

The background of the slide features a faint, light-colored grid pattern that resembles a globe or a geodesic dome, centered behind the text.

Презентация лекций  
по дисциплине  
«Геофизика»

Автор – профессор Н.Е. Фоменко

## Лекция 1

Предмет геофизики.  
Основные понятия и  
определения.

Структура разделов,  
содержательная часть  
модулей

Цель разведочной геофизики – зарегистрировать над исследуемыми объектами аномалии естественных или искусственно созданных в земной коре геофизических полей и выполнить геологическое истолкование этих аномалий. Поэтому система знаний разведочной геофизики требуют изучения таких наук как физика, геология (литология, геохимия, структурная геология), математика, информатика, радиотехника и радиоэлектроника. Обязательное знание закономерностей изучения физических свойств пород (петрофизика).

## **Полный цикл геофизических исследований включает:**

- Полевые геофизические наблюдения, цель которых зарегистрировать сигналы геофизических полей с соответствующей аппаратурой;
- Получение сведений и проведение измерений физических свойств горных пород;
- Решение прямой геофизической задачи (физическое или математическое моделирование);
- Решение обратной геофизической задачи с целью получения геофизического разреза или геофизической карты;
- Трансформацию геофизического разреза в геологический посредством петрофизических связей

# Использование геофизических методов при изучении геологической среды

## Задачи:

- 1) районирование территорий по признаку чувствительности горных пород к различным геологическим структурам;
- 2) нахождение искомых геологических объектов и определение границ их распространения;
- 3) получение количественных показателей, характеризующих геологическую среду;

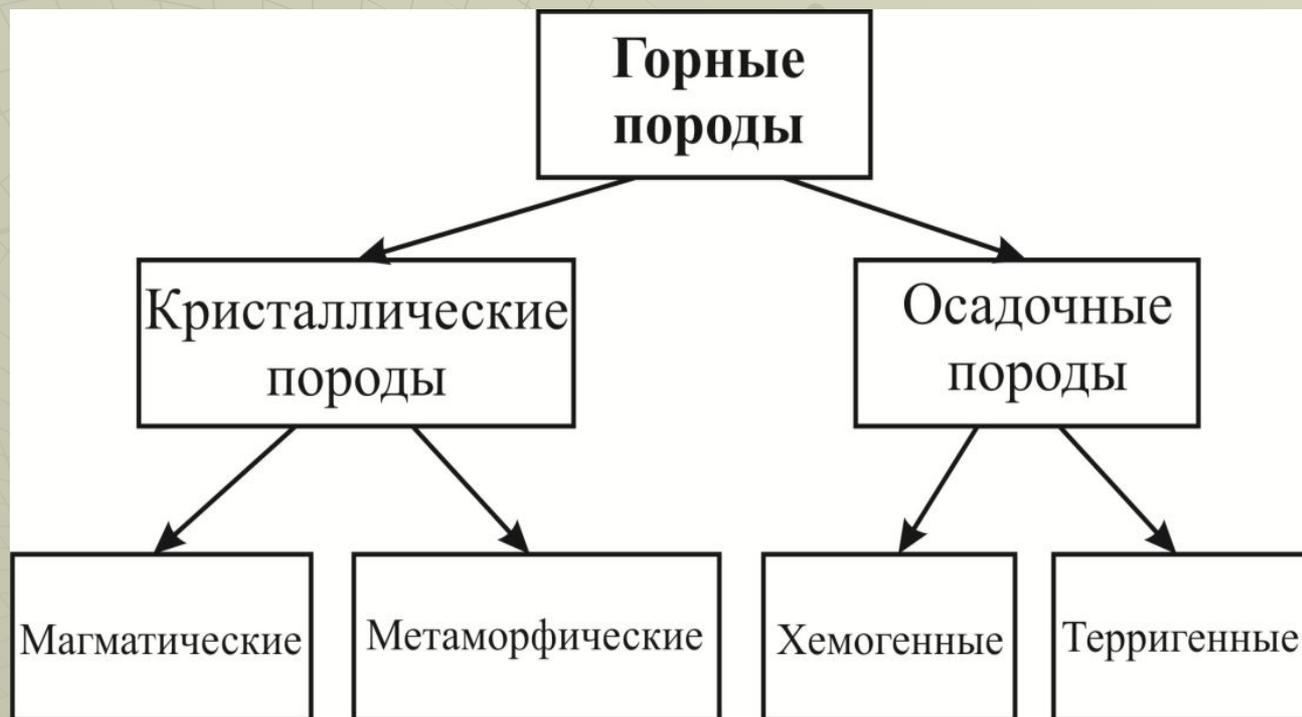
Результат решения поставленных задач – создание физико-геологических моделей изучаемых территорий, удовлетворяющих геологическим требованиям.

## **Объект геофизических исследований - геологическая среда**

Это сложнейшая система, основные компоненты которой (горные породы, подземные воды, лед и газы) находятся под воздействием внутренних и внешних физических полей.

Пространственно-временная изменчивость той или иной рассматриваемой области геологической среды создает большие трудности при её изучении геофизическими методами. Поэтому необходимо отчетливо представлять факторы, определяющие свойства вещества, слагающего объект исследования, т. е. горные породы, включая в это понятие воды, воздух и лед.

# Классификация горных пород при изучении физических свойств



# Схема изучения тенденций изменения физических параметров для магматических и метаморфических пород

## Магматические породы

Увеличение-уменьшение геофизического параметра

Кислые (гранит) → Средние (диорит) → Основные (габбро) → Ультраосновные (перидотит)

Щелочноземельный ряд

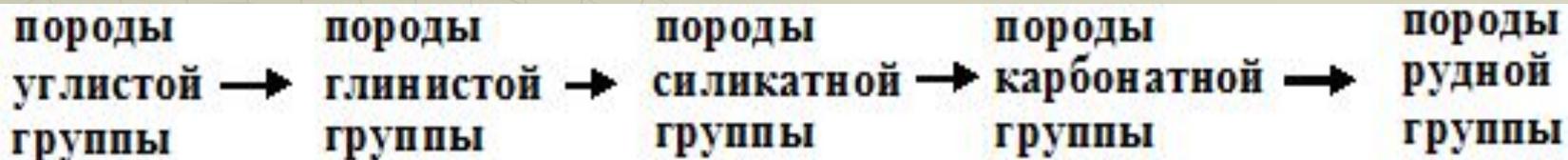
## Метаморфические породы

Увеличение-уменьшение геофизического параметра

Зеленосланцевая → Гранулитовая → Амфиболитовая → Эклогитовая

Стадии метаморфизма

# Схемы изучения тенденций изменения физических свойств осадочных пород



Стадии окаменения

Физический параметр ( $K_{п}$  – пористость)

Диагенез (бурые угли)

Катагенез (каменные угли) 5

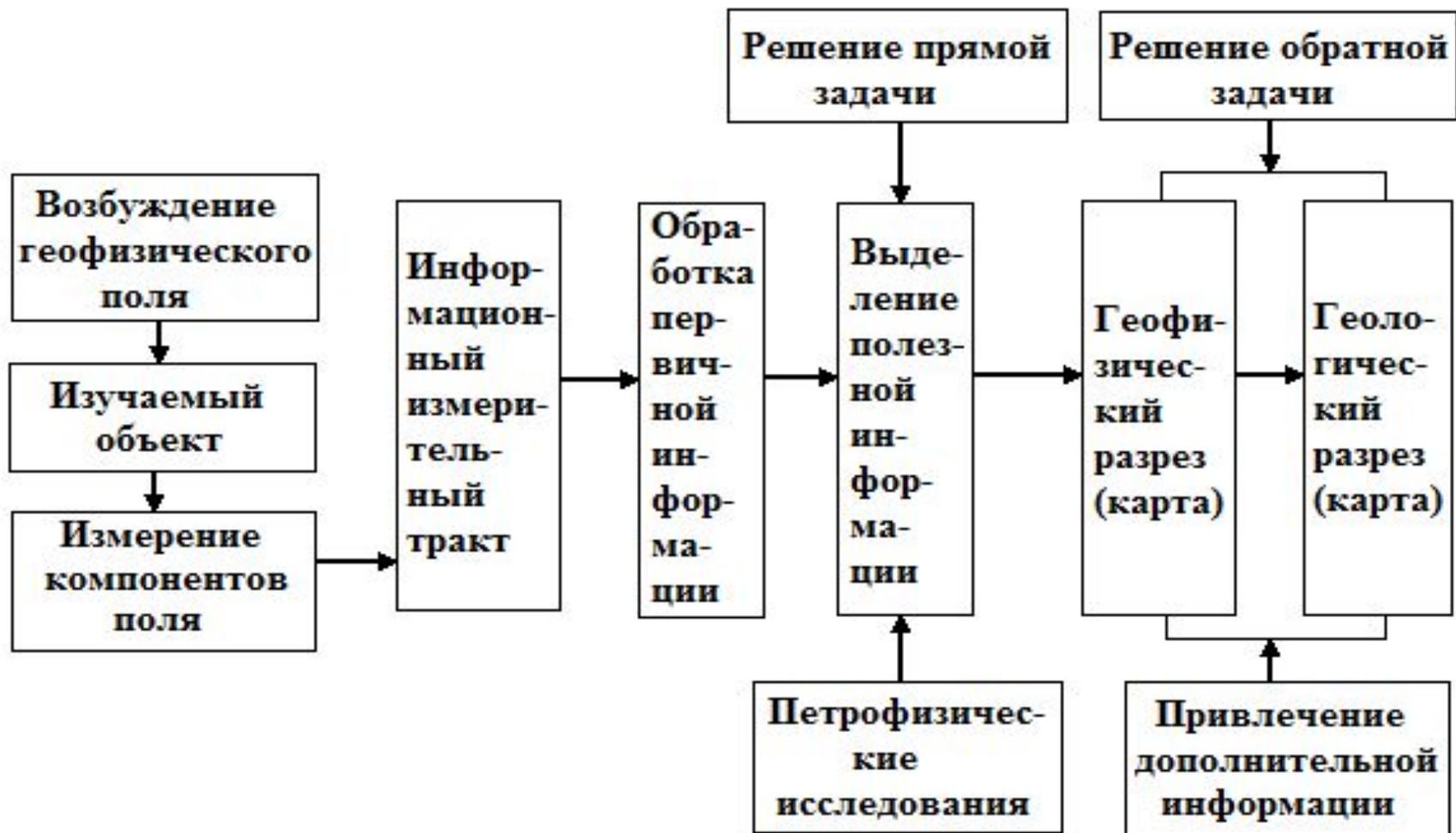
Метагенез (антрациты) 10

$H, км$



терригенные породы  
(песчаники, алевролиты,  
аргиллиты)

# Схема процесса полевых геофизических работ

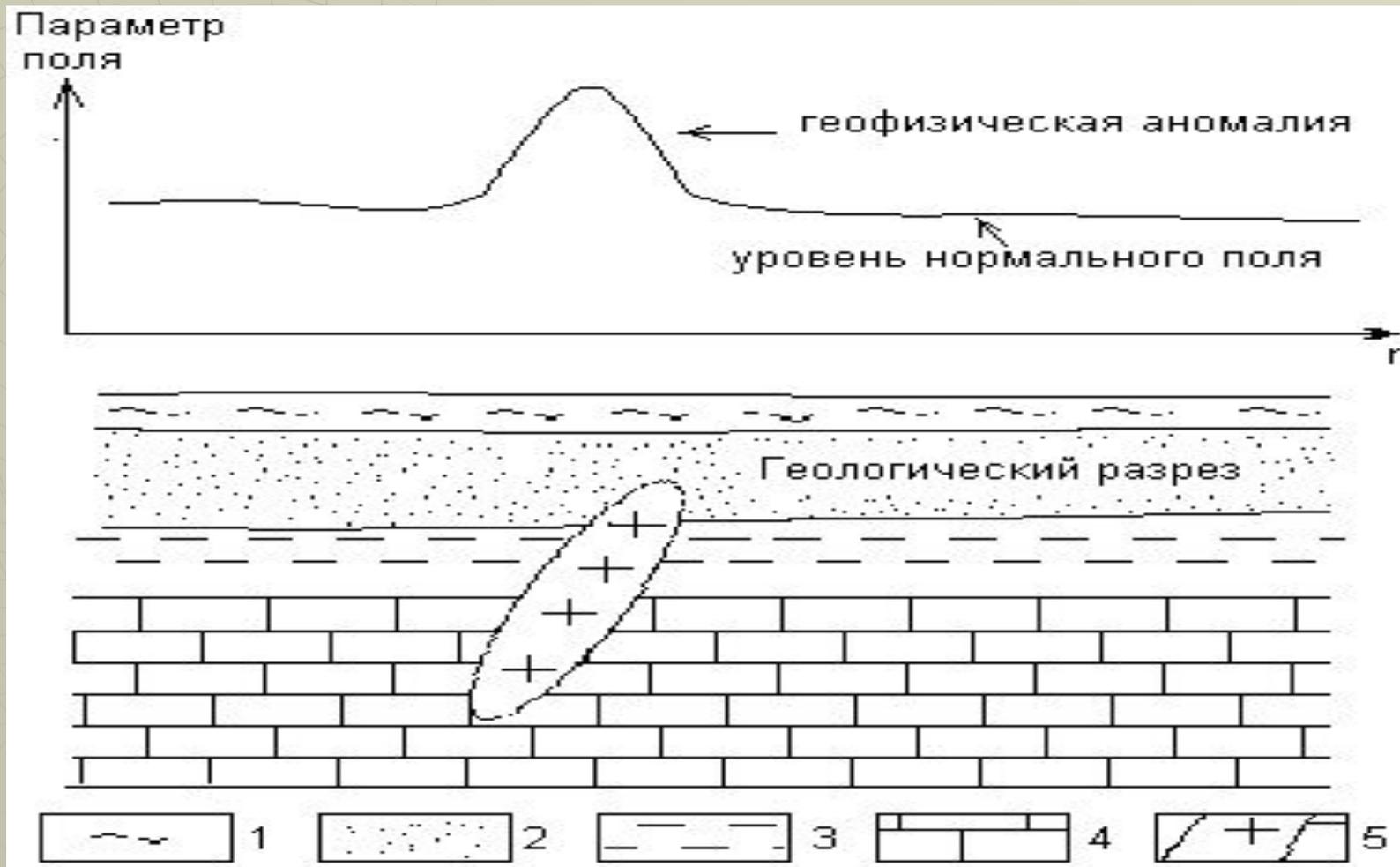


**Прямая геофизическая задача** - это получение теоретической кривой (графика) над объектом заданной геометрической формы с конкретными физическими параметрами. Задача решается путем математического или физического моделирования.

**Обратная геофизическая задача** - это интерпретация результатов полевых измерений с целью получения полного представления о геологических свойствах, геометрической форме и физических параметрах изучаемого объекта. Задача решается путем сопоставления полевой (наблюдённой кривой) с теоретическими кривыми (метод подбора). При неоднозначности решения требуется привлечение дополнительных геолого-геофизических данных.

Как правило, регистрируемые геофизические параметры являются интегральными показателями изучаемой среды, где наибольший вклад в суммарное аномальное поле приносят те объекты, которые наиболее контрастны по физическим свойствам и соответственно являются бо́льшими по геометрическим размерам.

# Пример отображения в геофизическом поле контрастного по физическим свойствам геологического объекта



- ◆ **Переход от параметров поля к показателям среды, которые собственно создают геофизические поля, т.е. к значению физических свойств, осуществляется путем так называемых **материальных уравнений**. К ним относятся уравнения классических физических законов, например Ньютона, Ома, Био, Савара и др.**
- ◆ **Тенденции изменения геофизических параметров изучаются в зависимости от геологических признаков. При этом **горная порода**, как совокупный агрегат из минералов определенного состава, рассматривается как **полифазная, многокомпонентная, термодинамическая система с присущими ей количественными физическими показателями.****

## Лекция 2

# Краткая теория гравитационного поля и его изучение в гравиметрии и гравиразведке

**Гравитационное поле** - это поле силы тяжести, то есть поле взаимодействия механических масс в материальной среде.

В основе лежит закон Ньютона:

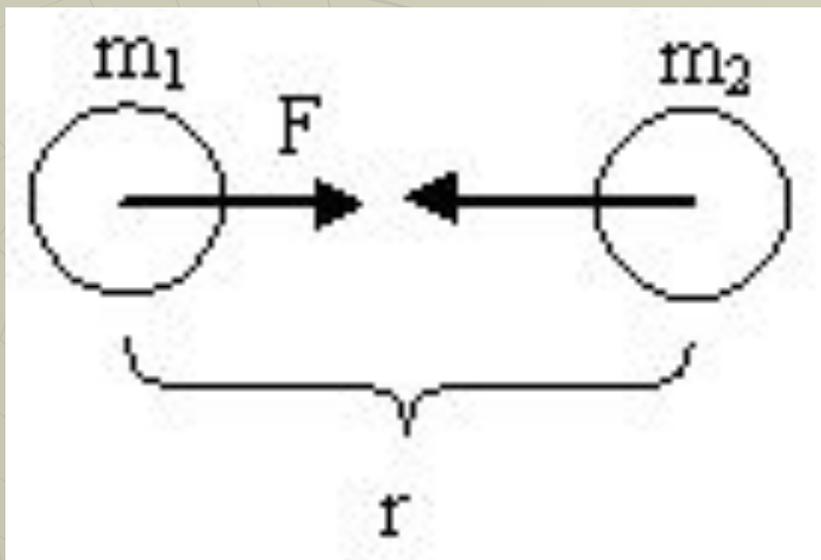
$$F = -f \cdot \frac{(m_1 * m_2)}{r^2}$$

- ◆  $F$  - сила притяжения,  $f$ -постоянная гравитационного поля:  $6,67 \cdot 10^{-8} \cdot \text{г}^{-1} \text{см}^3 \text{сек}^{-2}$ ,  $m_1$  и  $m_2$  - взаимодействующие массы,
- ◆  $r$  - расстояние между  $m_1$  и  $m_2$ .

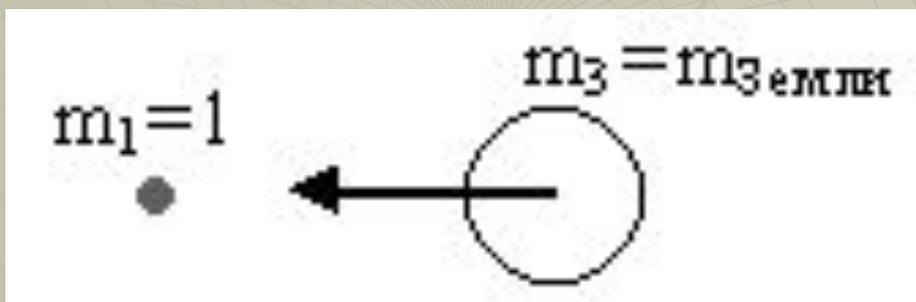
Если  $m_1$  считать точечной массой, а  $m_2$  увеличить до массы Земли, то формула Ньютона примет вид:

$$F = -f \cdot \frac{m_3}{r^2} = q'$$

где  $q'$  - ускорение свободного падения, значение которого с учётом центробежной силы, возникающей от вращения Земли, составляет 9,81 м/с<sup>2</sup>.



**Схема взаимодействия масс**



**Схема взаимодействия массы Земли с точечной массой**

В гравиразведке измерения выполняются по параметру  $\Delta g_B$  - приращение силы тяжести в редукции Буге. Этот параметр является результирующим между аномальным  $g_{аном}$  (измеренным) и нормальным  $g_{нор}$  (теоретическим) значениями силы тяжести. Кроме того, в показания вводятся поправки:

- 1) за свободный воздух  $\Delta g_{св.возд}$ ,
- 2) за промежуточный слой пород  $\Delta g_G$  (толщю пород между точкой наблюдения поверхностью геоида или за поправку Буге),
- 3) за рельеф  $\Delta g_p$

$$g_{\text{аном}} = dU/dr$$

$g_{\text{норм}}$  - ускорение силы тяжести Земли, как сфероида малого сжатия

$g_{\text{св.возд.}}$  или  $g_{\text{ф}}$  - поправка за слой воздуха находящийся между точкой наблюдения и поверхностью геоида

$$g_{\text{ф}} = 0,3086 \cdot h_1, \text{ где } h_1 \text{ толщина слоя воздуха}$$

$g_{\text{б}}$  - поправка за промежуточный слой, который еще носит название поправки Буге:

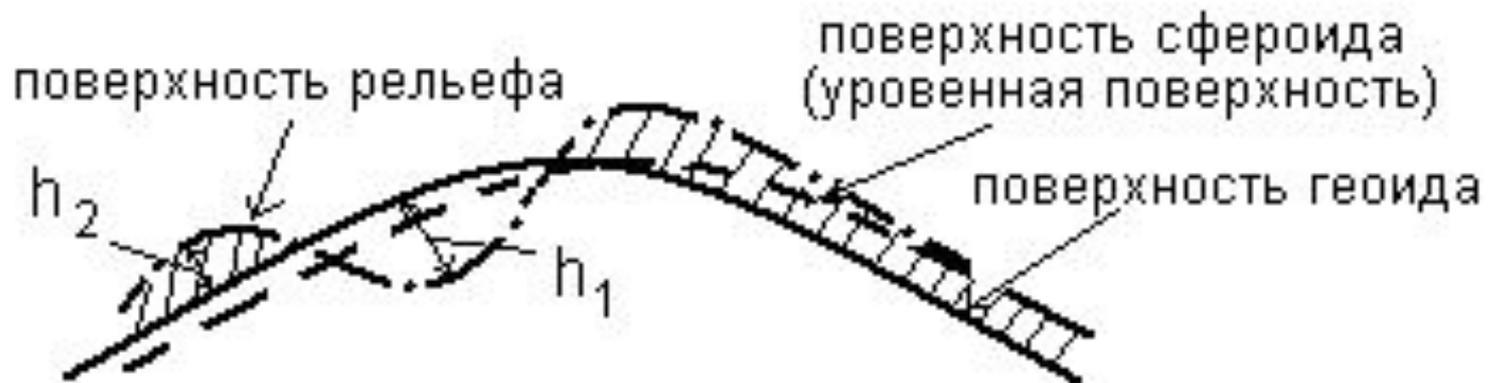
$$g_{\text{б}} = -0,418\delta h_2, \text{ где } \delta \text{ - средняя плотность, а } h_2 \text{ - толщина промежуточного слоя}$$

$\Delta g_p$  - поправка за рельеф если он очень сложный, например в горной местности

Формула аномальной силы тяжести в редукции Буге:

$$\Delta g_B = g_{\text{аном}} - g_{\text{норм}} + g_{\text{ф}} + g_{\text{б}} + g_p$$

# Соотношение уровненных поверхностей геоида и сфероида с поверхностью рельефа



Абсолютные измерения силы тяжести в гравиразведке требуют очень высокой точности. В основу маятниковых приборов положена формула Гюйгенса:

$$T = \pi \cdot \sqrt{l/g}$$

$T$  – период,  $l$  – длина

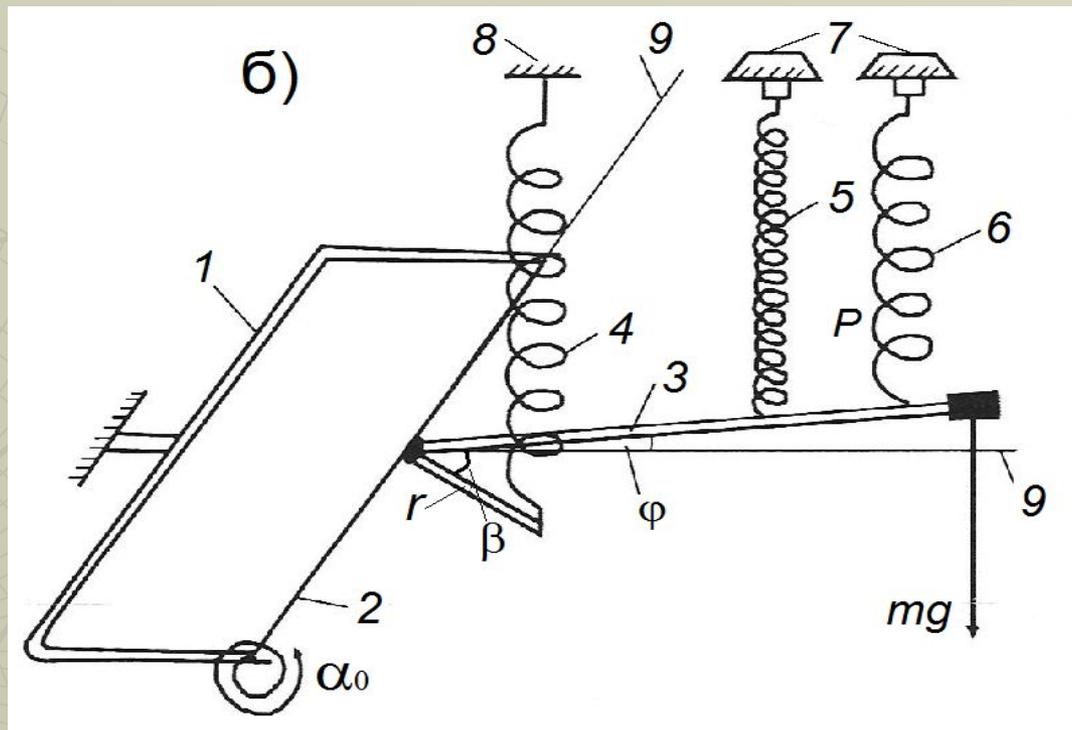
В методе свободного падения грузов используется формула:

$$S = \frac{gt^2}{2}$$

$S$  – высота падения груза,  $t$  – время падения груза.

Относительные измерения ведутся по отношению к одной выбранной базовой точке. Приборы для таких измерений носят название гравиметров.

## Общий вид (а) и схема механизма действия астазированных гравиметров (б)



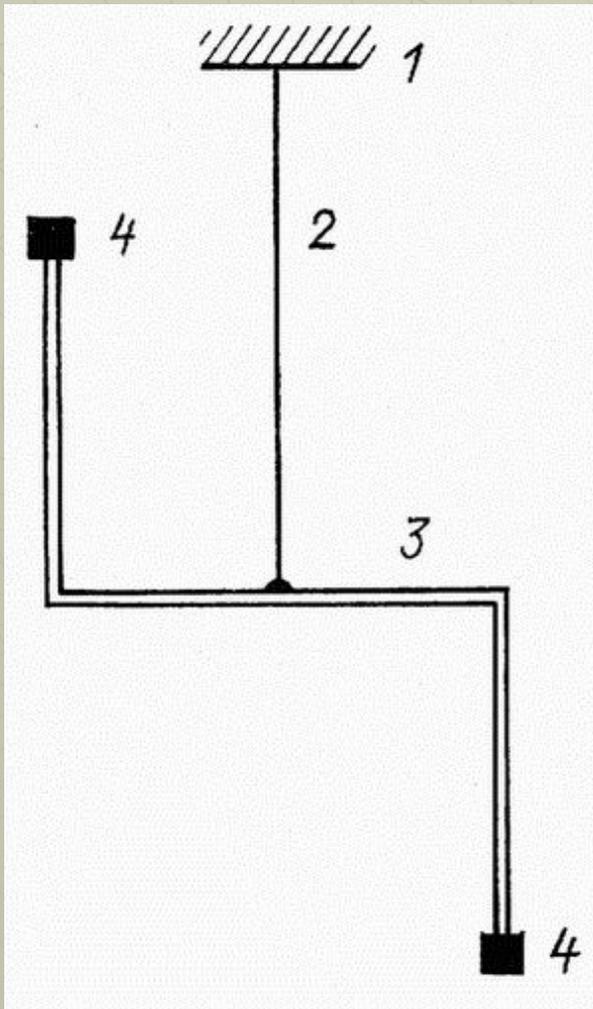
1 - рамка крепления нити, 2 - упругая кварцевая нить, 3 - главный рычаг с массой  $m$ ,  $r$  - дополнительный рычаг, жестко связанный с главным, 4 - главная пружина, 5 - диапазонная пружина, 6 - измерительная пружина, 7 - микрометрические винты, 8 - корпус прибора, 9 - линия горизонта

В настоящее время используются и зарубежные гравиметры Scintrex CG-5 Autograv, причем совместно с геодезической аппаратурой. Точность определения аномалий поля силы тяжести в редукции Буге,  $3 \div 5$  мкГал.

Особенностью этих типов гравиметров является автоматическая коррекция шумов, позволяющая реализовать требуемую точность измерений в условиях городских сейсмических помех.



