

Теоретические основы индукционного каротажа

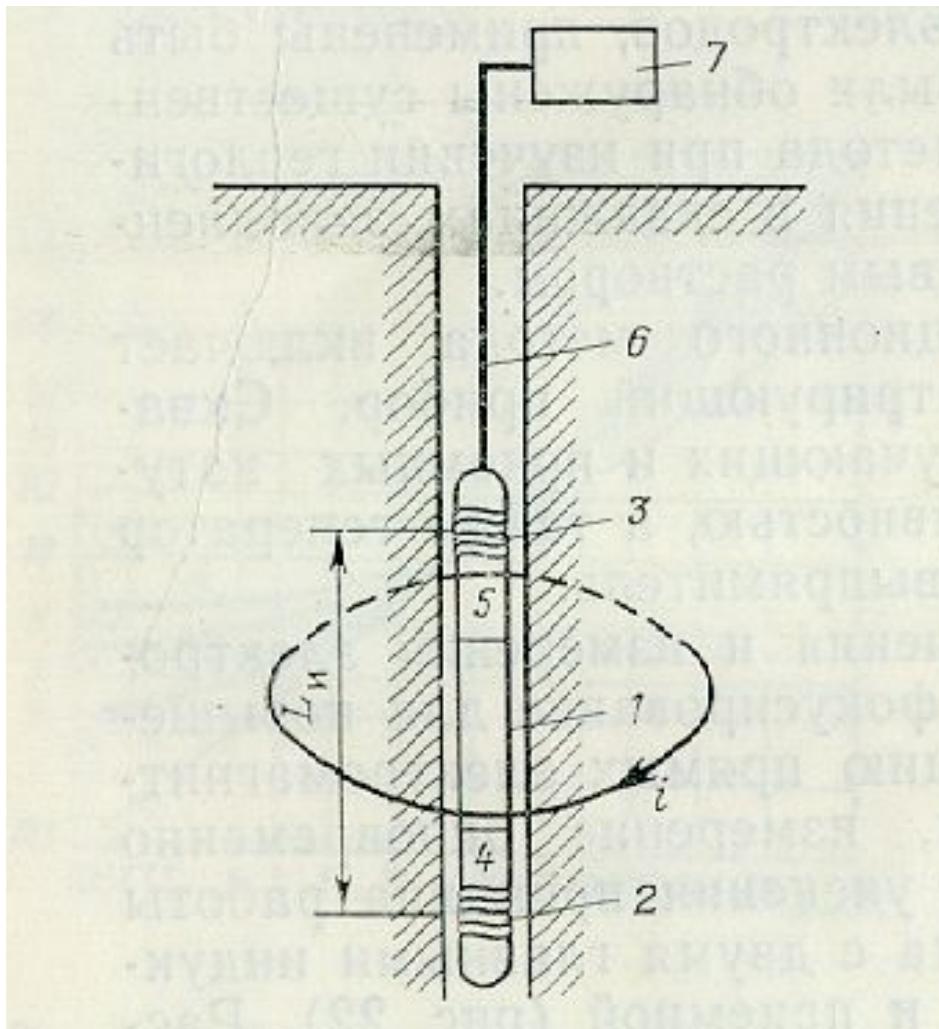
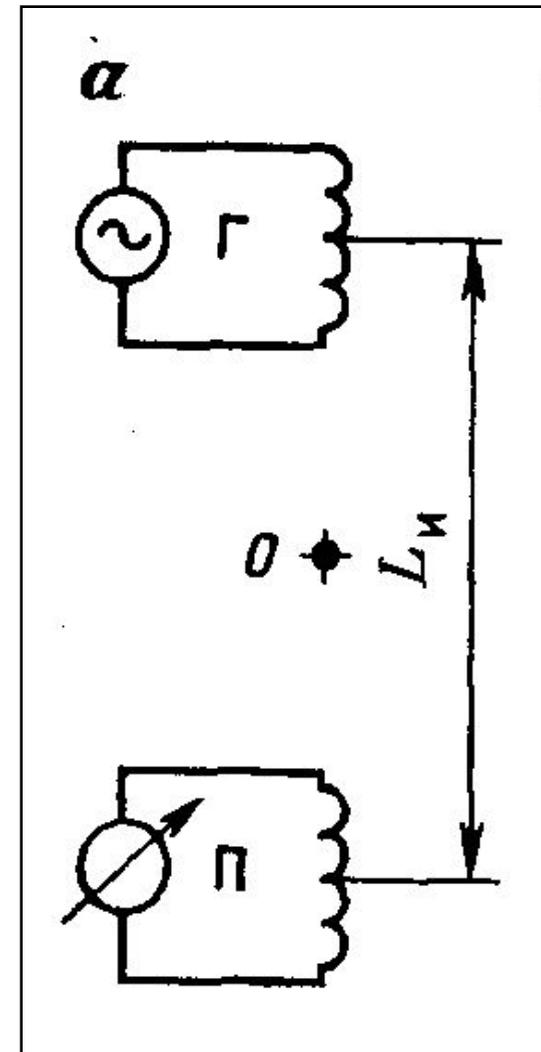


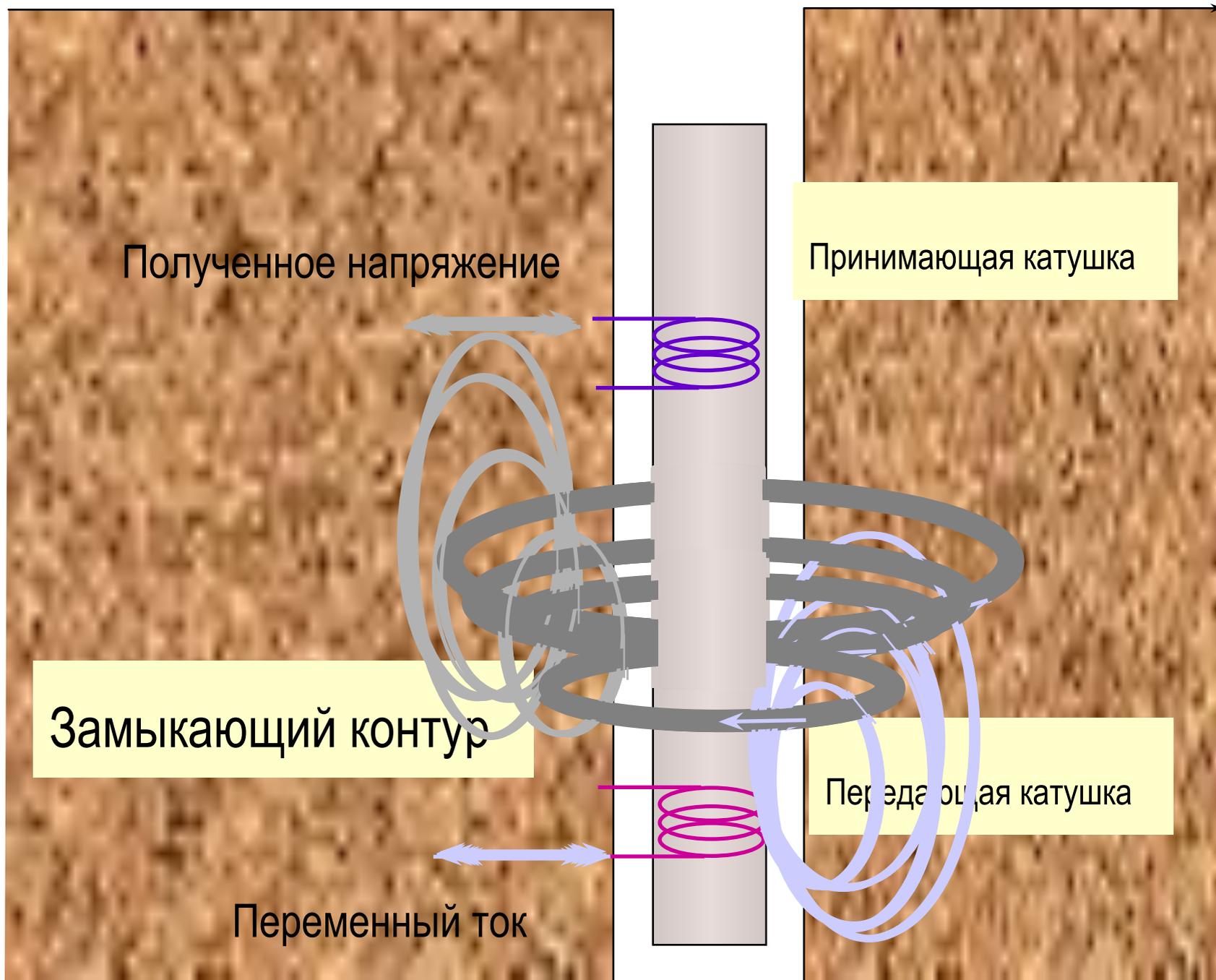
Рис. 22. Принципиальная схема индукционного метода.

