, \quad R_t > 200 \text{ Ом}$$

- При определении сопротивления продуктивного пласта необходима поправка за проникновение
- Вертикальное разрешение – 60 – 80 см
- Используется в скважинах, заполненных проводящим раствором

Электрические методы ГИС

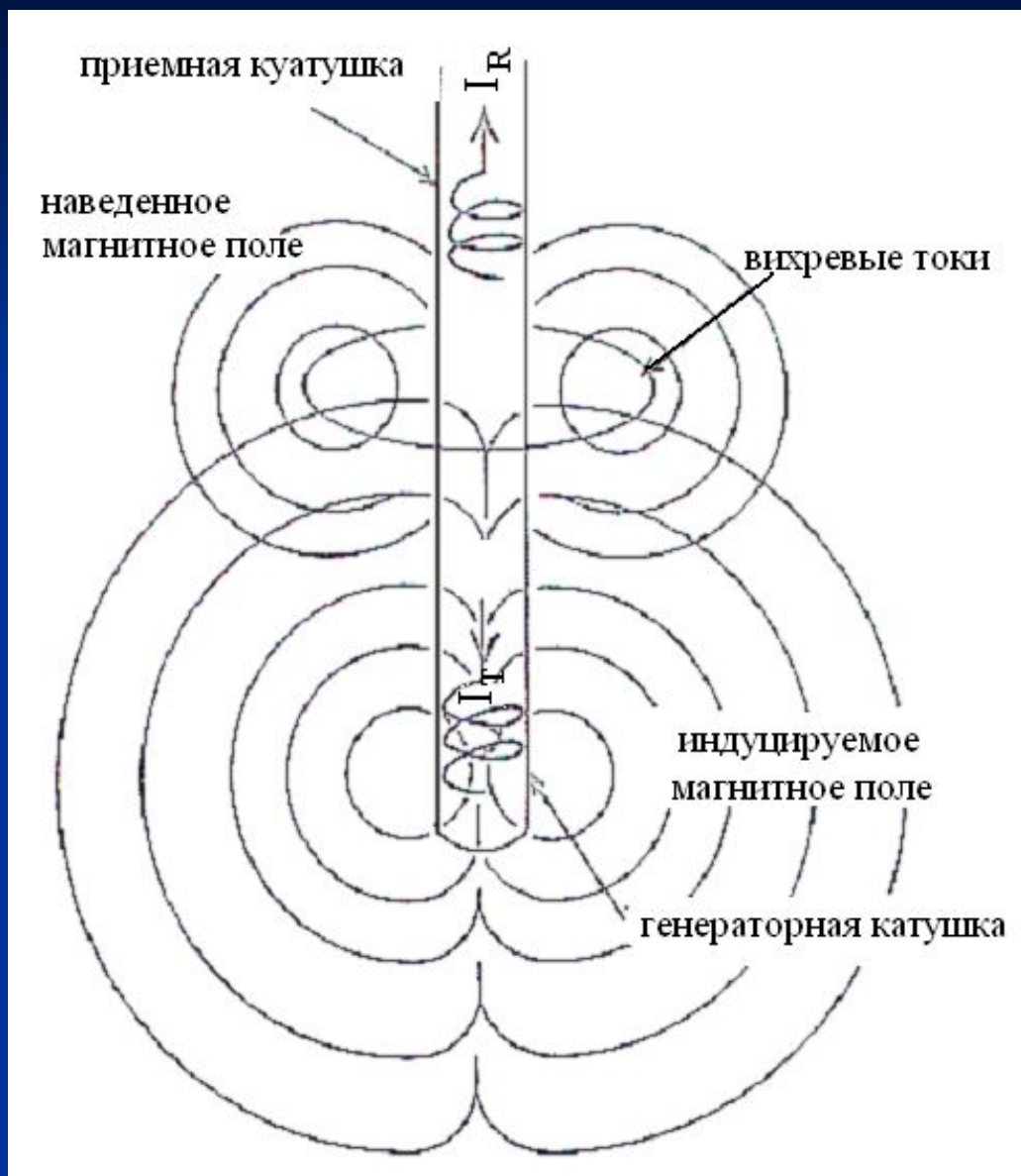
Индукционный метод – Induction Log - ILD, ILM



Большинство индукционных приборов состоит из совокупности излучателей и приемников, которые производят измерение на определенном расстоянии в пласте, обычно 40 дюймов (1 м) для ILD (глубинный) и 28 дюймов (0,7 м) для ILM (средний).

Fig. 7-18—Basic two-coil induction log system.

Индукционный каротаж - ИК



Измеряется кажущаяся
электропроводность
пород

Индукционный метод

Влияющие эффекты:

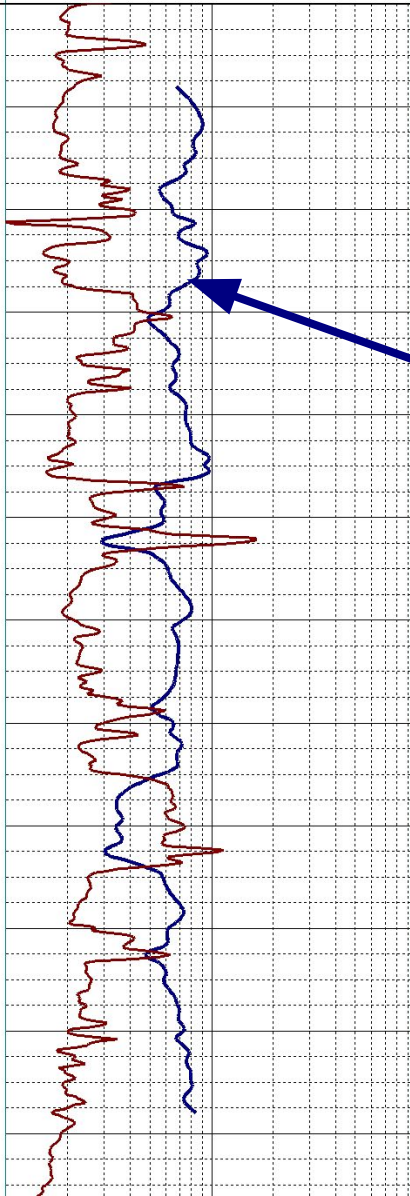
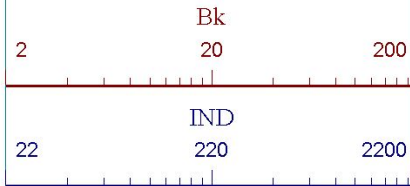
- Скин-эффект
- Диаметр скважины
- Вмещающие породы
- Наклонное падение слоев
- Геометрический фактор
- Зона проникновения

ИК - оптимальные условия применения

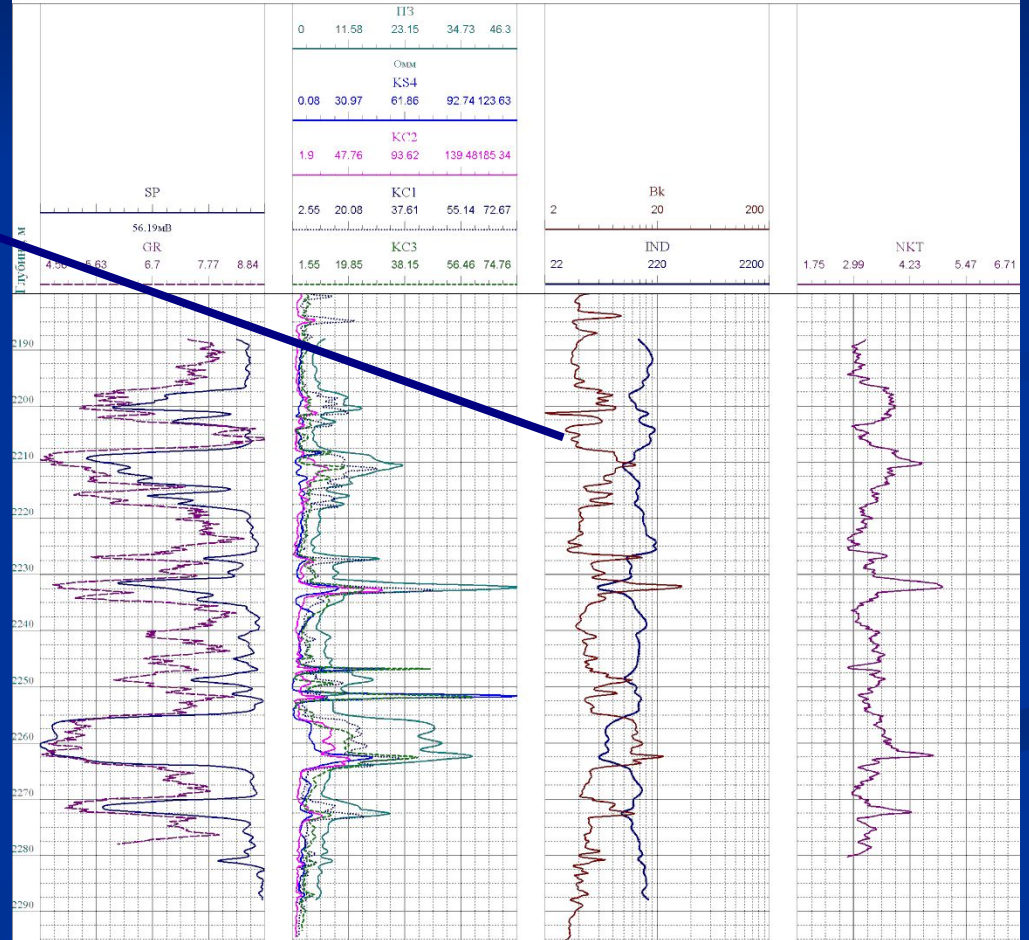
$$\frac{R_{mf}}{R_w} > 2, \quad R_t \leq 200 \text{ Омм}$$

- Регистрирует значение сопротивления, близкое к истинному сопротивлению пласта
- Вертикальное разрешение – 80 см
- Используется в скважинах, заполненных непроводящим раствором, или в пустой скважине

Типичные кривые ИК и БК



Интегрированная система обработки данных ГИС «ПРАЙМ» (г. Уфа, ул. Ленина, 13. Тел./факс (3472) 226056; www.geotec.ru)



Благодаря высокой разрешающей способности изопараметрического зондирования результаты измерений определяются электрическими свойствами среды.

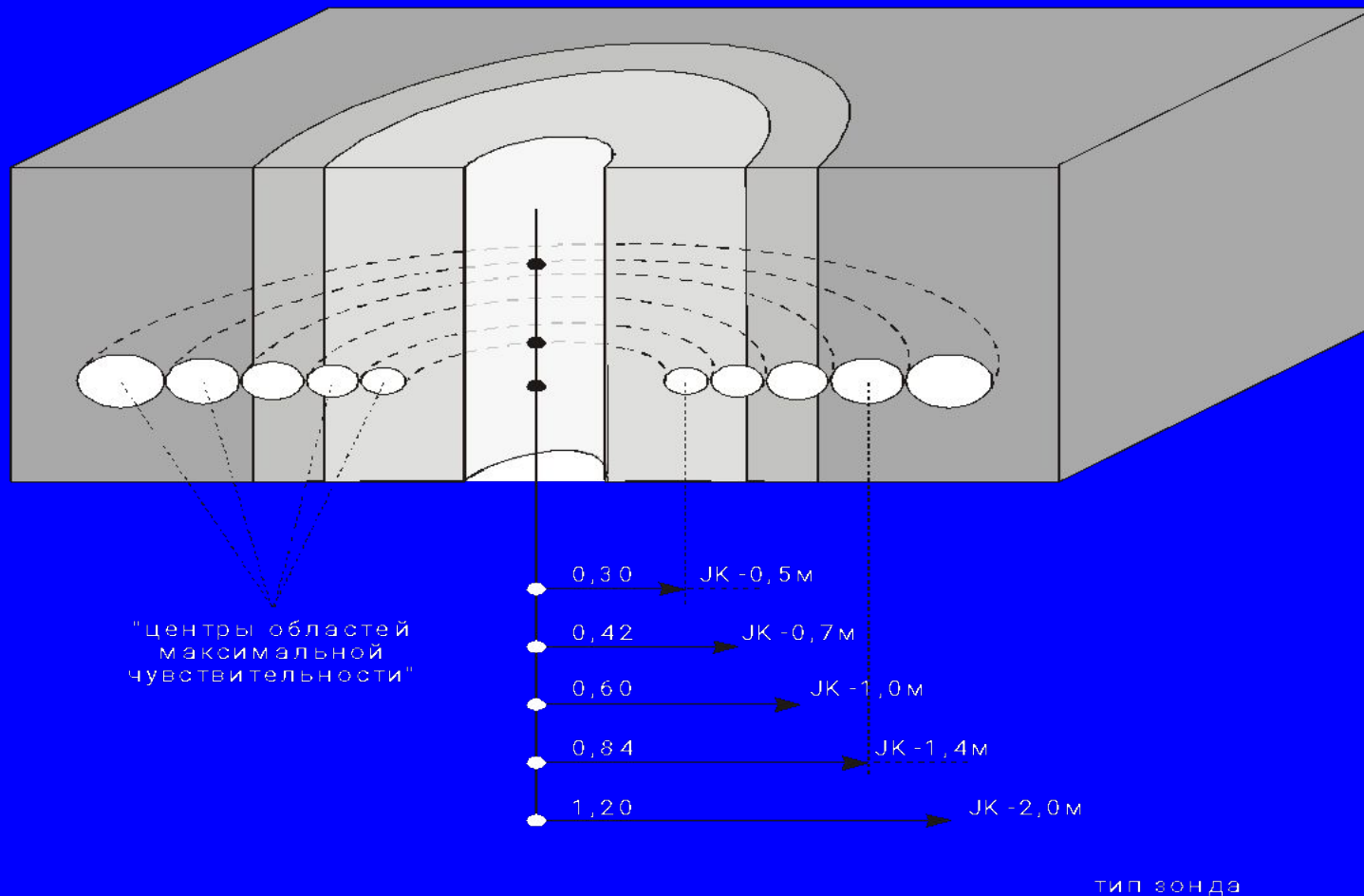
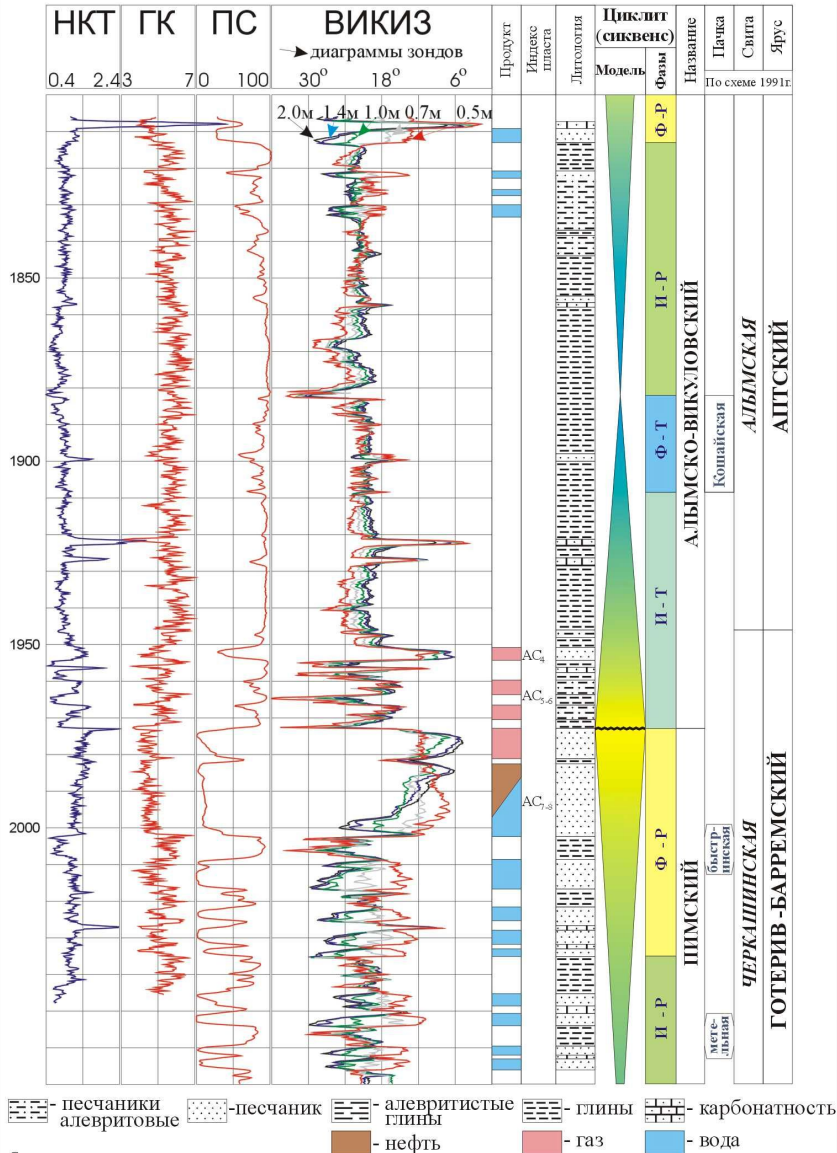


Рис.1 Схема концентрации электромагнитных откликов изопараметрических зондов ВИКИЗ.