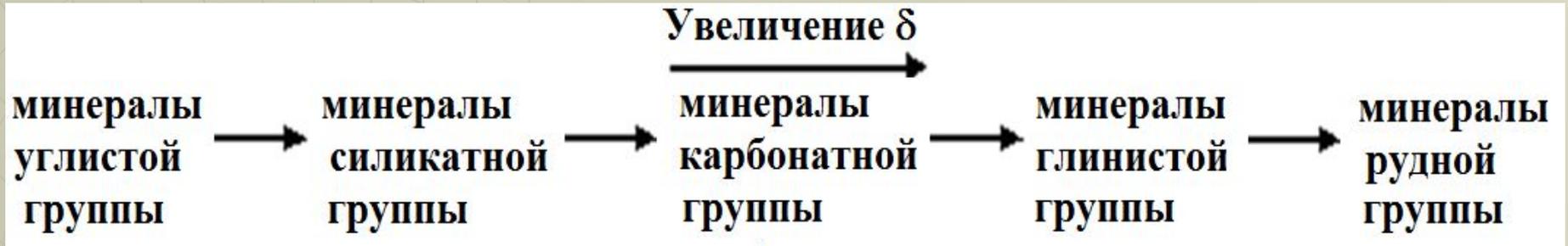
# Схема устройства вариометров и градиентометров



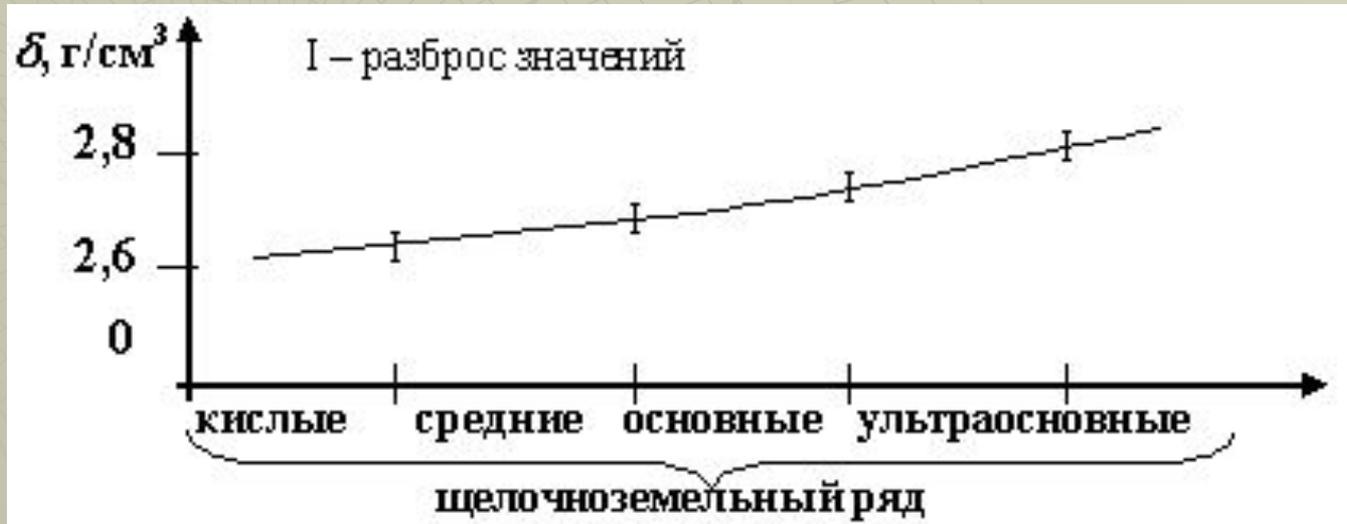
- 1 - корпус прибора,
- 2 - упругая нить,
- 3 - ломаный рычаг,
- 4 - грузики массой  $m$

- ◆  $U''_{xz} = \partial^2 U / \partial x \partial z = W_{xz}$
- ◆  $U''_{yz} = \partial^2 U / \partial y \partial z = W_{yz}$

# Тенденция изменения плотности твердой фазы для основных породообразующих минералов



# Тенденция изменения плотности магматических пород

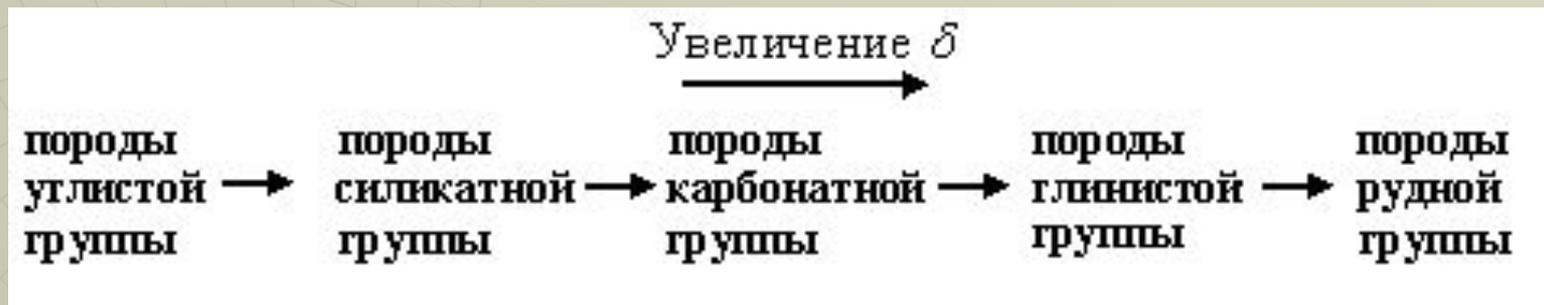


# Тенденция изменения плотности метаморфических пород

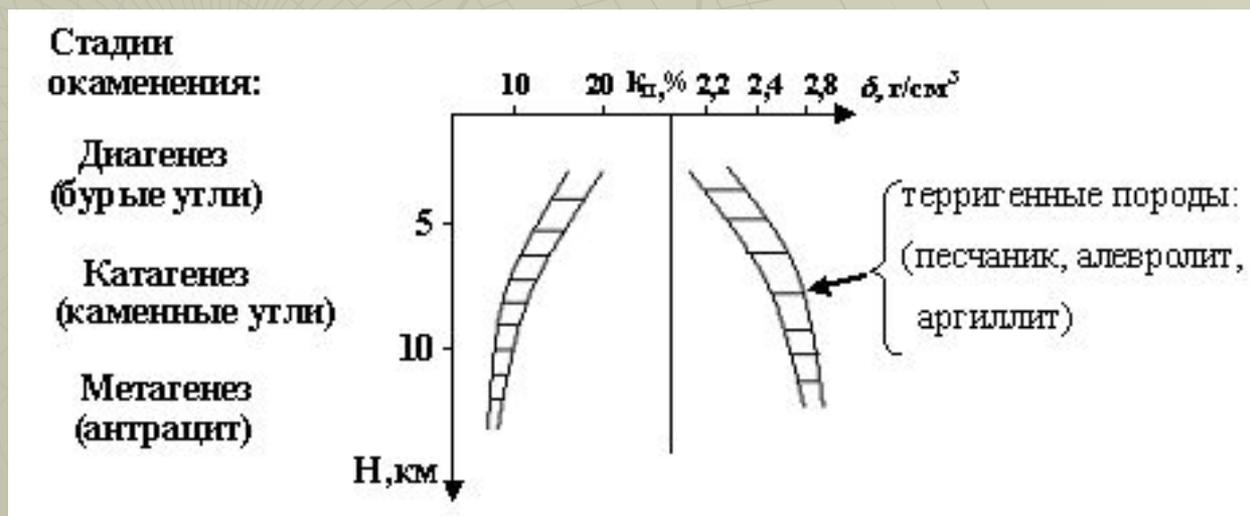


I – диабаз, II – уплотненный диабаз, III – амфиболит, IV – филлит

# Тенденция изменения плотности осадочных пород при одинаковой степени их преобразования (окаменения)



# Тенденция изменения плотности осадочных пород для одноименных литологических разностей в зависимости от стадии их преобразования



## Лекция 3

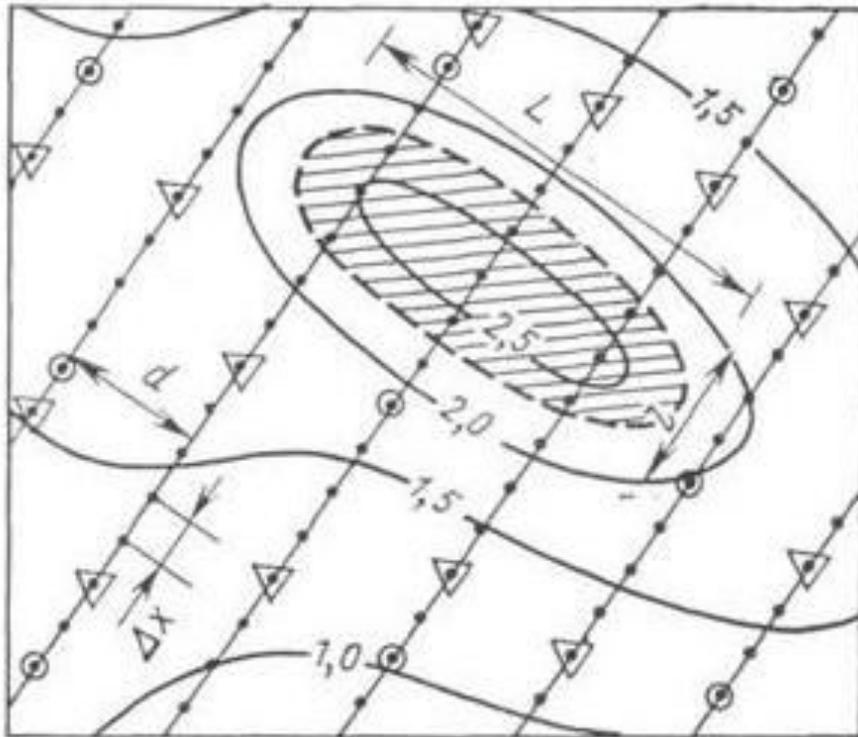
**Методика гравиразведки и  
её применение для поисков  
и разведки полезных  
ископаемых и в других  
областях геологии**

## **Методика гравиразведочных работ включает:**

- Выбор вида и характера съёмки;
- Топографическую разбивку участка работ;
- Порядок и последовательность измерений;
- Первичную обработку и последующую качественную и количественную интерпретацию исходных материалов.

Основной вид гравиметрической съёмки – это **полевая съёмка**. Для её проведения производится сбор априорных данных о предполагаемом геологическом объекте, намечается направление (ориентация) геофизических профилей.

# Пример расположения геофизических профилей при гравитационной съемке



- 1 - профили;
- 2-4 - рядовые, опорные и контрольные точки наблюдения;
- 5 - предполагаемое простирание искомого геологического объекта;
- 6 - изоаномалы  $\Delta g$

**Опорная сеть** представляет систему замкнутых полигонов.

**Реперные точки** служат для увязки измерений на рядовых точках.

Для определения значений в опорных точках осуществляется **разброс невязок** по формуле:

$$\varepsilon_{опор} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i^2}{m - n}}$$

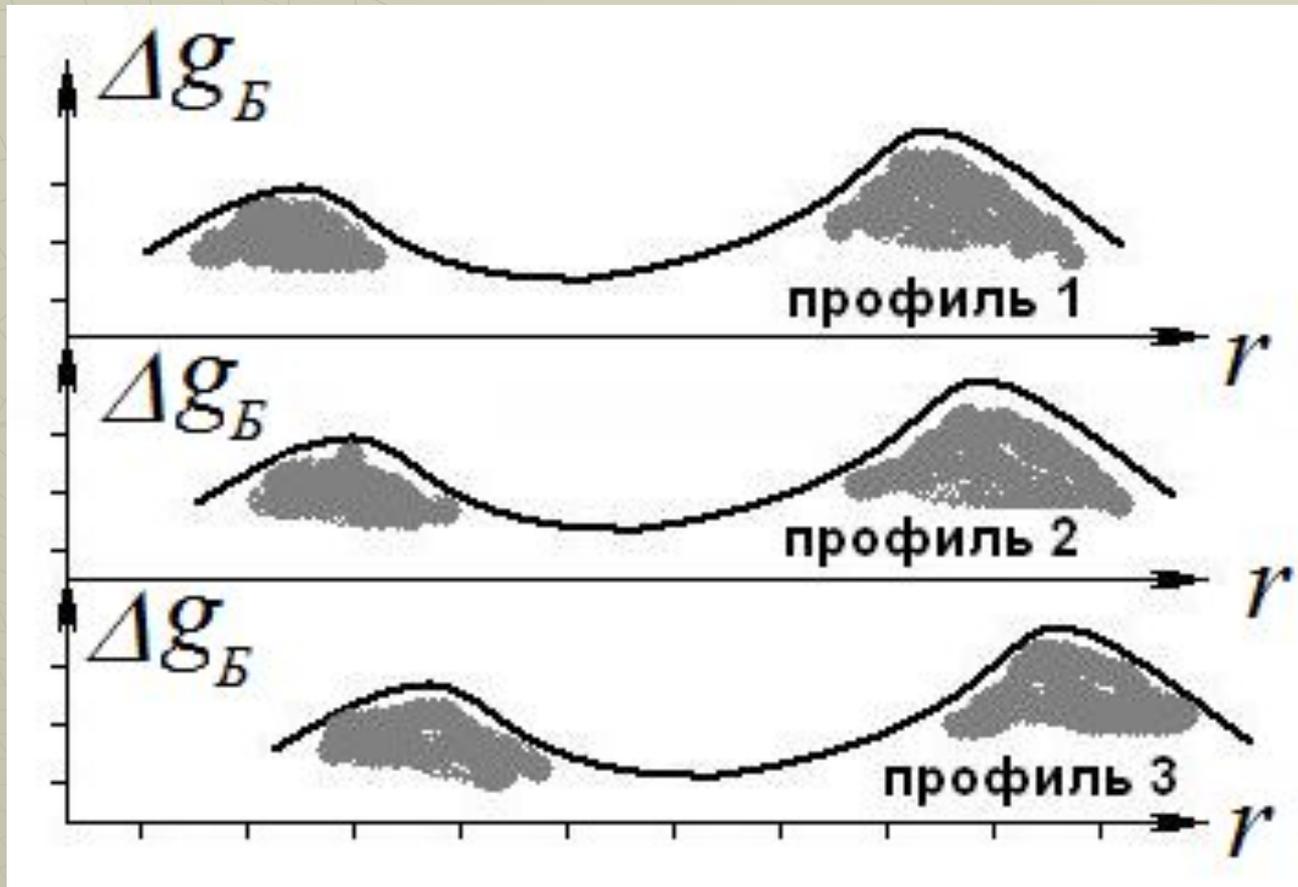
$\varepsilon$  - средняя квадратичная погрешность

$\delta_i$  - разность основных и контрольных измерений

$m$  - общее количество точек

$n$  - количество контрольных точек

# Форма представления результатов гравитационной съемки в виде план-графиков



$r$  – расстояние по профилю,  
 $\Delta g_B$  – приращение силы тяжести

Интерпретация гравиметрических данных разделяется на качественную и количественную. Последняя выполняется на основе решения прямой и обратной задач гравиразведки.

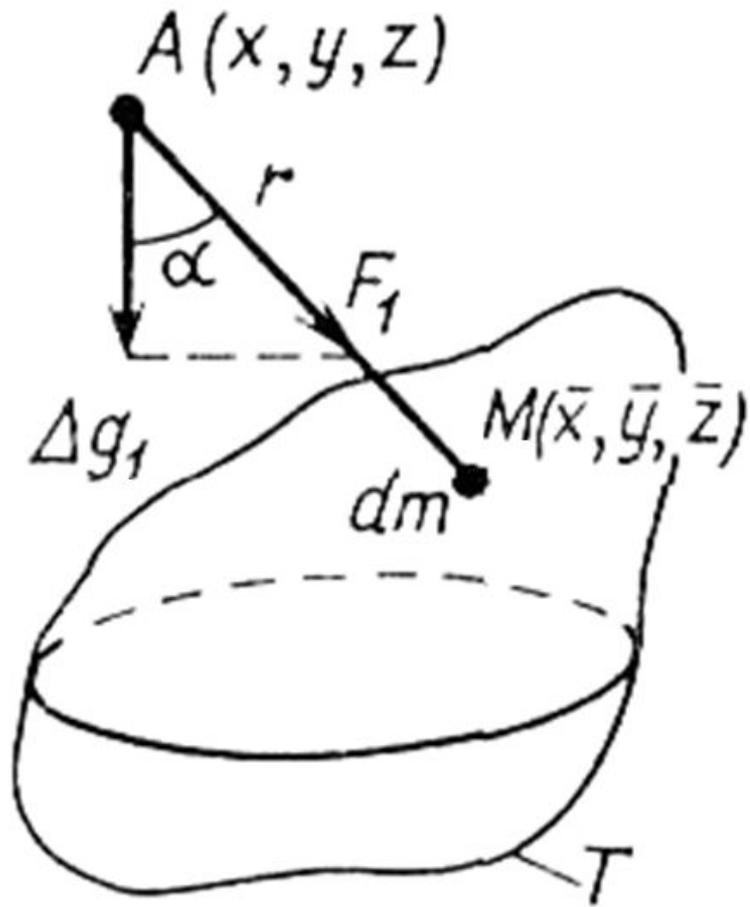
Прямая задача для тел простой геометрической формы (шар, цилиндр и др.) решается аналитическим способом по формуле:

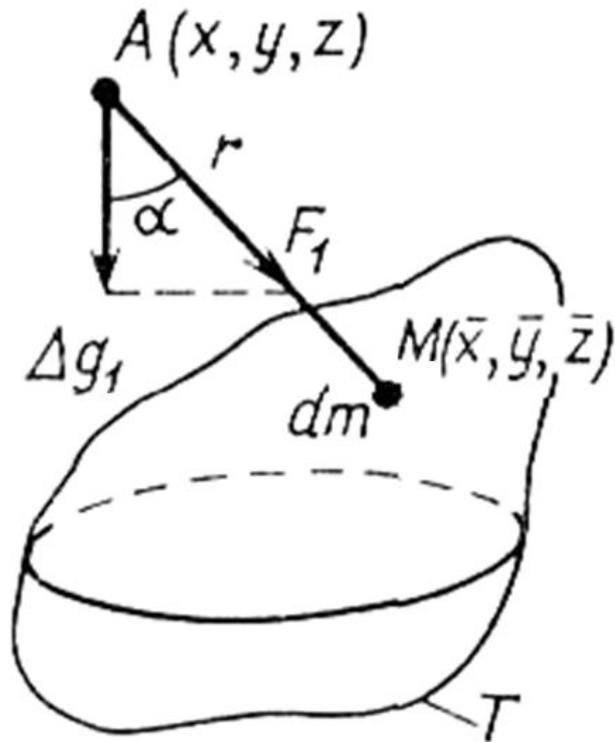
$$\Delta g_B = f \cdot \int \frac{\Delta \delta (\bar{z} - z) dv}{\left[ (\bar{x} - x)^2 + (\bar{y} - y)^2 + (\bar{z} - z)^2 \right]^{3/2}}$$

$\Delta \delta$ - избыточная плотность

Для элементарной массы  $dm$  в гравитирующем теле  $T$  будем иметь расстояние от  $A$  до  $M$  равным  $r$ :

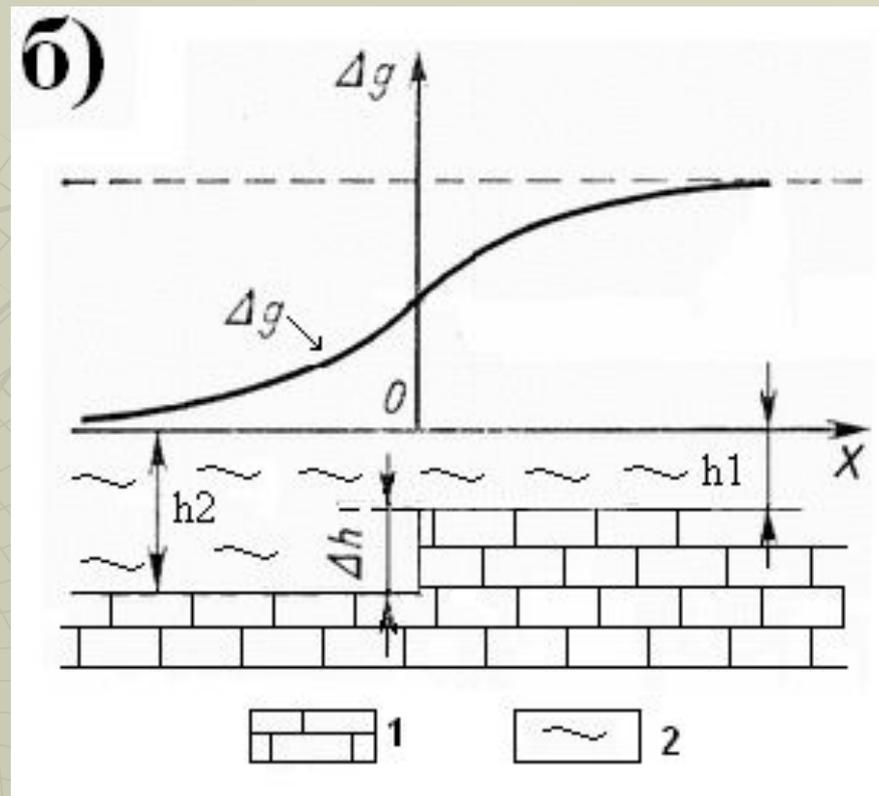
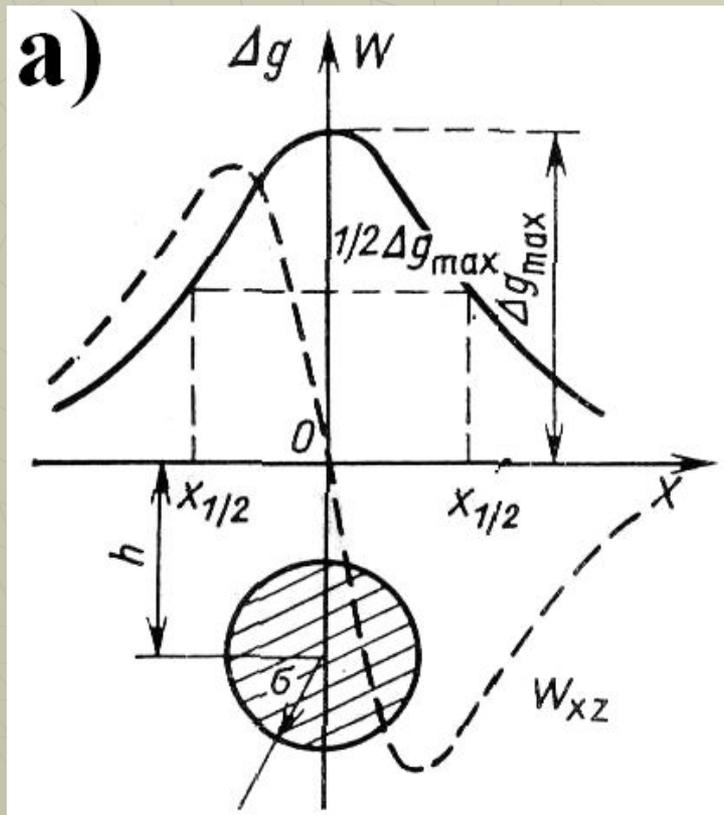
$$r = \sqrt{(\bar{x} - x)^2 + (\bar{y} - y)^2 + (\bar{z} - z)^2}$$





**Модель цилиндра  
для расчета  
приращения силы  
тяжести в месте его  
расположения от  
точки наблюдения**

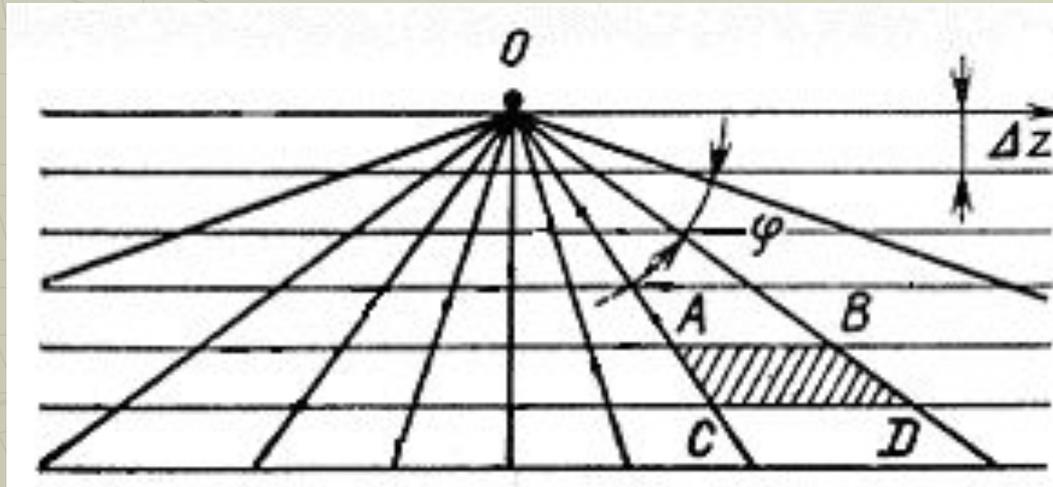
# Гравитационные аномалии над шаром (а) и вертикальным уступом (б)



1 – покровные отложения ( $\delta_1 = 2,2$  г/см<sup>3</sup>)

2 – известняк ( $\delta_2 = 2,8$  г/см<sup>3</sup>)

# Численный способ решения прямой задачи с помощью палетки Гамбурцева



- ◆ Формула цены деления каждой клетки палетки:

- ◆  $\Delta g = 2f * (\Delta z * \Delta \delta * \varphi)$

- ◆  $f = 6,67 * 10^{-8} 2^{-1} \text{см}^3 \text{с}^{-2}$

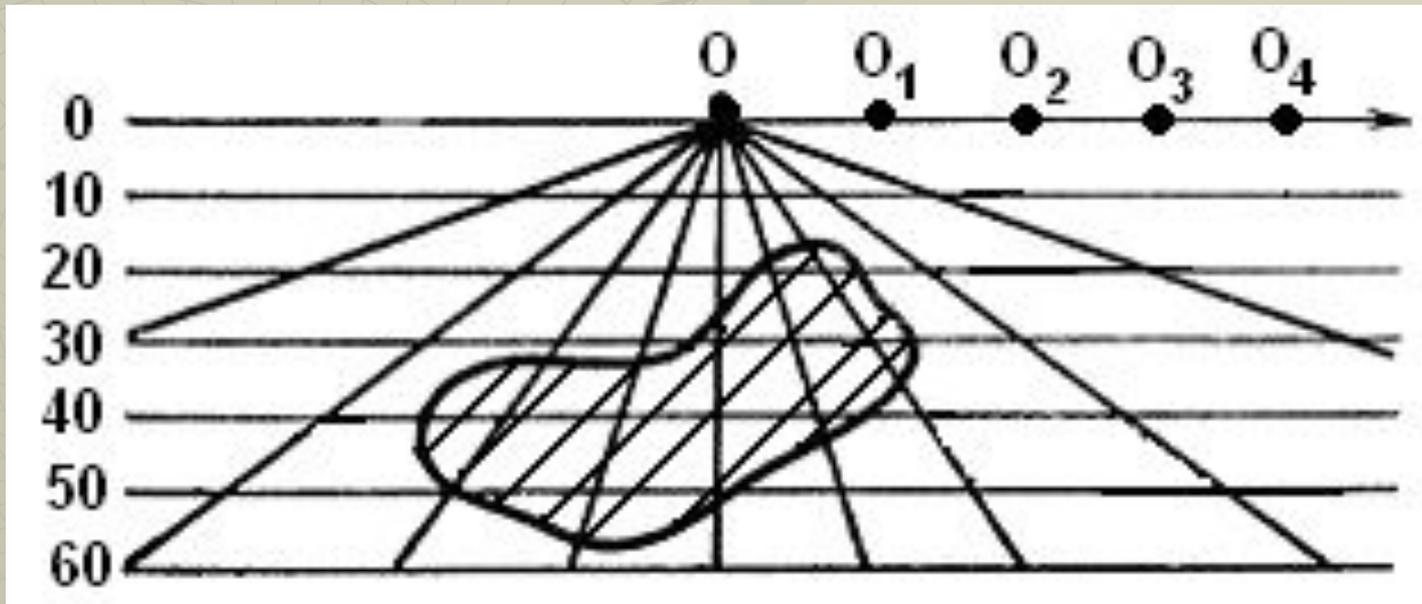
- ◆

- ◆ Гравитационная аномалия определяется по формуле:

- ◆  $\Delta g_B = m * \Delta g_n * k$

- ◆  $k$  - масштабный коэффициент

# Пример расчета величины гравитационных аномалий для тел неправильной формы



## Качественная интерпретация

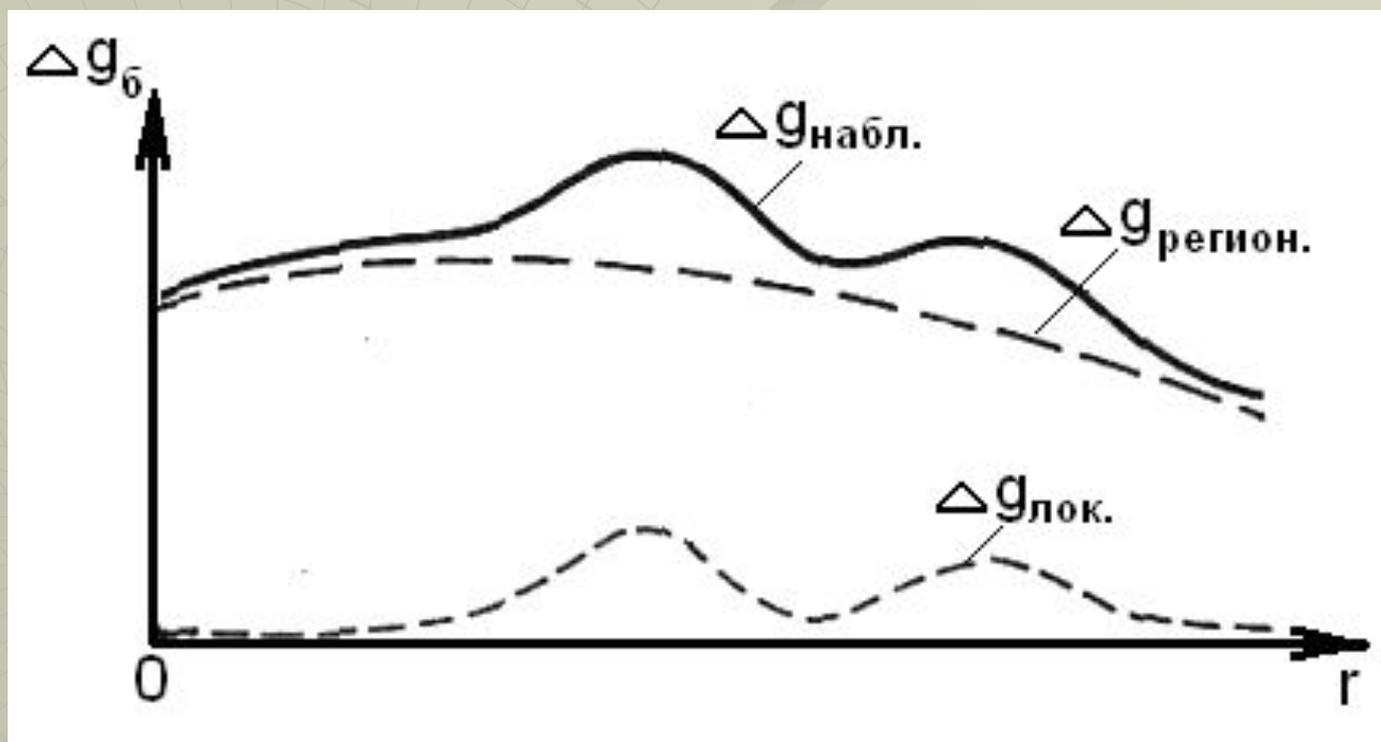
- Строятся план-графики или карты  $\Delta q_B$
- Устанавливается геологическая природа гравитационных аномалий
- Оценивается местоположение изучаемых объектов

Предусматривается получение "чистой" аномалии:

$$\Delta q_B = \Delta q_{\text{набл}} - \Delta q_{\text{норм}}$$

$\Delta q_{\text{набл}}$  и  $\Delta q_{\text{норм}}$  – значения силы тяжести для  
наблюденного и нормального полей

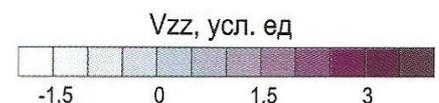
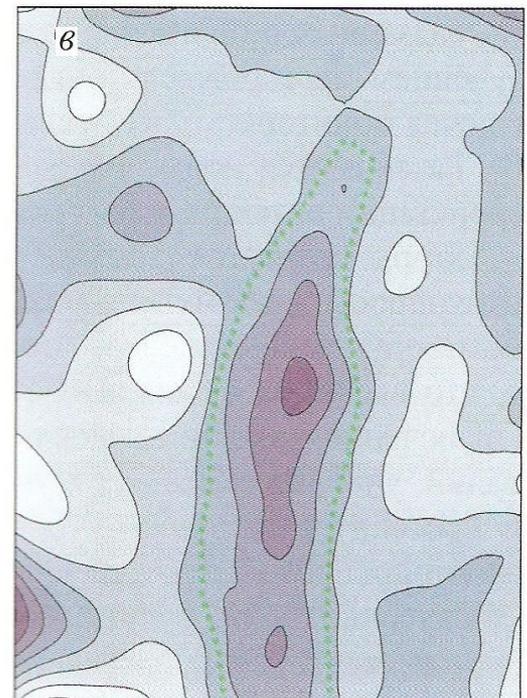
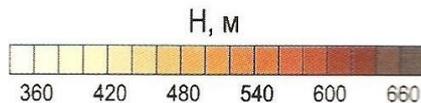
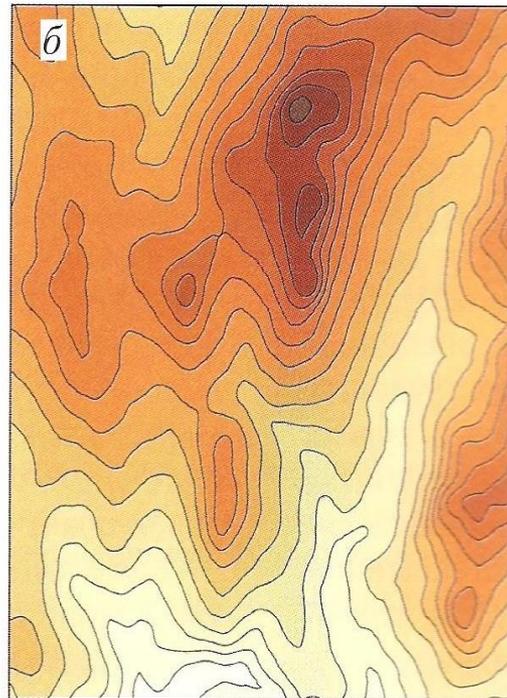
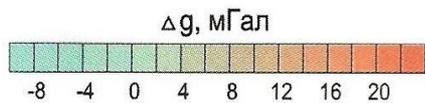
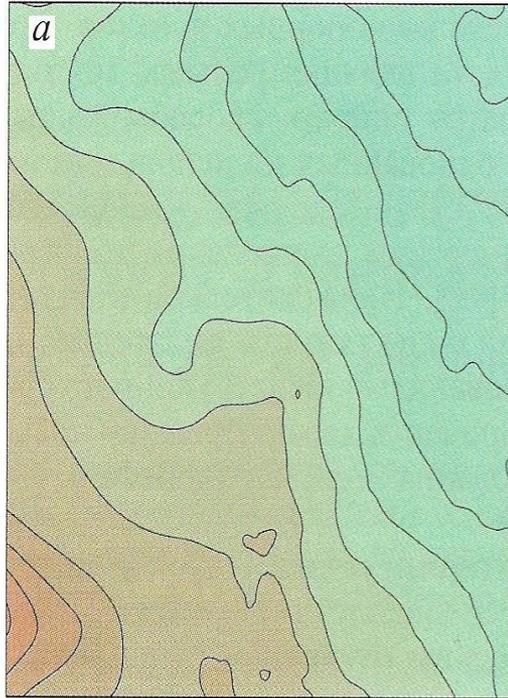
# Пример «снятия» регионального фона при качественной интерпретации гравитационных аномалий





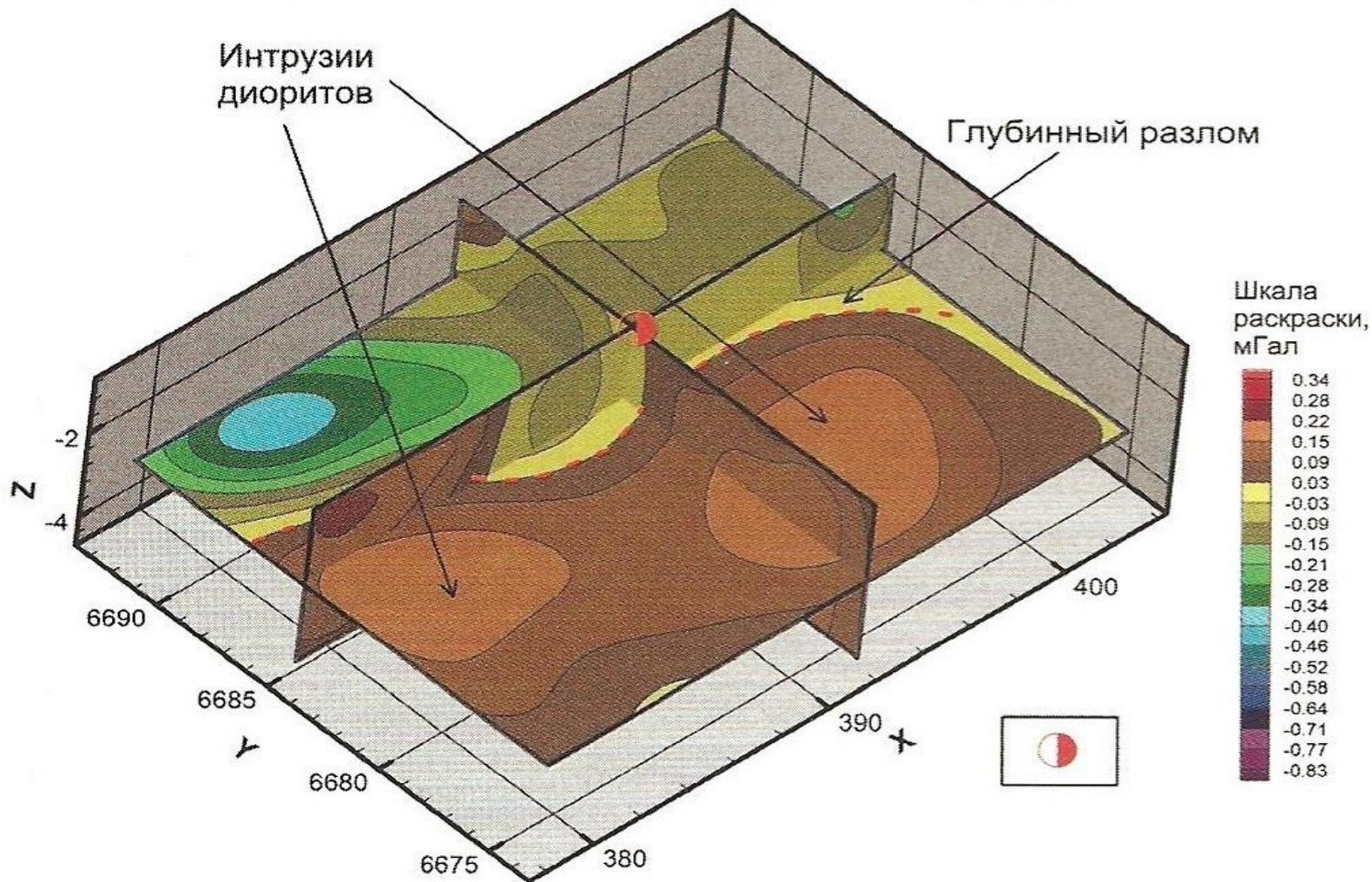
**Количественная интерпретация** гравиразведочных данных предусматривает сопоставление теоретических и наблюдаемых кривых. Это классический прием в разведочной геофизике. Разработаны компьютерные программы. Интерпретация носит название **D-инверсия**. Результатом является определение формы, размеров, глубины залегания и пространственного положения объектов. При этом обязательно определение их плотностных характеристик и геологической принадлежности. Это достигается с помощью петрофизических связей.

Карты изолиний: силы тяжести  $\Delta g$  (а); высотных отметок  $H$  рельефа местности (б);  
1-й вертикальной производной  $V_{zz}$  на высоте  $H = 1000$  м (в). Предуралье.  
зеленый пунктир – контур габброидной интрузии



# Результаты интерпретации данных крупномасштабной гравиметрической съемки методом фильтрационной томографии. Охотско-Чукотский вулканогенный пояс .

Условное обозначение: золоторудное месторождение



## Лекция 4

# Краткая теория геомагнитного поля и его изучение в магнитометрии и магниторазведке

**Магниторазведка** - раздел разведочной геофизики, изучающий особенности распределения геомагнитного поля в земной коре с целью поисков, оценки и разведки месторождений полезных ископаемых.

**Геомагнитное поле** - часть общего магнитного поля Земли, имеющего потенциальный характер.

Взаимодействие магнитных масс подчиняется закону Кулона:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu_a \cdot r^2}$$

$F$  - сила взаимодействия масс  $m_1$  и  $m_2$ ,

$r$  - расстояние между массами,

$\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость ( $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ )

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – проницаемость вакуума

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость

Если Землю представить как космическое тело, имеющую массу  $m_2$ , то согласно закону Кулона она будет притягивать массу  $m_1$  с силой равной напряженности магнитного поля  $H$ :

$$H = \frac{F}{m_2} = \frac{m_1}{r^2}$$

при условии, что,  $\mu = 1$ , т.е. среда не магнитная

Потенциал магнитного поля для элементарных магнитных масс, как и гравитационный потенциал, обладает свойством аддитивности:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{r} = \int \frac{dm}{r}$$

Суммарное магнитное поле Земли складывается из:

- 1) постоянного геомагнитного поля, которое представляет собой поле диполя большого намагниченного шара;
- 2) материкового поля, созданного породами глубинных структур;
- 3) переменного магнитного поля, под действием которого формируются в Земле вихревые токи. Последние вызывают магнитную индукцию:

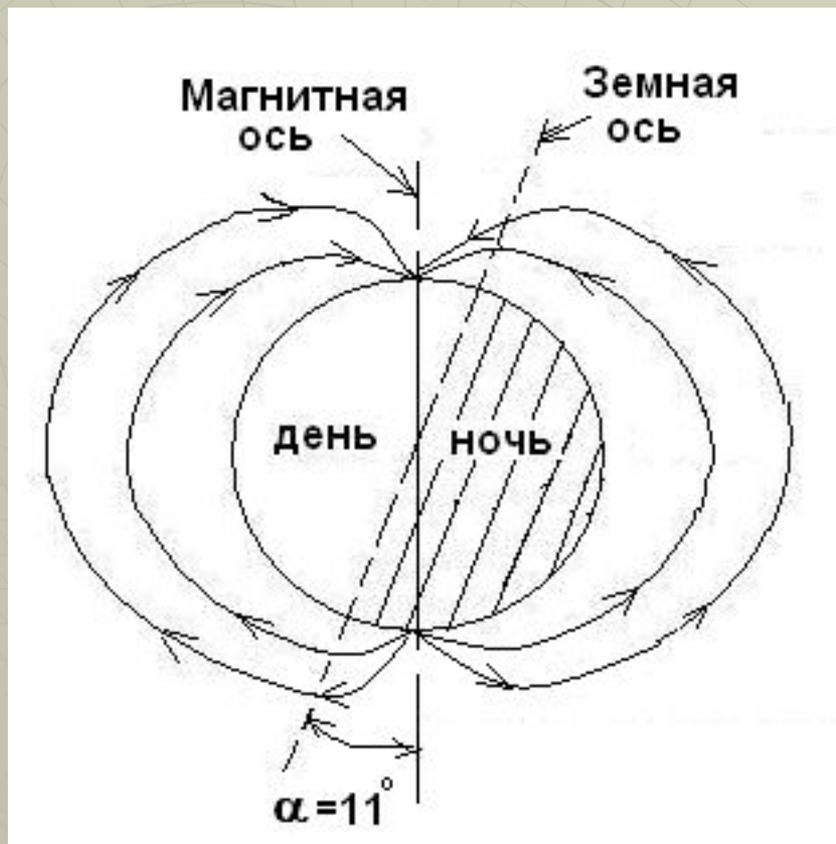
$$\vec{B} = \mu * \vec{H}$$

$\vec{B}$  - магнитная индукция,  
 $\vec{H}$  - напряженность магнитного поля

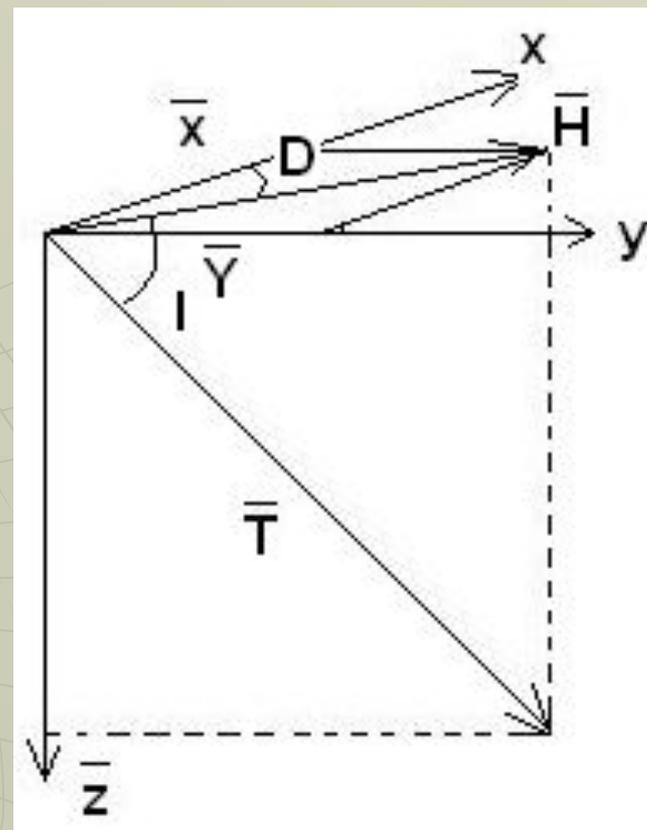
Магнитная индукция измеряется в теслах (Тл).

В магниторазведке принята дробная величина 1 нТл, которая равна  $10^{-9}$  Тл

# Схема формирования геомагнитного поля Земли



# Элементы геомагнитного поля



## Параметры магнитного поля:

$D$  - магнитное склонение

$I$  - магнитное наклонение

$X$  - северная проекция

$Y$  - западная (восточная) проекция

На полюсах  $T = Z = 0,66 \cdot 10^5$  нТл при  $H = 0$

На экваторе  $T = H = 0,33 \cdot 10^5$  нТл при  $Z = 0$

$$H_m = H_o + H_m + H_a + H_{вн} + \Delta H$$

$H_m$  – суммарное магнитное поле

$H_o$  – поле диполя Земли

$H_m$  – поле материковое

$H_a$  – аномальное поле

$H_{вн}$  – внешнее поле

$\Delta H$  – поле магнитных вариаций

**Нормальное поле** - поле диполя Земли и материковое

**Аномальное поле** - поле от намагниченных геологических тел

**Внешнее поле** – поле от объектов-помех

**Поле вариаций:**

- вековые
  - годовые
  - солнечно- и лунно-суточные
  - магнитные бури
- Происхождение магнитного поля Земли связывается с существованием в ядре слабых вихревых токов , которые вследствие вращения Земли и под действием гидромагнитного эффекта приводят к первоначально слабому эффекту электромагнитной индукции. Процесс "диффундирует" (последовательно передается) к поверхности Земли, где компенсируется поверхностными токами.

# Магнитные свойства горных пород

Две группы:

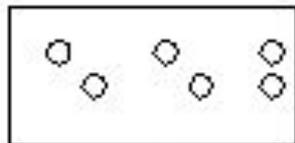
- 1) диамагнетики (магнитная проницаемость  $\eta < 1$ )
- 2) парамагнетики (магнитная проницаемость  $\eta > 1$ )

В группе парамагнетиков выделяются специальная группа ферро-, ферри- и антиферромагнетиков  $\eta \gg 1$

Природа магнетизма обусловлена структурой спин-орбитальных моментов атомов под действием магнитного поля

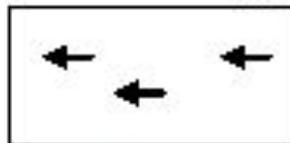
*Диамагнетики:*

До действия поля



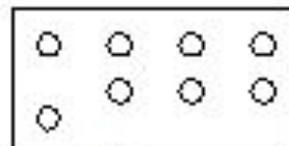
Спин-орбитальные моменты взаимно-скомпенсированы, объект не магнитен

Во время действия поля



Спин-орбитальные моменты противоположны направлению поля

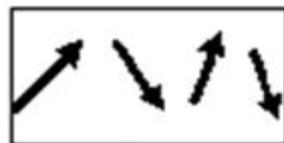
После действия поля



Спин-орбитальные моменты возвращаются в первоначальное состояние

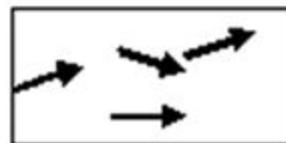
*Парамагнетики:*

До действия поля



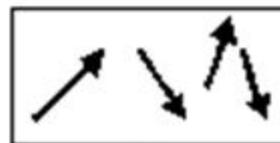
Спин-орбитальные моменты взаимно-скомпенсированы из-за разориентации

Во время действия поля



Спин-орбитальные моменты преимущественно ориентированы в направлении поля

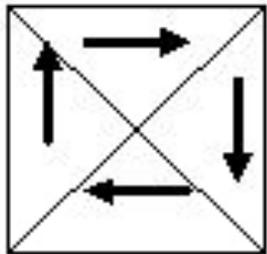
После действия поля



Спин-орбитальные моменты возвращаются в первоначальное состояние

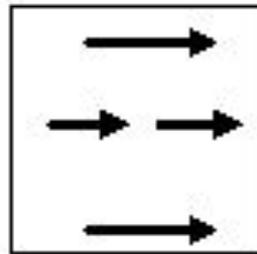
**Ферро-, ферри- и антиферромагнетики** - очень сильные природные магниты, внутренняя структура которых содержит специальные области домены

До действия поля



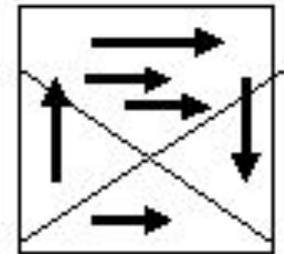
Домены между собой взаимно скомпенсированы

Во время действия поля



Домены целиком ориентируются вдоль поля

После действия поля

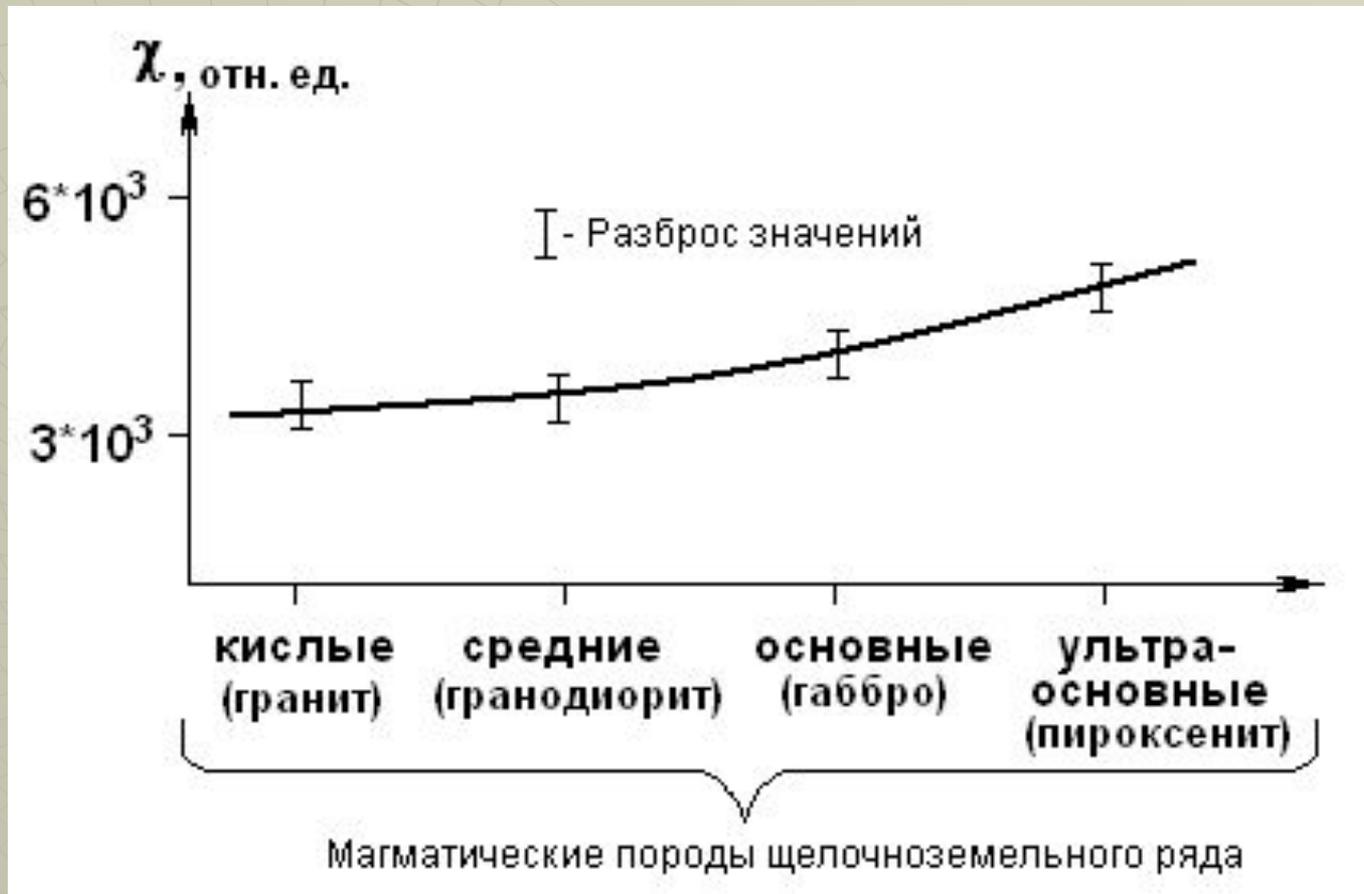


Доменам не хватает энергии возвратиться в исходное состояние

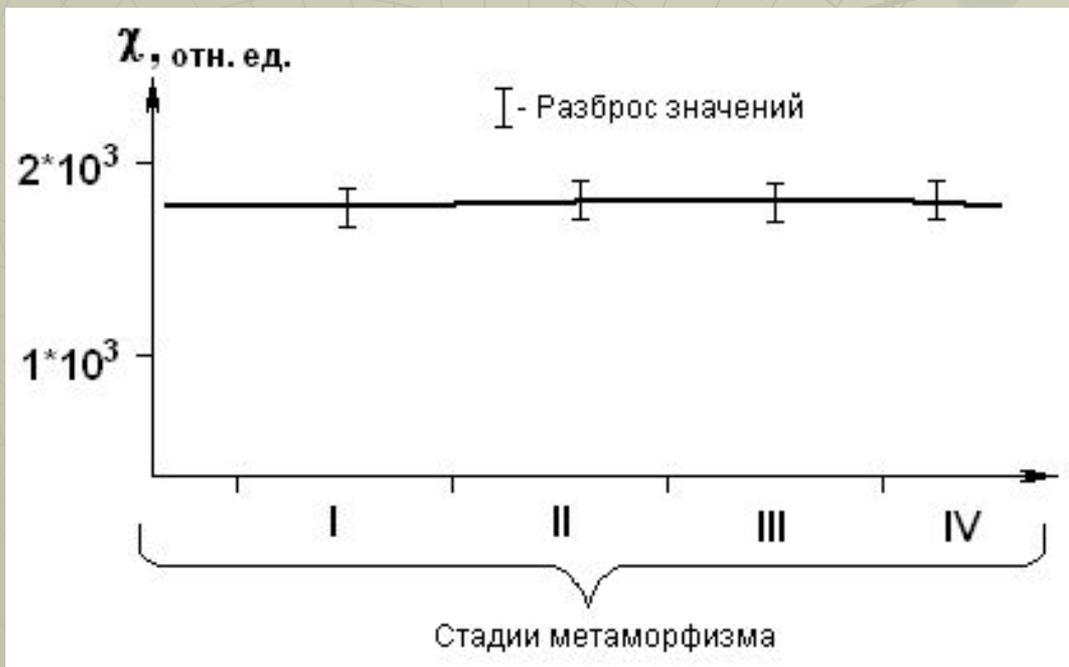
Вода и нефть диамагнитны

Газы и газозвоздушные смеси также диамагнитны

# Тенденция изменения магнитной восприимчивости у магматических пород щелочноземельного ряда



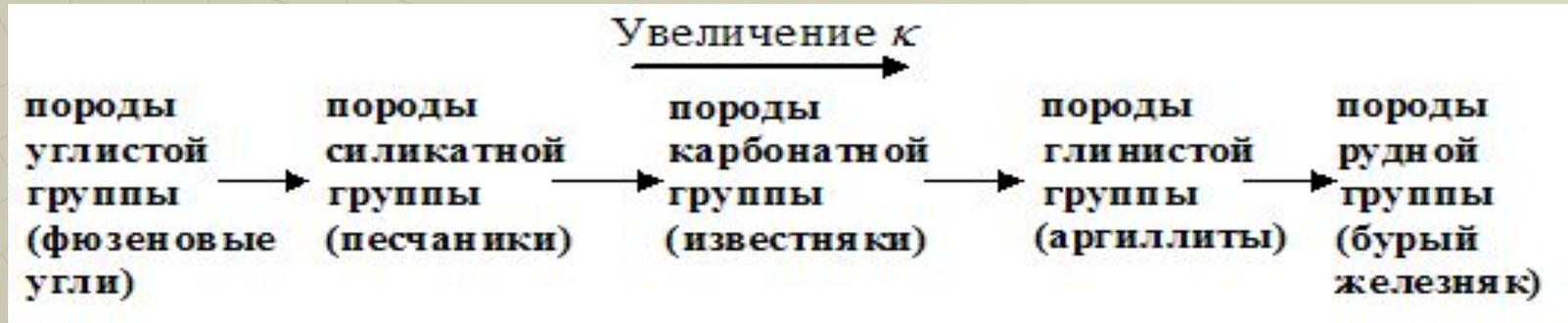
# Тенденция изменения магнитной восприимчивости у метаморфических пород