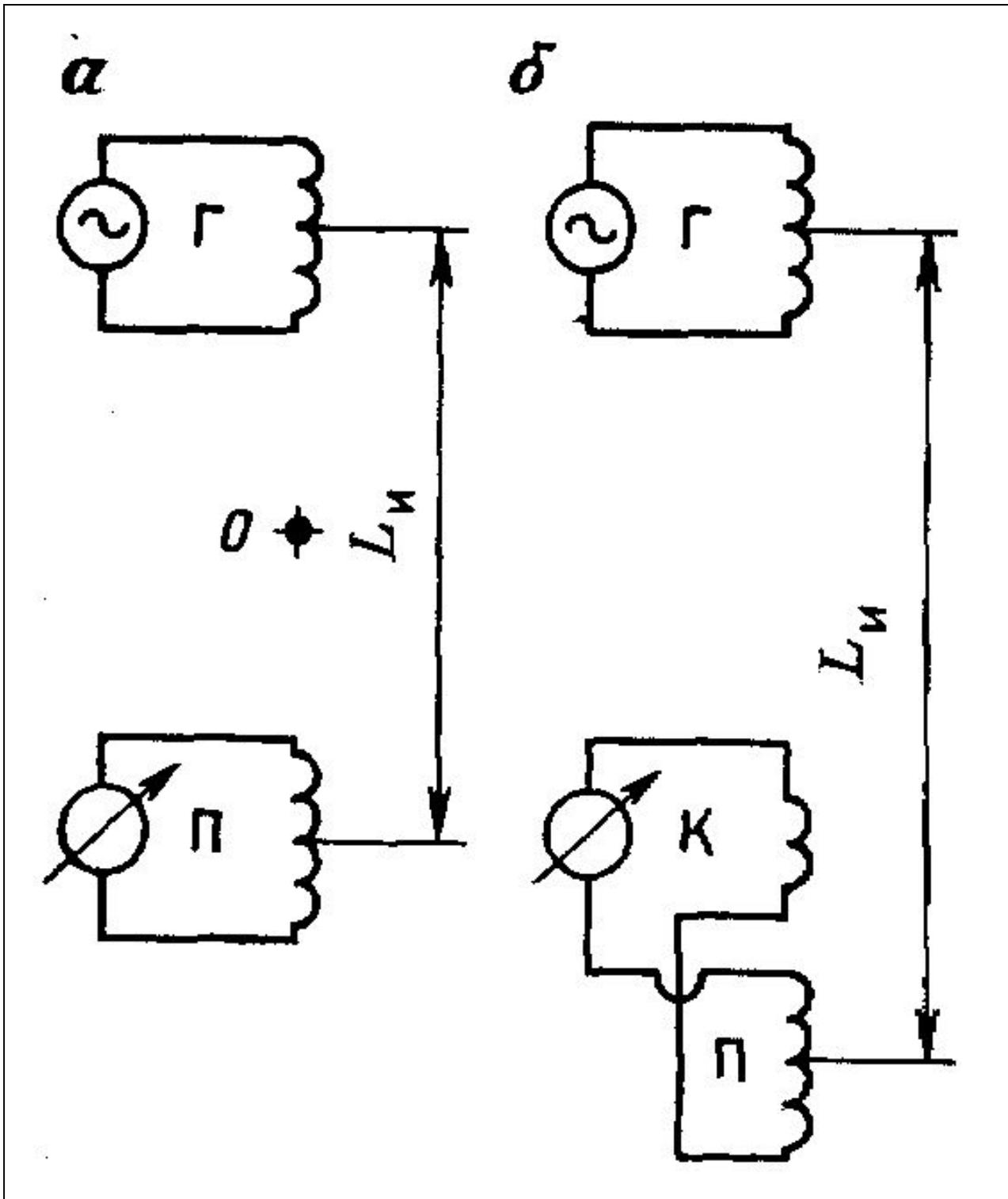
- 1 — скважинный снаряд-зонд;
- 2 — излучающая катушка;
- 3 — приемная катушка; 4 — генератор; 5 — усилитель и выпрямитель; 6 — кабель;
- 7 — регистрирующий прибор

ИК. Принципиальная схема измерений



ИНДУКЦИЯ

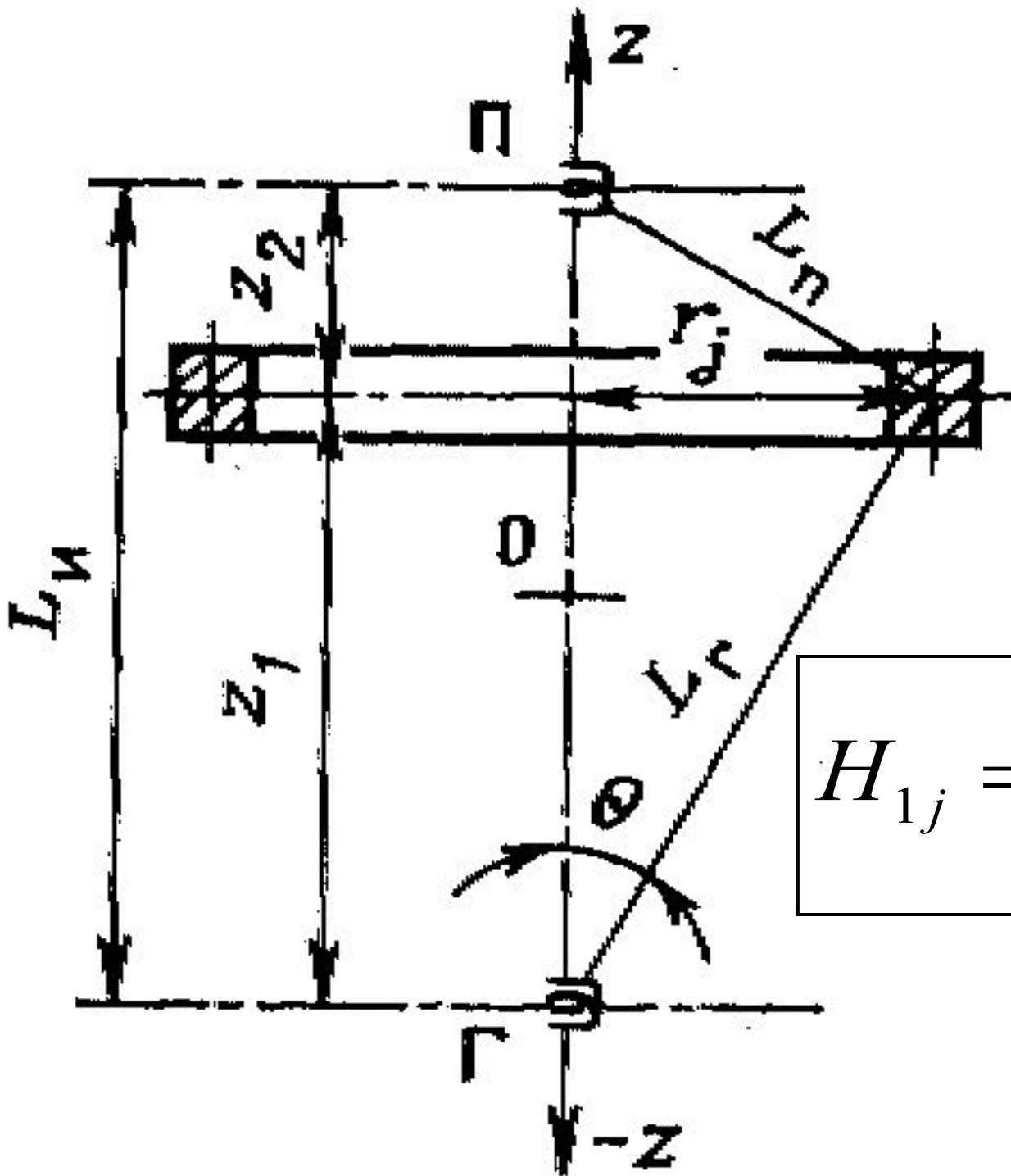




ИК. Блок-схема зонда ИК без компенсацией (а) и с компенсацией (б) первичного поля

ИК. Схема,
 поясняющая
 решение прямой
 задачи ИК в
 низкочастотном
 приближении.