Применение метода ВИКИЗ для оценки насыщенности пластов



- песчаники алевритовые
 - песчаник
 - алевритистые глины
 - глины
 - карбонатность
 - нефть
 - газ
 - вода

Фазы регионального цикла:
И-Р и **И-Т** - инициально- регрессивные и инициально-трансгрессивные
Ф-Р и **Ф-Т** - финально- регрессивные и финально-трансгрессивные

Рис. 2. Литостратиграфическая модель продуктивных готери-аптских отложений скважины 4614 Федоровского месторождения по данным ВИКИЗ.

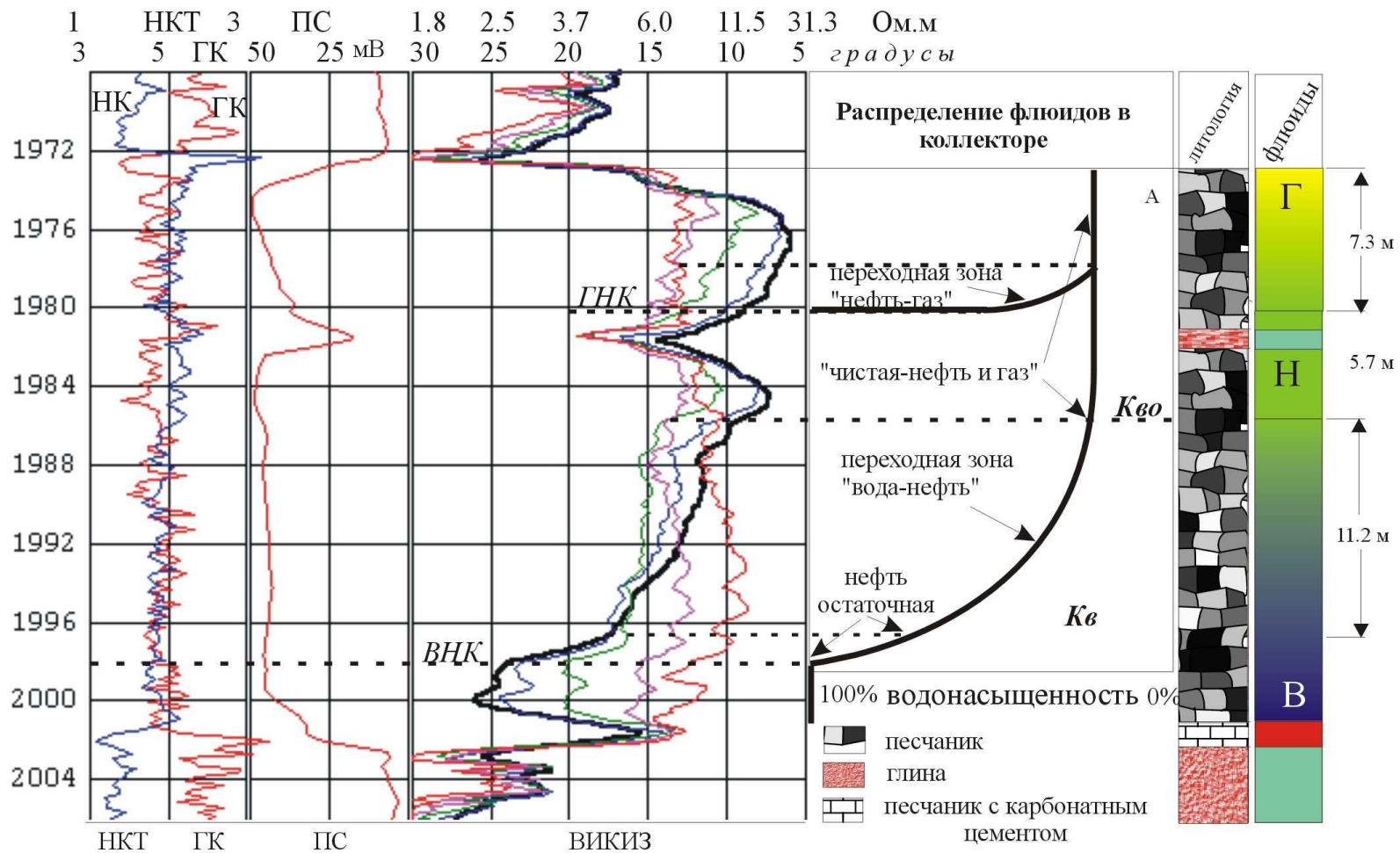


Рис.3. Разрез залежи пластов АС_7-8. Федоровское месторождение.

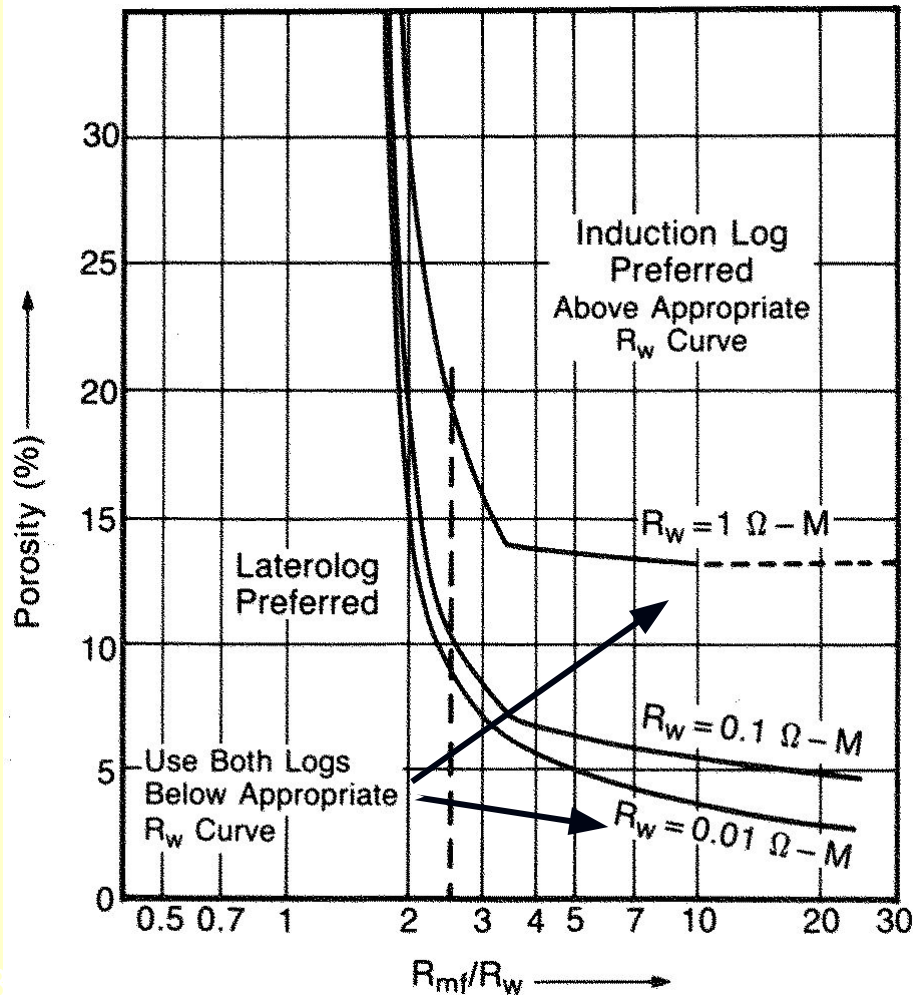
А. Схема распределения пластовых флюидов в переходной зоне.

Шифры зондов ВИКИЗ: $\frac{2.0\text{м}}{1.30\text{м}}$ $\frac{1.4\text{м}}{0.88\text{м}}$ $\frac{1.0\text{м}}{0.55\text{м}}$ $\frac{0.7\text{м}}{0.35\text{м}}$ $\frac{0.5\text{м}}{0.20\text{м}}$ Длина зонда
Относительная глубинность исследования

Электрические методы ГИС

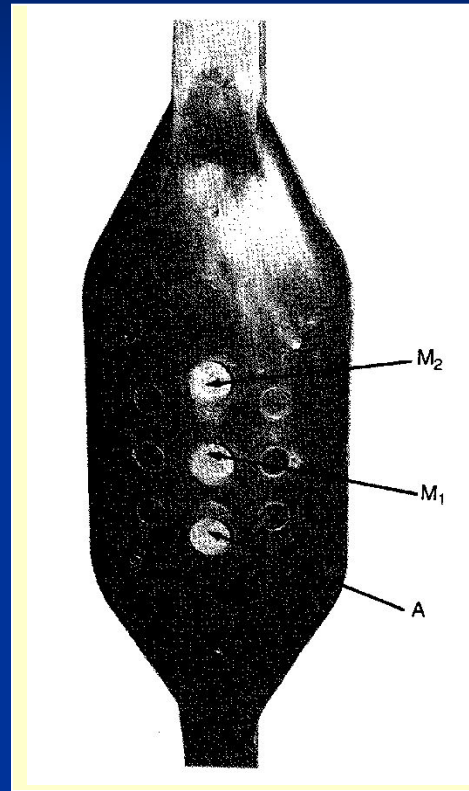
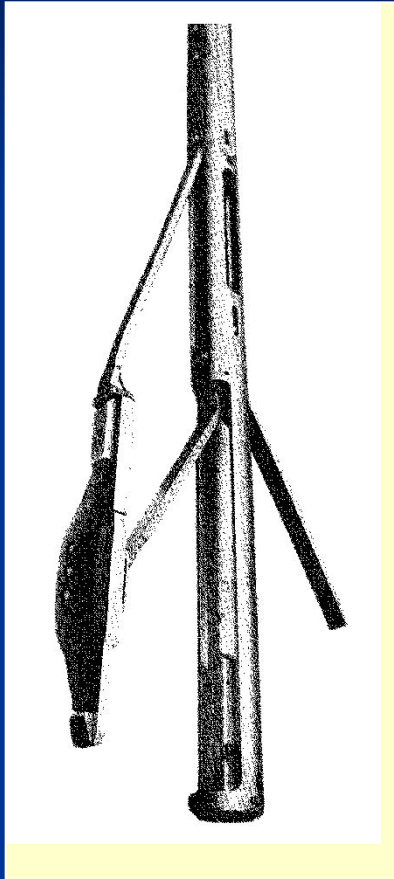
Индукционный метод – Induction Log

Критерии выбора методов бокового и индукционного метода каротажа



Электрические методы ГИС

Микрзонды



Конструкция микрзонда

Resistivity In The Flushed Zone

$$\frac{R_{xo}}{R_{mf}} = F = \frac{a}{\phi^m}$$

F = Formation Factor

**R_{xo} = Resistivity of the
flushed**

zone

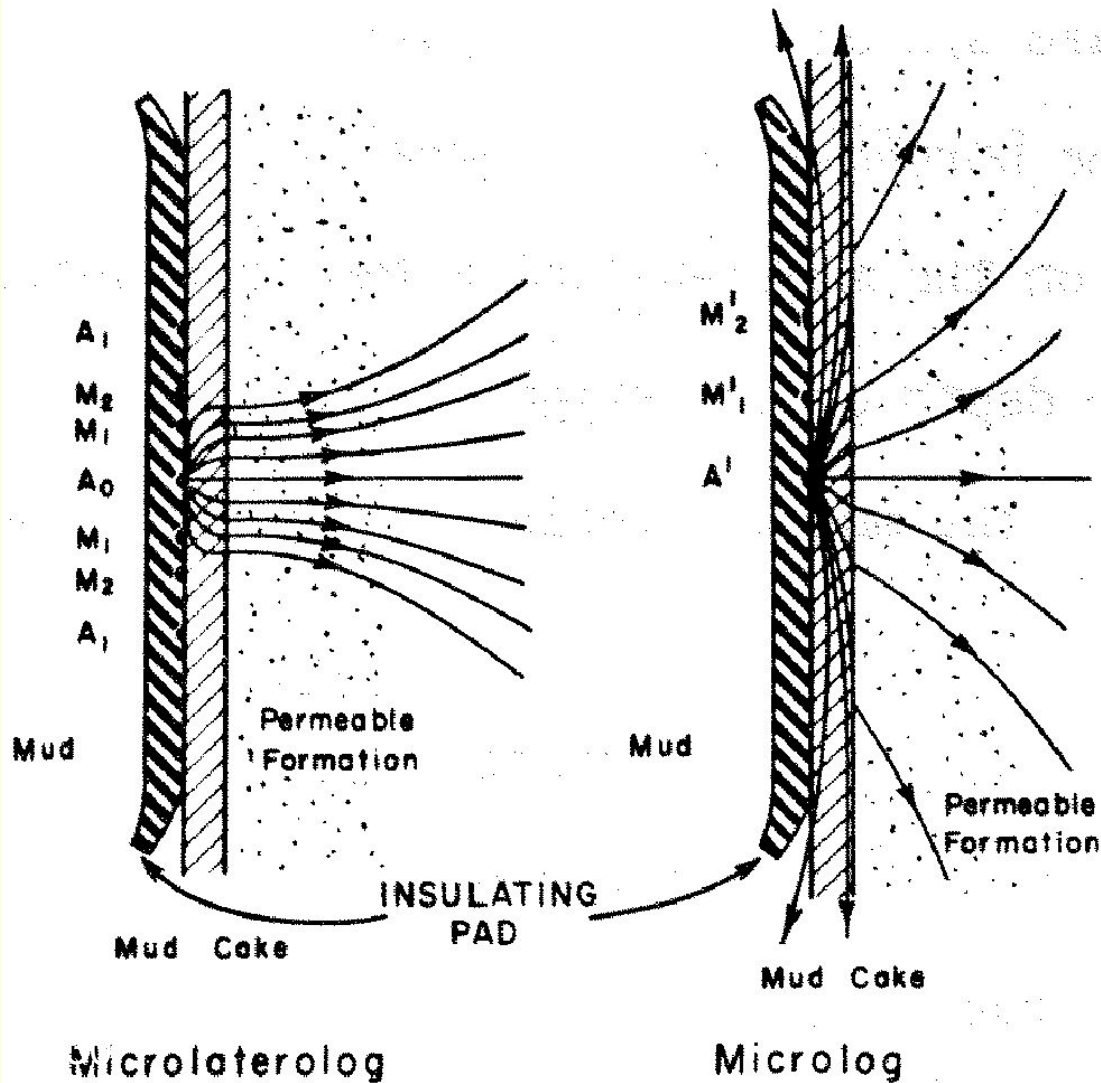
**R_{mf} = Resistivity of the mud
filtrate**