Стадии метаморфизма:

- ♦ I – зеленосланцевая,
- ♦ II – амфиболитовая,
- ♦ III – гранулитовая,
- ♦ IV – эклогитовая,
- ♦ к - (капа) магнитная восприимчивость

# Тенденция изменения магнитной восприимчивости у осадочных пород для одноименных стадий их преобразования



$k$  - (капа) магнитная восприимчивость

# Тенденция изменения магнитной восприимчивости у парамагнитных осадочных пород в зависимости от стадии их преобразования



## Лекция 5

Методика магниторазведки и  
её применение для  
региональных съемок,  
поисков и разведки полезных  
ископаемых и в других  
областях геологии

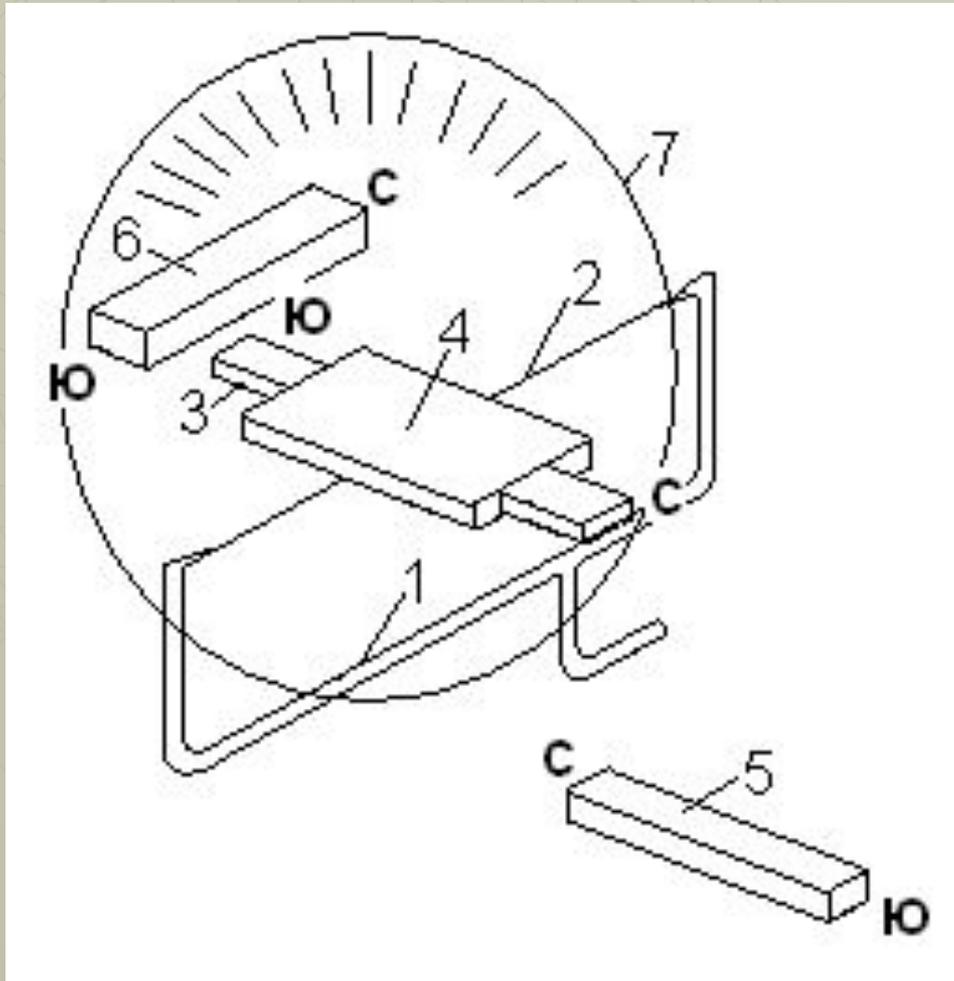
## **Методика и технология магниторазведочных работ**

- 1. Выбор характера и вида съемки, включая методы, аппаратуру, технологию;
- 2. Топографическая (геодезическая) разбивка сети;
- 3. Увязка результатов профильных (площадных) наблюдений с определением погрешностей;
- 4. Представление результатов съемки.

## **Приборы применяемые в магниторазведке**

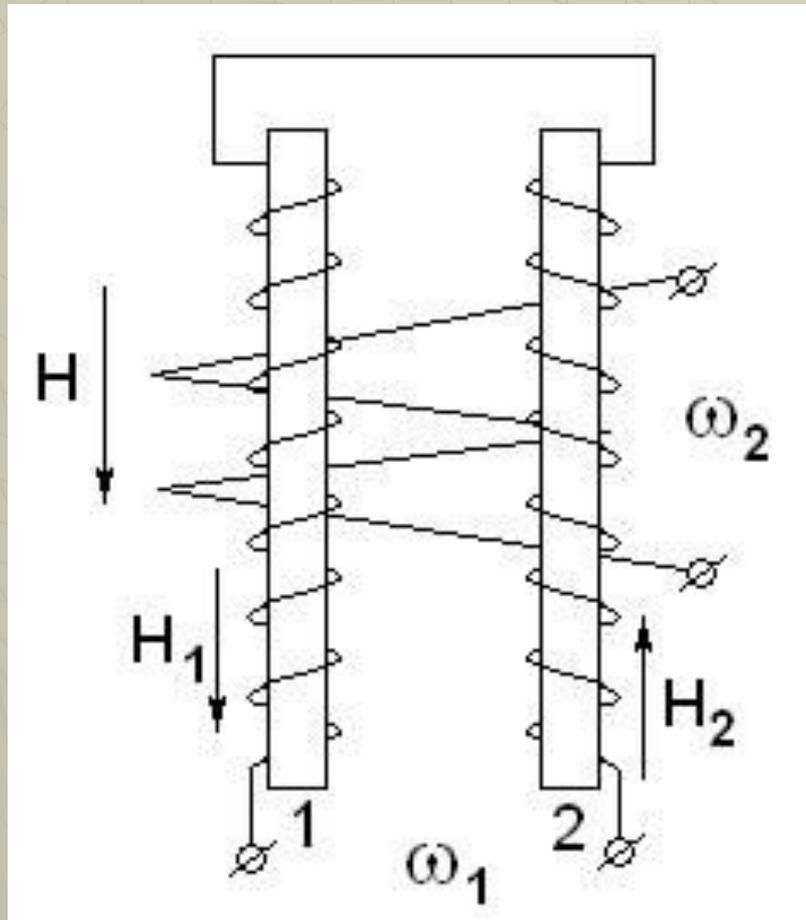
- Феррозондовые;
- Протонные;
- Оптико-механические;
- Квантовые.

# Схема устройства оптико-механического магнитометра



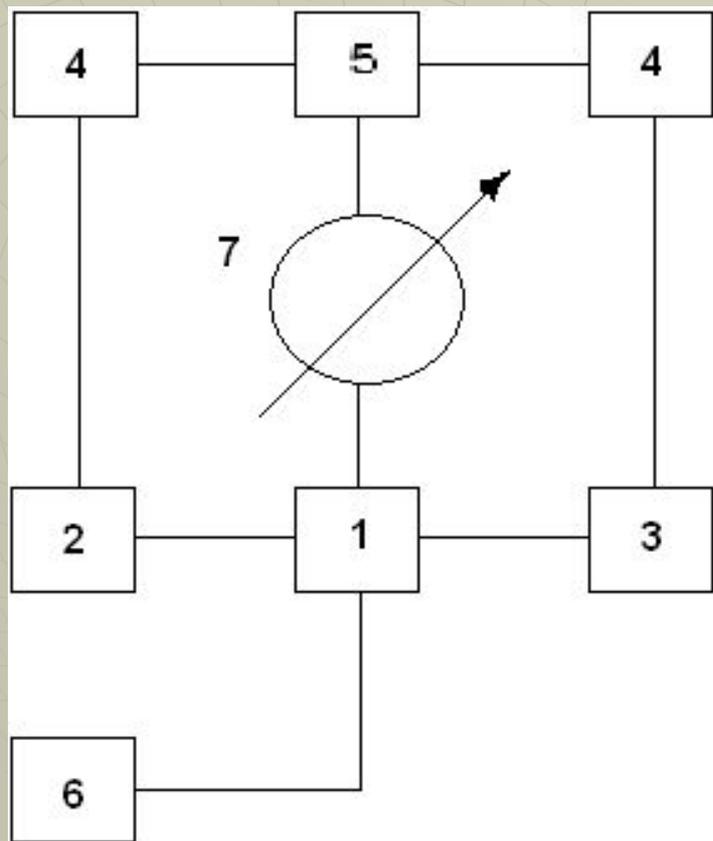
- 1 – рама,
- 2 – металлическая нить,
- 3 – постоянный магнит,
- 4 – зеркало,
- 5 – диапазонный магнит,
- 6 – компенсационный магнит,
- 7 – лимб

## Схема феррозонда по типу второй гармоники



1,2 – пермалловые сердечники,  
 $H_1, H_2$  – направление переменного магнитного поля частотой  $\omega_1$ ,  
 $H$  – постоянная составляющая внешнего магнитного поля,  
 $\omega_2$  – результирующая частота

## Блок-схема феррозондового магнитометра



- 1 – феррозонд,
- 2 – генератор,
- 3 – измеритель первичного сигнала,
- 4 – фазовращатели (компенсаторы напряжения и фазы),
- 5 – сумматор,
- 6 – кварцевый генератор (частотомер),
- 7 – регистрирующее устройство

## Протонные магнитометры

Используется физическое явление прецессии протонов, т.е. ориентации магнитных моментов протонов вдоль силовых линий магнитного поля.

Датчик поля - сосуд, с водой, спиртом, бензолом или их смесью.

Вокруг сосуда намотаны генераторная и измерительная катушки.

Прецессия выражается формулой:

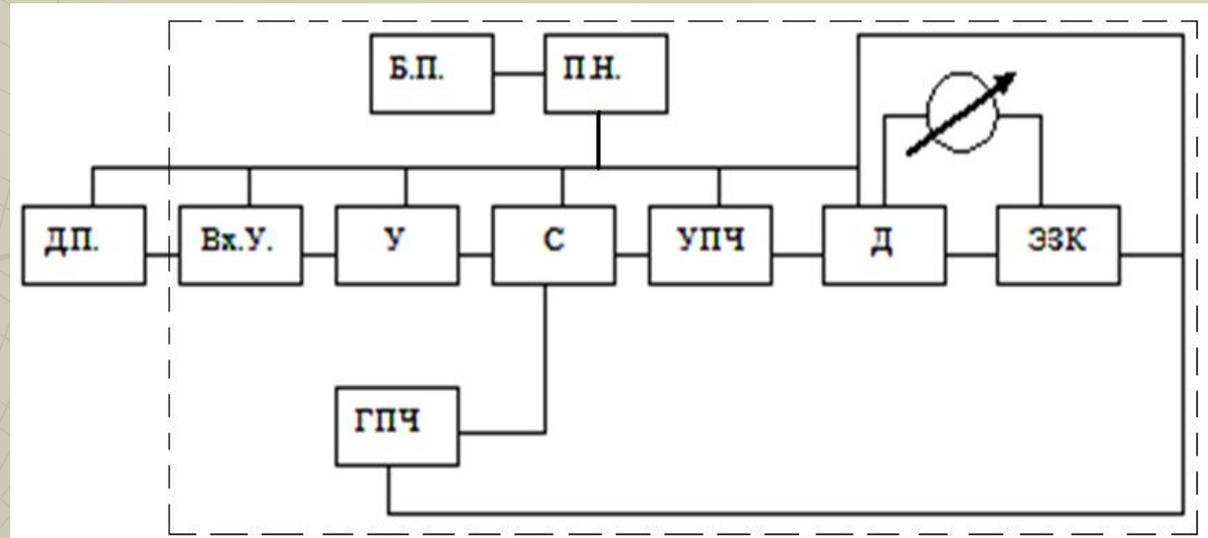
$$\omega = \alpha \cdot T$$

$T$  - суммарный магнитный вектор

$\omega$  - частота,  $\alpha$ - коэффициент, характеризующийся отношением

механического и магнитного моментов.

# Общий вид и блок-схема протонного магнитометра



Д.П. – датчик поля, Вх.У. – выходной усилитель, У – усилитель мощности, С – смеситель, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, Д – детектор, ЭЗК – электронная записная книжка, ГПЧ – генератор промежуточной частоты, Б.П. – блок питания, П.Н. – преобразователь напряжения

## Квантовые магнитометры

Используется физическое явление Леемана. Сущность в переходе электронов на новый энергетический уровень под действием монохроматического света. Электроны атомов отдельных элементов переходят на другой энергетический уровень. После прекращения накачки (вспышки монохроматического света) электроны возвращаются на прежние уровни с частотой, пропорциональной суммарному вектору  $T$ .

Сосуд (лампа) наполнен парами или цезия, или рубидия или гелия. Блок-схема аналогична протонным магнитометрам.

## Общий вид квантового магнитометра



# Магнитометрические наблюдения с квантовым магнитометром при поисках труб



Проведения магниторазведочных работ, как правило, сопровождается вариационными наблюдениями (непрерывные по времени измерения стационарным магнитометром, установленным на базе) с целью записи магнитных пульсаций (бурь).

Погрешности результатов наблюдений вычисляются по разности измерений на контрольных точках:

$$\varepsilon_i = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n-1}}$$

$\delta$ - разность основных и контрольных замеров  
 $n$  – общее количество контрольных точек

Качественная и количественная интерпретация в магниторазведке выполняются по той же схеме что и в гравиразведке.

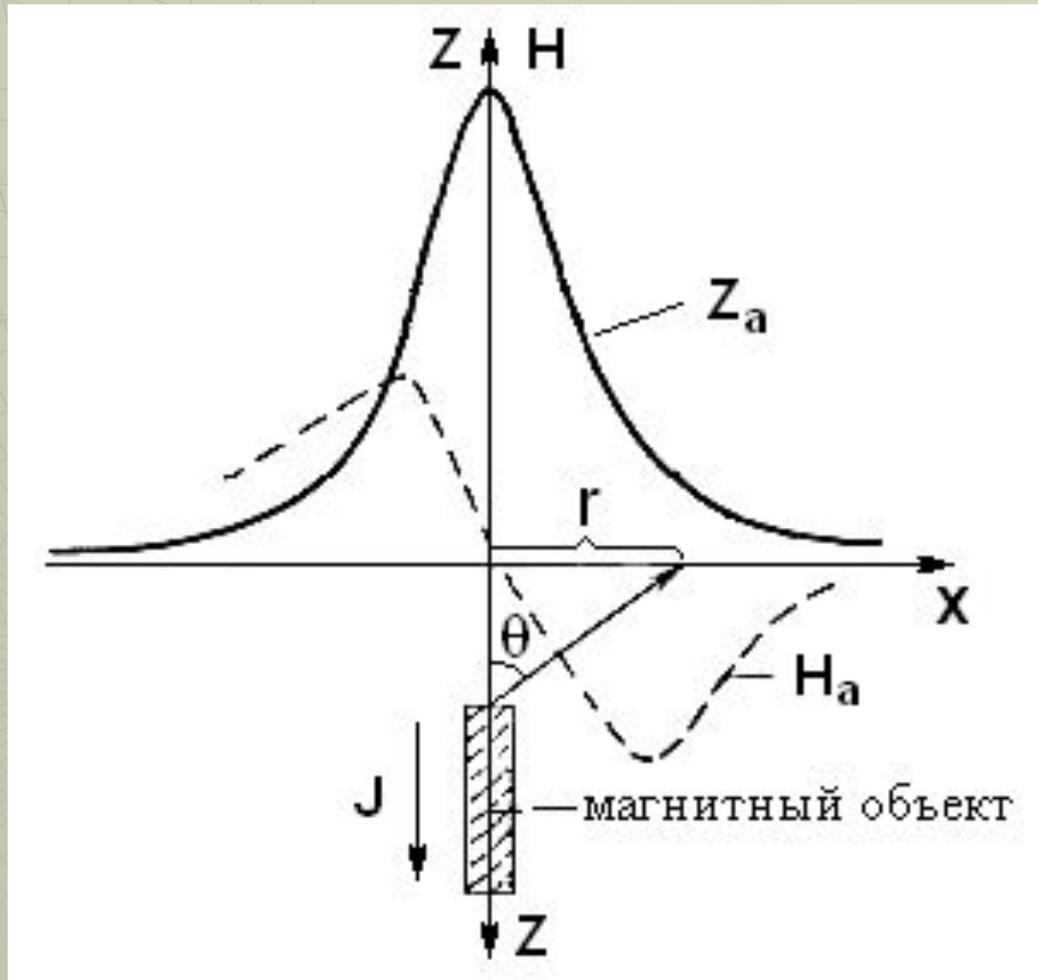
Решение прямой задачи, в основном, производится для объектов простой геометрической формы.

Используется формула:

$$U_v = \iiint_v \frac{I * \cos \theta * dV}{\mu * r^2}$$

$U$  - магнитный потенциал,  $I$  - интенсивность намагничивания,  $\theta$  - угол между точкой наблюдения и изучаемым объектом,  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $r$  - расстояние между объектом и точкой наблюдения.

# Форма графиков $Z_a$ и $H_a$ над крутопадающим пластом бесконечного простираения



Решение обратной задачи предусматривает количественную интерпретацию с обязательным привлечением априорной информации.

Для объектов простой формы определяются:

1. глубина залегания ( $h = 1,3[X_{1/2z_{max}}]$ ),
2. магнитная масса ( $m = Z_{max} * \mu * h^2$ ),
3. интенсивность намагничивания ( $I = k * z$ ),
4. площадь верхней кромки магнитного объекта ( $S = m/I$ )

Для объектов сложной геометрической формы используются численные методы решения прямой и обратной задач в рамках 1D, 2D, 3D – инверсии.

Существуют специальные компьютерные программы.

## Лекция 6

Определение предмета  
электроразведки

Классификационные схемы

Общие сведения об  
изучаемых полях

**Электроразведка** – раздел разведочной геофизики, основанный на изучении распределения электромагнитных полей в земной коре с целью поисков и разведки месторождений полезных ископаемых

**Электромагнитное поле** – сумма электрического и магнитного полей приводящих к существованию электромагнитных волн  
Электромагнитной поле описывается системой уравнений Максвелла.

## Основные параметры поля:

$\vec{E}$  - напряженность электрического поля

$\vec{H}$  - напряженность магнитного поля

$\vec{D}$  - электрическая индукция

$\vec{B}$  - магнитная индукция

$\vec{J}$  - плотность тока

## Электрические свойства:

$\rho$  - удельное электрическое сопротивление

$1/\rho = \sigma_{\text{э}}$  - удельная электропроводность

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость

$\eta$  - поляризуемость

$\mu$  - магнитная проницаемость

## Материальные уравнения:

$$\overset{\nabla}{D} = \varepsilon * \overset{\nabla}{E}$$

$$\overset{\nabla}{J} = \sigma_{\varepsilon} * \overset{\nabla}{E}$$

$$\overset{\nabla}{B} = \mu * \overset{\nabla}{H}$$

В зависимости от используемого диапазона частот, в электроразведке условно выделяют три модели:

- **Стационарную** (постоянное электрическое поле), где  $f \rightarrow 0$  и основную роль играют токи проводимости (направленное движение электронов, ионов)
- **Полустационарную** (индукционную), где  $\infty > f > 0$  и в разной мере соотносятся токи проводимости и смещения
- **Волновую**, где  $f \rightarrow \infty$  (переменное электромагнитное поле высокой частоты) и основную роль играют токи смещения (волнообразная передача энергии от одних двойных электрических слоев к другим)

## **Естественные электромагнитные поля:**

1) Постоянное естественное электрическое поле, как поле естественных потенциалов (ЕП), возникающих в земной коре вследствие электрохимических и электрокинетических процессов

2) Магнитотеллурическое поле, как поле космического происхождения вследствие корпускулярного излучения солнца (солнечного ветра)

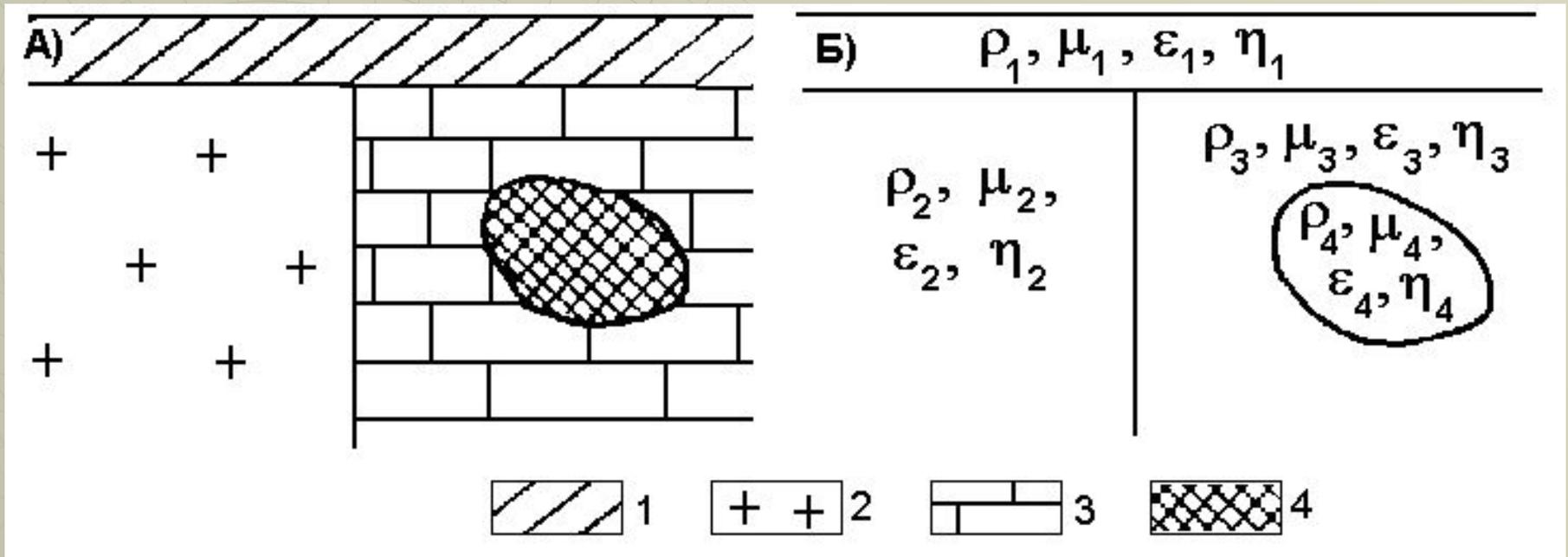
2) Поле дальних радиостанций, как поле электромагнитных излучений относительно низких (первые десятки килогерц) частот от радиовещания

3) Поле ЕИЭМПЗ (естественное импульсное электромагнитное поле Земли), как поле механических напряжений вследствие сейсмоакустических и динамических процессов в земной коре

## Искусственные электромагнитные поля:

- **Постоянное**, описываемое в рамках стационарной модели и возникающее вследствие пропускания («задавливания») постоянного электрического тока в земной коре
- **Переменное**, описываемое в рамках полустационарной модели и возникающее вследствие пропускания («задавливания») переменного электрического тока в земной коре
- **Неустановившееся**, описываемое в рамках полустационарной модели и возникающее во временном промежутке между импульсным включением или выключением тока
- **Электроволновое**, описываемое в рамках волновой модели и возникающее вследствие излучения высокочастотных импульсов (электромагнитных волн) метрового и дециметрового диапазонов в геологической среде

# Геологический (А) и геоэлектрический (Б) разрезы



1 – покровные отложения, 2 – интрузия,  
3 – известняк, 4 – карст

По **электрическим свойствам** все природные объекты подразделяются на:

- Проводники  $\rho \rightarrow 0$  и  $\epsilon \rightarrow \infty$
- Полупроводники  $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} > \rho > 0$  и  $20 \text{ отн. ед.} < \epsilon < \infty$
- Диэлектрики  $\rho \rightarrow \infty$  и  $\epsilon \rightarrow 1$

В **проводниках** электромагнитное поле обусловлено сквозным током электронов и ионов,  
в **полупроводниках** сквозным током ионов и дырок,  
в **диэлектриках** преобладают волновые процессы, связанные с токами смещения, т.е. передачей энергии электромагнитного поля от одних двойных электрических слоев к другим (беспроводная поляризация)

## ***Жидкая фаза***

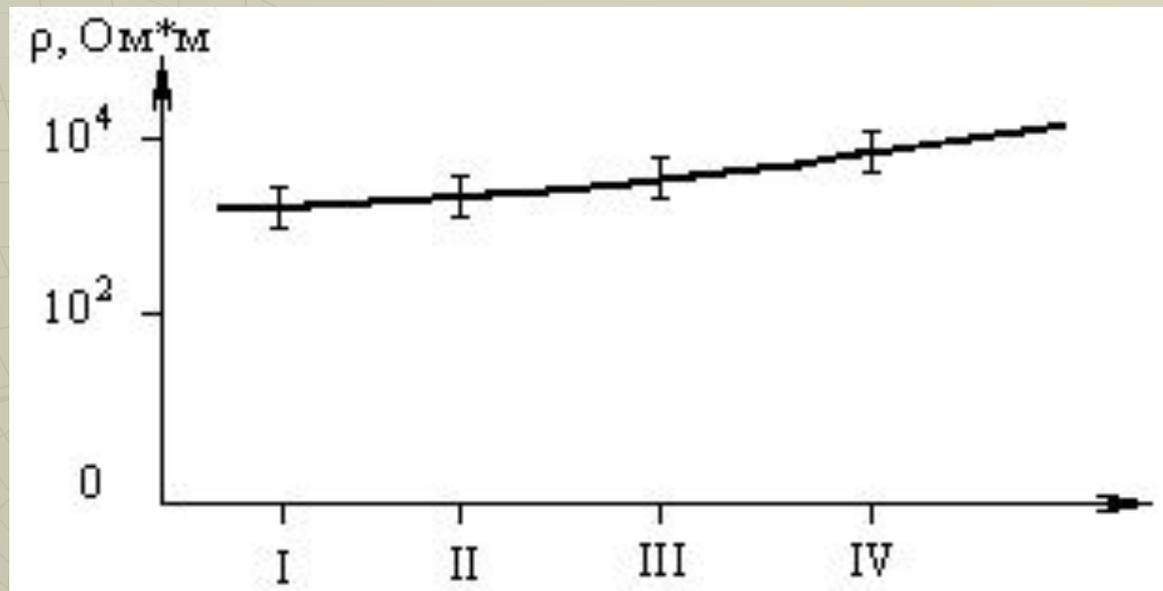
Нефть и дистиллированная вода относятся к диэлектрикам при  $\rho \rightarrow \infty$ , при этом  $\varepsilon \rightarrow 1$  у нефти и  $\varepsilon = 80$  у воды.

По мере увеличения концентрации солей в природных водах и по мере окисления нефти (если она существует длительное время в виде разливов) показатель  $\rho$  уменьшается, а показатель  $\varepsilon$  при таких же условиях практически не изменяется в природных водах и уменьшается по мере увеличения окисления нефтей.

## ***Газовая фаза***

Воздух и все природные газы диэлектрики, поэтому  $\rho \rightarrow \infty$  и  $\varepsilon \rightarrow 1$ , поэтому все пористые породы заполненные газом или природной нефтью являются более высокоомными по сравнению с таковыми заполненными водой.