Z-составляющая
 напряженности **первичного**
 магнитного поля

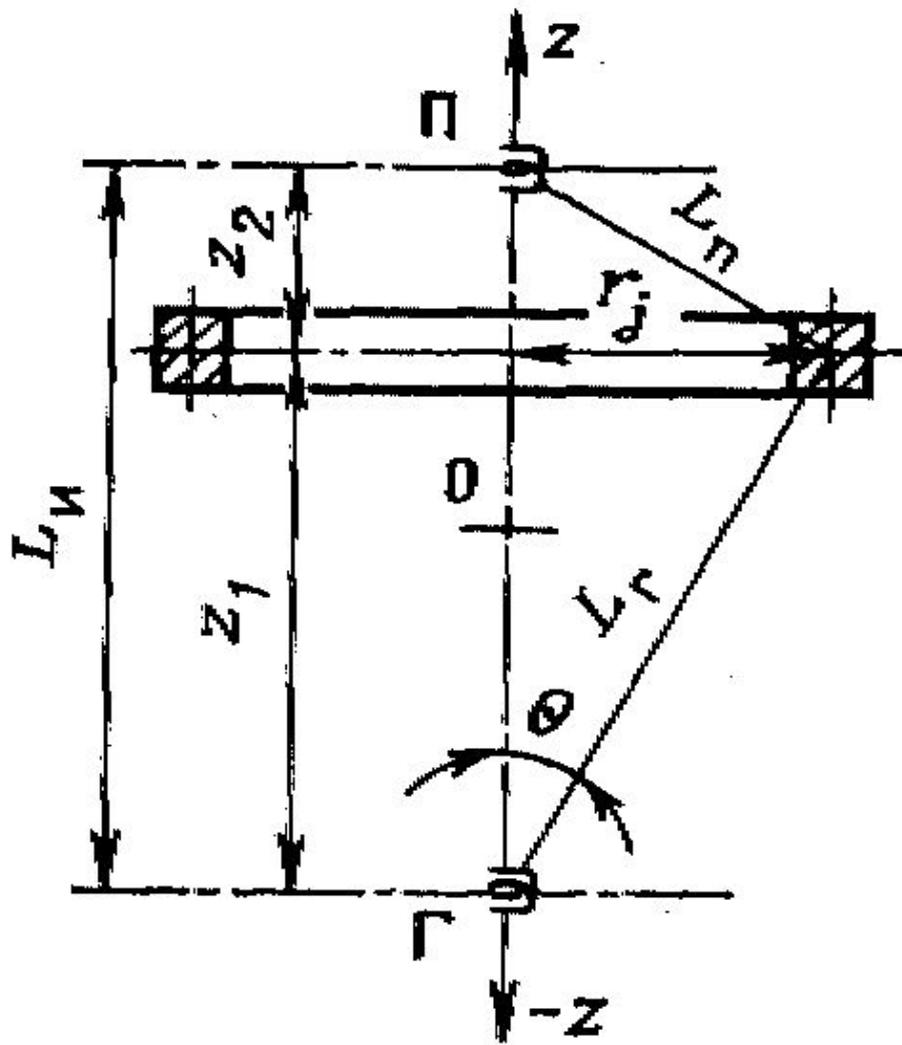


$$H_{1j} = \frac{M_z}{4\pi L_2^3} (3 \cos^2 \theta - 1).$$

Момент **генераторной**
 катушки

$$M_z = n_{\tilde{a}} S_{\tilde{a}} I_{\tilde{a}}$$

ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.



Учитывая, что

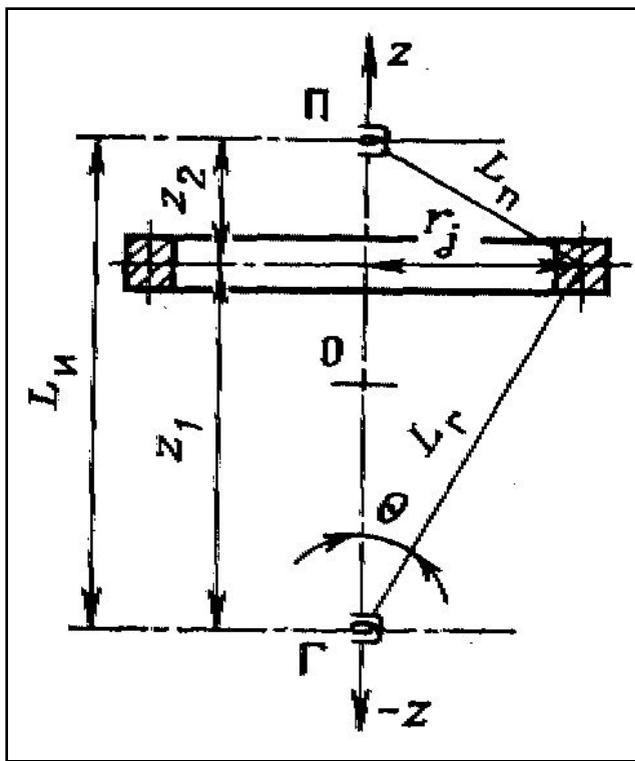
$$L_2 = (z_1^2 + r_j^2)^{1/2}$$

$$\cos^2 \theta = z_1^2 / (r_j^2 + z_1^2)$$

Перепишем

$$H_{1j} = \frac{M_z}{4\pi L_2^3} (3 \cos^2 \theta - 1).$$

$$H_{1j} = \frac{M_z}{4\pi (r_j^2 + z_1^2)^{3/2}} \left(3 \frac{z_1^2}{r_j^2 + z_1^2} - 1 \right).$$



ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.

Поток магнитной индукции через **j-тый** тор

$$\Phi_{1j} = \frac{M_z}{2} \mu_a \left(\int_0^{r_j} 3 \frac{z_1^2 r dr}{(z_1^2 + r^2)^{5/2}} - \int_0^{r_j} \frac{r dr}{(z_1^2 + r^2)^{3/2}} \right).$$

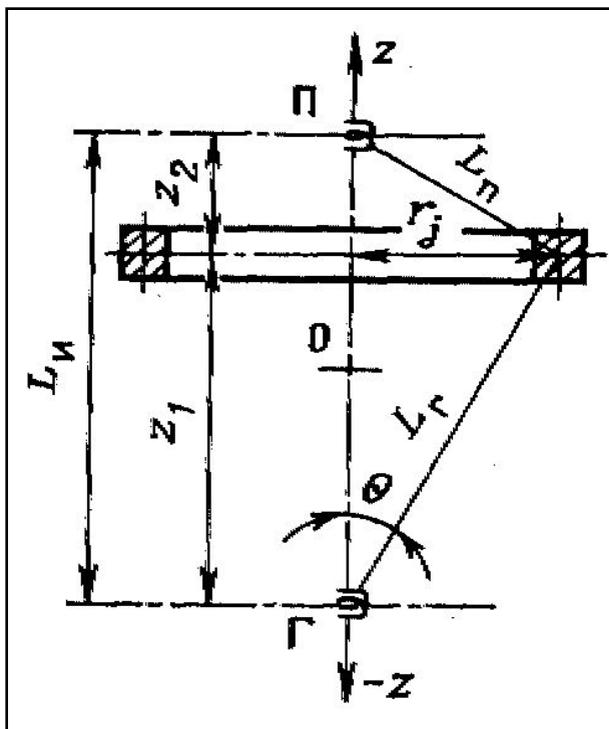
Решение интегралов и то, что

$$z_1^2 + r_j^2 = L_2^2$$

дает

$$\hat{O}_{1j} = \mu_a n_{\tilde{a}} S_{\tilde{a}} \exp(-i\omega t) r_j^2 / 2L_{\tilde{a}}^3$$

ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.



Комплексная ЭДС в j-том торе

$$E_{1j} = - \frac{d\Phi_{1j}}{dt} = i\omega\mu_a n_z S_z I r_j^2 \exp(-i\omega t) / 2L_2^3$$

Ток в j-м торе $I_{1j} = E_{1j} / R_{1j}$, где R_{1j} – сопротивление тора.

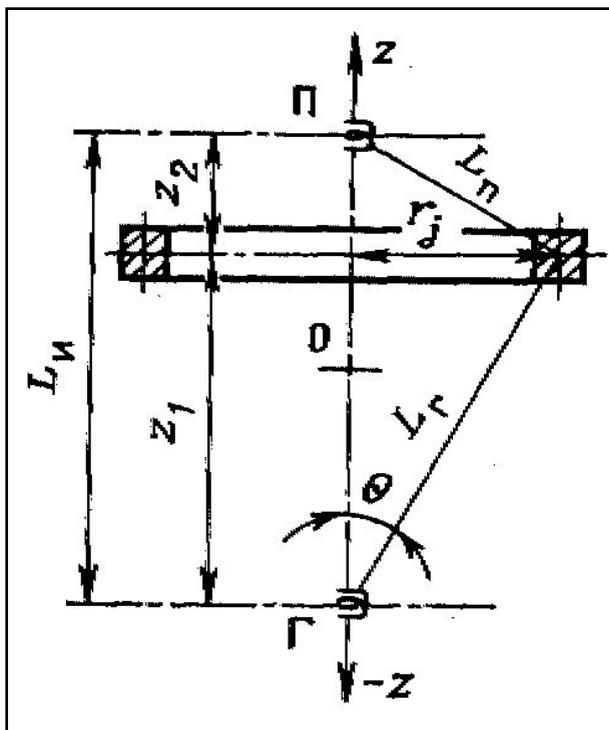
Считается, что сечение тора S равно единице. Тогда

$$R_{1j} = 2\pi r_j / \sigma_n.$$

Далее находим значение **вихревого тока в j-м торе**

$$I_{1j} = i\omega\mu_a n_z S_z I r_j \sigma_n \exp(-i\omega t) / 4\pi L_2^3$$

ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.



Напряженность **вторичного магнитного поля j-тым тором**

$$H_{2j} = M_{zj} / 2\pi L_n^3,$$

Момент диполя $M_{zj} = S_j I_{1j}$, где $S_j = \pi r_j^2$ – площадь, ограниченная j-м тором.