φ = Porosity, fraction

**However this only works
where S_{xo} is 100% water.**

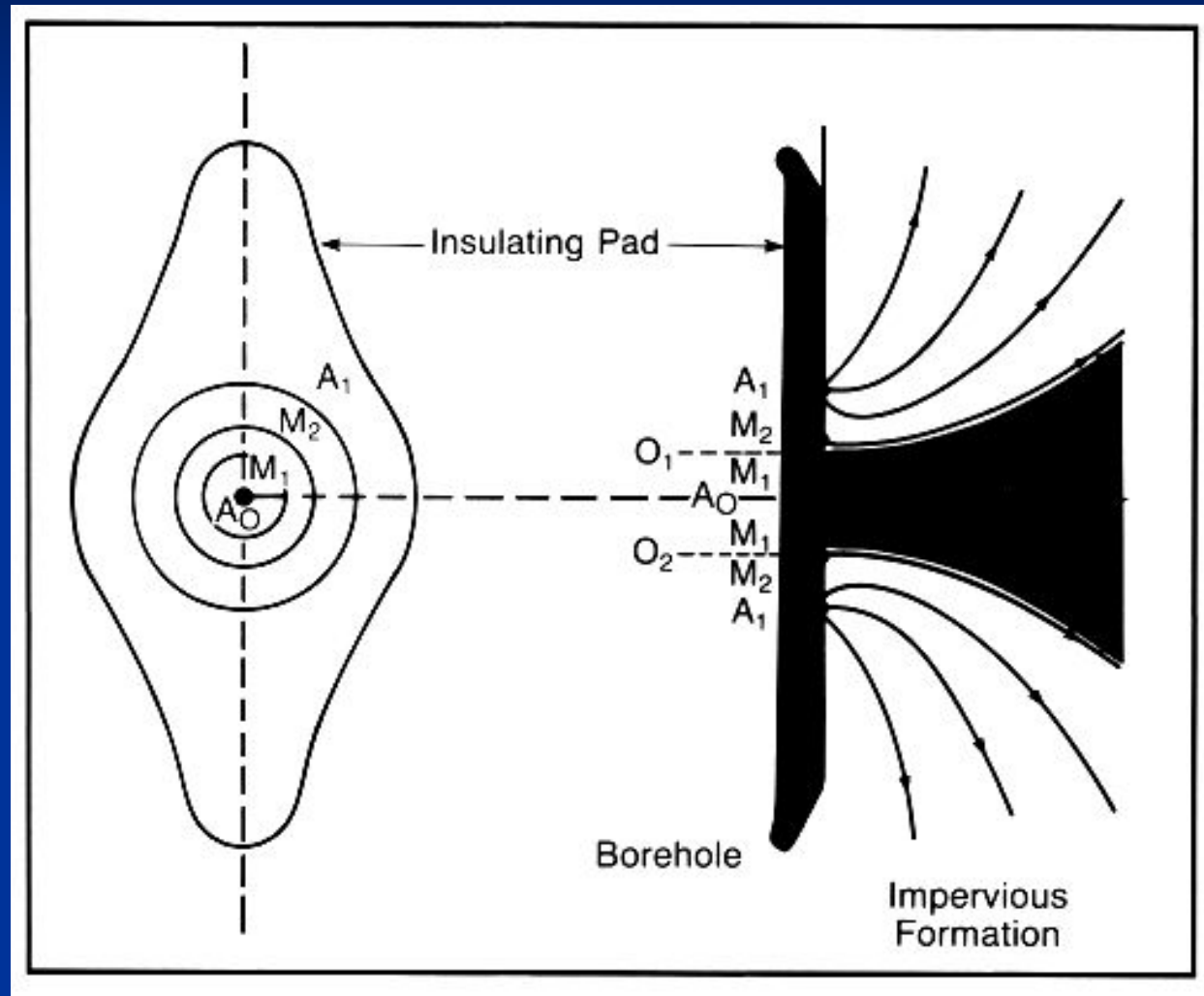
Электрические методы ГИС

электрические поля микрозондов



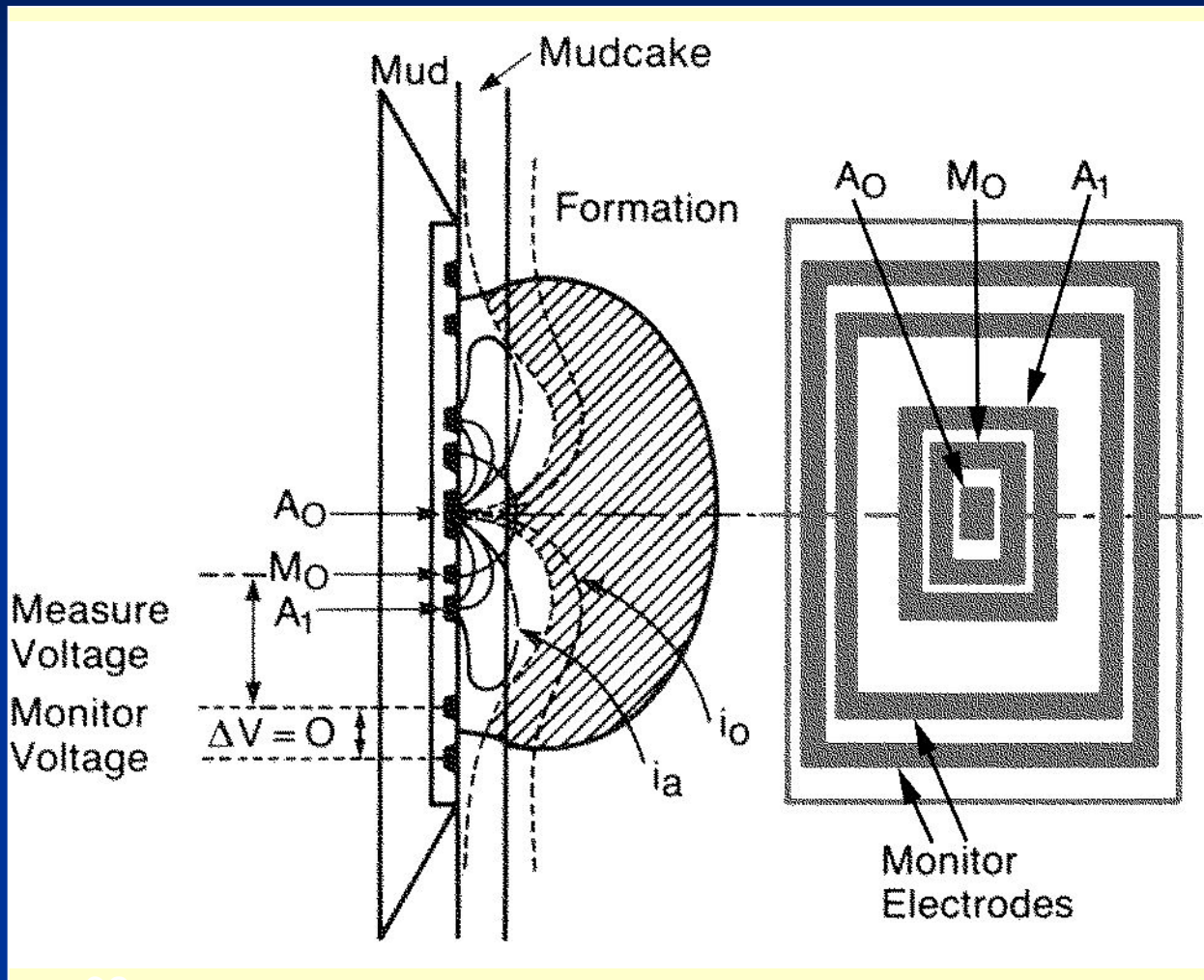
Current Paths in
Focused and
Non-focused Contact
Logs

Microlaterolog pad showing electrodes (left) and schematic current lines (right)



Электрические методы ГИС

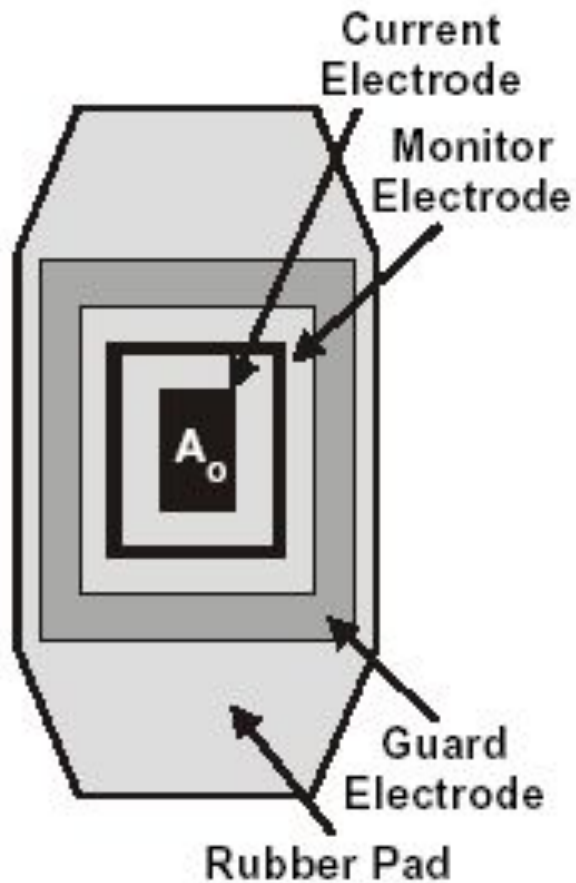
Микробокковой зонд - MSFL



**MSFL,
Microspherically
Focused Log
Electrode Array and
Current Sheet**

Электрические методы ГИС

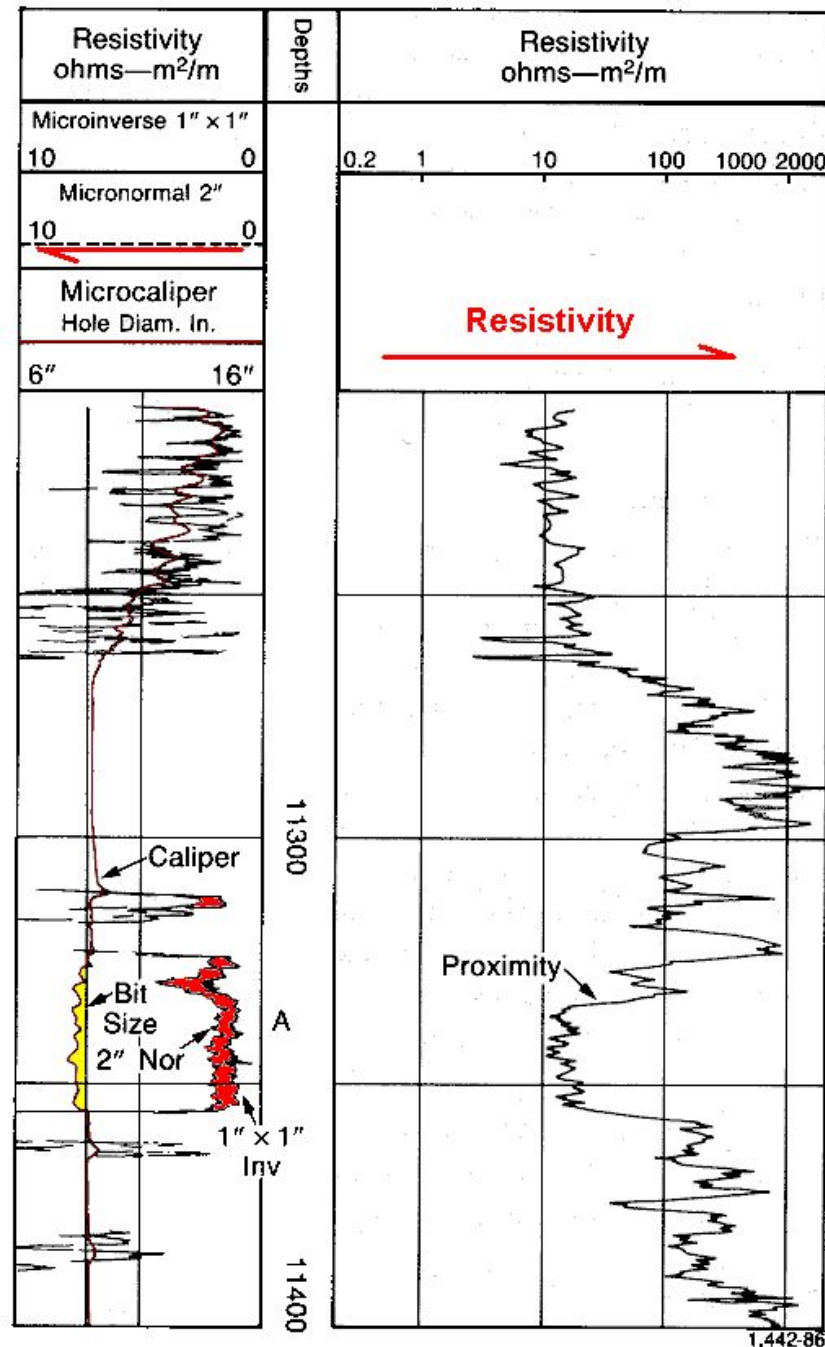
Микробоковой зонд - РЛ



Proximity Log Tool
construction

Микрокаротаж – Микробоковой каротаж

Расхождение кривых микрокаротажа используется для выявления налипания глинистой корки и потенциально проницаемых зон. Абсолютное расхождение является относительно не важным, но оно связывается с толщиной глинистой корки и R_{ho} . Предпочитаемый масштаб представления - $10 \times R_m$. Расхождение может встречаться в интервалах с малыми проницаемостями, как 0.001 md ! Обратное расхождение ($\text{microinverse} > \text{micronormal}$) также является возможным и может быть связано с пресной глинистой коркой, где R_{ho} меньше, чем R_{mc} . Микробоковой каротаж позволяет более точно оценить значение R_{ho}



1,442-86

Fig. 7-40—Presentation of Proximity-Microlog.