# Тенденция изменения удельного электрического сопротивления у кристаллических пород



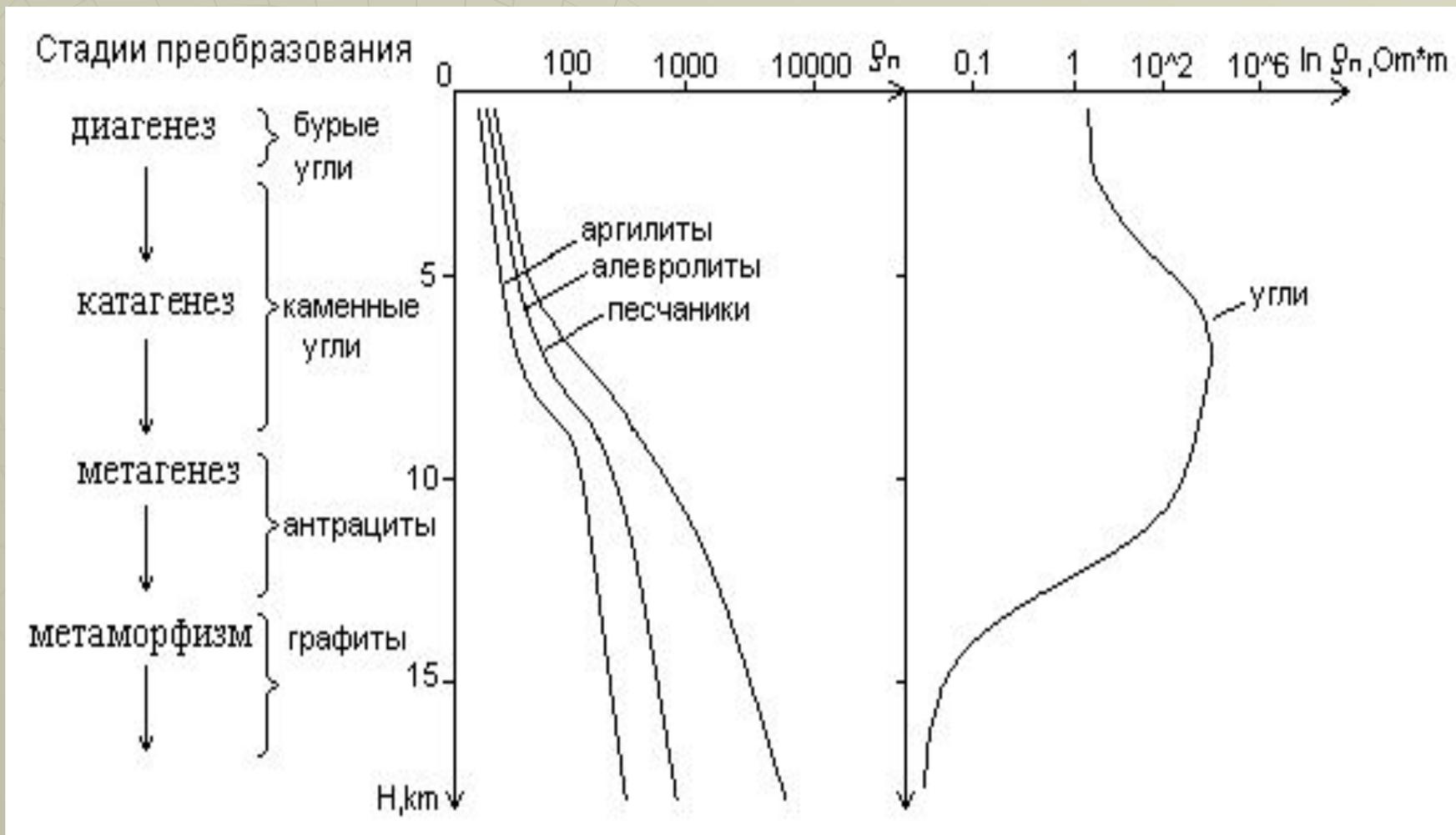
Магматические породы	Стадии метаморфизма
I – кислые	I – зеленосланцевая
II – средние	II – амфиболитовая
III – основные	III – гранулитовая
IV – ультраосновные	IV – эклогитовая

Тенденция изменения удельного электрического сопротивления для одноименных по степени преобразования осадочных пород



Для слоистых толщ значения  $\rho_{\text{вкрест}}$  и  $\rho_{\text{вдоль}}$  неодинаковы. Такая среда называется анизотропной и характеризуется коэффициентом анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_{\text{вкрест}} / \rho_{\text{вдоль}}}$ .

# Тенденция изменения удельного электрического сопротивления у терригенных осадочных пород в зависимости от стадий их преобразования



## Лекция 7

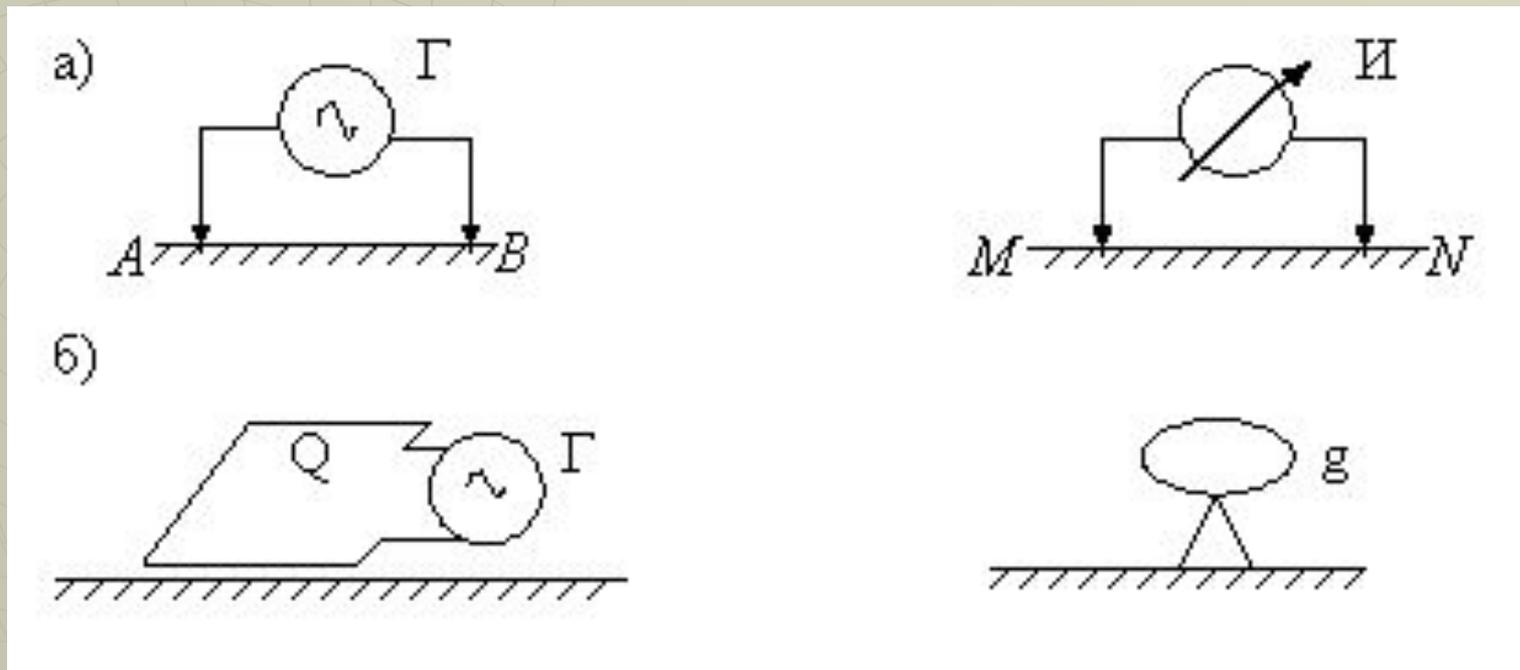
Методика электроразведки и  
сущность её методов на  
основе естественных и  
искусственных постоянных  
электрических полей

**Электромагнитное профилирование** - картирование участков геологоразведочных работ путем перемещения фиксированных по размерам электроразведочных установок или модулей по системе профилей.

**Электромагнитное зондирование** - изучение геологических разрезов, на глубину в заданных точках, где инструментом бурения выступает электрический ток.

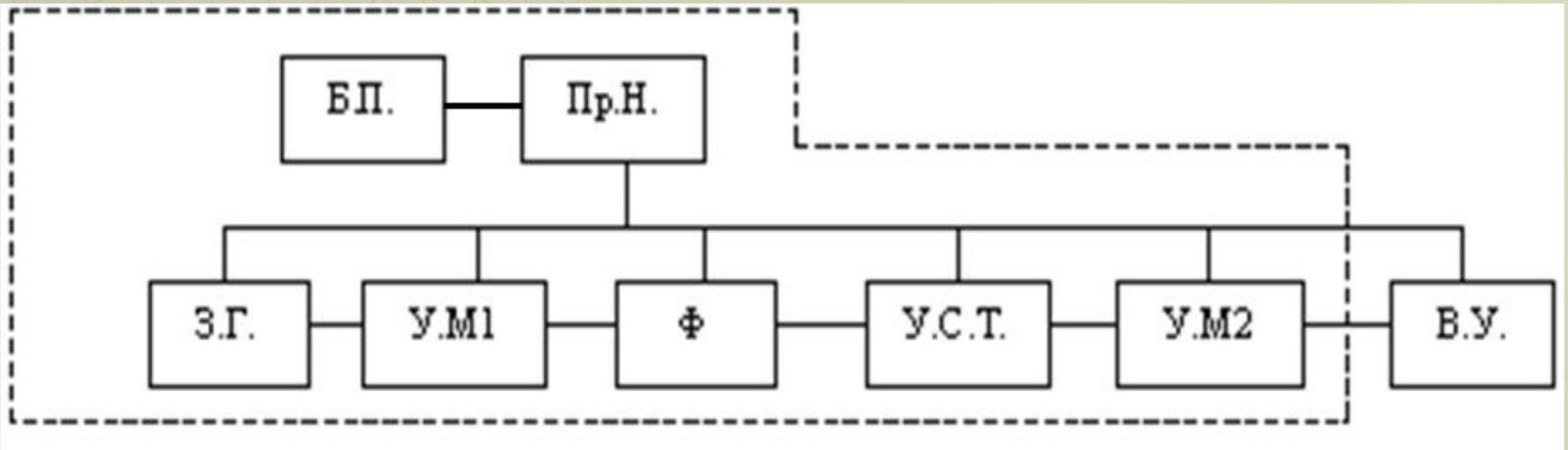
Модификации электропрофилирования и электроразведочного зондирования реализуются применением специальной **электроразведочной аппаратуры и оборудования** путем возбуждения (создания) электромагнитных полей и измерения составляющих этих полей (получения значений напряженности и потенциалов).

# Схемы гальванического (а) и индуктивного (б) возбуждения и приема сигналов электромагнитного поля



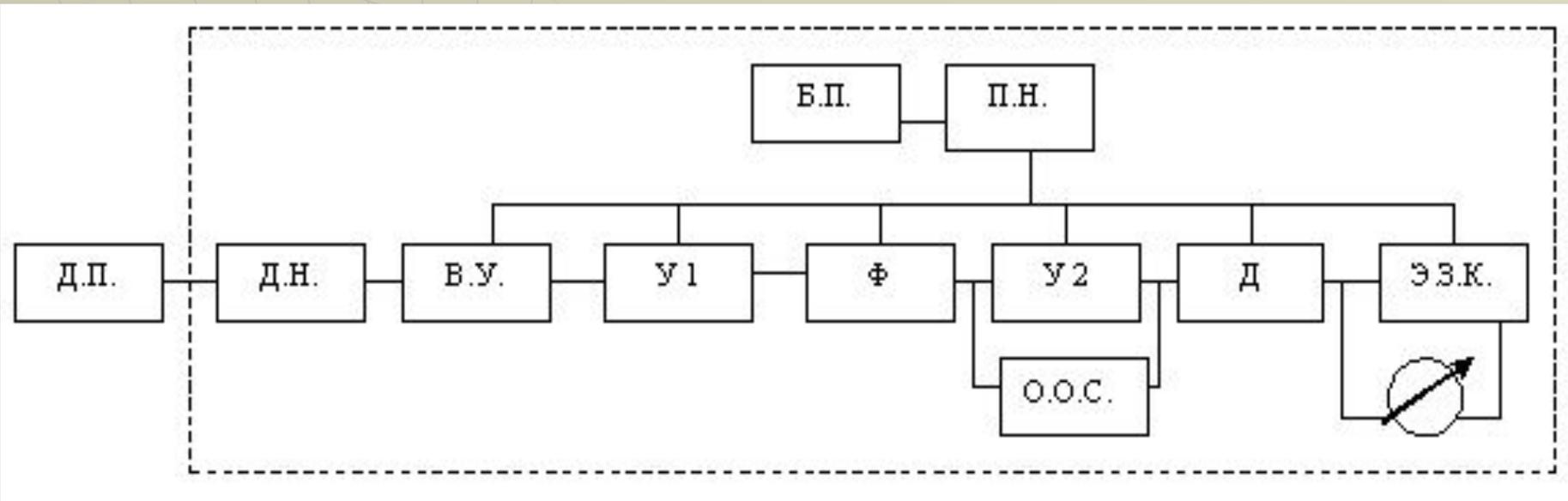
$A$  и  $B$  - питающие электроды,  $M$  и  $N$  - измерительные электроды,  $\Gamma$  – генератор,  $\text{И}$  – измеритель,  $Q$  – площадь генераторной петли,  $g$  – площадь измерительной рамки

# Типовая блок-схема электроразведочного генератора



З.Г. – задающий генератор,  
У.М. – усилитель мощности,  
Ф – фильтр,  
У.С.Т. – устройство стабилизации тока,  
В.У. – выходное устройство, Б.П. – блок питания,  
Пр.Н. – преобразователь напряжения.

# Типовая блок-схема электроразведочного измерителя



Д.П. – датчик поля, Д.Н. – делитель напряжения,  
В.У. – входное устройство (обеспечение высокоомного входа),  
У – усилитель, Ф – фильтр (фильтрация всевозможных помех),  
Д – детектор (выпрямление сигнала), Б.П. – блок питания,  
Э.З.К. – электрозаписная книга, П.Н. – преобразователь напряжения,  
О.О.С. – отрицательная обратная связь (многократное усиление)

# Метод естественного постоянного электрического поля (ЕП)

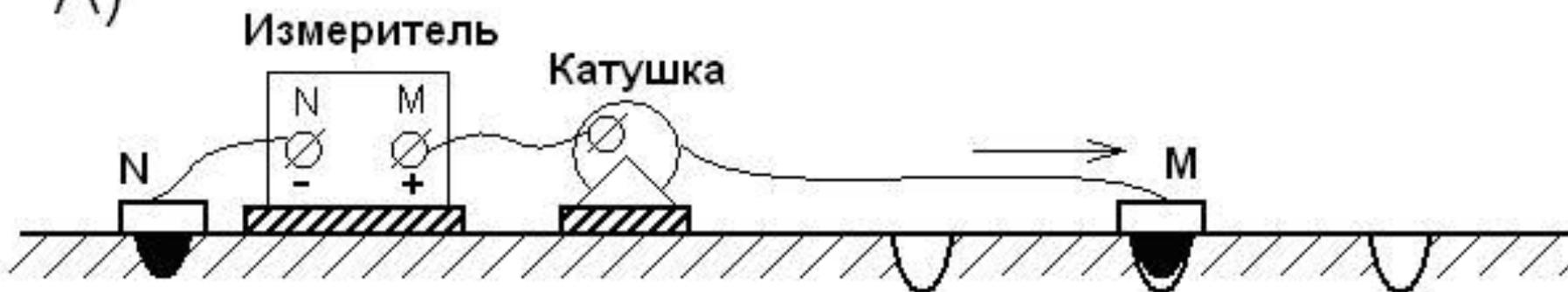
Метод ЕП основан на изучении окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессов в земной коре. Они создают аномалии, которые могут быть зарегистрированы микровольтметром постоянного тока с высокоомным входом.

Для производства работ используются специальные неполяризующиеся электроды, так как металлические из-за окисления в грунте создают значительную (до 1 В) электродную разность потенциалов.

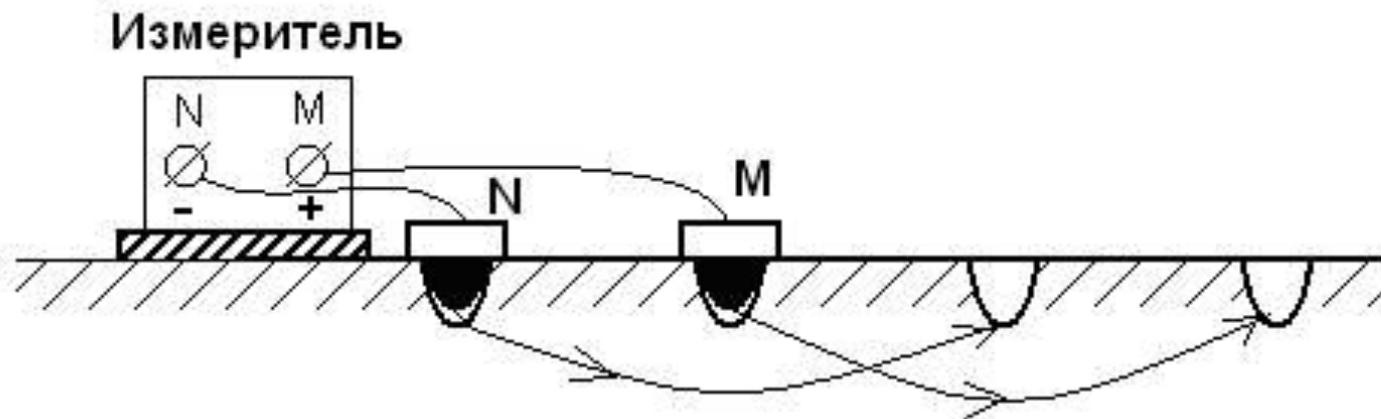
Полевые наблюдения состоят в измерениях потенциала ( $U_{ЕП}$ ) или разности потенциалов ( $\Delta U_{ЕП}$ ) между измерительными электродами  $M$  и  $N$

# Схема съёмки потенциалов (А) и градиентов потенциала (Б) методом ЕП

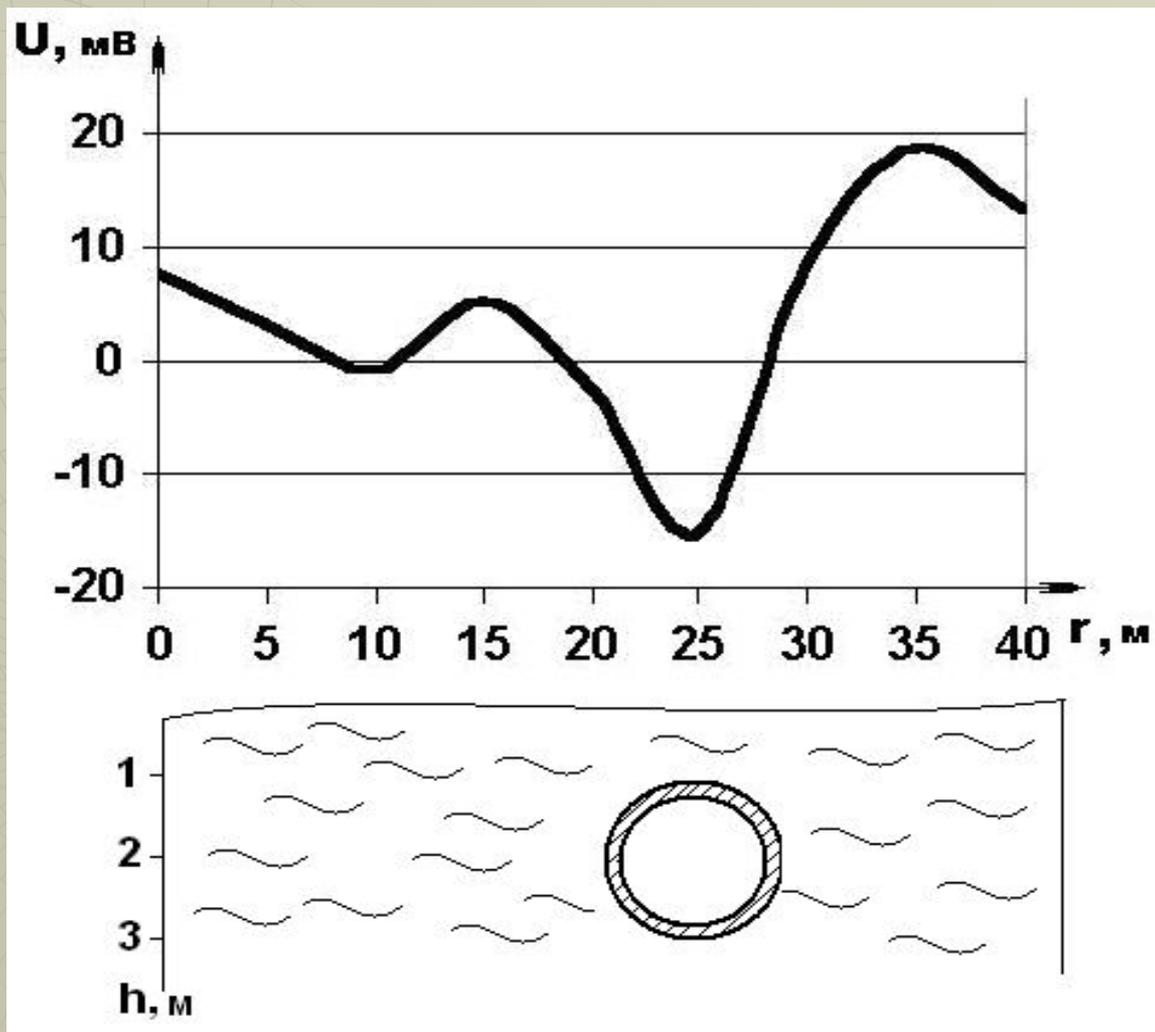
А)



Б)



## Форма графика ЕП над стальной трубой



# Методы электроразведки на основе искусственного постоянного электрического поля - методы сопротивлений (КС)

Все процессы рассматриваются в рамках стационарной модели. В основе лежит теория распределения в геологической среде постоянного электрического поля, когда  $f \rightarrow 0$  и основную роль играют токи проводимости. Название методов связано с понятием кажущегося сопротивления  $\rho_k$ , которое отличается от истинного  $\rho_{\Gamma}$  в силу того, что во всех случаях изучаемый объект является частью гетерогенной (неоднородной) геологической среды и поэтому регистрируемые параметры поля являются интегральными показателями, в которых учитывается доля каждого из присутствующих в этой среде других объектов.

В электроразведке используются установки с гальваническим способом возбуждения и приема. Параметр  $\rho_k$  рассчитывается по формуле:

$$\rho_k = k * (\Delta U / I)$$

$k$  - коэффициент электроразведочной установки, зависящий от геометрического расположения электродов;

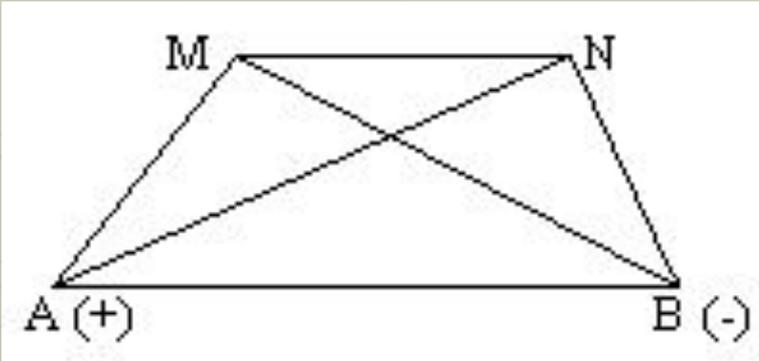
$\Delta U$  - разность потенциалов между электродами  $M$  и  $N$ ;

$I$  - сила тока в цепи  $AB$ .

Формула для потенциала поля в точке, удаленной от источника на расстояние  $x$ :

$$U = (I * \rho / 2\pi) * 1/x$$

## Типовая 4-х электродная электроразведочная установка



Разность потенциалов между электродами  $M$  и  $N$  согласно формуле будет равна:

$$\begin{aligned}\Delta U_{MN} &= U_M^{AB} - U_N^{AB} = \\ &= [(I \cdot \rho / 2\pi) \cdot (1/AM - 1/BM)] - [(I \cdot \rho / 2\pi) \cdot (1/AN - 1/BN)],\end{aligned}$$

Выносим  $I$  за скобки и вычисляем показатель  $\rho$ :

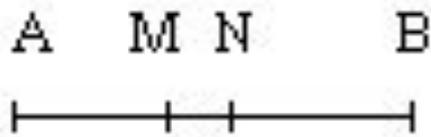
$$\rho = (\Delta U / I) \cdot 2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN) = (\Delta U / I) \cdot k,$$

где  $k = 2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)$

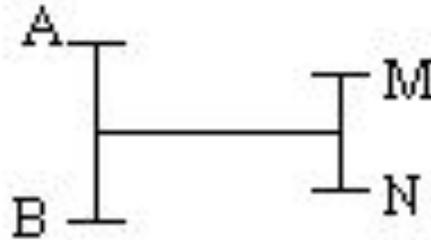
Как видно, коэффициент  $k$  зависит только от геометрических размеров между питающими и измерительными электродами и его сущность в компенсации уменьшения потенциала поля или его напряженности по мере удаления точек измерения от источника.

# Типы электроразведочных установок

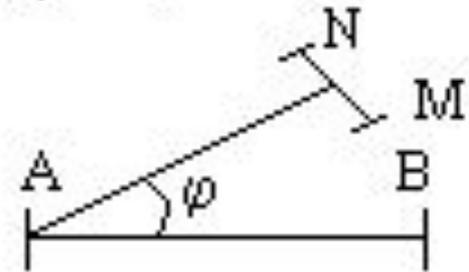
1) Осевая



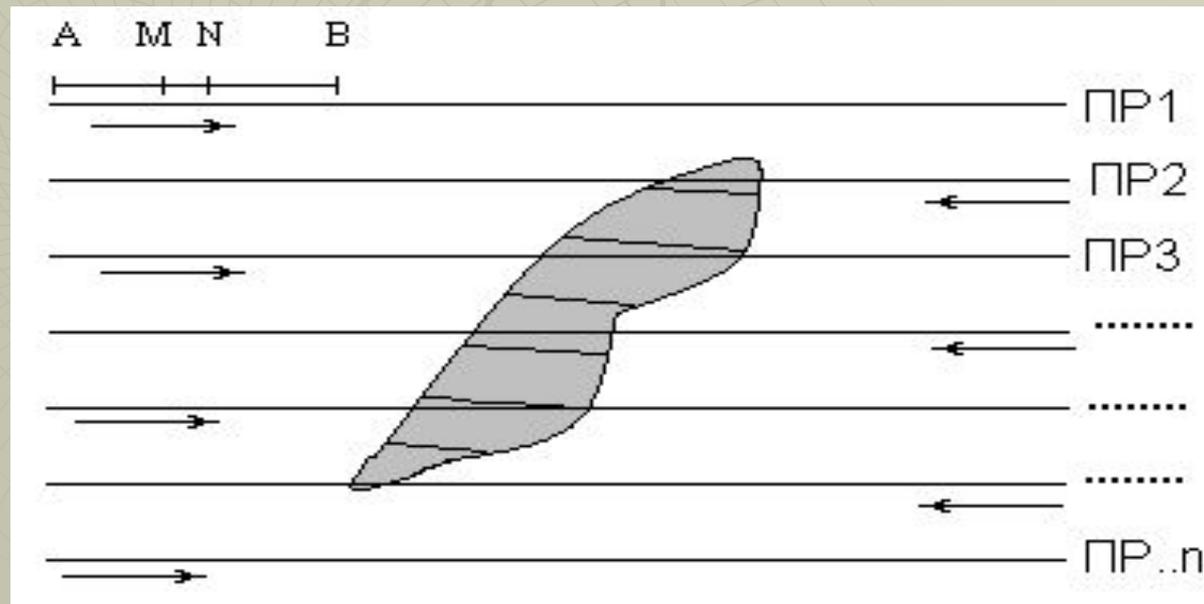
2) Экваториальная



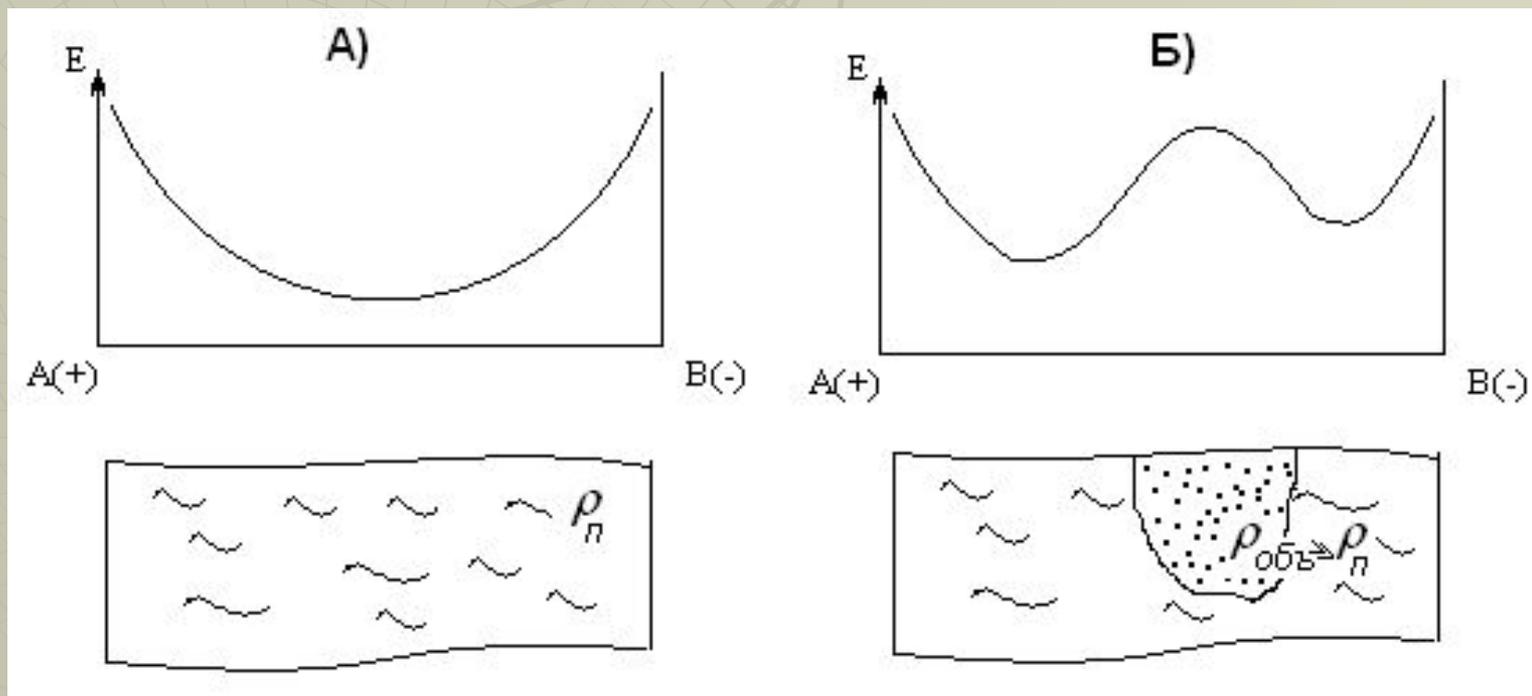
3) Радиальная



## Схема электропрофилирования челночным способом



Физической основой электропрофилирования является квазилинейное изменение напряженности поля  $E$  в центре линии  $AB$  (фрагмент А), следовательно при появлении в среде объекта, отличающегося по показателю  $\rho$ , этот объект проявится в виде аномалии (фрагмент Б).