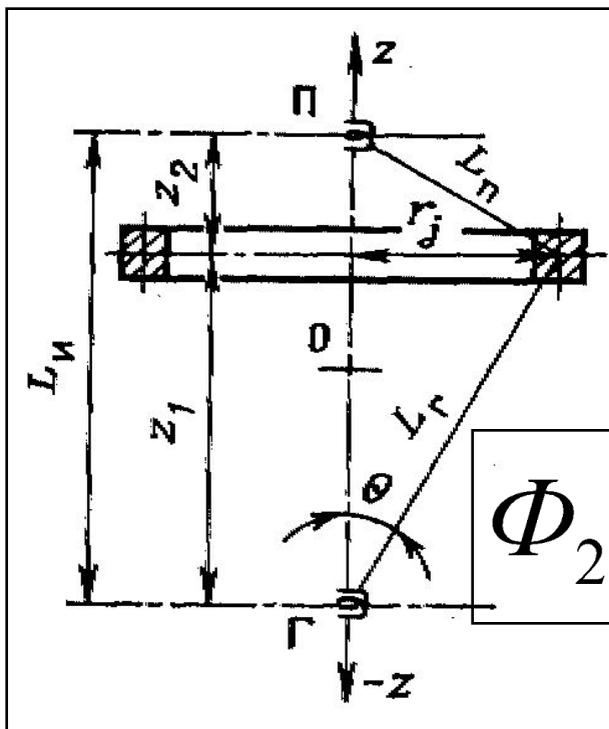
Подставляя

$$I_{1j} = i\omega\mu_a n_z S_z I_r \sigma_n \exp(-i\omega t) / 4\pi L_z^3$$

Получим

$$H_{2j} = i\omega\mu_a n_z S_z I e^{-i\omega t} r_j^3 \sigma_n / 8\pi L_r^3 L_n^3.$$

ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.



Поток магнитной индукции через **приемную катушку**

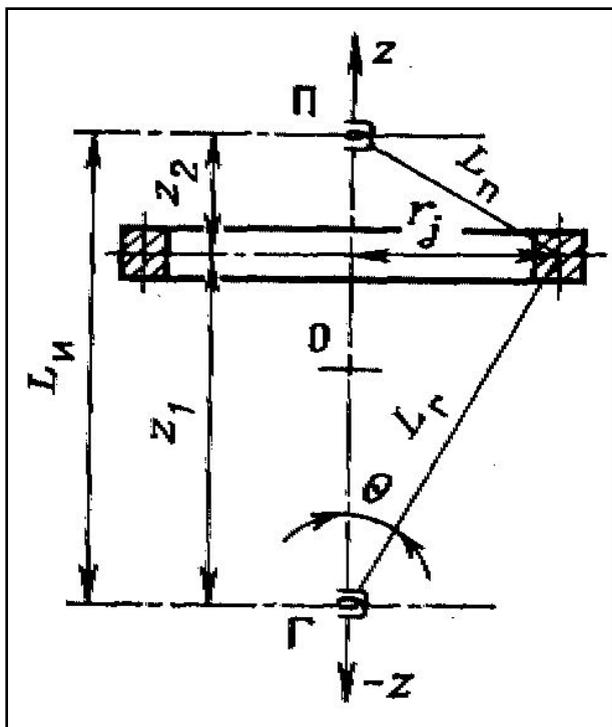
$$\Phi_{2j} = i\omega\mu_a^2 n_z S_z n_n S_n I e^{-i\omega t} r_j^3 \sigma_n / 8\pi L_z^3 L_n^3.$$

Комплексная ЭДС в приемной катушке, созданная j-м тором,

$$E_{2j} = -\frac{d\hat{O}_{2j}}{dt} = -\pi f^2 \mu_a^2 n_{\tilde{a}} S_{\tilde{a}} n_{\tilde{i}} S_{\tilde{i}} I e^{-i\omega t} r_j^3 \sigma_{\tilde{i}} / 2L_{\tilde{a}}^3 L_g^3.$$

Умножив и разделив E_{2j} на L_u и учтя, что для большинства немагнитных пород $\mu_a = \mu_o$, запишем

$$E_{2j} = K_{\tilde{e}} G_j \sigma_{\tilde{i}},$$



ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.

Комплексная ЭДС в приемной катушке, созданная j -м тором,

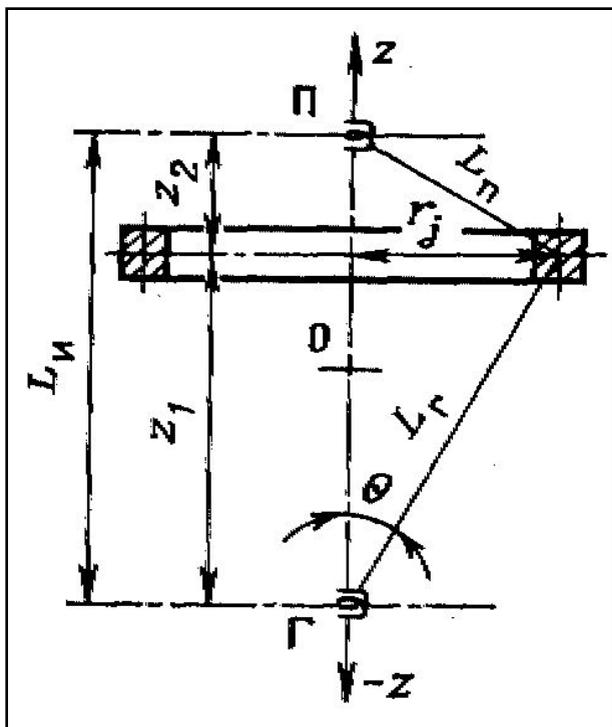
$$E_{2j} = K_e G_j \sigma_i,$$

$$K_u = -\pi f^2 \mu_0^2 n_z S_z n_n S_n I_z / L_u$$

- коэффициент индукционного зонда;

$$G_j = L_u r_j^3 / 2L_z^3 L_n^3$$

- геометрический фактор j -го тора, характеризующий его относительный вклад в ЭДС, создаваемую в приемной катушке всеми торами, составляющими исследуемое пространство.



ИК. Схема, поясняющая решение прямой задачи ИК в низкочастотном приближении.

ЭДС, создаваемая в приемной катушке всеми торами, составляющими исследуемое пространство

$$E = \sigma_n K_u \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_j dr dz.$$

Известно, что

$$\int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_j dr dz = 1,$$

окончательно

$$\sigma_n = E / K_u.$$

ИК. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР

В однородной среде при $\rho > 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $f < 20 \text{ кГц}$

$$\sigma_n = E / K_u \cdot$$

Из формулы

$$E_{2j} = K_e G_j \sigma_i,$$

следует, что при отсутствии скин-эффекта вклад любого элементарного тора в регистрируемую приемной катушки ЭДС зависит только от проводимости участка этого тора и его местоположения.

Полная ЭДС (15)

$$E = K_u \left(\sigma_c \int_0^{r_c} \int_{-\infty}^{\infty} G_{ic} dr dz + \sigma_{zn} \int_{r_c}^{r_{pg}} \int_{-h/2}^{h/2} G_{jzn} dr dz + \sigma_n \int_{r_{zn}}^{\infty} \int_{-h/2}^{h/2} G_{kn} dr dz + 2\sigma_{вм} \int_{r_c}^{\infty} \int_{h/2}^{\infty} G_{lвм} dr dz \right) =$$
$$= K_u (\sigma_c G_c + \sigma_{zn} G_{zn} + \sigma_n G_n + \sigma_{вм} G_{вм}),$$

ИК. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР

Полная ЭДС (15)

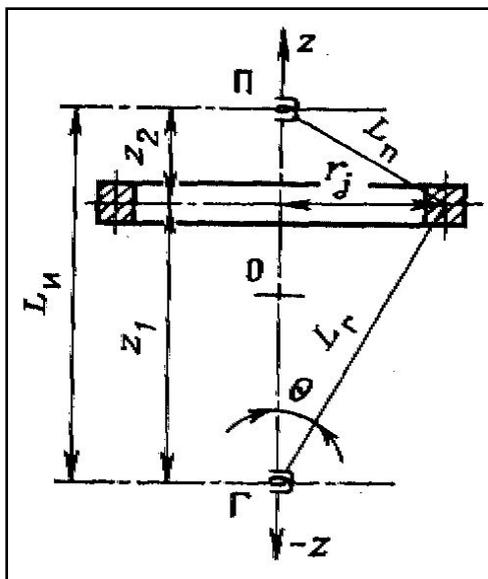
$$E = K_u \left(\sigma_c \int_0^{r_c} \int_{-\infty}^{\infty} G_{ic} dr dz + \sigma_{zn} \int_{r_c}^{r_{pg}} \int_{-h/2}^{h/2} G_{jzn} dr dz + \sigma_n \int_{r_{zn}}^{\infty} \int_{-h/2}^{h/2} G_{kn} dr dz + 2\sigma_{вм} \int_{r_c}^{\infty} \int_{h/2}^{\infty} G_{lвм} dr dz \right) =$$
$$= K_u (\sigma_c G_c + \sigma_{zn} G_{zn} + \sigma_n G_n + \sigma_{вм} G_{вм}),$$

где индексы i_c , j_{zn} , k_n , $l_{вм}$ соответствуют геометрическим факторам произвольных элементарных торов, составляющих ту или иную область, а индексы c , zn , n , $вм$ — результирующим геометрическим факторам этих областей.