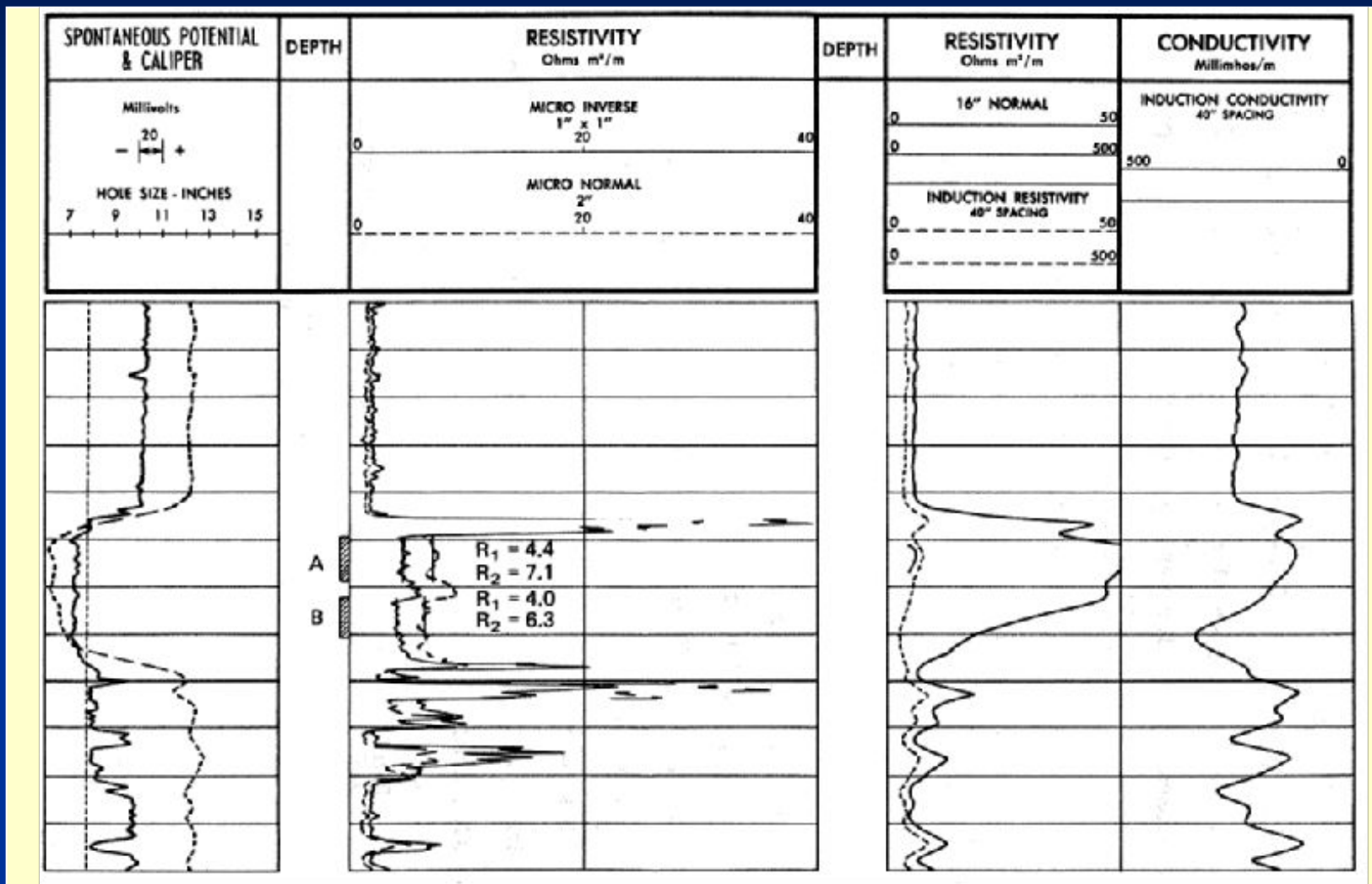
Микрозонды

- Применяются для измерений в промытой зоне.
- Главная цель - вычислить пористость, предполагая 100% водонасыщенность промытой зоны $S_{хо}$ и используя сопротивление фильтра бурового раствора R_{mf} .
- Отношение $R_{хо}$ к R_t выявляет подвижные углеводороды.
- Зонды выбираются на основе предполагаемой глубины зоны проникновения, комбинируются с другими электрическими зондами, обязательно корректируются за скважинные условия.
- Микрозонд дает отношение сопротивления глинистой корки $R_{мс}$ (микроградиент-зонд 1"х1") к $R_{хо} + R_{мс}$ (микрopotенциал-зонд 2") которое указывает на налипание глинистой корки и, следовательно, на проницаемый пласт.

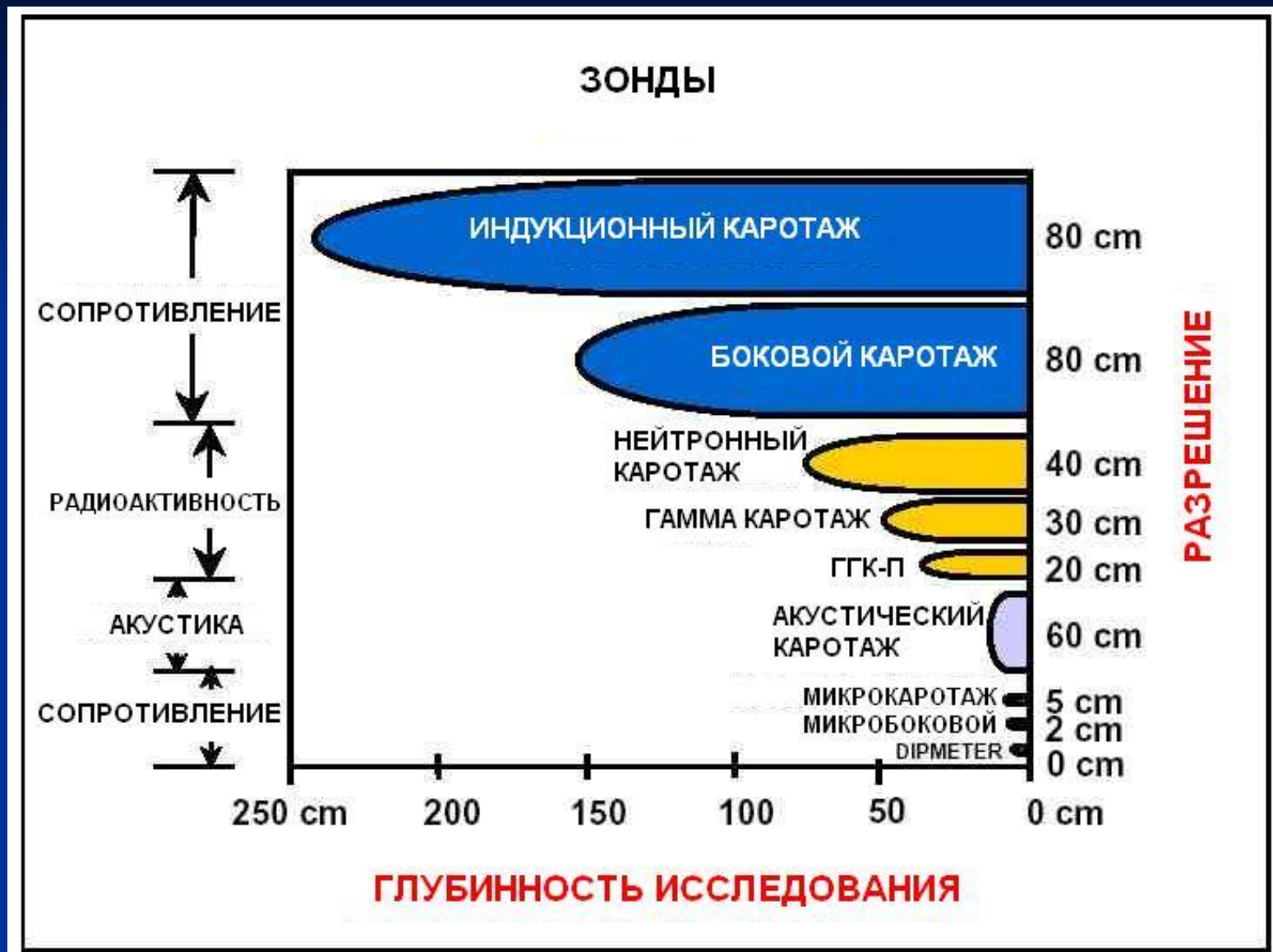
Известно, что расхождение (кривых микрозондов) встречается и для пластов с очень низкой проницаемостью.

Электрические методы ГИС

Данные электрических методов



Разрешающая способность методов



ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Параметры пластов, подлежащие определению

- Границы пластов различного сопротивления
- Литологический состав и характер насыщения
- Сопротивление промытой зоны пласта
- Истинное сопротивление пласта и параметры зоны проникновения (диаметр и сопротивление)

Необходимая дополнительная информация

- Условия измерений (диаметр скважины и установка прибора)
- Электрические параметры бурового раствора, фильтрата и глинистой корки
- Толщина глинистой корки

Estimation of R_{mf} and R_{mc}

Gen-7

Direct measurements of filtrate and mudcake samples are preferred. When not available, filtrate resistivity, R_{mf} , and mudcake resistivity, R_{mc} , may be estimated from one of the following methods.

Method 1

Lowe and Dunlap (Reference 36)

For freshwater muds with mud resistivity, R_m , in the range from 0.1 to 2.0 ohm-m at 75°F [24°C], and measured values of R_m and mud density, ρ_m , in pounds per gallon:

$$\log \left(\frac{R_{mf}}{R_m} \right) = 0.396 - 0.0475 \rho_m$$

Method 2

Overton and Lipson (Reference 1)

For drilling muds with mud resistivity, R_m , in the range from 0.1 to 10.0 ohm-m at 75°F [24°C], where K_m is given as a function of mud weight in the table below:

$$R_{mf} = K_m (R_m)^{1.07}$$

$$R_{mc} = 0.69 (R_{mf}) \left(\frac{R_m}{R_{mf}} \right)^{2.65}$$

Example: $R_m = 3.5$ ohm-m at 75°F [24°C]

Mud weight = 12 lbm/gal [1440 kg/m³]

Therefore, $K_m = 0.584$

$R_{mf} = (0.584)(3.5)^{1.07} = 2.23$ ohm-m at 75°F

$R_{mc} = 0.69(2.23)(3.5/2.23)^{2.65} = 5.07$ ohm-m at 75°F

The calculated value of R_{mf} is more reliable than that of R_{mc} .

Mud Weight		K_m
lbm/gal	kg/m ³	
10	1200	0.847
11	1320	0.708
12	1440	0.584
13	1560	0.488
14	1680	0.412
16	1920	0.380
18	2160	0.350

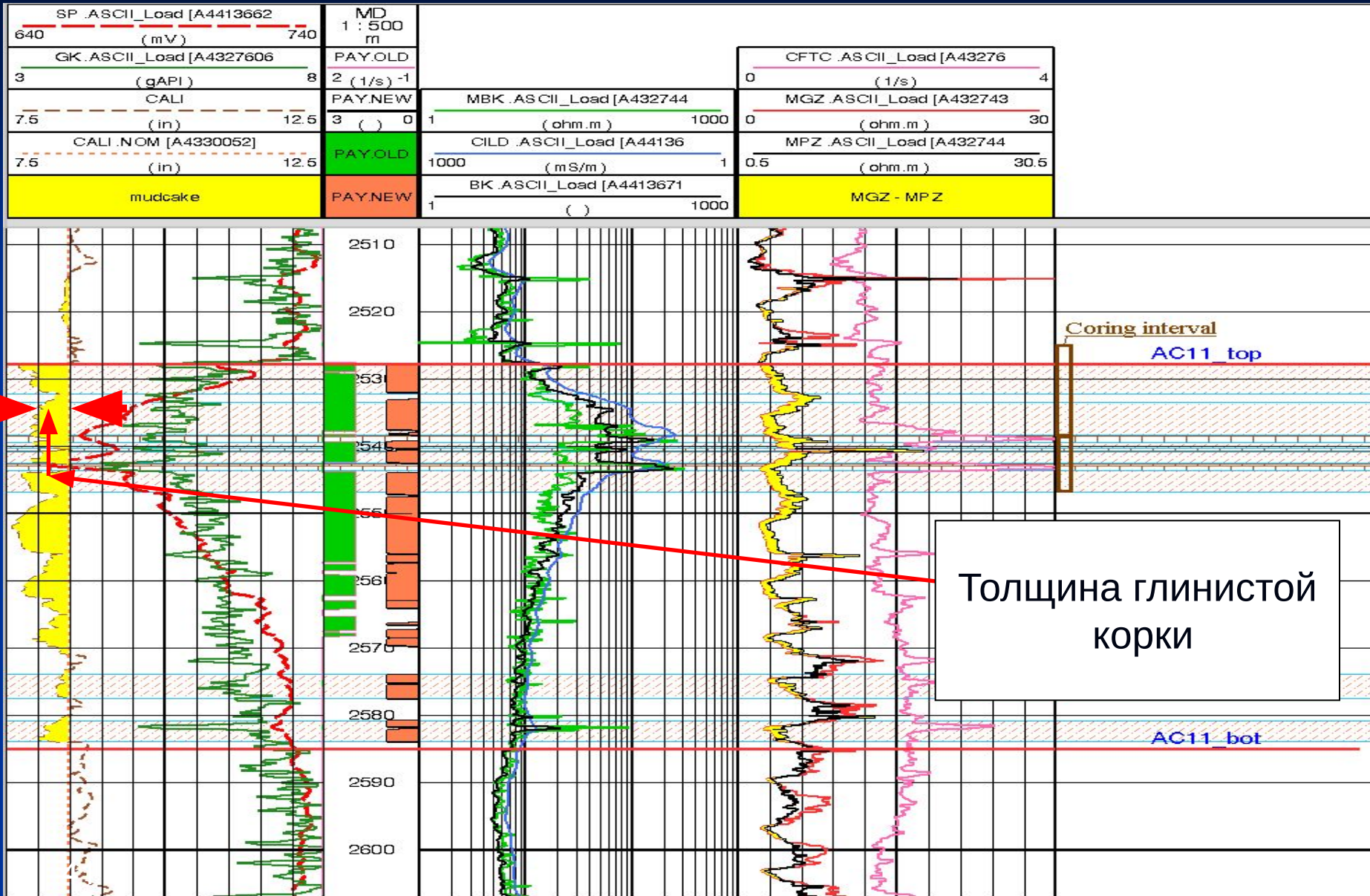
Method 3

A statistical approximation, for predominantly NaCl muds, is $R_{mf} = 1.5 R_m$, and $R_{mc} = 0.75 R_m$.