Чем больше длина  $AB$  и меньше  $MN$ , тем глубинность исследований увеличивается. Мерой увеличения является коэффициент установки  $k_{AM_1N_1B} > k_{AMNB}$ .

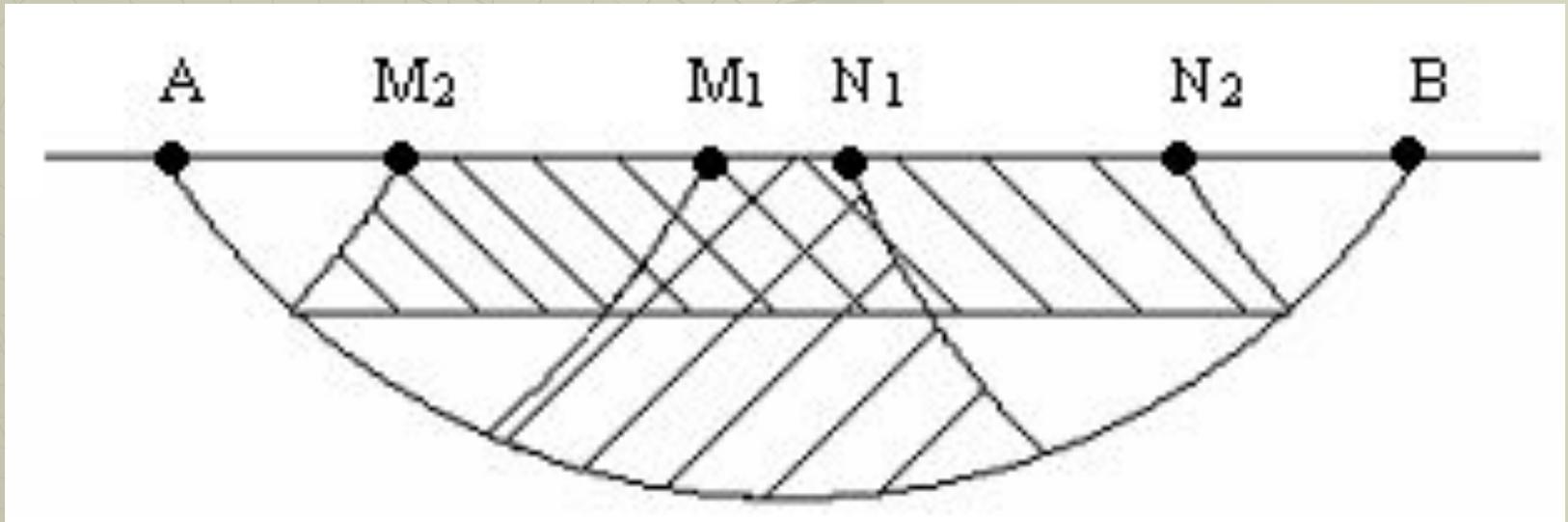
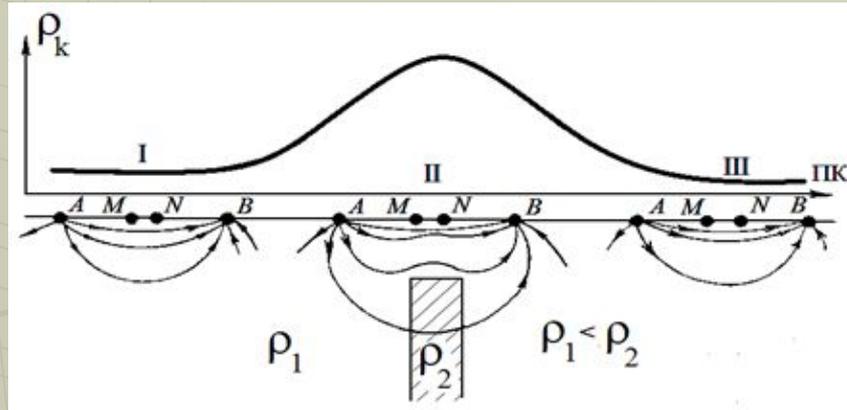
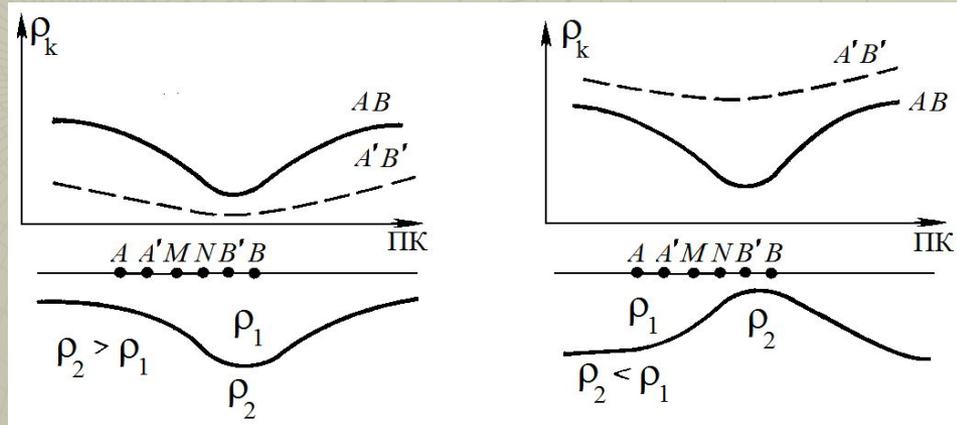


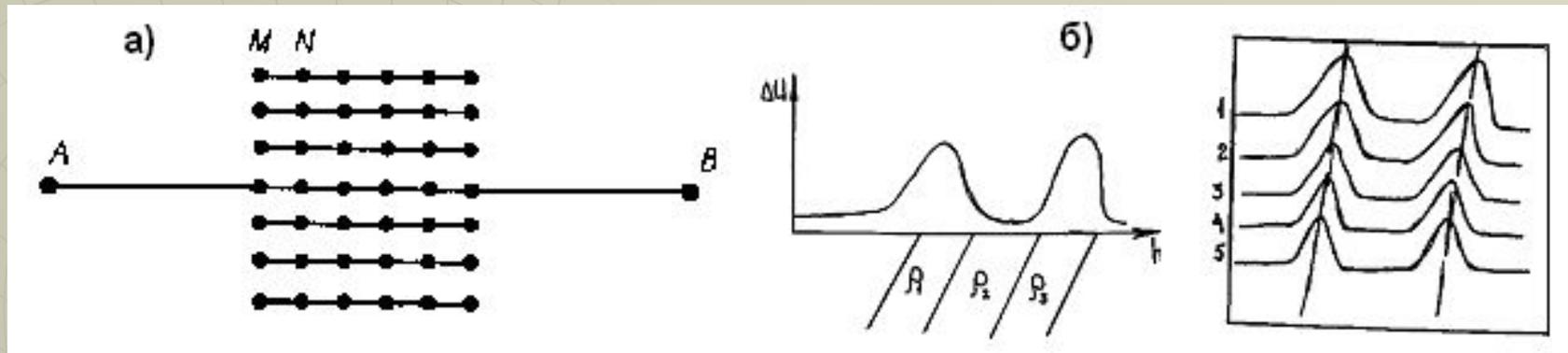
График  $\rho_k$ , полученный при профилировании симметричной установкой над плохо проводящим пластом (I – III положения установки)



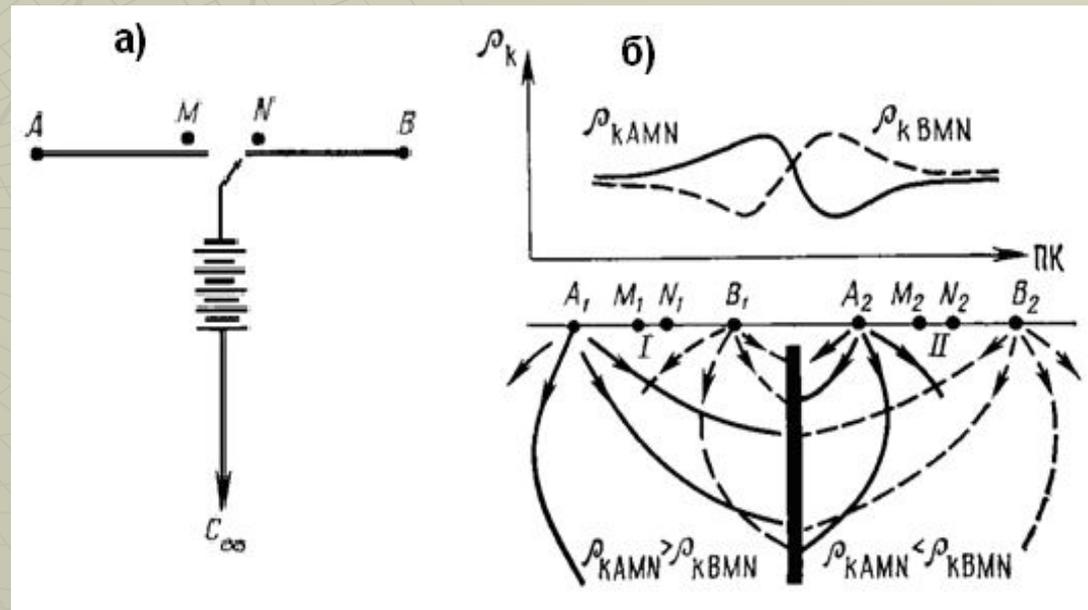
Графики  $\rho_k$  при электропрофилеировании установкой  $AA'MNB'B$  над синклиналью и антиклиналью



# Вид установки (а) и изображение результатов наблюдений (б) электрического профилирования методом СГ



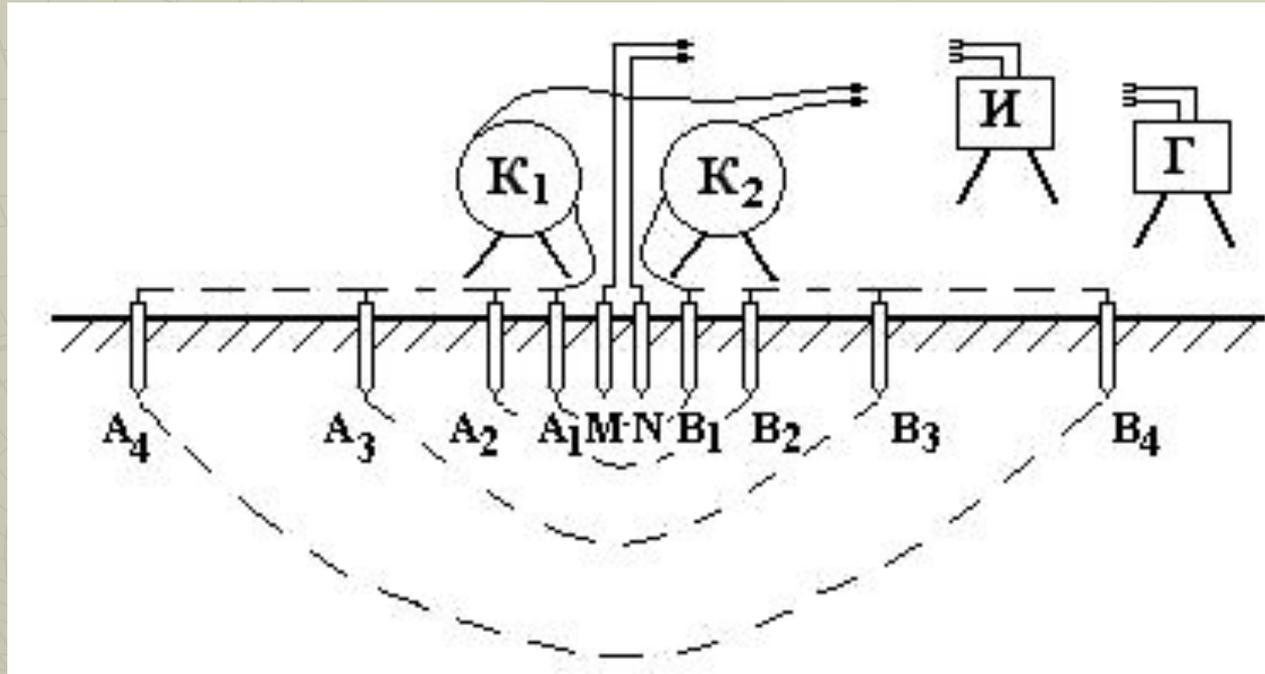
Вид установки (а) и изображение результатов наблюдений (б) электрического профилирования методом КЭП



**Электромагнитное зондирование** это вторая основная модификация электроразведки, цель которой изучение геологических разрезов на глубину в заданной точке. Другими словами это электробурение, инструментом которого служит электрический ток.. Наиболее распространены два способа: ВЭЗ - вертикальное и ДЭЗ - дипольное электрическое зондирование.

**ВЭЗ** осуществляется путем последовательного увеличения размеров питающей линии *AB*, когда каждый последующий разнос увеличивается по отношению к предыдущему в 1,5 - 2 раза, что соответствует логнормальному закону, т.е. чем больше разнос (длина линии *AB*), тем больше вклад вторичных зарядов формирующихся на границах разделов сред.

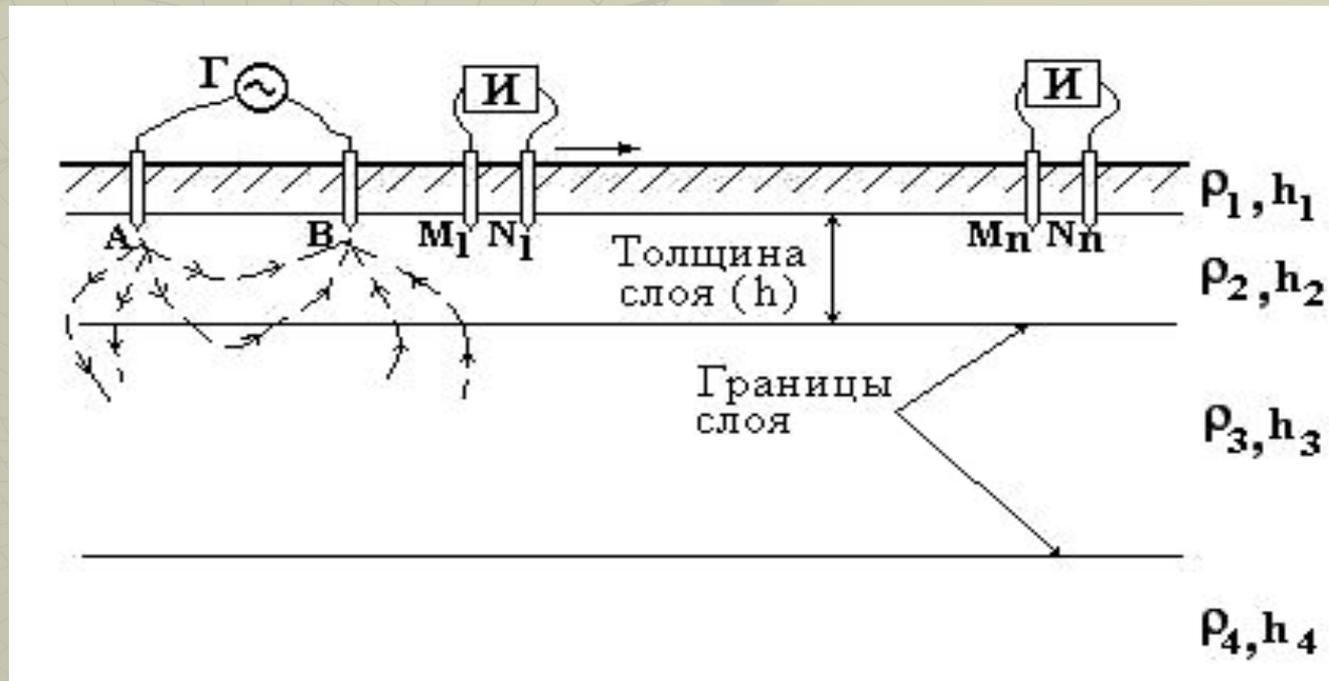
# Схема установки вертикального электрического зондирования



$K_1, K_2$  - катушки с проводом;  
Г - генератор; И - измеритель;  
A, B, M, N - питающие и измерительные электроды;  
пунктиром показаны токовые линии

**ДЭЗ** основан на последовательном удалении друг от друга питающего и измерительного диполей (линий  $AB$  и  $MN$ ), линейный размер которых меньше расстояния между их центрами. При этом, линия  $MN$  последовательно удаляется с заданным шагом от  $AB$

## Схема установки ДЭЗ



$\Gamma$  – генератор,  $\text{И}$  - измеритель,  $A, B, M, N$  – питающие и измерительные электроды,

## Лекция 8

Методы переменных (гармонически изменяющегося, неустановившегося и магнитотеллурического) электромагнитных полей.

Интерпретация результатов электроразведки, её место в комплексе работ при решении геологических задач

## **К переменным электромагнитным полям относятся:**

- Гармонически изменяющееся поле;
- Неустановившееся поле (поле переходных процессов);
- Магнитотеллурическое поле.

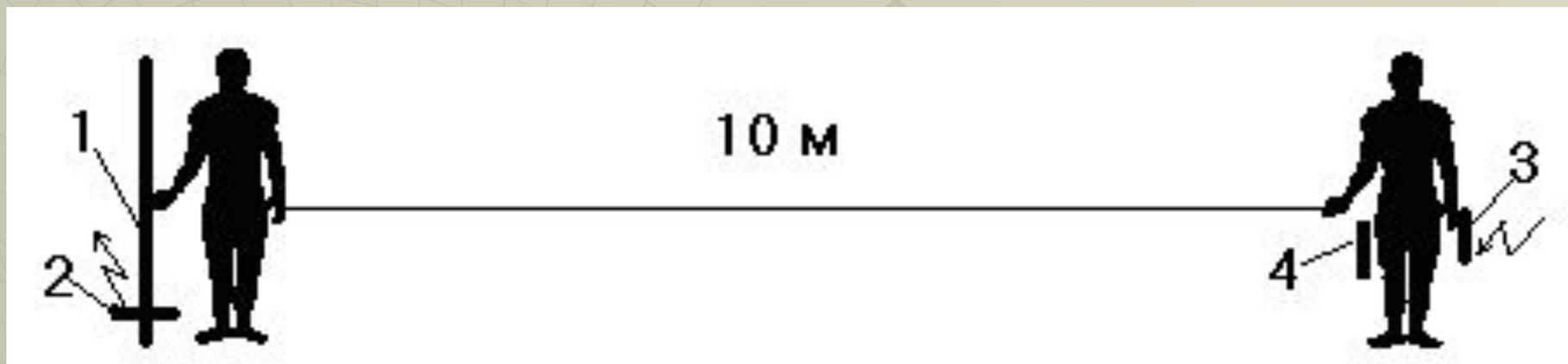
### **Гармонически изменяющееся поле**

Все элементы поля изменяются во времени по закону косинуса или синуса. Возбуждение (создание) поля производится или гальваническим (с помощью металлических электродов), или индуктивным (использование индукционных рамок и магнитных антенн) способами. Возможен смешанный способ, например гальваническое заземление - индуктивный приём). Исследования выполняются преимущественно в диапазоне частот от первых сотен герц до единиц мегагерц.

**Электропрофилирование на основе гармонически изменяющегося поля** включает не менее десятка методов и способов, которые основаны на установках индукционного или смешанного способов возбуждения и приема сигналов электромагнитного поля.

Широко известен метод дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП). Профилирование заключается в передвижении электроразведочной установки источник-приемник (И-П), где в качестве излучателя используется индукционная рамка, а в качестве приемника - магнитная антенна.

# Схема работы методом дипольного электромагнитного профилирования

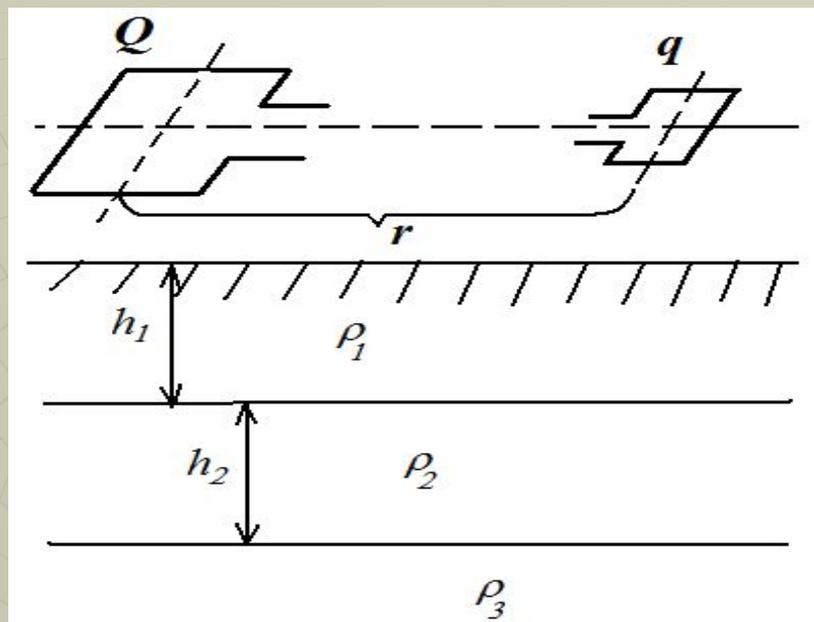


- ◆ 1 – генератор электромагнитного поля;
- ◆ 2 – передающая антенна;
- ◆ 3 – приемная антенна;
- ◆ 4 – измеритель электромагнитного поля.

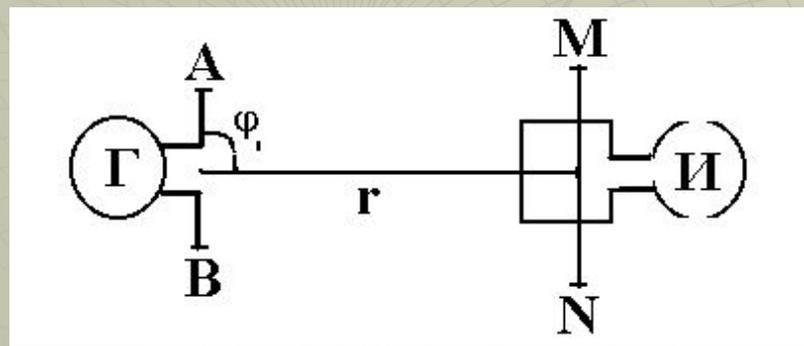
**Электрическое зондирование на основе гармонически изменяющегося поля выполняется двумя способами.**

**1. Радиально-частотного зондирование** основано по аналогии с **ВЭЗ** на последовательном изменении размера питающей линии на фиксированной частоте.

**2. Частотное зондирование (ЧЗ)** заключается в том, что расстояние между питающим и измерительным модулем является постоянным, а частота изменяется от высоких значений до инфранизких. Происходит “задавливание” вихревых электрических токов вглубь земли. Метод относится к разряду глубинных. Проникновение электрического тока на глубину происходит вследствие скин-эффекта, суть которого в том, что на высоких частотах токи концентрируются у поверхности Земли, а на низких, наоборот, все в большей мере проникают на глубину.



**Установка радиально-  
частотного  
зондирования**



**Установка частотного  
зондирования**

**Неустановившееся поле** – поле переходных процессов, возникающих при ступенчатом изменении силы тока в источнике. Постоянный электрический ток пропускают через возбуждающие устройства гальванического (линия  $AB$ ) или индукционного (петля) типа. В момент включения или выключения тока резко изменяется магнитная индукция, в проводящей среде образуется вихревое переменное электромагнитное поле, структура и частотная характеристика которого непрерывно изменяется во времени и в пространстве.

**Ранняя стадия** – в частотном спектре высокие гармоники, вихревые токи концентрируются у поверхности.

**Средняя стадия** – высокочастотная часть поля затухает, (энергия поглощается средой), возрастает роль низкочастотных гармоник.

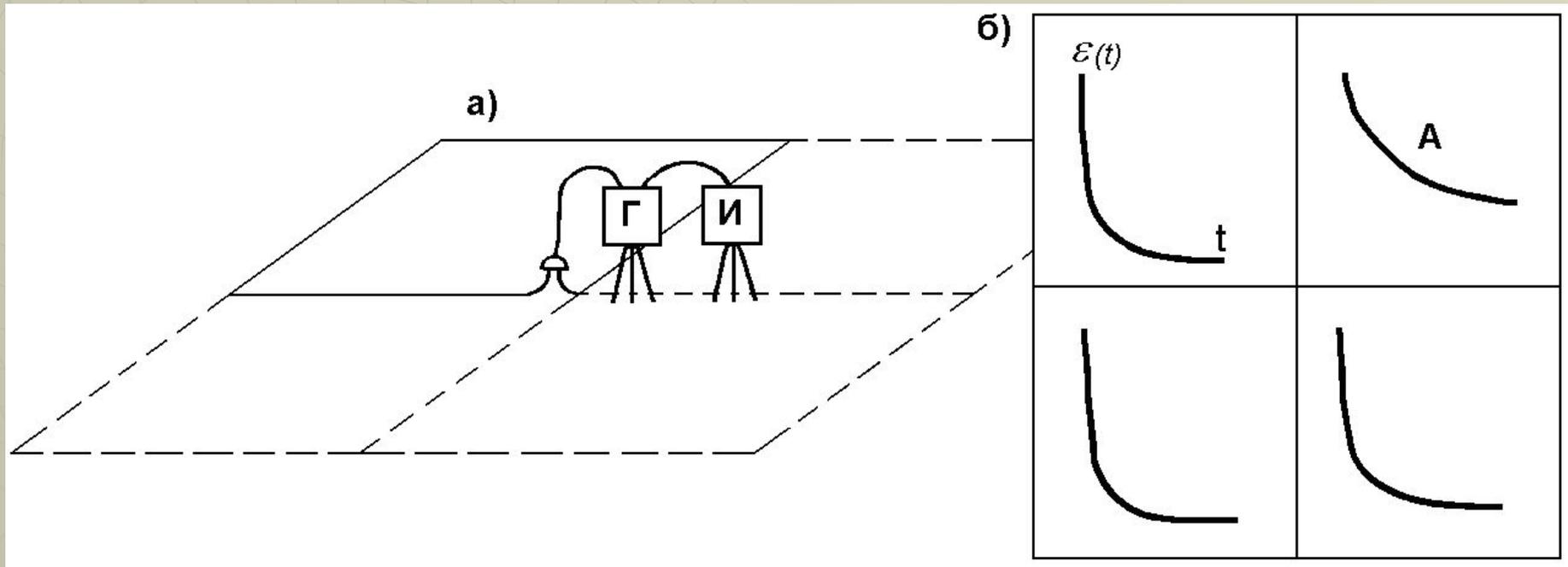
**Поздняя стадия** – поле выравнивается, токи равномерно распределяются в пространстве и их интенсивность зависит от суммарной продольной проводимости пород.

Основной параметр неустановившегося электрического поля – время ( $t$ ).

**Модификации ЭП** носят название методов переходных процессов (МПП), основанных преимущественно на петлевых установках (индукционные рамки возбуждения и приема сигналов). Измерения выполняют на всех временных задержках (см. след. слайд).

**Модификации ЭЗ** основаны на явлении проникновения вихревых токов во все более глубокие горизонты с течением переходного процесса. Методы относятся к разряду глубинных и разделяются на зондирование становлением поля в дальней (ЗСД) и ближней (ЗСБ) зонах.