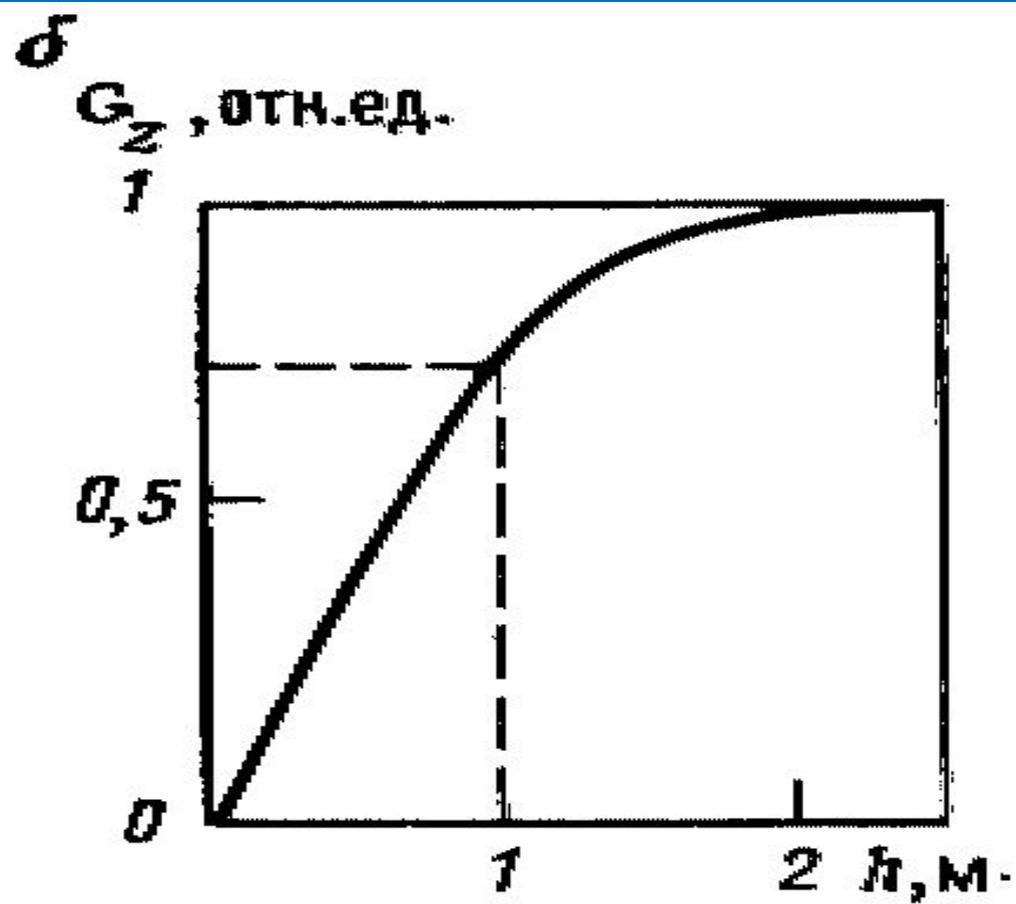
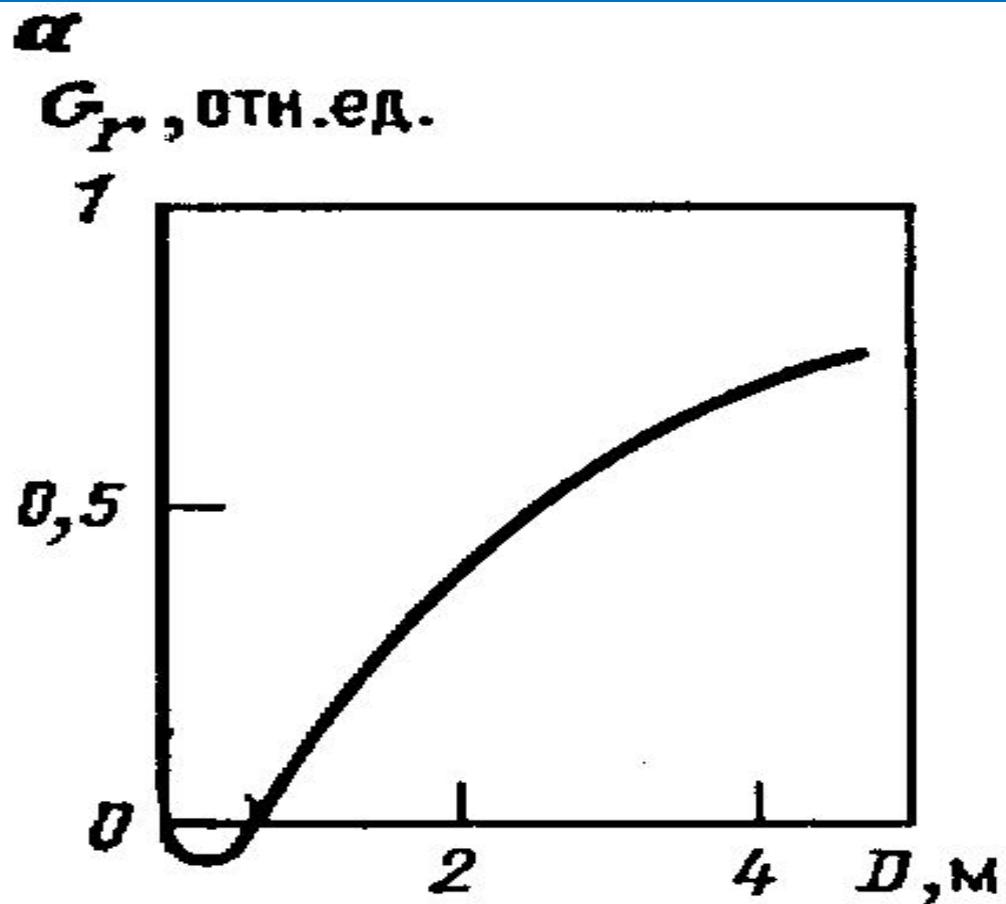
По аналогии с предыдущим