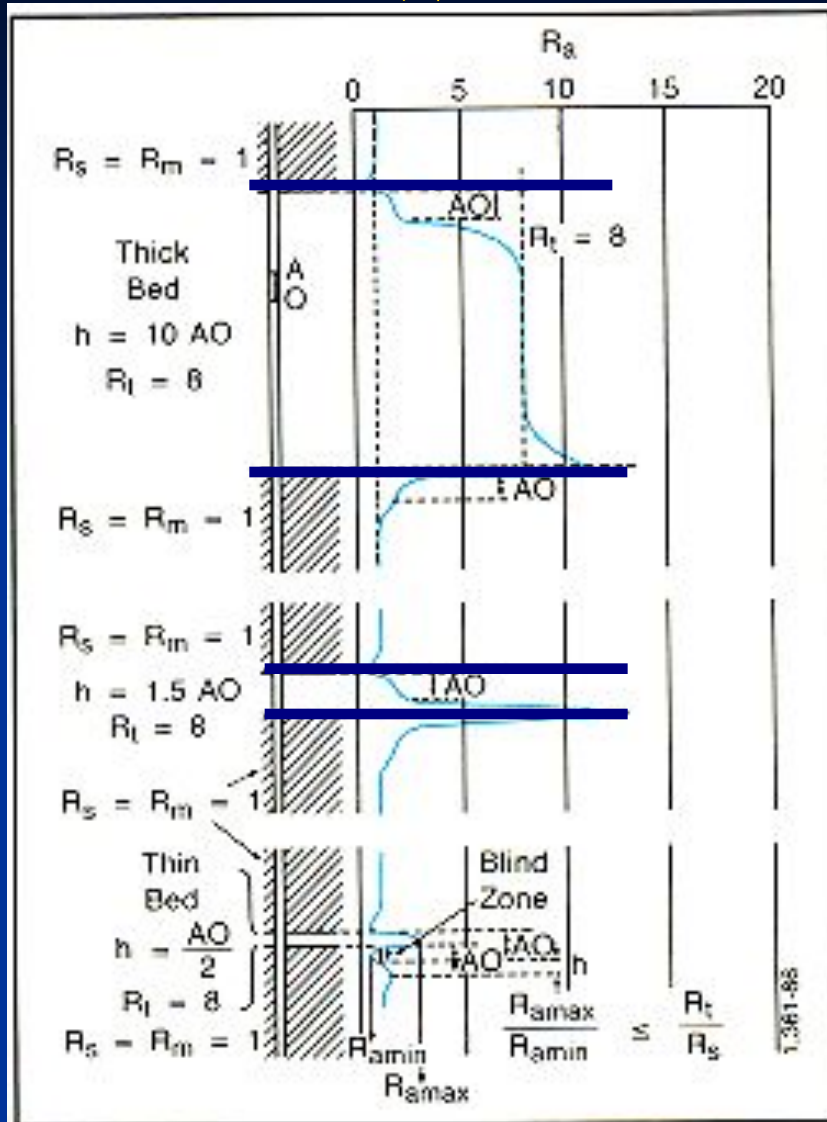
Gen

Определение параметров бурового раствора

Определение толщины глинистой корки по кавернометрии



Метод КС - Conventional Current Logs

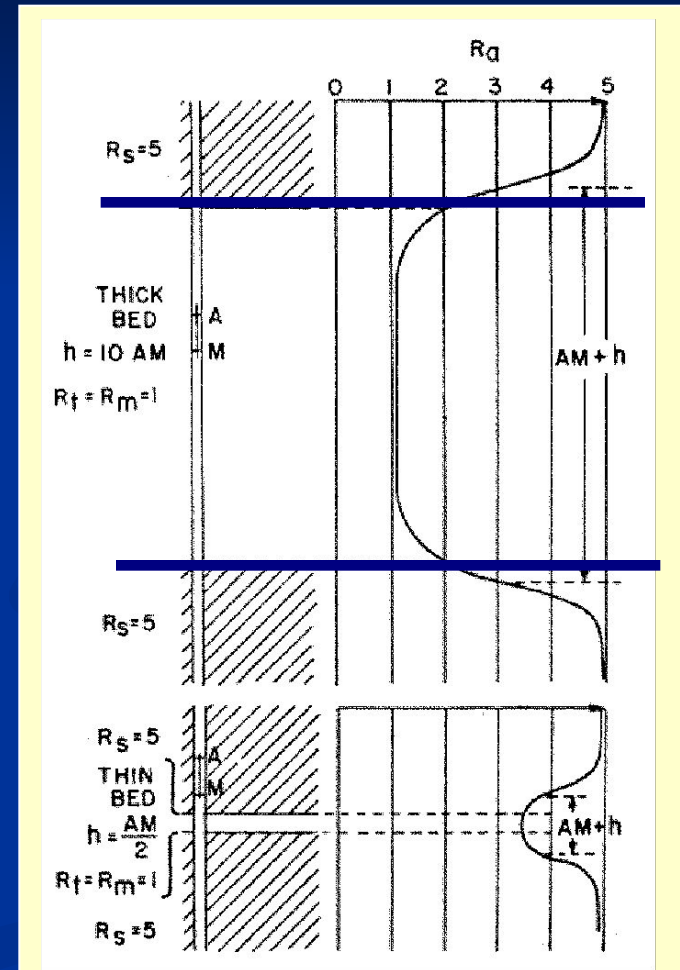
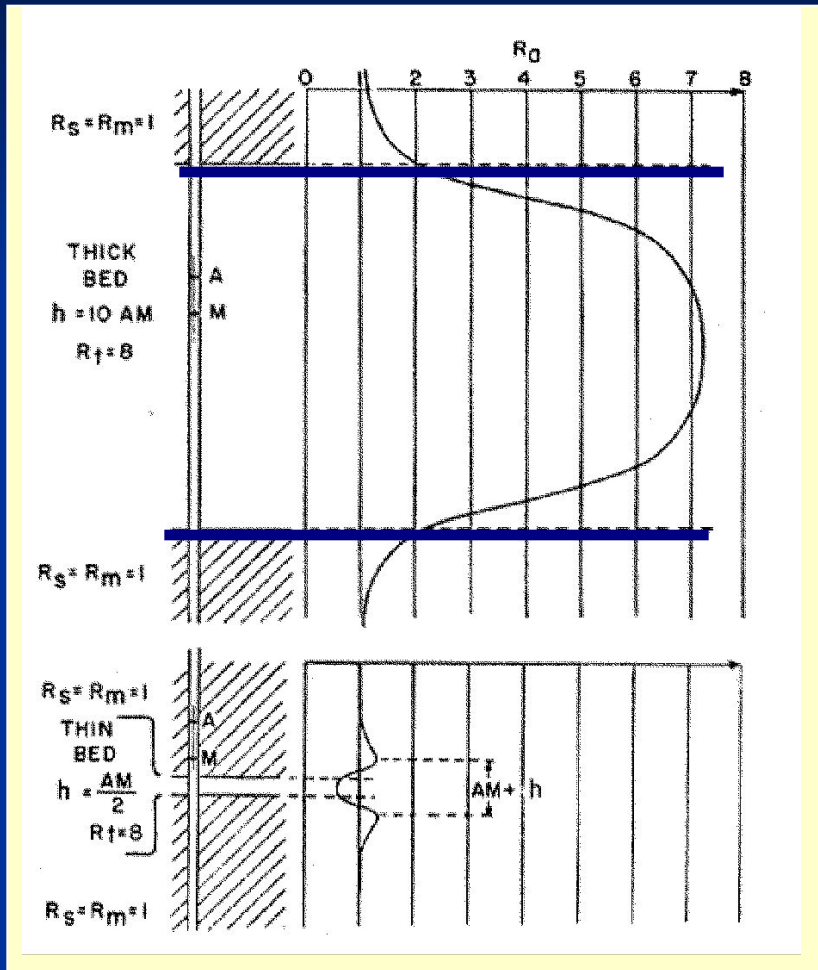


Определение границ
 пластов высокого
 сопротивления по
 точкам минимума
 (кровля) и максимума
 (подошва)

Fig. 7-5—Lateral curves—bed more resistive than adjacent formations.

Электрические методы ГИС

Метод КС - Conventional Current Logs

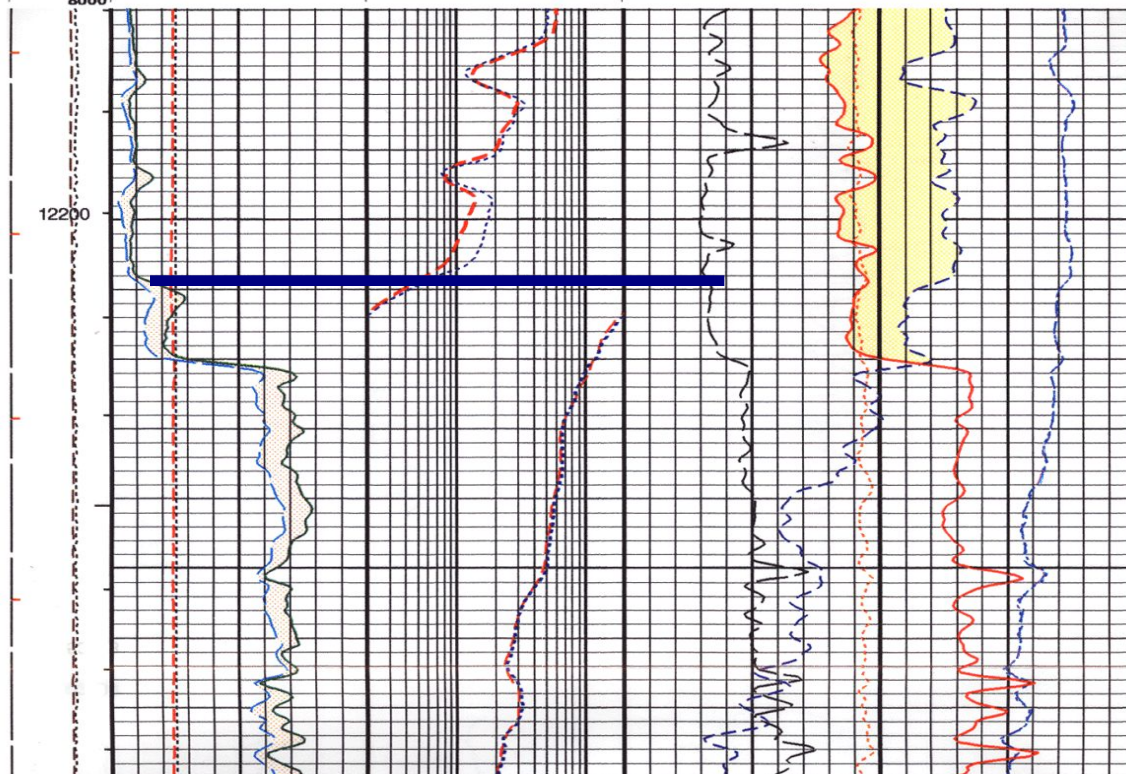


43 Кривые КС потенциал-зонда в случае непроводящих и проводящих слоев и положение границ пластов