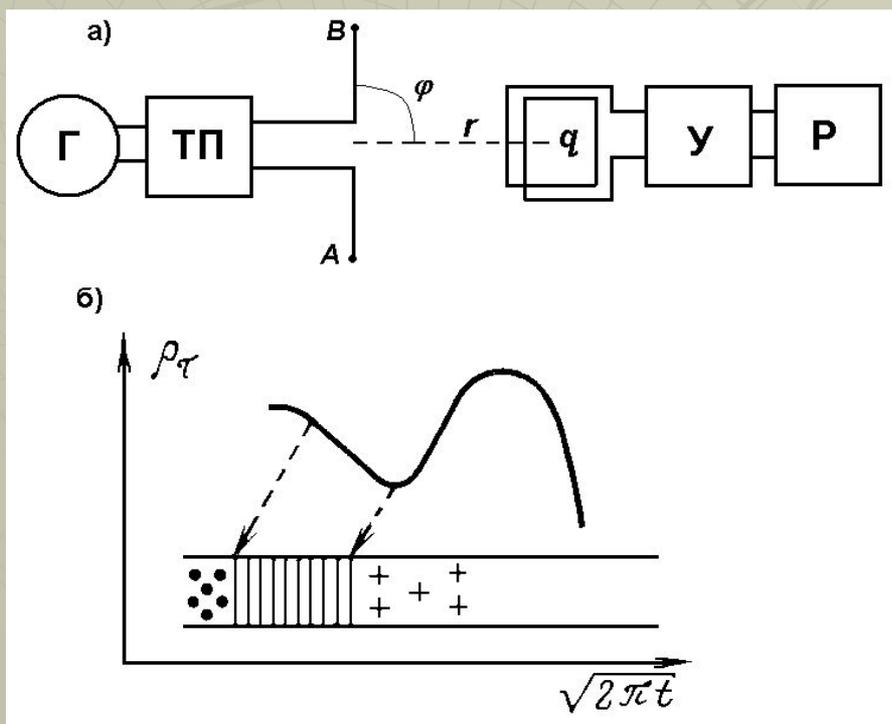
# Схема съемки для однопетлевого варианта МПП (а) и план отработанных петель с нанесенными переходными характеристиками (б)



А – переходная характеристика над аномальной зоной,  
Г – генератор, И – измеритель

**ЗСД** выполняют в дальней зоне, где преобладают линейные процессы распределения электромагнитного поля. Неустановившееся поле регистрируют в режиме включения тока. Применяется экваториальная установка, состоящая из питающего диполя  $AB$  (гальваническое возбуждение) и приемного контура  $q$  (индуктивный прием) при расстоянии между ними до 10-15 км. Разнос  $AB-q$  должен в два и более раз превышать глубину залегания основного опорного горизонта.

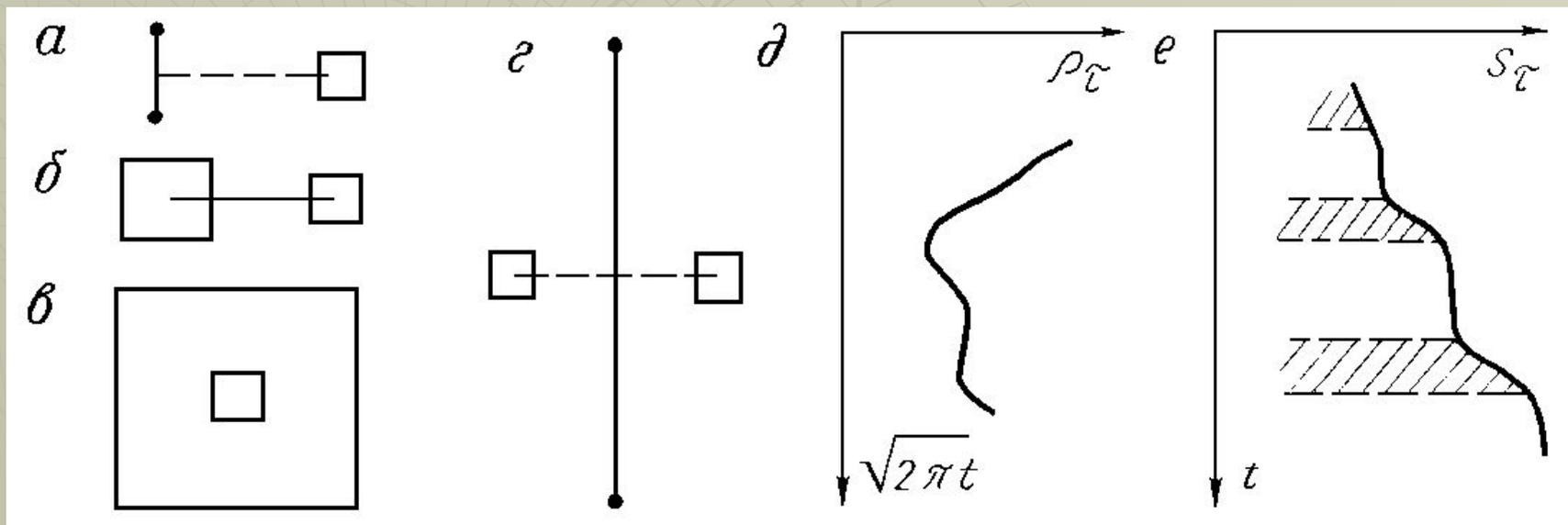
**Установка ЗСД (а), кривая зондирования (б)**



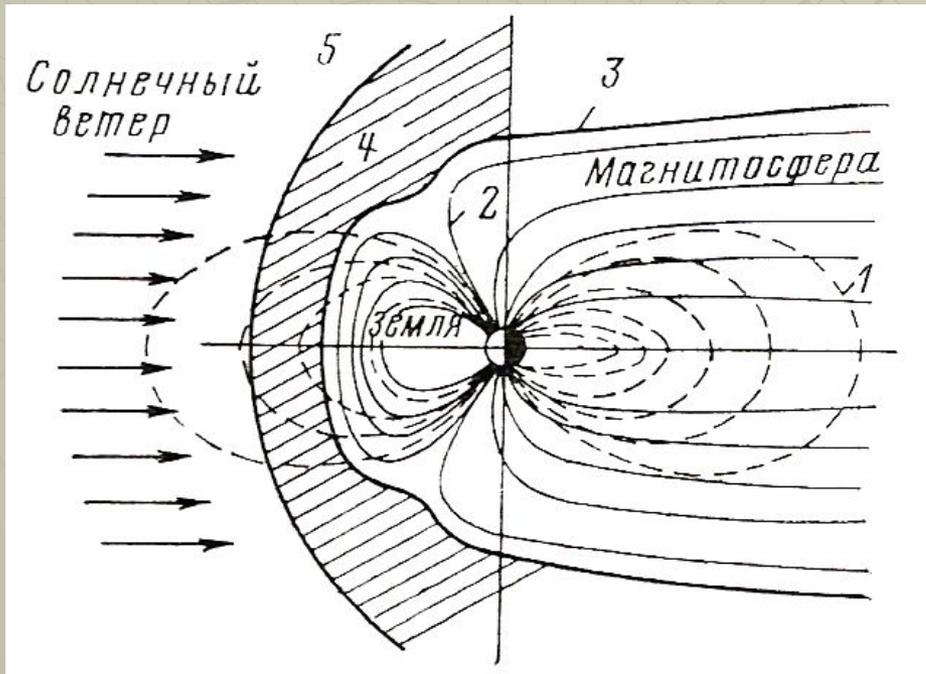
$У$  – усилитель,  
 $Р$  – регистратор,  
 $q$  – приемная  
петля

**ЗСБ** основано на изучении неустановившегося поля в ближней зоне, когда преобладают процессы поздней стадии. Поле «выравнивается» и равномерно распределяется в разрезе. Наблюдения выполняют после выключения тока. Используют различные установки. По графикам  $\rho_T$  и  $S_T$  детализируют геоэлектрический разрез.

Схемы установок ЗСБ: а) диполь-петля; б) петля-петля; в) петля в петле; г) длинный кабель-петля; д),е) кривые кажущегося сопротивления  $\rho_T$  и кажущейся проводимости  $S_T$



**Магнитотеллурическое поле** - это естественное электромагнитное поле Земли, наблюдаемое на больших регионах в виде вариаций электрических и магнитных компонент. Источники первичного поля зарождаются в магнитосфере и ионосфере Земли под воздействием корпускулярного излучения солнца. У поверхности земли формируются на ограниченном пространстве квазиплоские волны, падающие по вертикали. Они возбуждают вихревые токи, глубина проникновения которых определяется частотой колебаний или периодом вариаций.



**Деформация геомагнитного поля под действием солнечного ветра и формирование переходной зоны**

- 1 - силовые линии магнитного поля диполя;
- 2 - силовые линии геомагнитного поля;
- 3 - граница магнитосферы;
- 4 - переходная зона;
- 5 - область занятая солнечным ветром

В электроразведке методами МТП используют короткопериодные колебания (КПК). Изучают 5 компонент магнитотеллурического поля:  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ . Ось  $X$  – вдоль простирания объектов.

Об источнике поля сведений нет, поэтому используется относительный параметр – импеданс:  $Z=E/H$ .

Основные импедансы:

$$\frac{E_x}{H_y} = Z_{xy}, \quad \frac{E_y}{H_x} = Z_{yx}$$

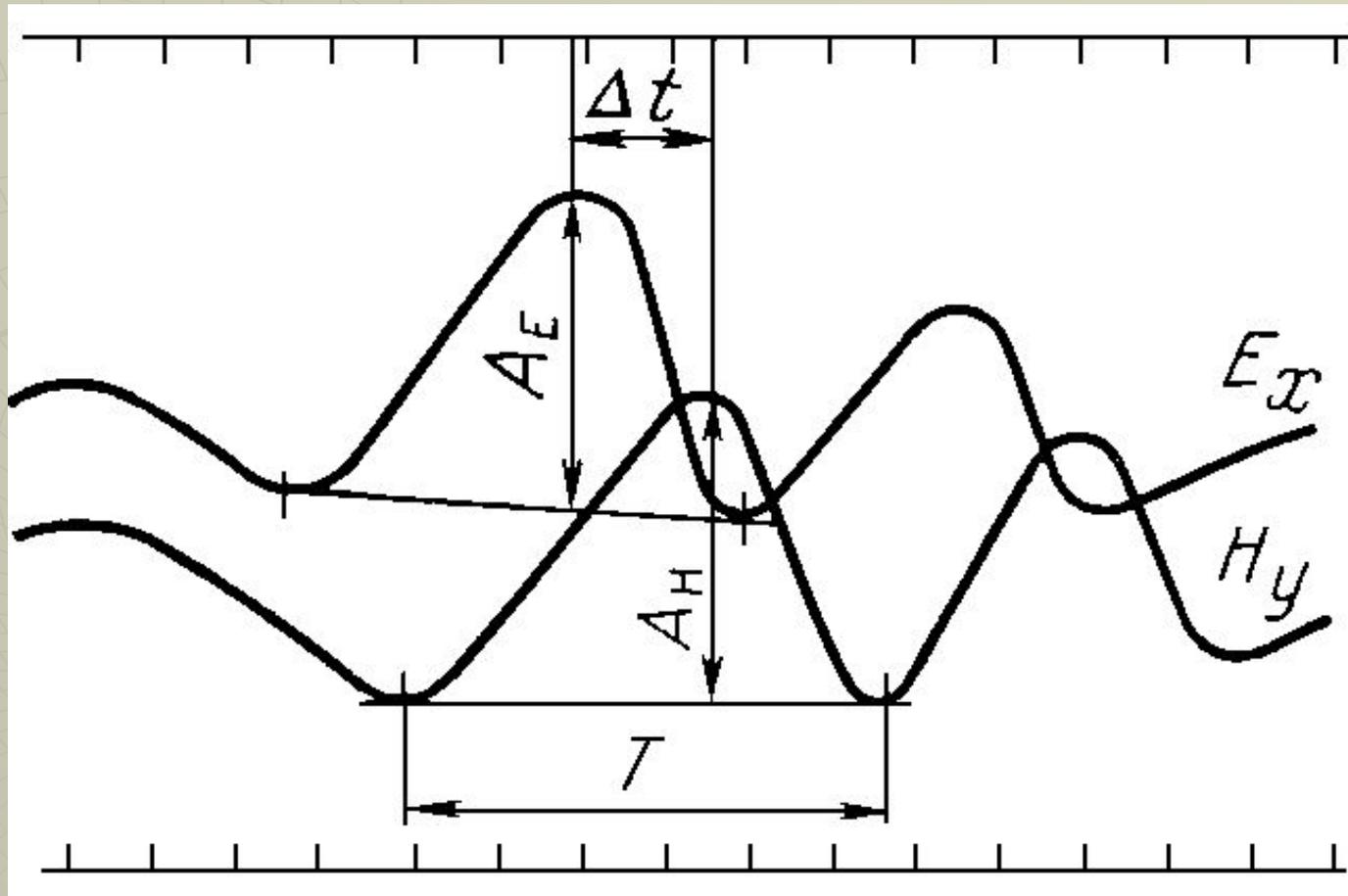
Кажущееся удельное электрическое сопротивление  $\rho_T$  и фазу импедансов  $\varphi_T$  рассчитывают по формулам:

$$\rho_{Txy} = a \cdot |Z_{xy}|^2 \quad \rho_{Tyx} = b \cdot |Z_{yx}|^2 \quad \varphi_T = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ$$

$a$  и  $b$  коэффициенты, зависящие от геоэлектрических условий

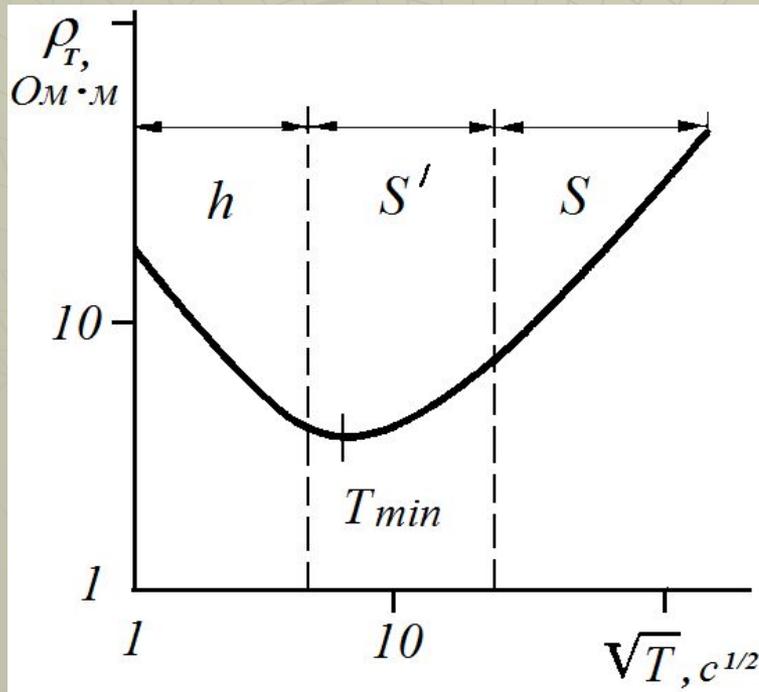
Значения  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $T$  и  $\Delta t$  снимают с графиков короткопериодных вариаций

# Фрагмент записи короткопериодных вариаций



**Магнитотеллурическое профилирование (МТП)**, заключается в измерении взаимно перпендикулярных составляющих  $E_x, H_x, E_y, H_y$  электрического и магнитного полей на земной поверхности. Диапазон периодов  $T$  составляет 10–100 с, что соответствует квазигармоническим колебаниям с частотой  $f$ , равной 0.1–0.01 Гц. Глубинность оценивается по формуле:

$$Z_{\text{эфф}} \approx 0.1 \cdot \lambda_{\text{эфф}} \approx 0.1 \cdot \sqrt{10 \cdot \rho_l / f}$$



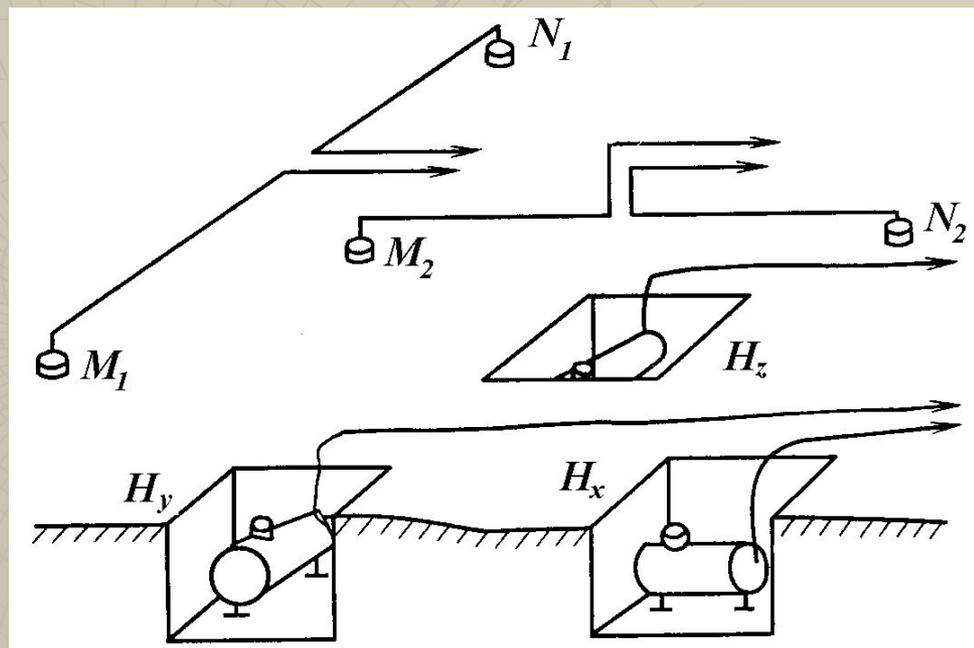
**Кривая рекогносцировочного магнитотеллурического зондирования**

$S'$  – расширенный диапазон  $S$

Диапазон  $S$  используют для вычисления суммарной продольной проводимости  $S$  толщи пород до опорного электрического горизонта, например фундамента, а диапазон  $h$  для определения глубины горизонта с  $\rho_2$

Сущность магнитотеллурического зондирования (МТЗ) заключается в одновременной регистрации компонентов магнитотеллурического поля  $E_{x'}$ ,  $E_{y'}$ ,  $H_{x'}$ ,  $H_{y'}$ ,  $H_z$  на поверхности земли и последующем спектральном анализе результатов измерений. Глубина проникновения тока зависит от периода вариаций  $T$

### Схема установки датчиков поля при МТЗ

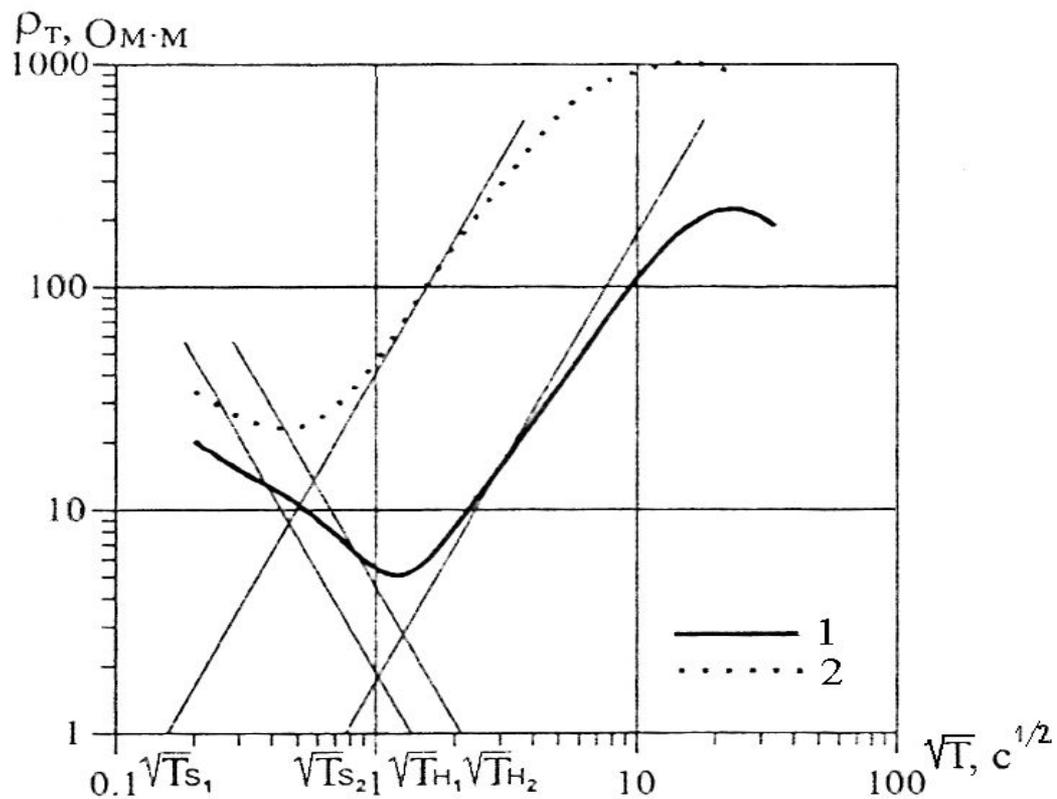
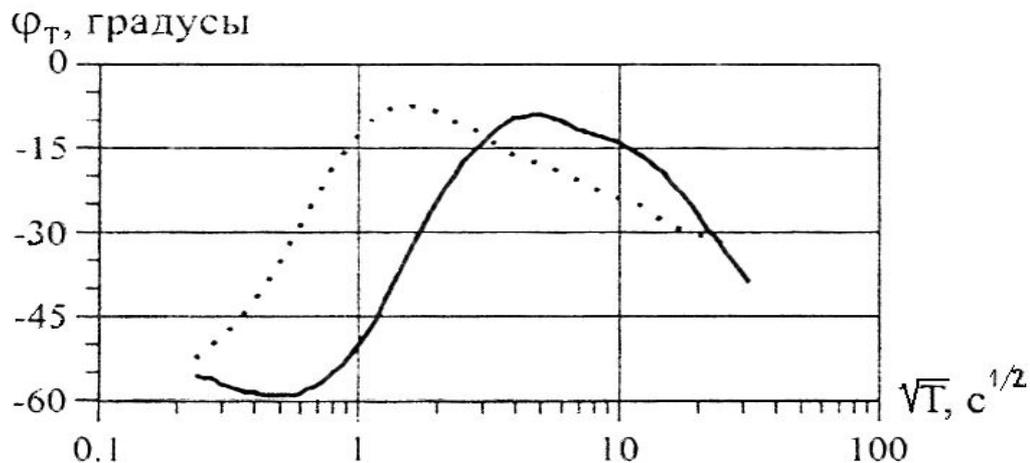


## Последовательность обработки результатов МТЗ:

- Выделение гармонических составляющих  $E_x, E_y, H_x, H_y, H_z$  для заданной последовательности периодов  $T$ ;
- Определение сдвига фаз между взаимно перпендикулярными составляющими  $E_x, H_y, E_y, H_x$ ;
- Вычисление кажущихся сопротивлений:

$$\rho_{Txy} = \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \rho_{Tyx} = \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2$$

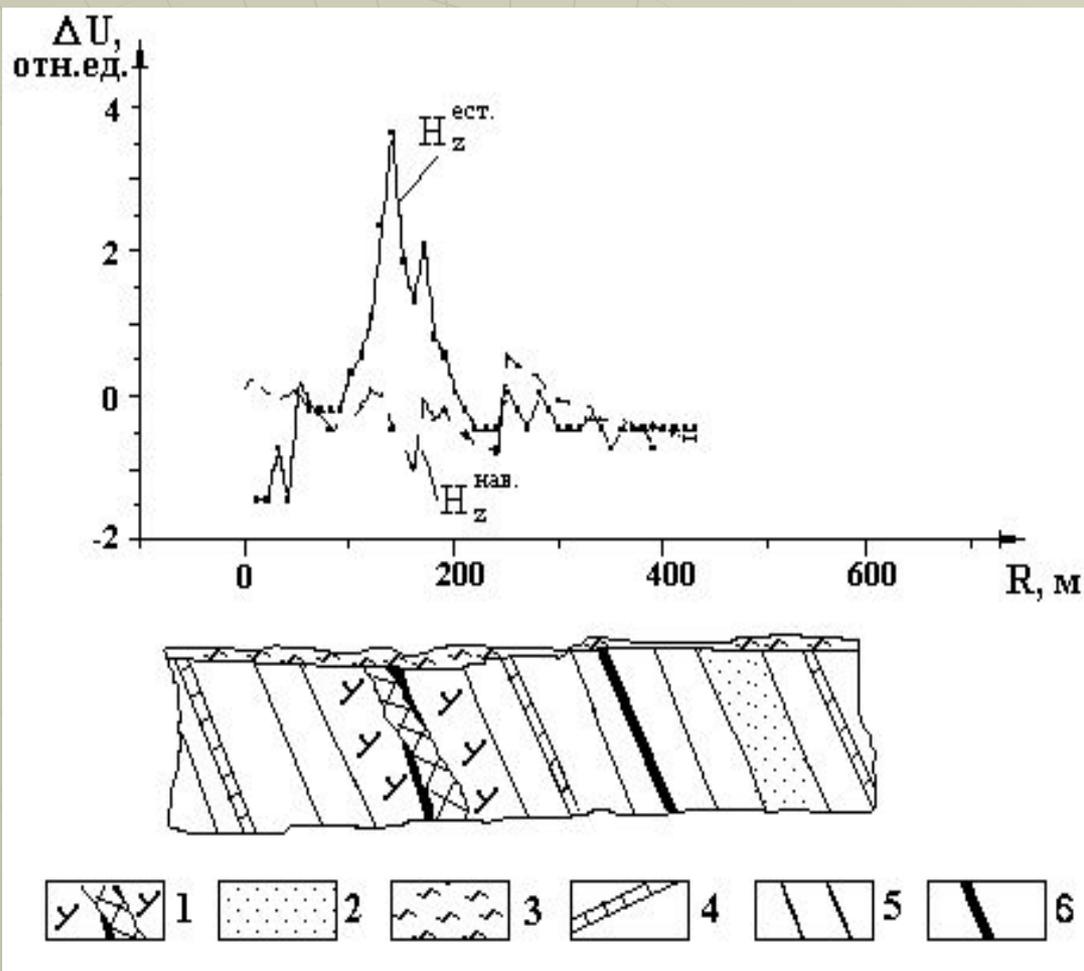
- Построение кривых МТЗ с последующей качественной и количественной интерпретацией.



**Типичные фазовые и амплитудные кривые МТЗ:**

1 – на склоне Московской синеклизы,  
 2 – на склоне Воронежской антеклизы

**Интерпретация данных ЭП** преимущественно качественная. Результаты оформляют в виде графиков характерных эффективных параметров.