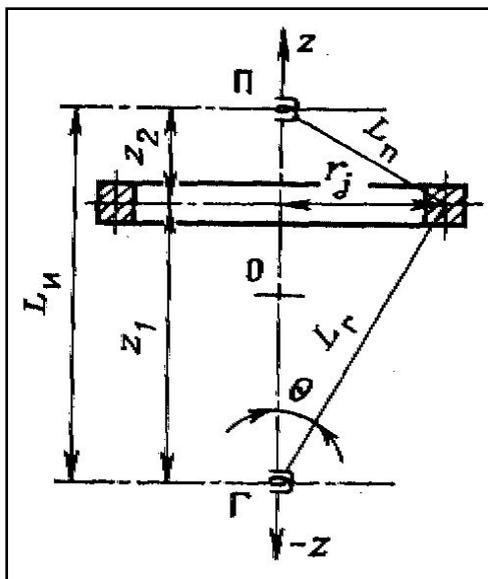
$$\sigma_K = E / K_u, \quad (16)$$

$$\sigma_K = f(\sigma_n, \sigma_c, \sigma_{zn}, \sigma_{вм}, L_u, d_c, h, D).$$

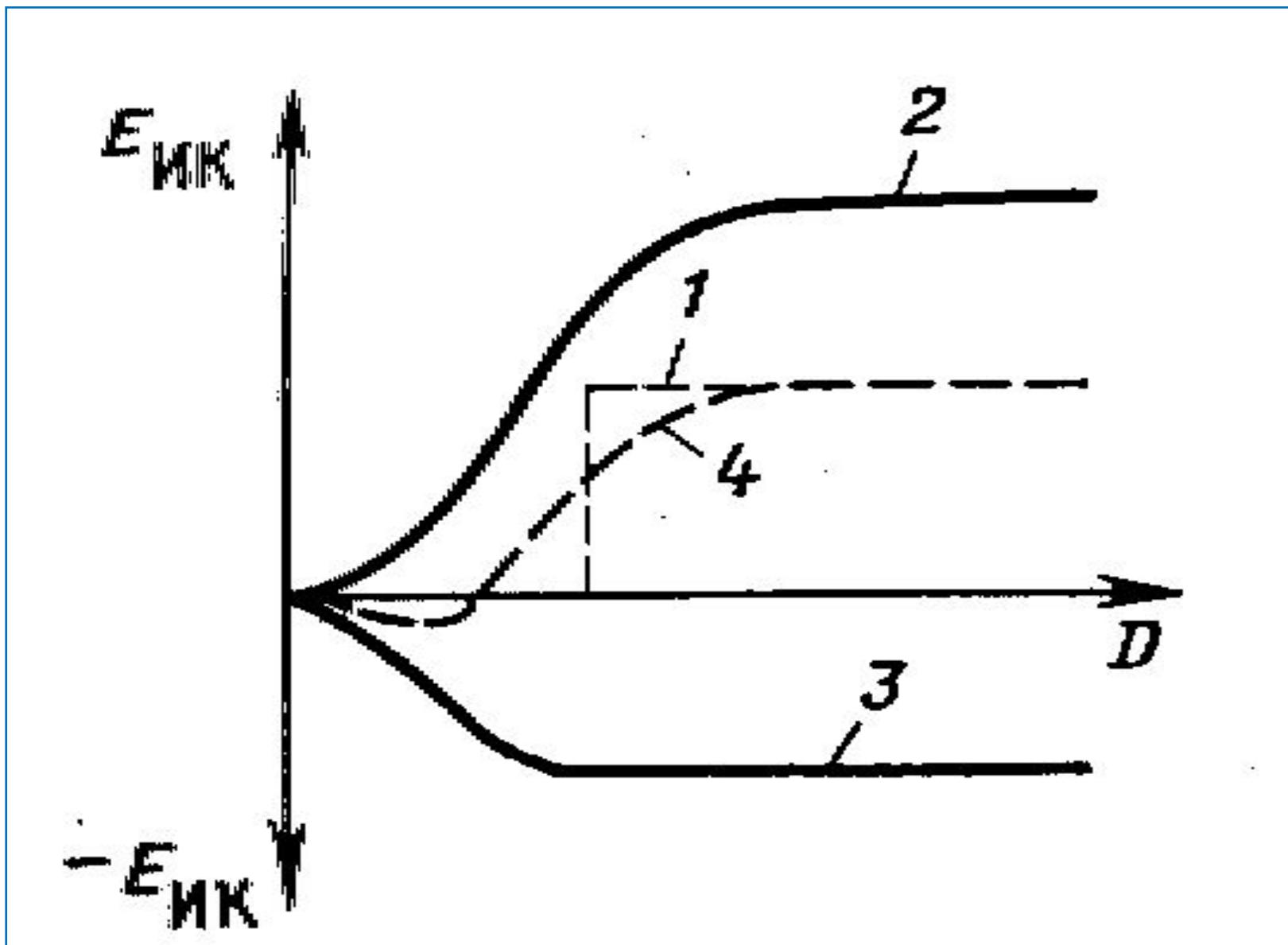


ИК. Типичные характеристики зонда: а – радиальная; б - вертикальная





ИК. Радиальные характеристики зондов: 1 – идеального; 2 – большого; 3 – малого; 4 – фокусированного.



ИК. Применение фокусирующих катушек.

Применение фокусирующих катушек и внесение поправок за влияние скважины, зоны проникновения и вмещающих пород позволяет во многих случаях определить удельное сопротивление пласта с необходимой точностью.

Если $\rho_c < 0,3 \text{ Ом-м}$ или зона проникновения понижающая и ее диаметр велик ($D > 3d_c$), погрешности значительны.

Влияние вмещающих пород тем больше, чем выше их проводимость, и особенно существенно при $h < 1,5 L_u$.

Неэффективен ИК также при $\rho_n > 50 \text{ Ом-м}$.

ИК. Увеличение уровня сигнала.

$$E_{2j} = -\frac{d\hat{O}_{2j}}{dt} = -\pi f^2 \mu_a^2 n_{\tilde{a}} S_{\tilde{a}} n_i S_i I e^{-i\omega t} r_j^3 \sigma_i / 2L_{\tilde{a}}^3 L_g^3.$$

Из формулы следует, что уровень сигнала в приемной катушке можно поднять за счет увеличения частоты. Применяв частоту порядка **1 МГц**, поднимают верхний предел измеряемых удельных сопротивлений до **200 Ом•м**.

При этом *за счет скин-эффекта* смещается в сторону больших удельных сопротивлений нижняя граница рабочего интервала.

Скважинный прибор ВИКИЗ

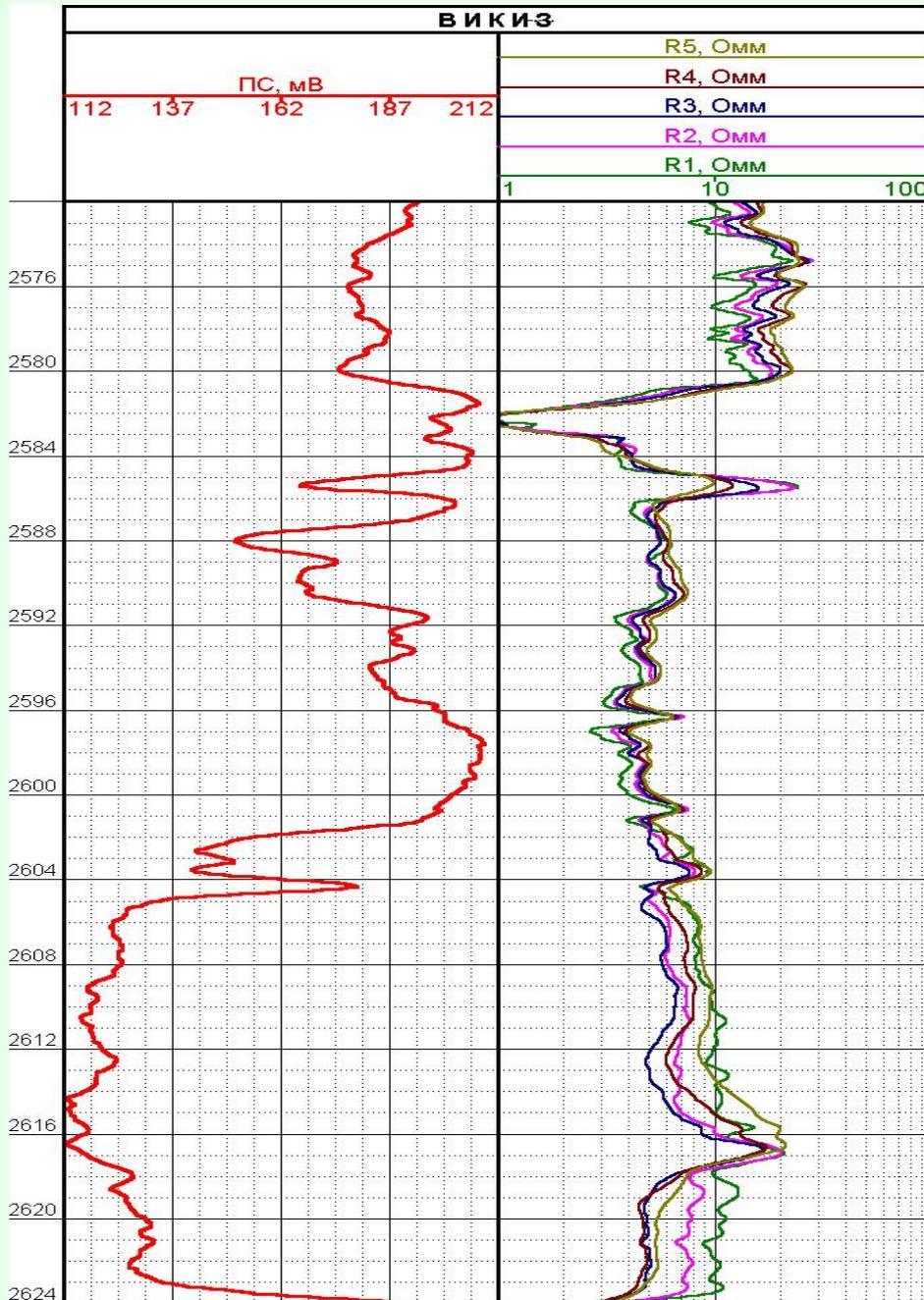
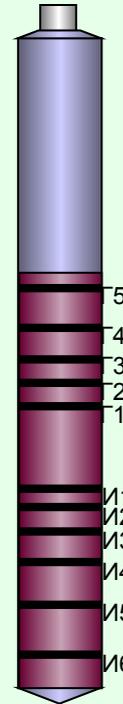
Технические характеристики

Диапазон измерения	1,6-200 Омм
ПС	-5...+5 В
Максимальное давление	50 МПа
Максимальная температура	100° С
Габаритные размеры:	
длина	4,0 м
диаметр	0,073 м
Масса	50 кг

Г1...Г5 - генераторные катушки
И1...И6 - Измерительные катушки

Геометрические характеристики зондов

Схема зонда	длина(м)	база(м)
И6 0,40 И5 1,60 Г5	2,00	0,40
И5 0,28 И4 1,13 Г4	1,41	0,28
И4 0,20 И3 0,80 Г3	1,00	0,20
И3 0,14 И2 0,57 Г2	0,71	0,14
И2 0,10 И1 0,40 Г1	0,50	0,10