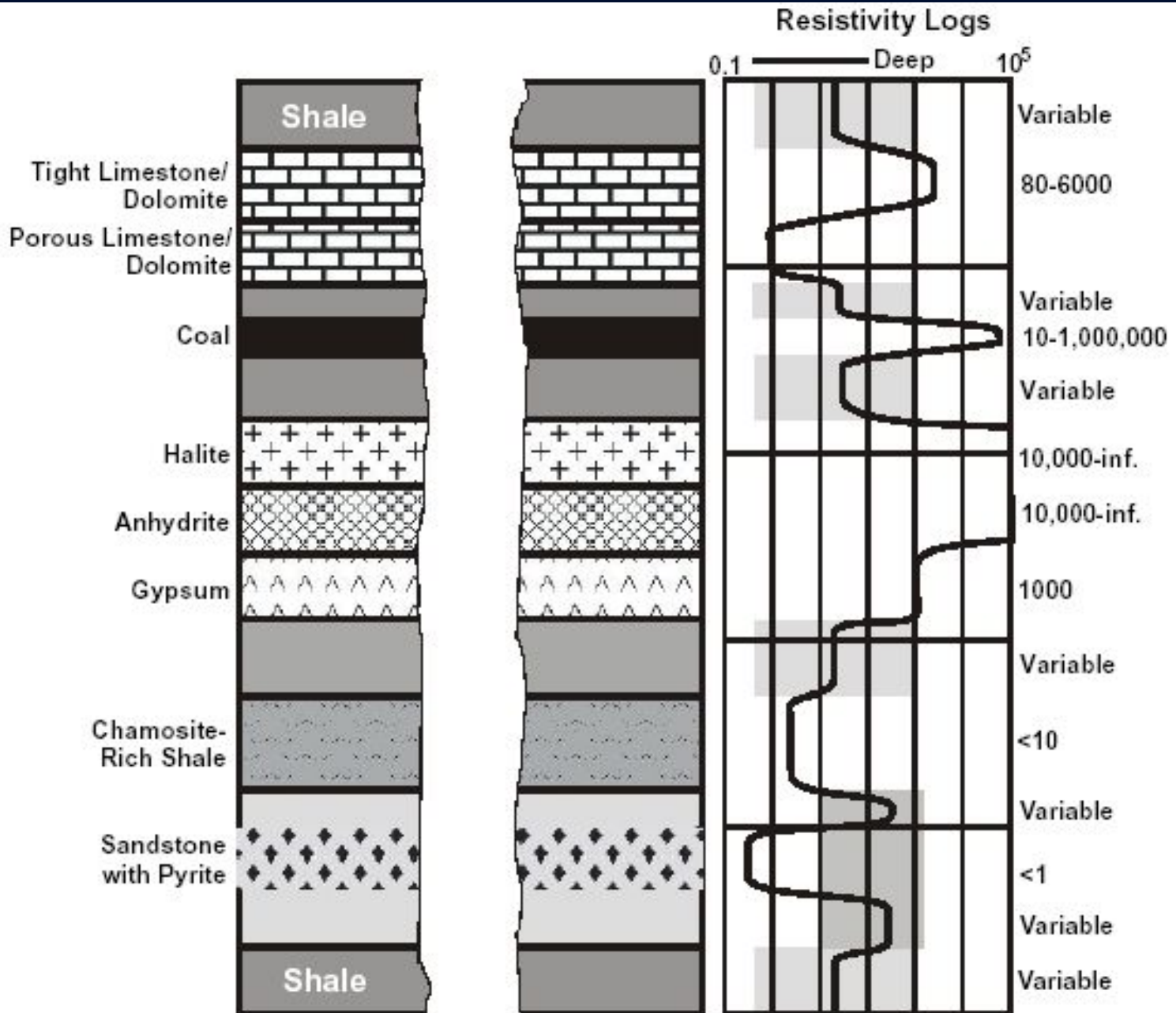
Индукционный метод

Определение границ пласта

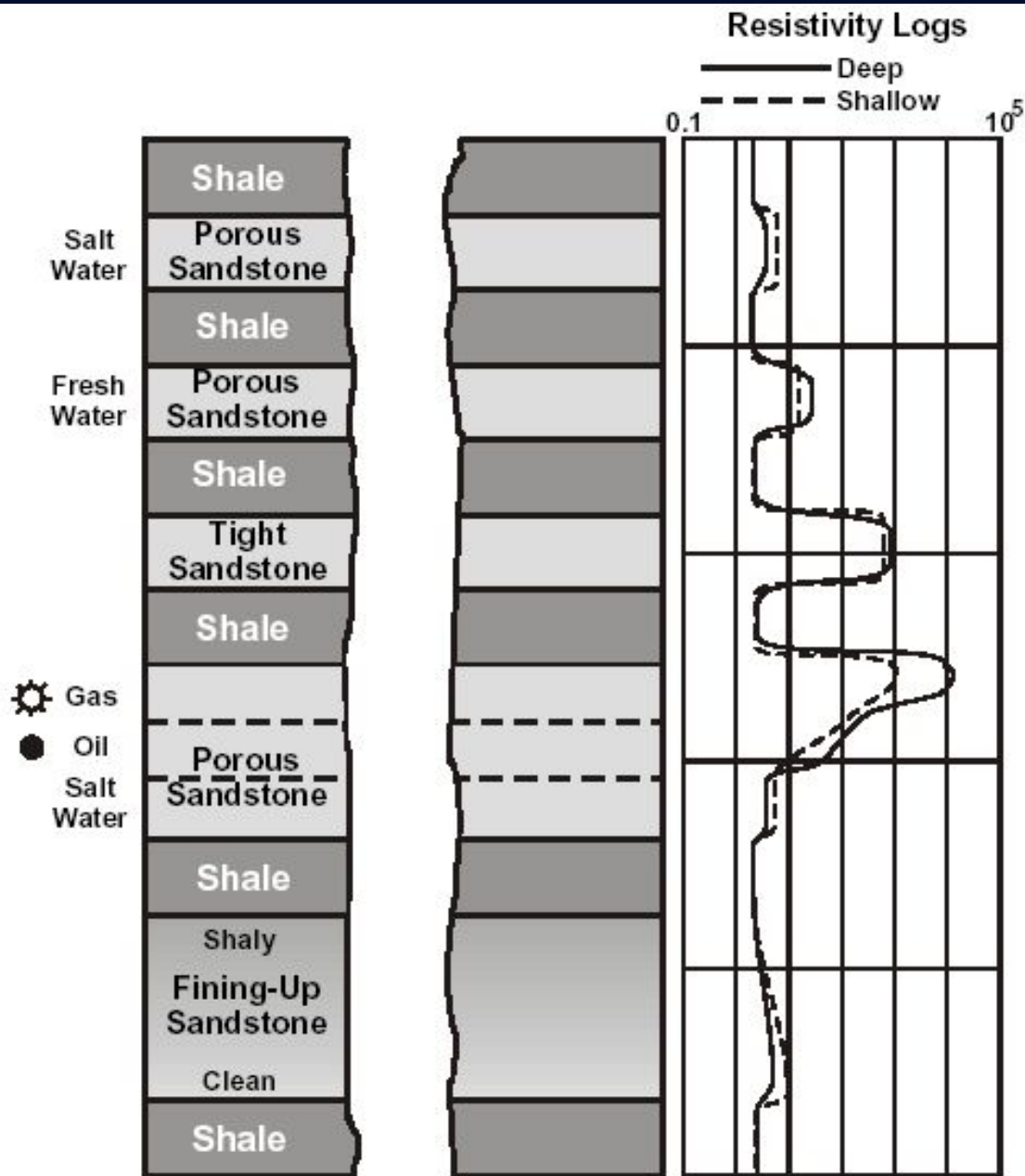
Spectroscopy Gamma Ray (SGR) (GAPI) 0 150				Delta-T Long Spacing Near (DTLN) (US/F) 140 40	
Computed Gamma Ray (CGR) (GAPI) 0 150				Delta-T Long Spacing Far (DTLF) (US/F) 140 40	
Washout	IL-Deep Resistivity (ILD) (OHMM) 20 2000	1.95	Bulk Density (RHOB) (G/C3)	2.95	
Uranium Indicator	IL-Medium Resistivity (ILM) (OHMM) 20 2000	0	PhotoElectric Factor (PEF) (----) 10		
Head Tension (HTEN) (LBF) 6 1800	Caliper (CAL) (IN) 6 16	IL-Medium Resistivity (ILM) (OHMM) 0.2 20	0.45	Neutron Porosity (NPHI) (V/V)	-0.15
Tension (TENS) (LBF) 3000	Bit Size (BS) (IN) 6 16	IL-Deep Resistivity (ILD) (OHMM) 0.2 20	-0.25	Bulk Density Correction (DRHO) (G/C3)	0.25



Литология и показания электрических методов

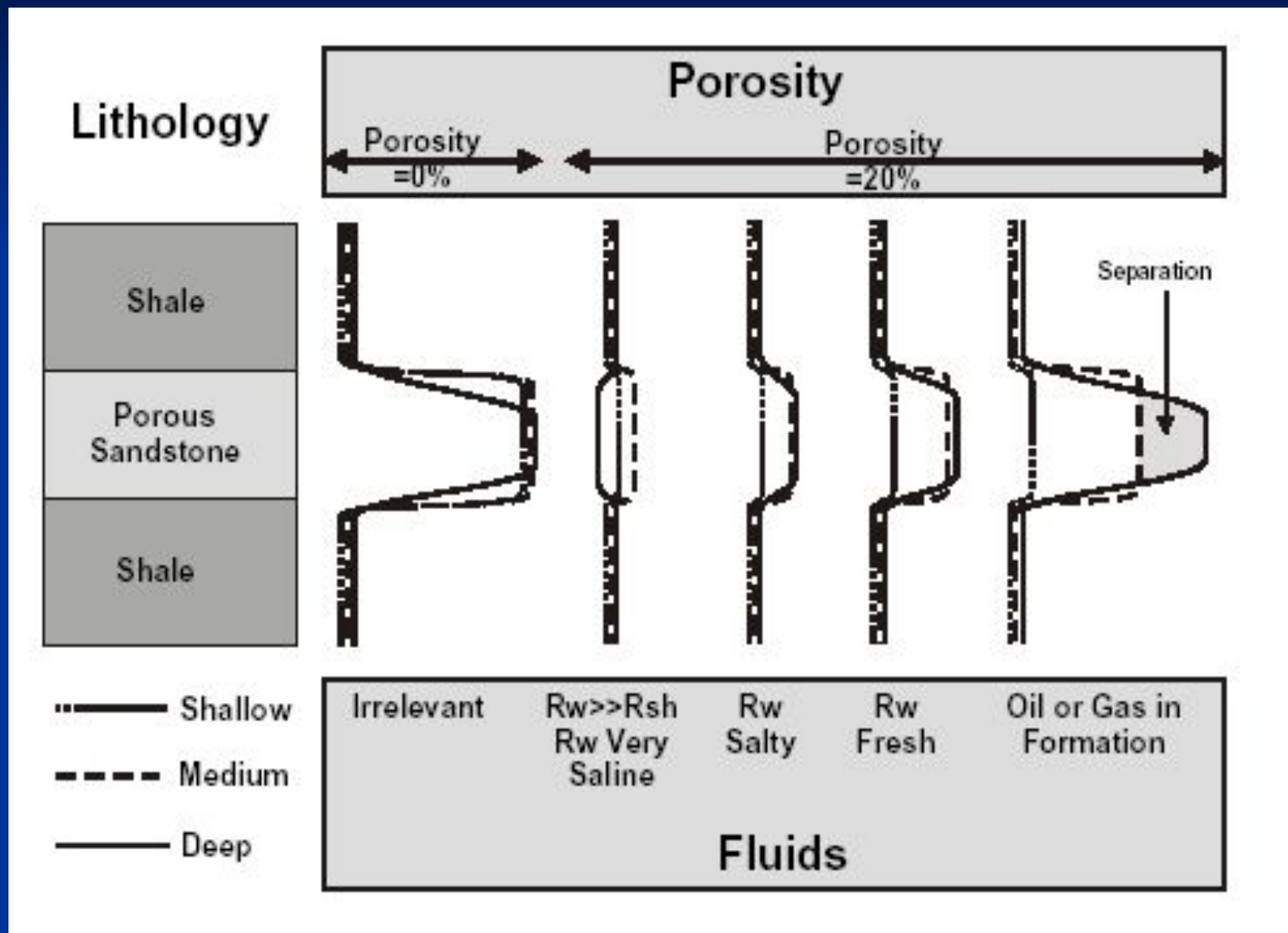


Литология и показания электрических методов



Песчано-глинистый разрез

Литология, насыщение пород и показания электрических методов



Метод КС - определение сопротивления пласта

градиент-зонд 18'8" lateral (18 футов 8 дюймов – 5,6 м)

Экспресс-методы оценки R_t

$h > 40$ ft

Метод средней точки

$h = 28$ ft

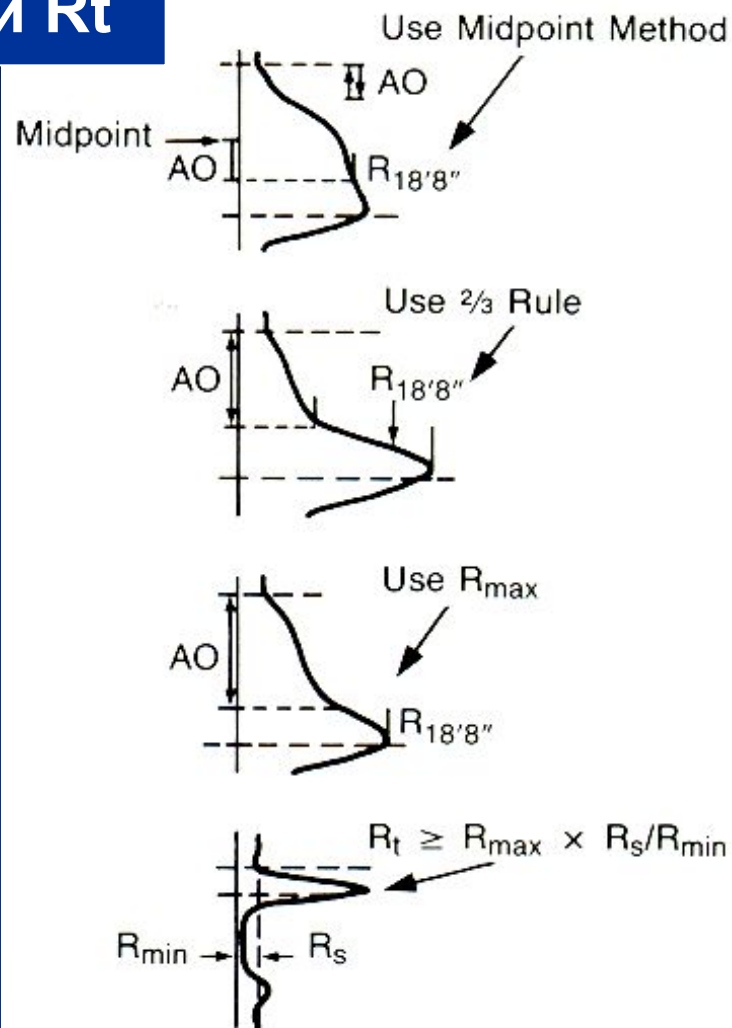
Правило 2/3

$h = 24$ ft

Метод максимума

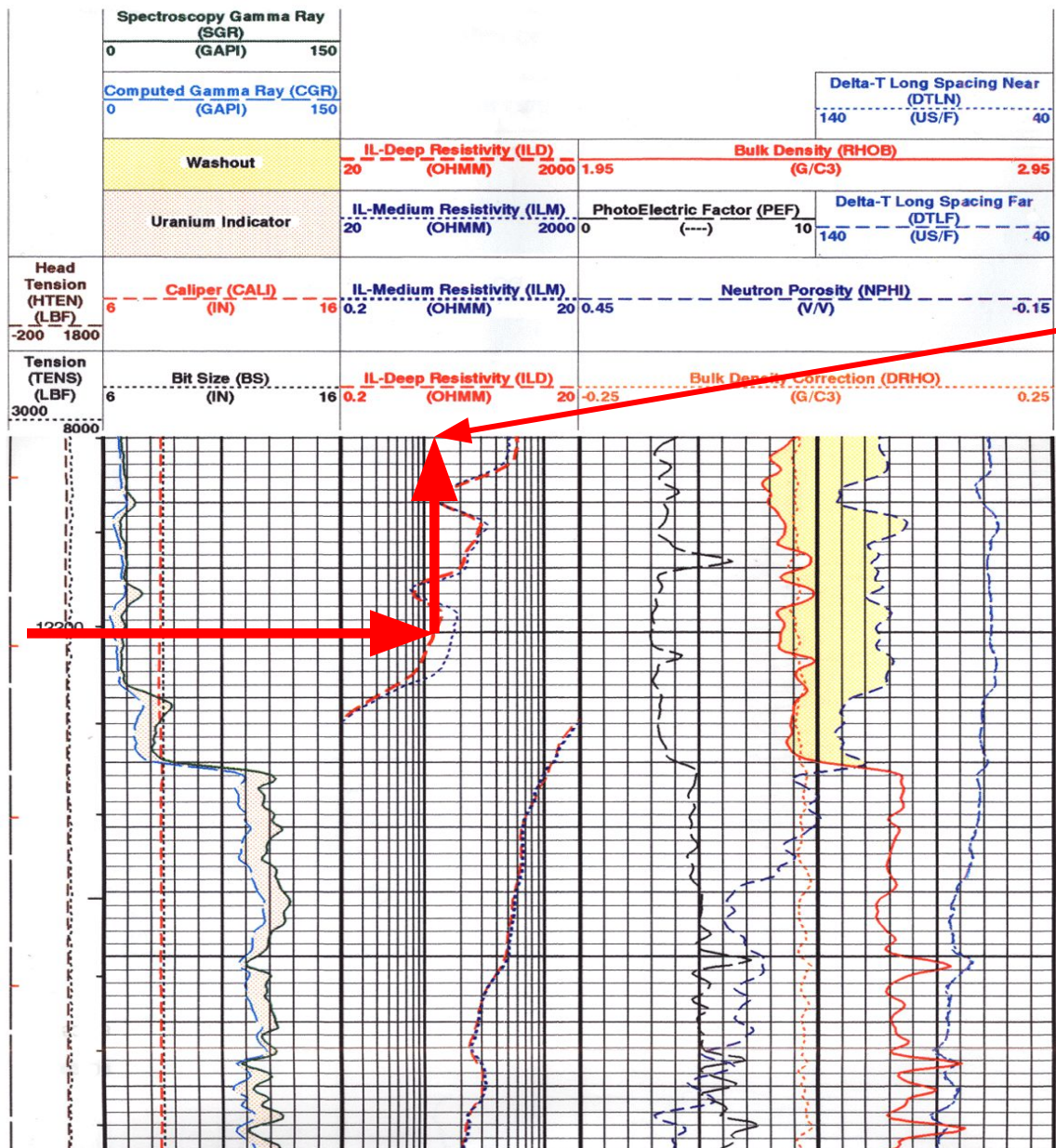
$5\text{ft} < h < 10$ ft

Метод тонких пластов



Индукционный метод

Определение
измеренного
сопротивления
пласта по
диаграмме



Индукционный метод

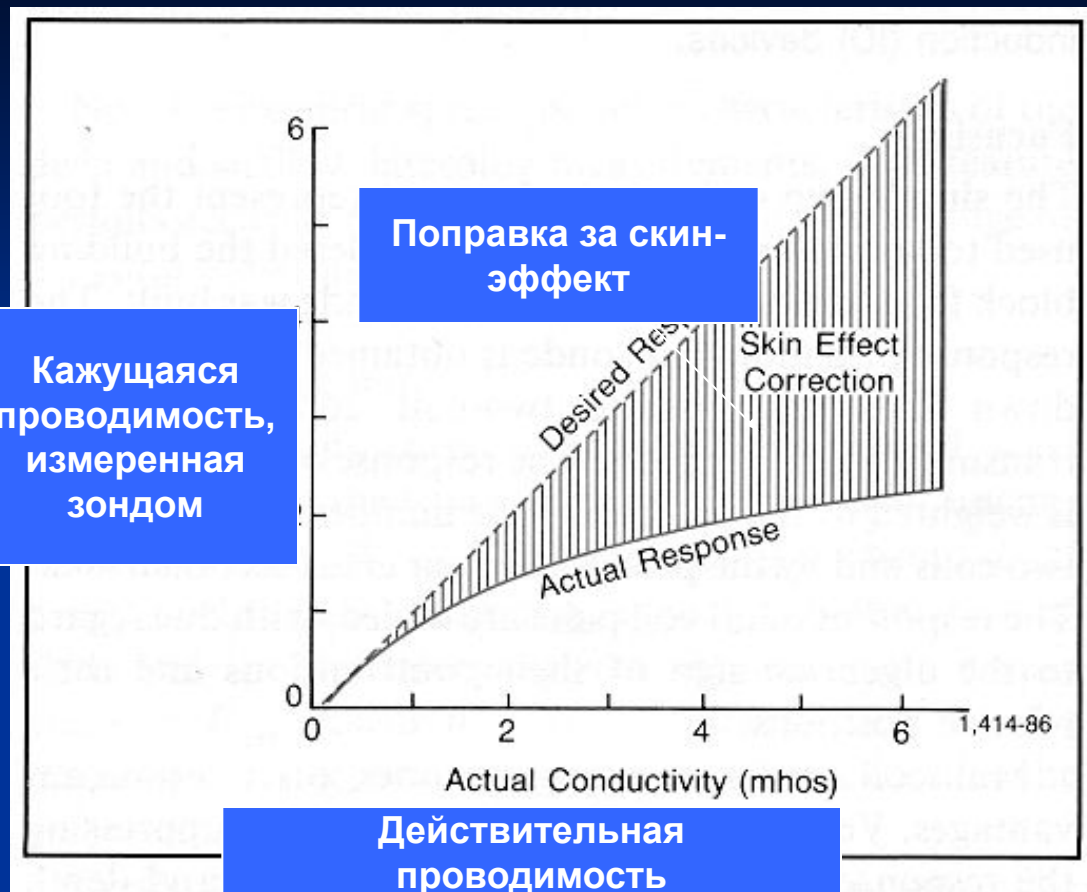
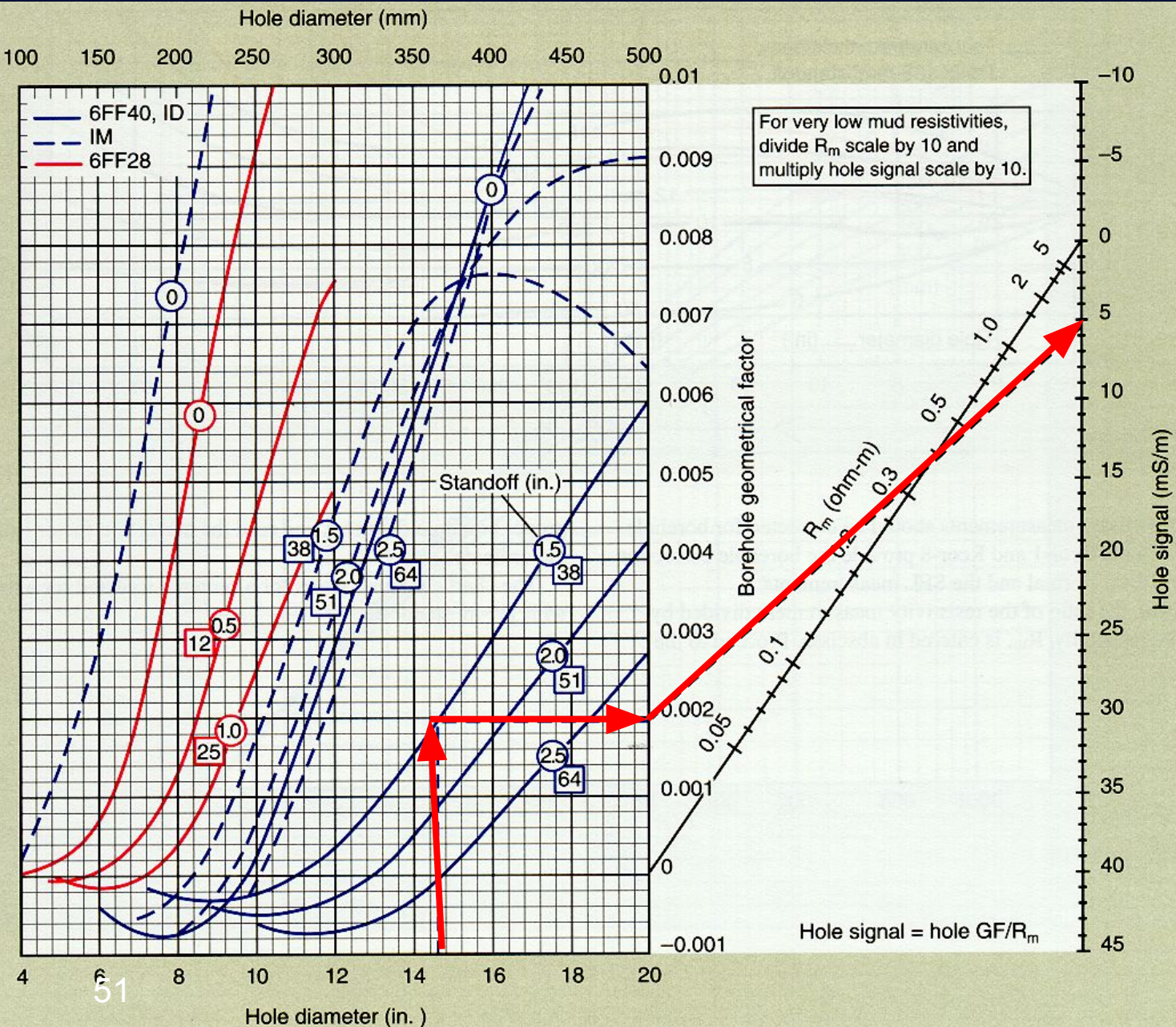


Fig. 7-20—Actual response of an induction log compared to the “desired” response.

Влияющие эффекты:

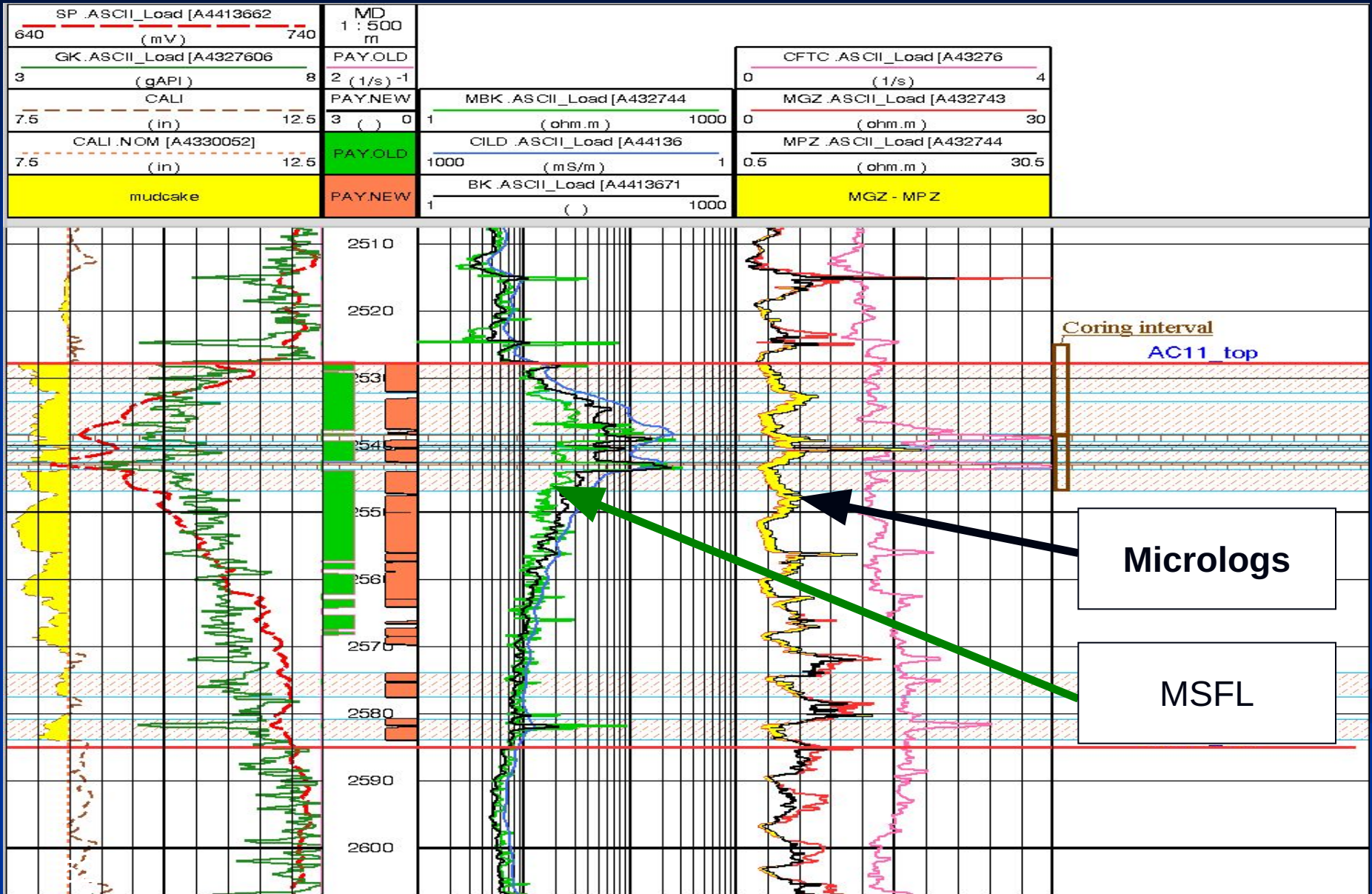
- Скин-эффект
- Диаметр скважины
- Вмещающие породы
- Наклонное падение слоев
- Геометрический фактор
- Зона проникновения

Действительный отклик индукционного каротажа в сравнении с ожидаемым



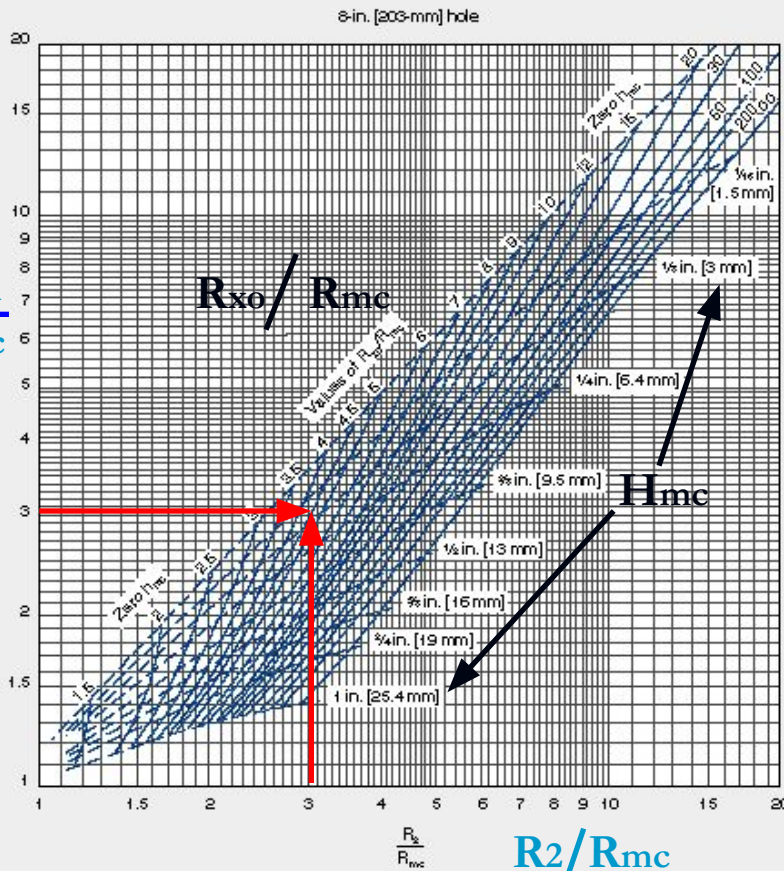
**Коррекция
за
скважину
Двойной
ИНДУКЦИОН
НЫЙ ЗОНД -
DIL**

Определение сопротивления промытой зоны пласта



$$\frac{R_{1x1}}{R_{mc}}$$

$$\frac{R_{1x1}}{R_{mc}}$$



© Schlumberger

Enter the chart with the ratios R_{1x1}/R_{mc} and R_2/R_{mc} . The point of intersection defines the R_{xo}/R_{mc} ratio and the mudcake thickness, h_{mc} . Knowing R_{mc} , R_{xo} can be calculated.

For hole sizes other than 8 in. [203 mm], multiply R_{1x1}/R_{mc} by the following factors before entering the chart: 1.15 for 4½-in. [120-mm] hole, 1.05 for 6-in. [152-mm] hole, and 0.93 for 10-in. [254-mm] hole.