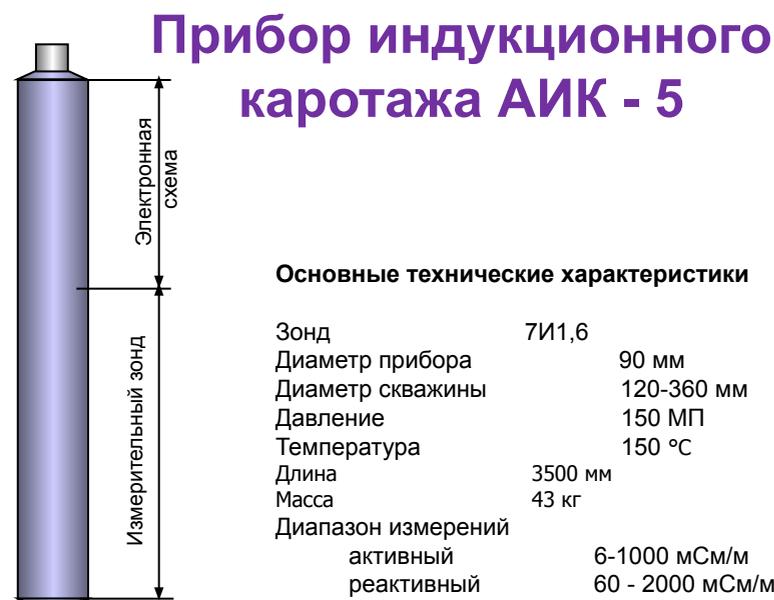
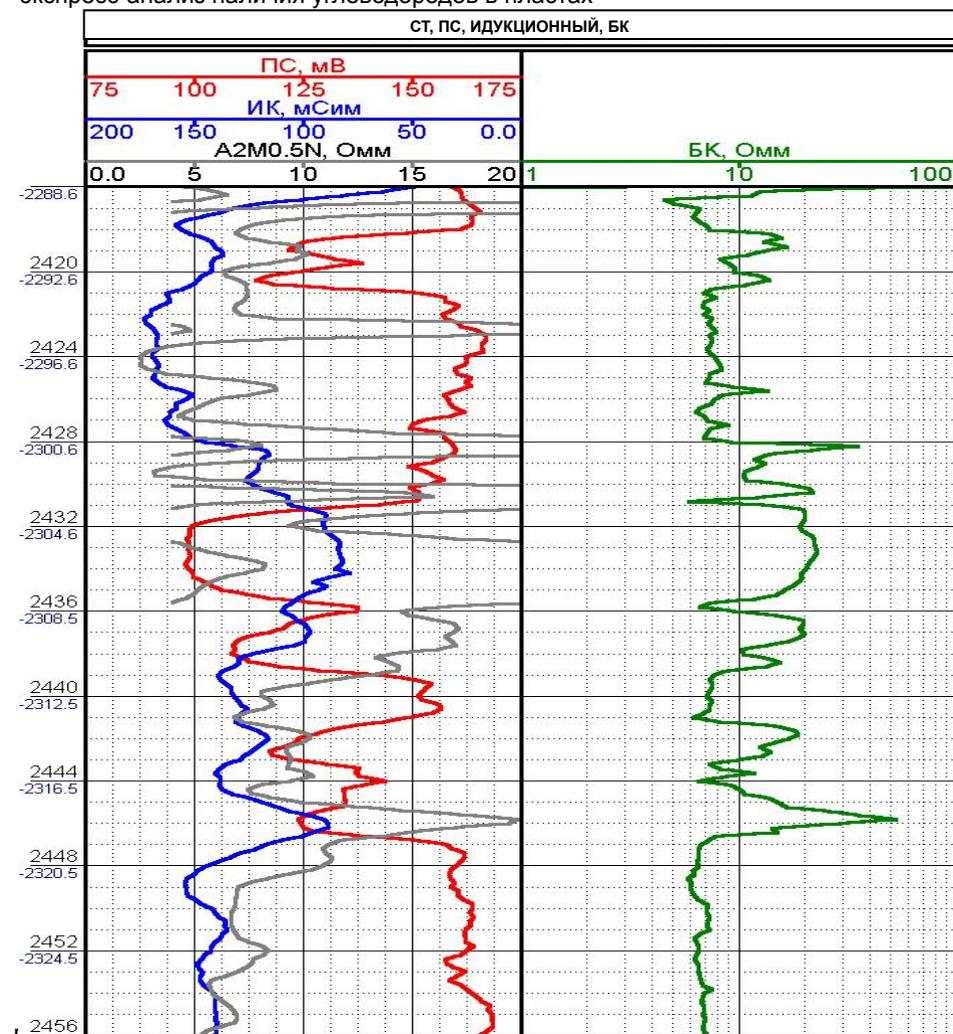


Индукционный каротаж

Индукционный каротаж основан на измерении в стволе скважины напряженности переменного магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, генерируемыми в горной породе. Результатом регистрации индукционного каротажа является величина удельной электропроводности горных пород. Информативный метод для экспресс-анализа наличия углеводородов в пластах-коллекторах, особенно в терригенном (песчано-глинистом) разрезе.

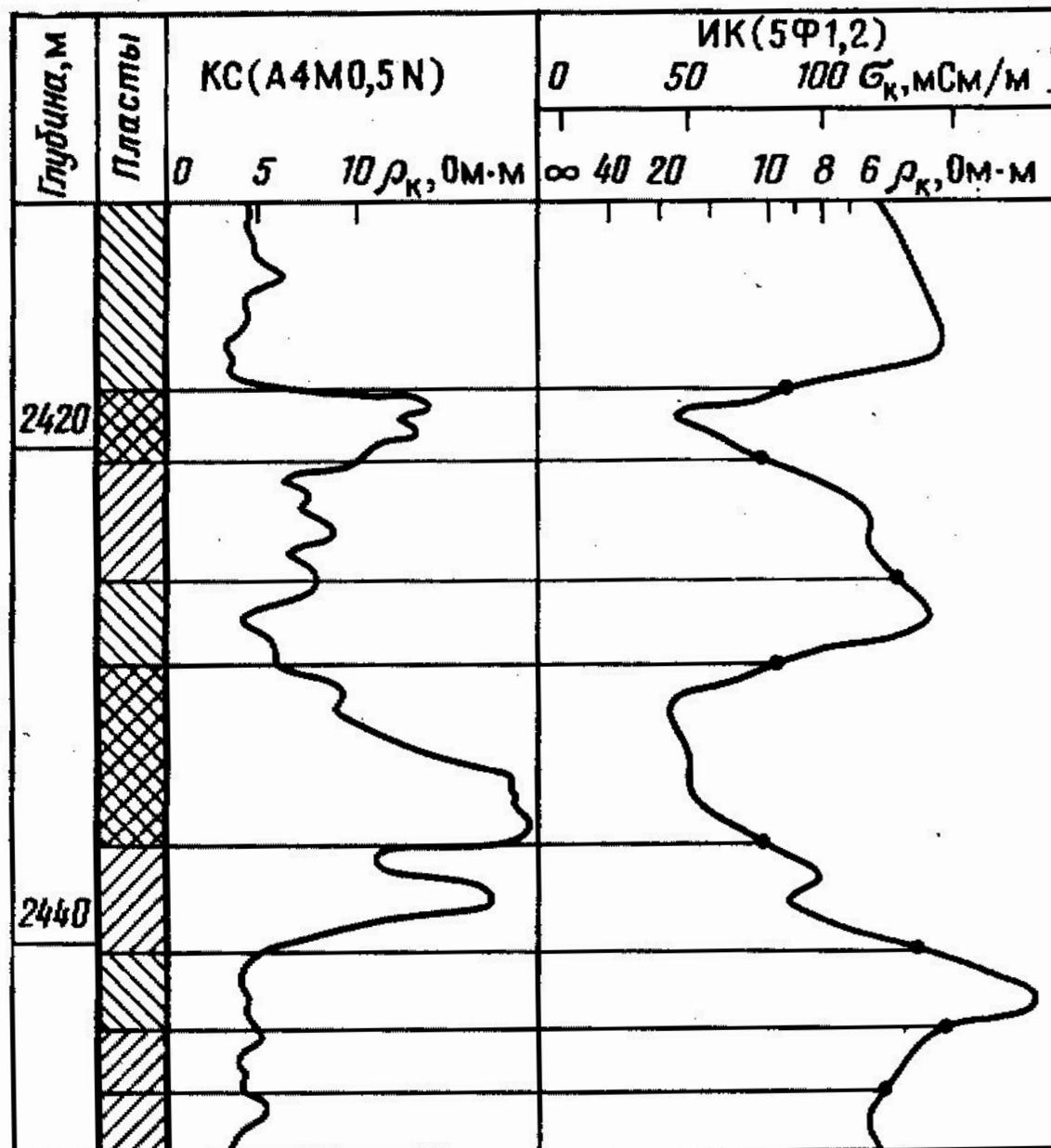
решаемые задачи:

- определение сопротивления в незатронутой проникновением фильтрата бурового раствора части пласта
- определение радиального градиента сопротивления горных пород
- экспресс-анализ наличия углеводородов в пластах



ИК. ДИАГРАММЫ

Расчленение разреза по диаграмме ИК (по М.Г. Латышевой):
 1,2,3 – пласты соответственно высокого, среднего и низкого удельного сопротивлений.



Зонды комплексного электрического каротажа

ГИС в процессе бурения разведочных и эксплуатационных скважин выполняют комплексные партии.

В открытом стволе:

- Стандартный каротаж, ПС, резистивиметрия (К1А-723)
- Боковое каротажное зондирование (К1А-723)
- Боковой каротаж (К1А-723)
- Индукционный каротаж (К1А-723, АИК-5М, ИК-КАС)
- Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ)
- Микрозондирование, микрокавернометрия (МКП)
- Кавернометрия, профилеметрия (СКПД-З, СКПД-Ц)
- Радиоактивный каротаж естественной и наведенной активности (РКС-З, РК5-7Б)
- Плотностной гамма-гамма каротаж (СП-2 АГАТ)
- Волновой широкополосный акустический каротаж (АКВ-1, АКШ-42)
- Инклинометрия (ИОН, ИОН-ГК)
- Термометрия

В обсаженном стволе:

- Акустический контроль определения качества цементирования (АКВ-1, АКШ-42)
- Плотностная цементометрия (ЦМ-8-12, СГДТ-НВ)
- Радиоактивный каротаж (РКС-З, РК-5-7Б, СРК-М)
- Инклинометрия (ИОН, ИОН-ПК)
- Термометрия

Электрический каротаж

Стандартный каротаж

Выполняется тремя стандартными зондами (А2.0МД.5Н, N0.5М2.0А, N6.0МД.5А) в комплексе с кривой ПС. Регистрация выполняется во всех скважинах с целью сопоставления разрезов скважин, стратиграфического расчленения по роду, пересеченных скважинно, выделения проницаемых интервалов.