Note: An incorrect R_{mc} will displace the points in the chart along a 45° line. In certain cases this can be recognized when

the mudcake thickness is different from direct measurement by the microcaliper. To correct, move the plotted point at 45° to intersect the known h_{mc} . For this new point, read R_{xo}/R_{mc} from the chart and R_2/R_{mc} from the bottom scale of the chart.

$$R_{xo} = R_2 \left(\frac{R_{xo}/R_{mc}}{R_2/R_{mc}} \right)$$

Микрозонды - Micrologs

Определение сопротивления промытой зоны R_{xo} и толщины глинистой корки h_{mc}

Resistivity In The Flushed Zone

$$\frac{R_{xo}}{R_{mf}} = F = \frac{a}{\phi^m}$$

F = Formation Factor

R_{xo} = Resistivity of the flushed zone

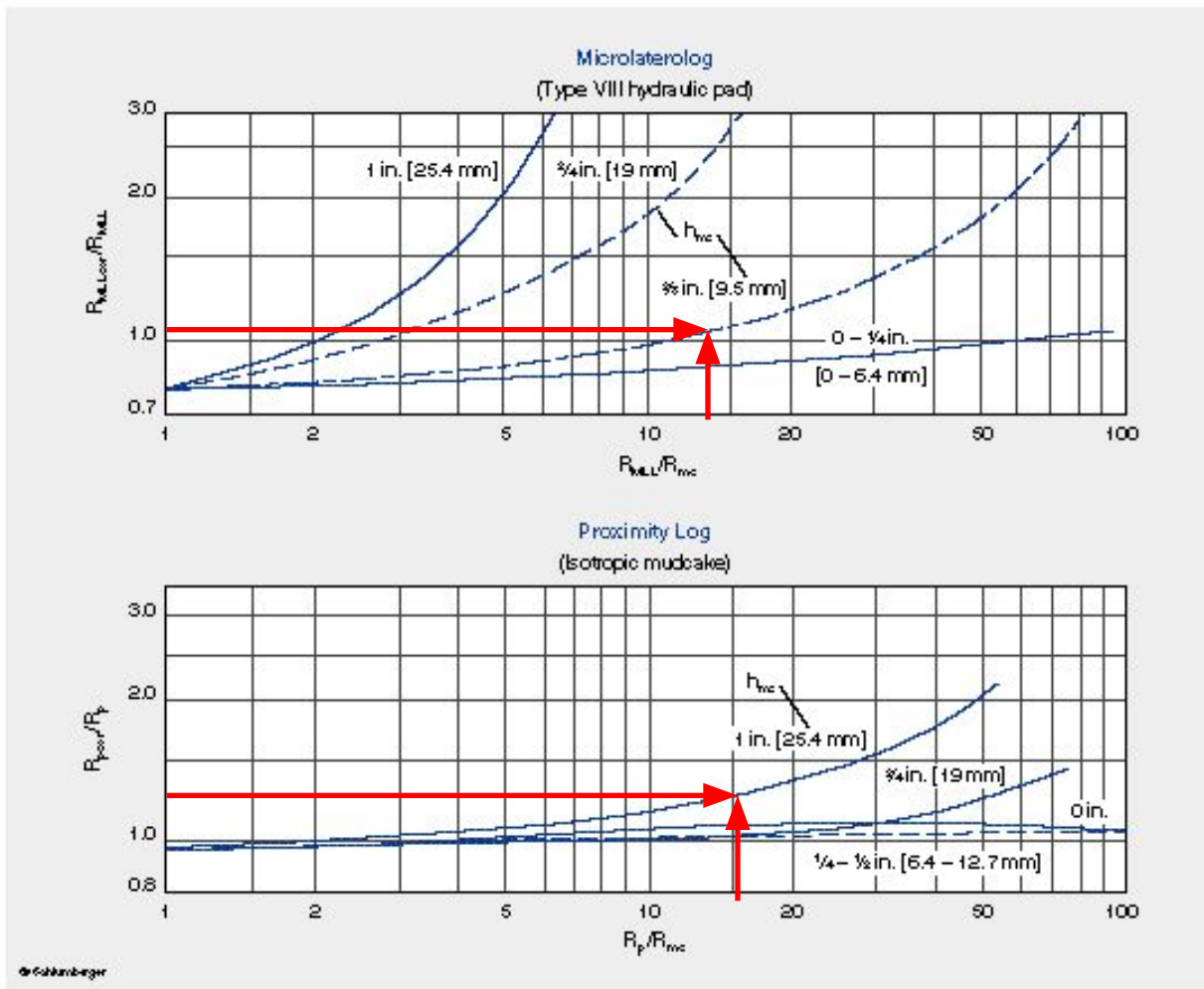
R_{mf} = Resistivity of the mud filtrate

ϕ = Porosity, fraction

However this only works where S_{xo} is 100% water.

Microlaterolog and Proximity Log
Mudcake Correction

R30-2



R30

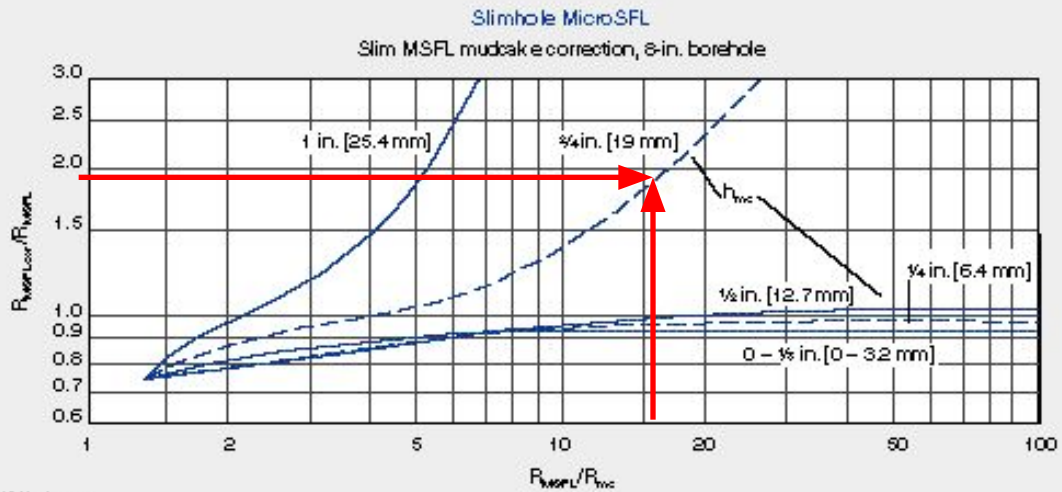
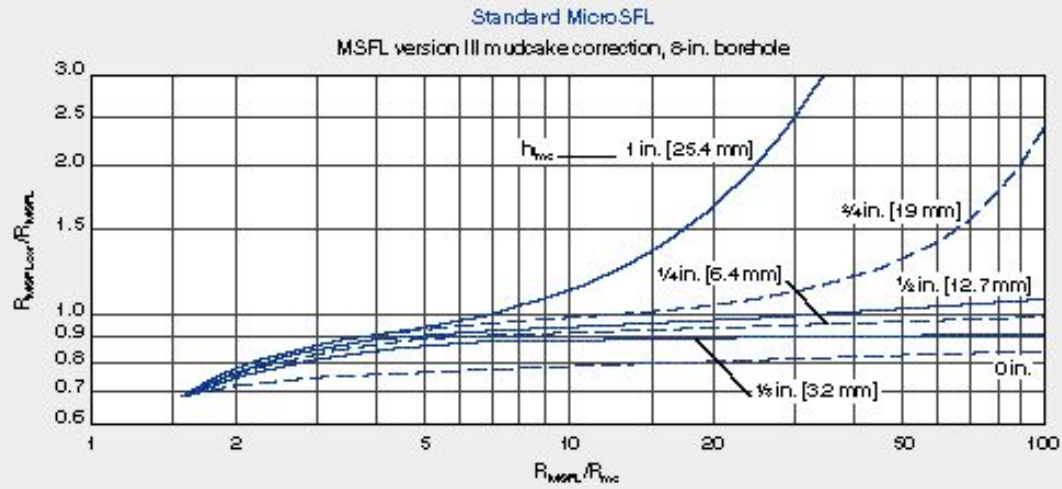
Charts R30-2 and R30-3 correct microresistivity measurements for mudcake effect. To use, enter the ratio of the microresistivity log reading divided by the mudcake resistivity into the abscissa of the appropriate chart. Go vertically to the mudcake thickness;

the ratio of the corrected microresistivity value to the microresistivity log reading is then given on the ordinate. Multiplication of this ratio by the microresistivity log reading yields the corrected microresistivity.

Continued on next page

MicroSFL[®] Mudcake Correction

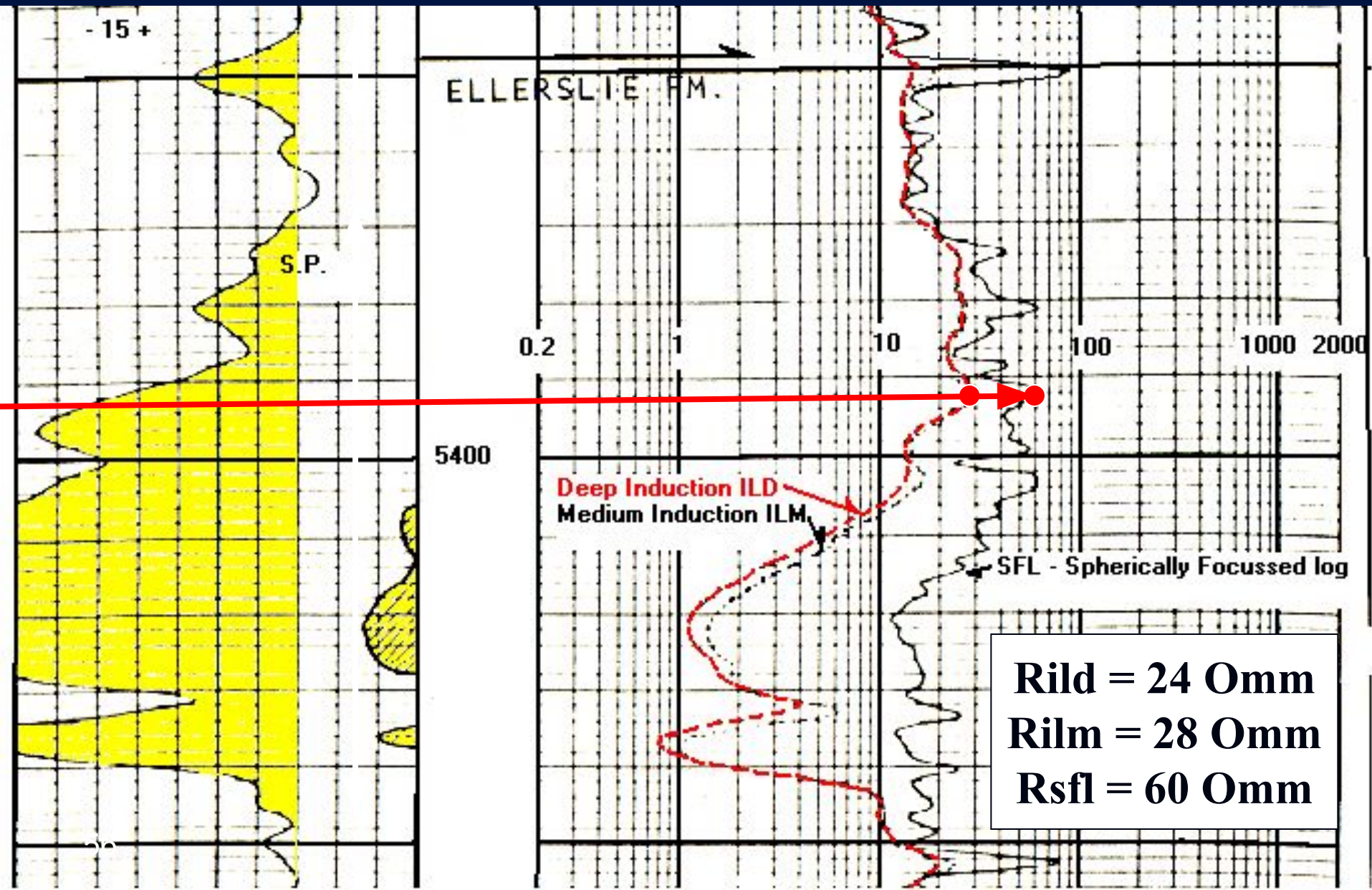
RD-3



*Mark of Schlumberger
© Schlumberger

RD

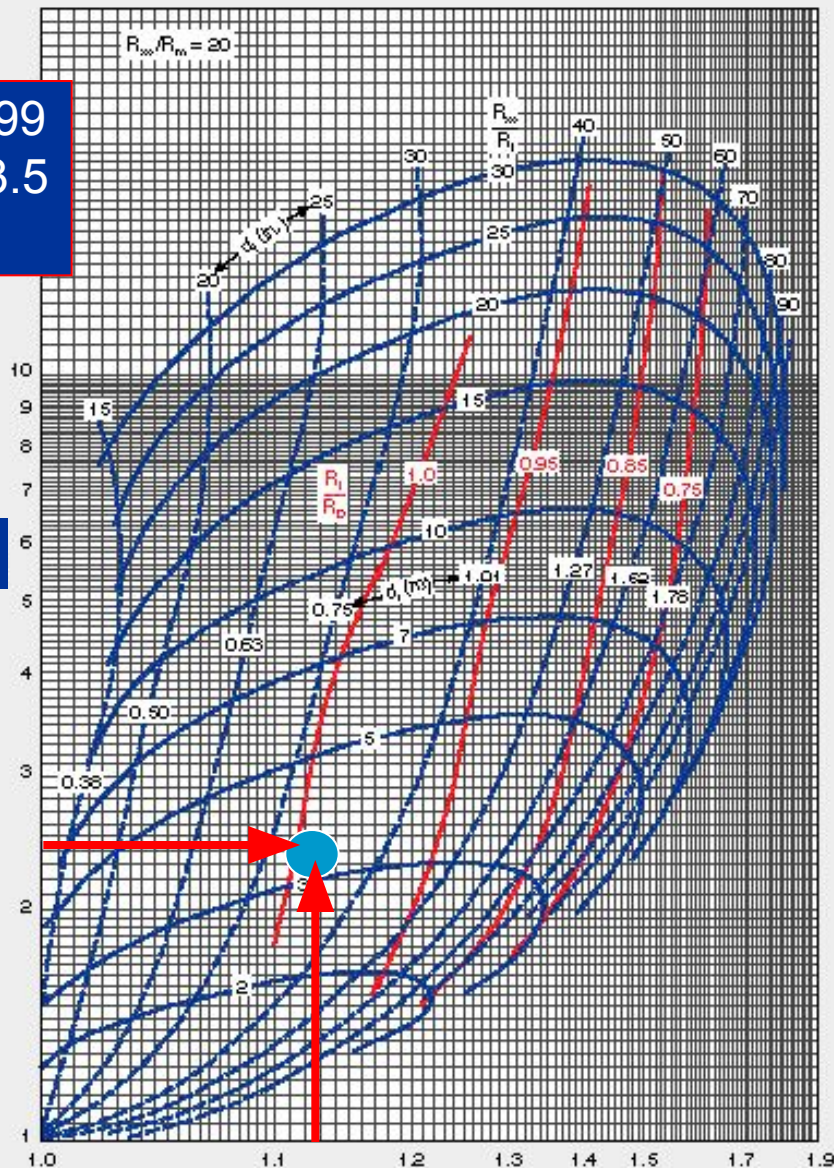
Двойной индукционный (Dual Induction) – боковой (SFL) - ПС (SP) каротажи – определение электрических параметров пласта.



Thick beds, 8-in. [203-mm] hole, skin-effect corrected,
DIS-EA or equivalent

$R_t/R_{id} = .99$
 $R_{xo}/R_t = 3.5$
 $d_i = 35 \text{ in.}$

R_{sf}/R_{id}



R_{ilm}/R_{id}

Индукционный – боковой
каротажи (DIL-SFL) –
коррекция за зону
проникновения и определение
 R_t

Вводят отношения R_{sf}/R_{id} и R_{ilm}/R_{id} и определяют отношение R_t/R_{id} , диаметр проникновения (d_i) и отношение R_{xo}/R_t . Диаграмма предполагает толстые слои (16 ft – 4.8 м), последовательное проникновение в пласт и пресный буровой раствор. Каждая комбинация измерений будет иметь свою собственную Торнадо номограмму, так что необходимо тщательно знать входное значение R_{xo} для выбора номограммы и тип индукционного зонда. Коррекция измерений за скважинные условия должна производиться перед использованием номограммы для коррекции за проникновение

Уравнение Арчи:

Эмпирическая константа
(обычно около 1)

Водонасыщенность, доли ед.

Показатель насыщения
(обычно 2)

Пористость доли ед.

Сопротивление пластовой воды, Омм

Показатель цементации,
(обычно около 2)

Сопротивление пласта, Омм

$$S_w = \frac{a R_w}{\phi^m R_t}$$