Боковое каротажное зондирование (БКЗ)

Представляет собой измерение в скважине кажущегося сопротивления горных пород пятью градиент-зондами разной длины (А0.4МД.1Н, А1.0МД.1Н, А2.0МД.5Н, А4.0МД.5Н, А8.0М1.0Н). БКЗ проводят в комплексе с измерением диаметра скважины, сопротивлению бурового раствора (резистивиметрия) и записью ПС.

- решаемые задачи:
- определение границ пластов
 - выделение коллекторов
 - определение пористости пластов
 - определение нефтегазонасыщенности

Боковой каротаж

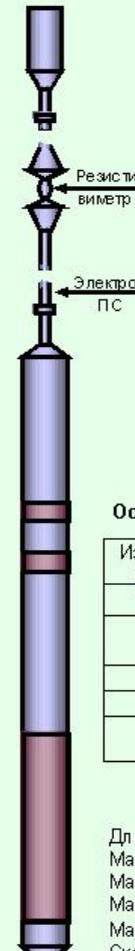
Отличается от каротажа обычными трехэлектродными зондами, применением двух симметрично расположенных экранирующих электродов с регулируемой силой тока в них. Применение этой схемы уменьшает влияние вмещающих пород и промысловой жидкости на результаты измерения. Получаемые значения КС близки к удельному электрическому сопротивлению горных пород.

- решаемые задачи:
- расчленение разреза, в том числе определение границ маломощных пластов
 - определение УЭС пластов в скважинах с минерализованным буровым раствором
 - определение УЭС в высокоомных разрезах

- ПС (собственный потенциал)
- Решаемые задачи:
- расчленение разреза, выделение коллекторов
 - определение коллекторских свойств пластов
 - определение степени глинизации коллекторов
 - определение коэффициента пористости

Резистивиметрия бурового раствора:
данные по сопротивлению бурового раствора используются при обработке БКЗ.

Прибор комплексного электрического каротажа К1А-723-М



Предназначен для проведения геофизических исследований в нефтяных и газовых скважинах. Прибор обеспечивает возможность за один проход по интервалу исследований выполнить измерения комплексом зондов БКЗ, зондом КС, зондом трехэлектродного БК, зондом ИК, резистивиметром, ПС.

Применяется для исследования необсаженных скважин, заполненных промысловой жидкостью на водной основе.

Отличается малым диаметром, что позволяет его использовать при проведении исследований через буровой инструмент, обладает высокой производительностью и надежностью, удобен в эксплуатации.

Основные технические характеристики

Измеряемый параметр	Единица измерения	Диапазон
Зонд БКЗ	Ом	0,2 – 5000
Зонд КС	Ом ^М	0,2 – 1000
Зонд БК	Ом ^М	0,2 – 1000
Зонд ИК	МСМ ^М	10 – 2500
ПС	В	-0,5 - +0,5
Резистивиметр	Ом	0,05 - 5

Общие технические данные

Длина (с зондом)	20470 мм
Максимальный диаметр	73 мм
Масса	80 кг
Макс. рабочая температура	120°С
Макс. рабочее давление	80 МПа
Скорость каротажа	2000 м/ч

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ БК И ИК

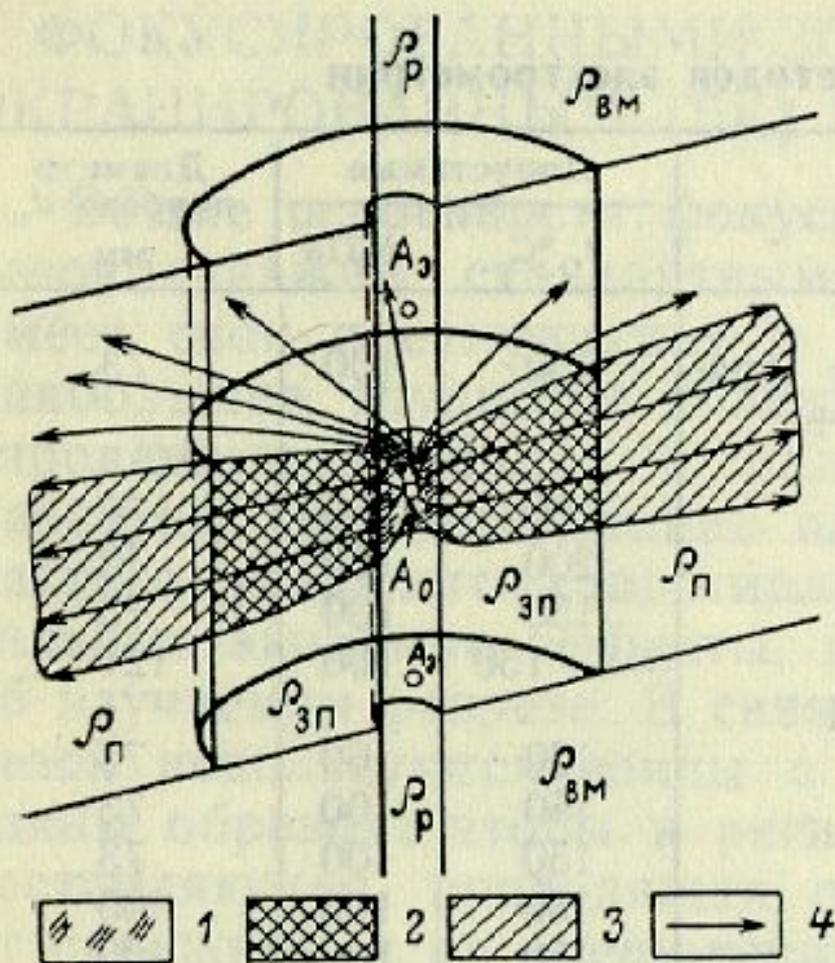


Рис. 16. Поле центрального электрода A_0 семиэлектродного экранированного зонда в пласте с зоной проникновения.

1 — скважина; 2 — зона проникновения; 3 — неизменная часть пласта; 4 — гоковые линии

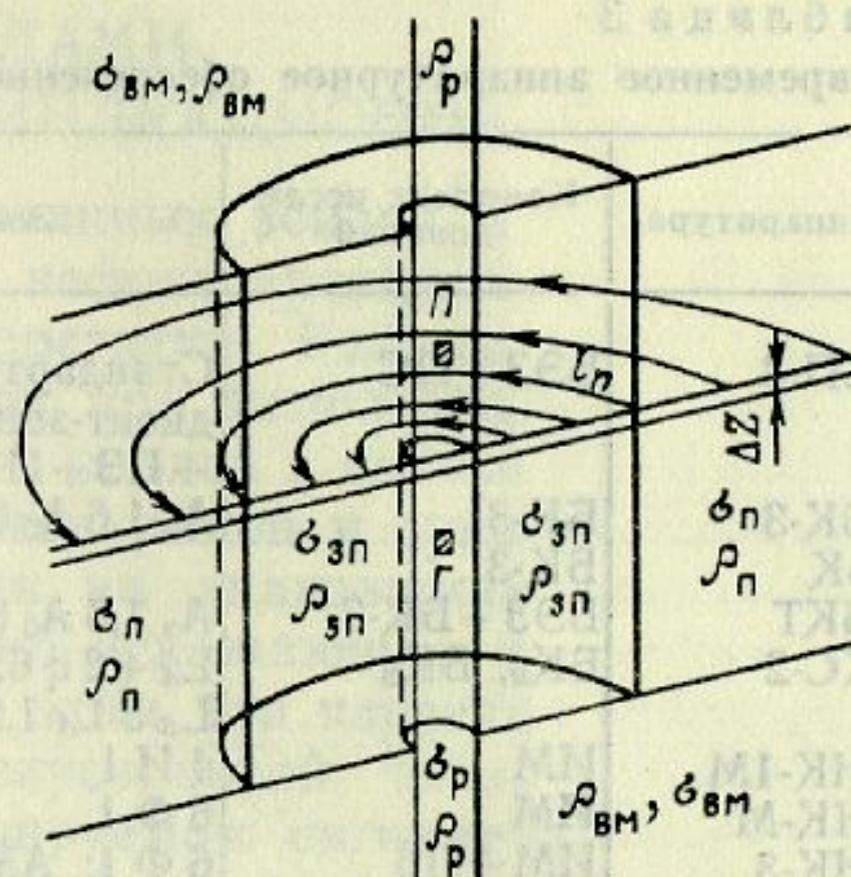


Рис. 17. Электрическое поле при изучении пласта, имеющего зону проникновения, индукционным методом

ДИАГРАММЫ ИМ