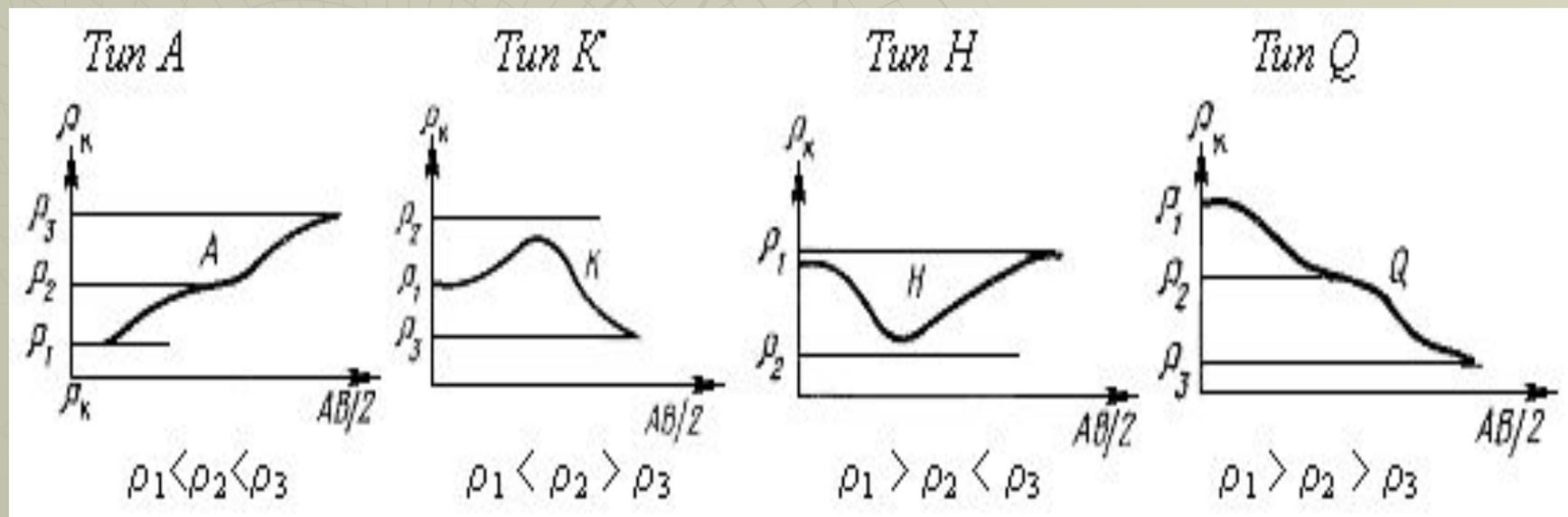


**Графики ДЭМП над согласным тектоническим нарушением, развитым в угленосной толще**

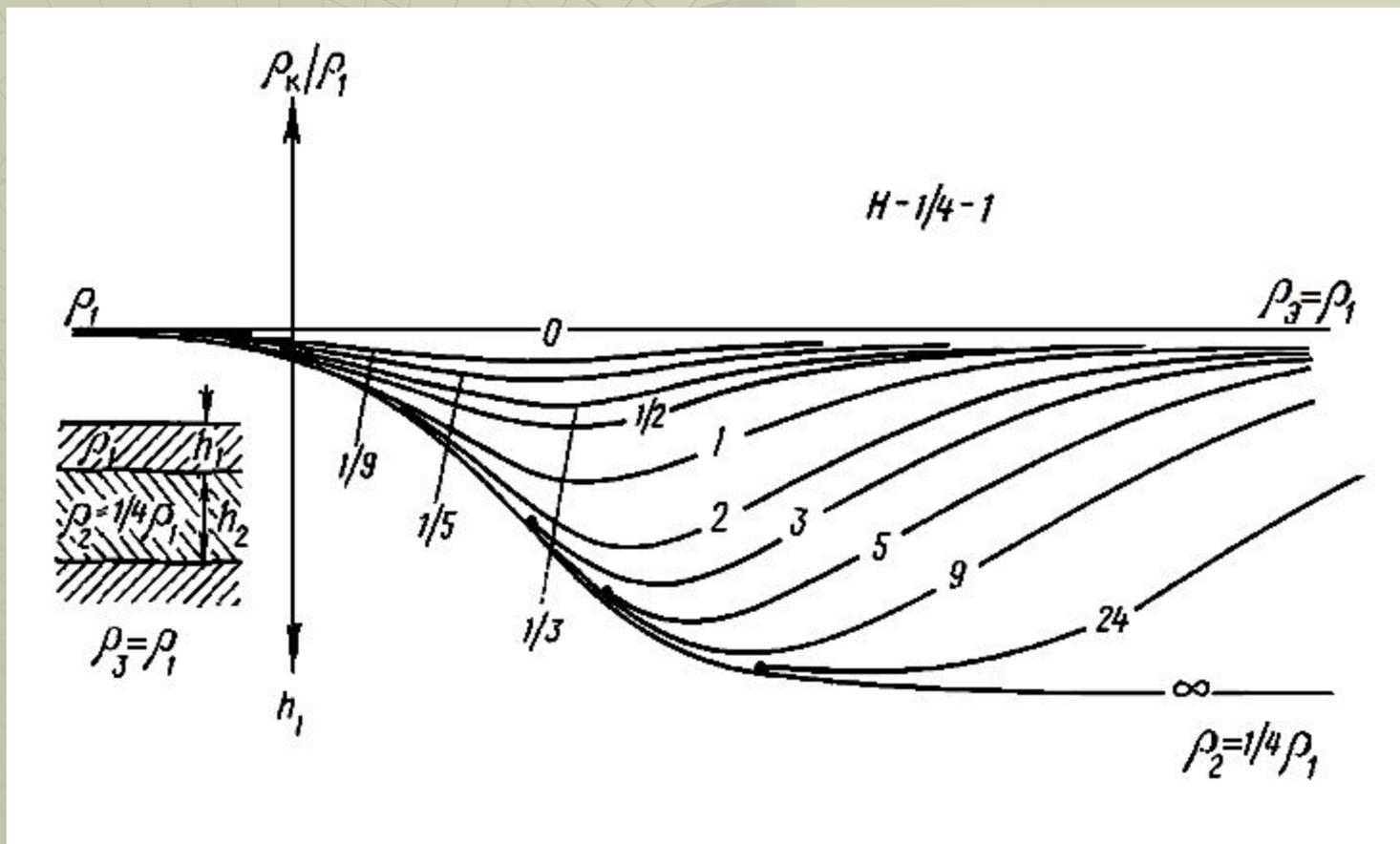
- 1 - тектонически нарушенная зона,
- 2 - песчаник,
- 3 - покровные отложения,
- 4 - известняк,
- 5 - аргиллито-алевролитовая толща,
- 6 - уголь

**Интерпретация данных ЭЗ** включает анализ кривых зондирования, построение геоэлектрического разреза и трансформацию геоэлектрического разреза в геологический.

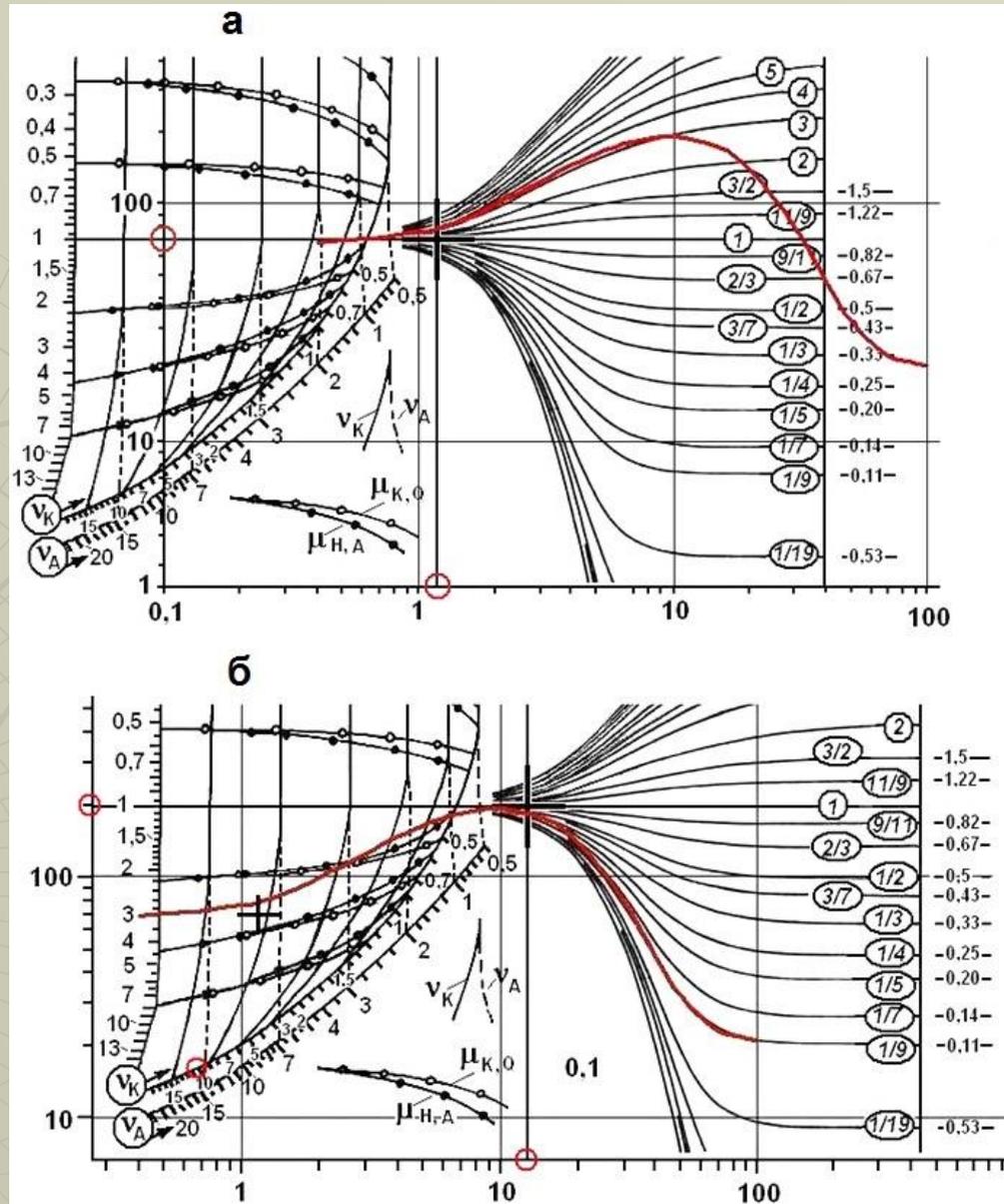
Основной рабочей моделью служит трехслойный геоэлектрический разрез, согласно которому все кривые зондирования разделяются на четыре типа:



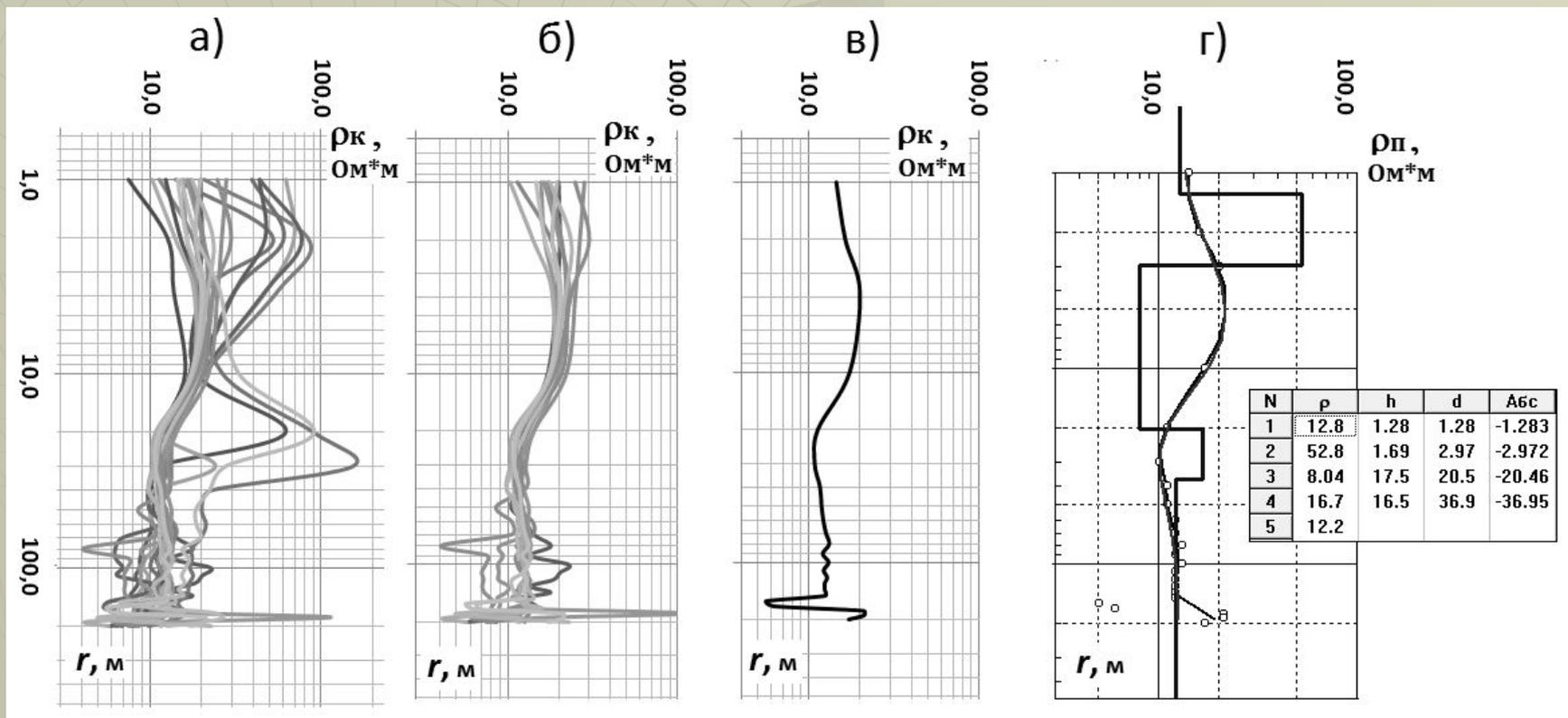
Семейства теоретических кривых ВЭЗ, сведенные на одном бланке, называются **палетками**. По ним интерпретация выполняется вручную. Процесс основан на методе подбора, т.е. сравнении палеточных кривых с наблюдаемыми.



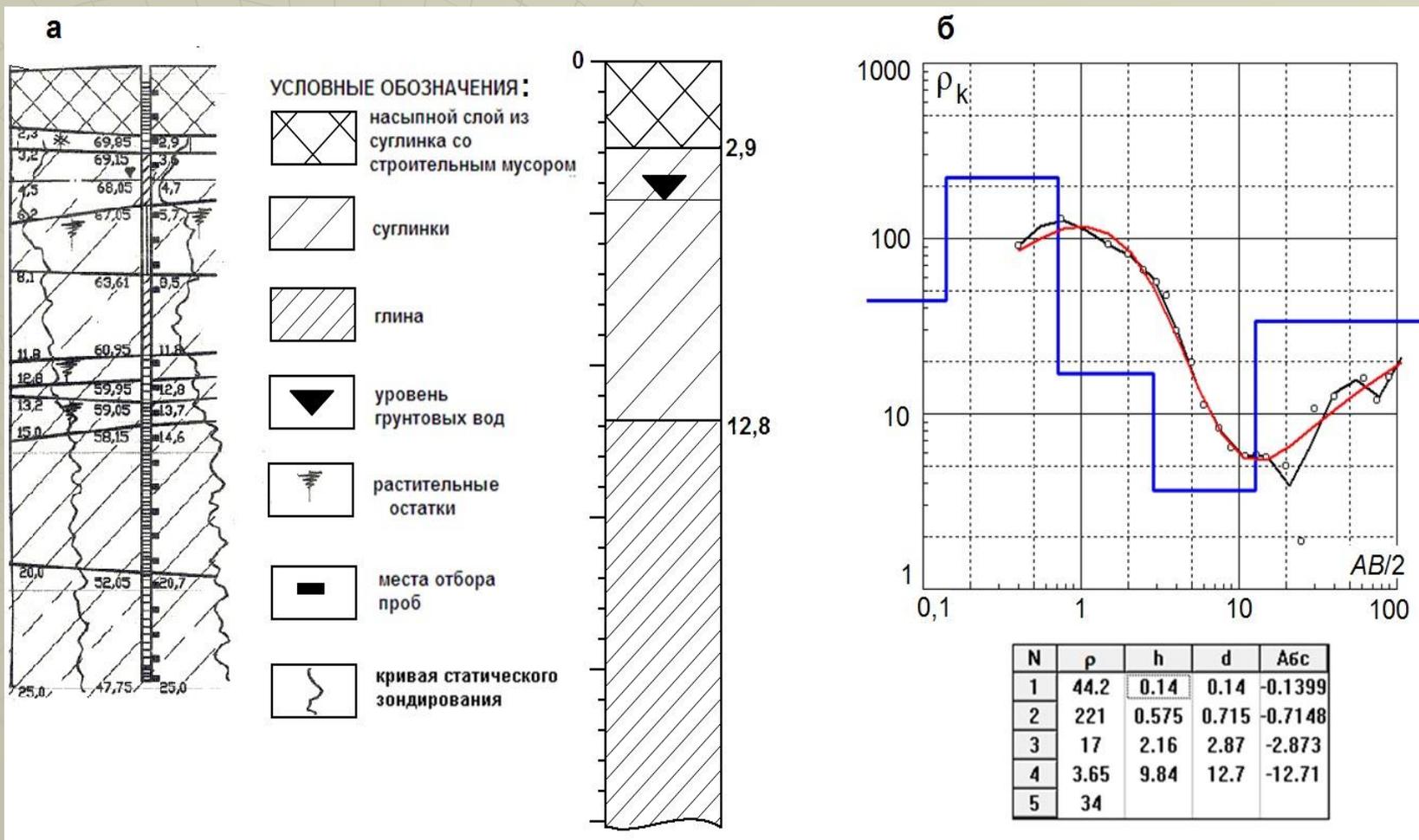
Пример ручной (палеточной) интерпретации кривых ВЭЗ а,б - совмещение наблюдаемой и теоретической кривых для первых двух (а) и последующих двух (б) слоев разреза



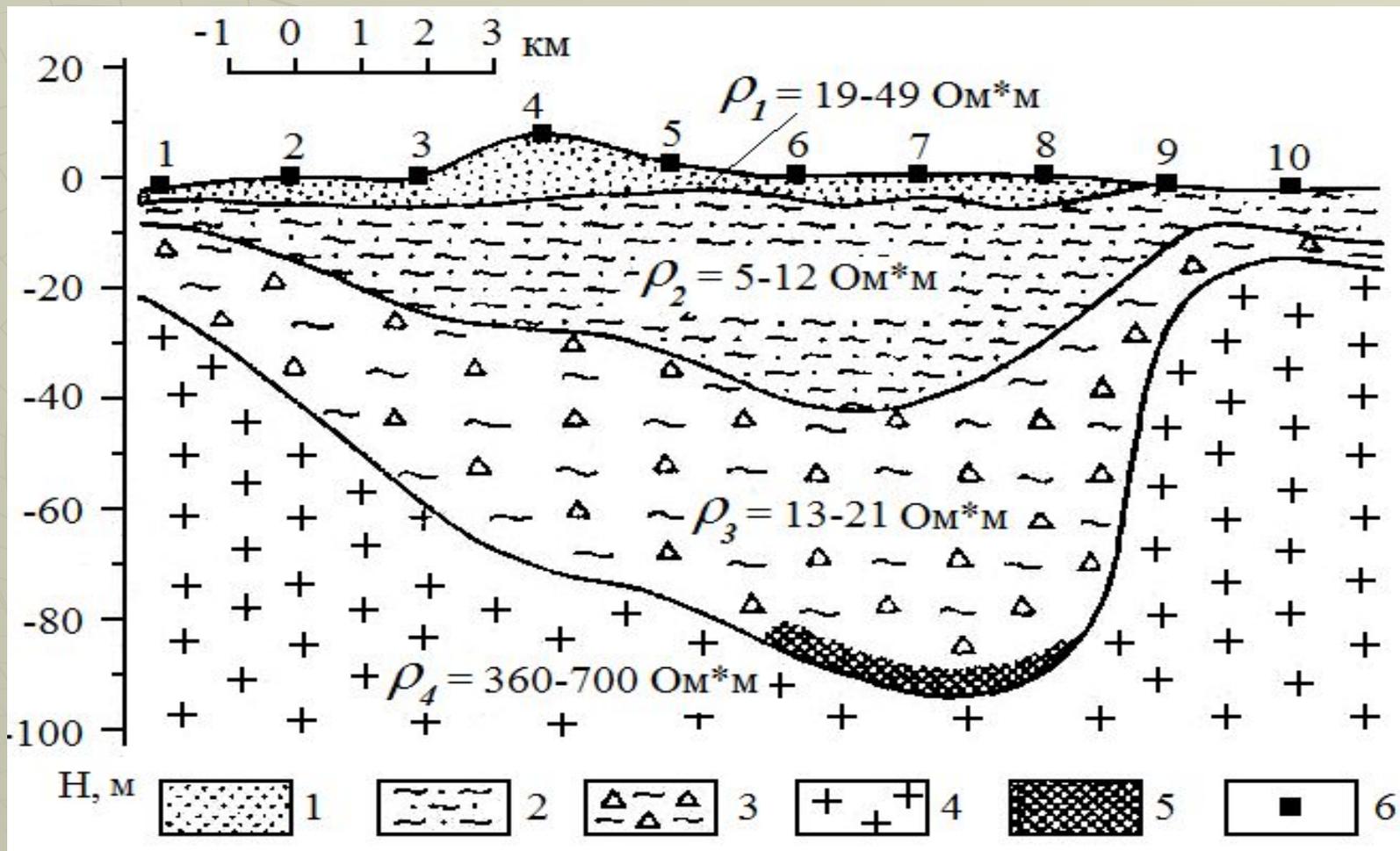
Имеются и компьютерные программы интерпретации данных (1D и 2D). Их использование предусматривает диалоговый (интерактивный) режим с обязательным получением стартовой кривой (фрагмент В).



# Геологический и формализованный разрезы грунтовой толщи на эталонной площадке по ул. Зорге в г. Ростове-на-Дону (а) и результат компьютерной интерпретации кривой ВЭЗ в программе IPI2Win (б)

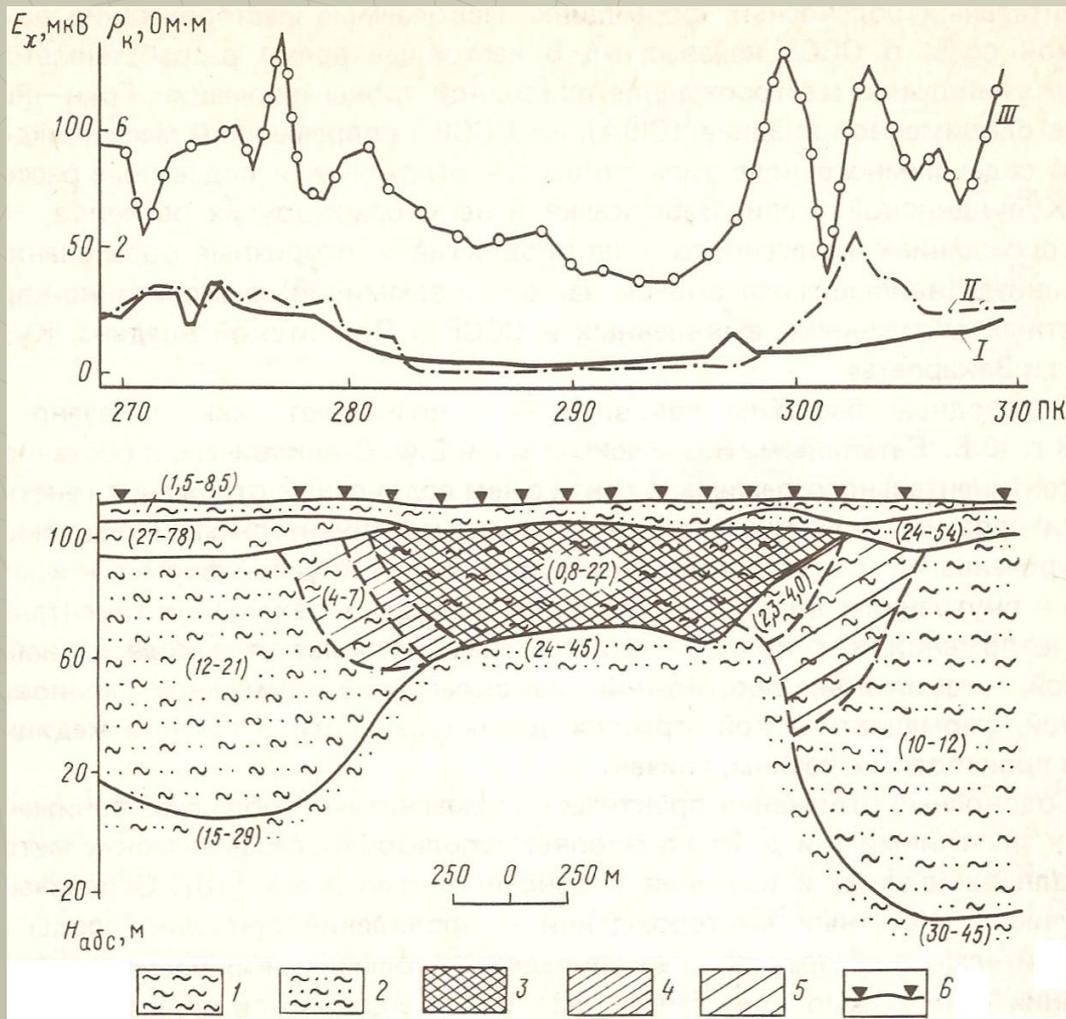


# Пример построения геоэлектрического разреза



1 - пески, 2 - песчано-глинистые отложения, 3 - глинистый конгломерат, 4 - гранит, 5 - бокситы, 6 - точки ВЭЗ

# Пример построения геоэлектрического разреза по данным ВЭЗ с привлечением результатов электропрофилирования СЭП и РадиоКип



1 — глины,  
 2 — песчано-глинистые  
 отложения,  
 3,4,5 — зоны  
 распространения  
 подземных вод с  
 различной  
 минерализацией,  
 6 — точки ВЭЗ.  
 I, II- графики СЭП при  
 АВ=200 м и 50 м в  
 значениях  $\rho_k$ ,  
 III — график поля дальних  
 радиостанций (метод  
 РадиоКип) в значениях  $E_x$

## Лекция 9

Физические и геологические  
основы сейсморазведки.

Сейсмоволновые  
характеристики горных пород

**Сейсморазведка** – раздел разведочной геофизики, в котором изучаются поля упругих деформаций происходящих в геологических средах вследствие механических воздействий. Это взрывы, удары, техногенные вибрации, тектонические процессы, в частности землетрясения. Как и в других разделах геофизики поля разделяются на искусственные, используемые преимущественно в сейсморазведке, и естественные, которые изучают в основном в сейсмологии.

**Упругость** - это свойство природных объектов сопротивляться изменению их объема и формы вследствие механических напряжений. Параметрами упругости являются Модуль Юнга  $E$  и Коэффициент Пуассона  $\nu$ . Модуль  $E$  измеряется в Паскалях (Па) и выражается формулой:

$$E = P_x / e_x$$

$P_x$  - приложенное напряжение по заданному направлению  $x$ ,  $e_x$  - деформация от приложенного напряжения

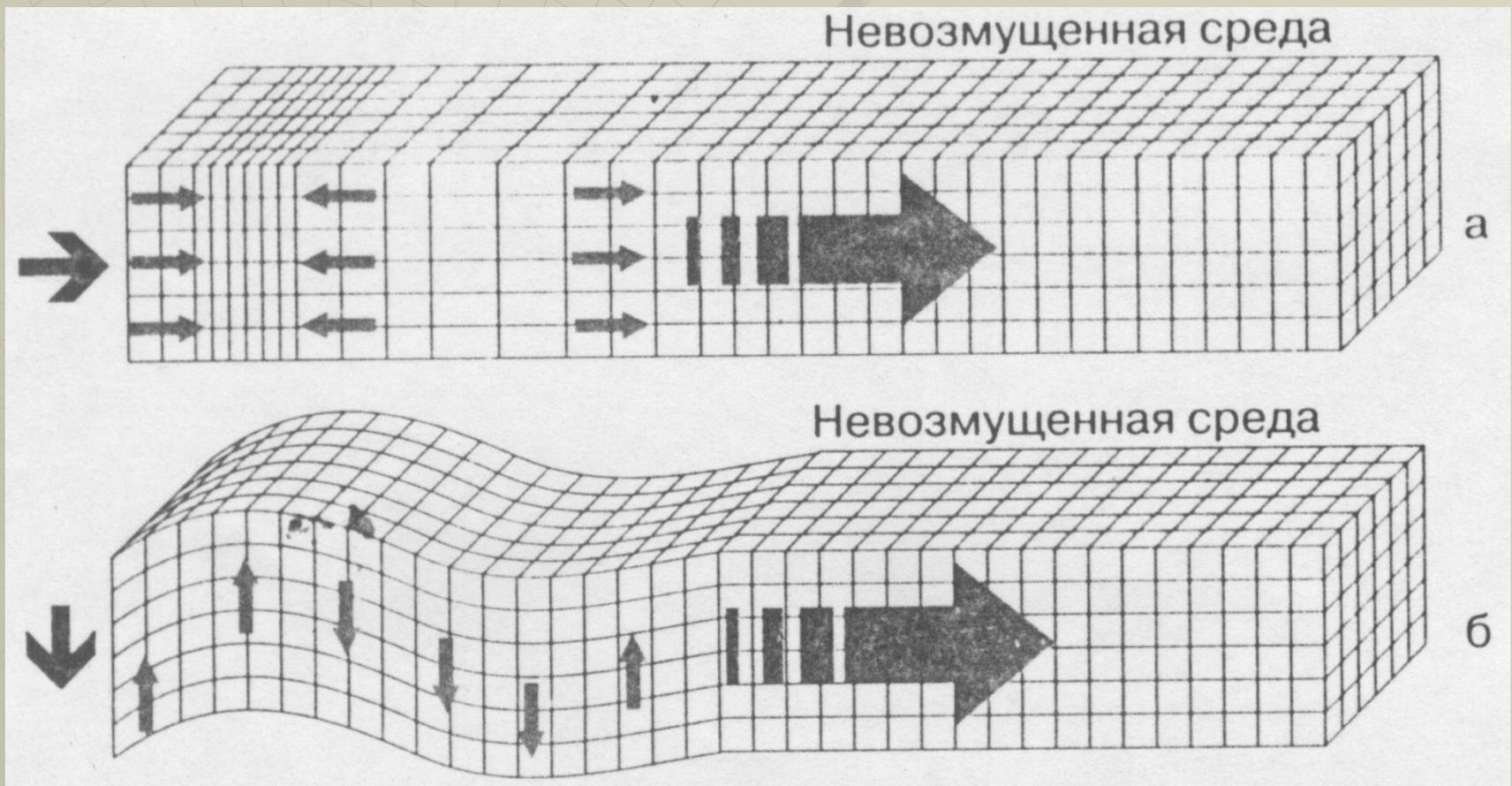
Коэффициент  $\nu$  выражается отношением меры растяжения-сжатия геологических объектов к их удлинению при приложении растягивающей нагрузки и является безразмерной величиной.

$$\nu = e_y / e_x$$

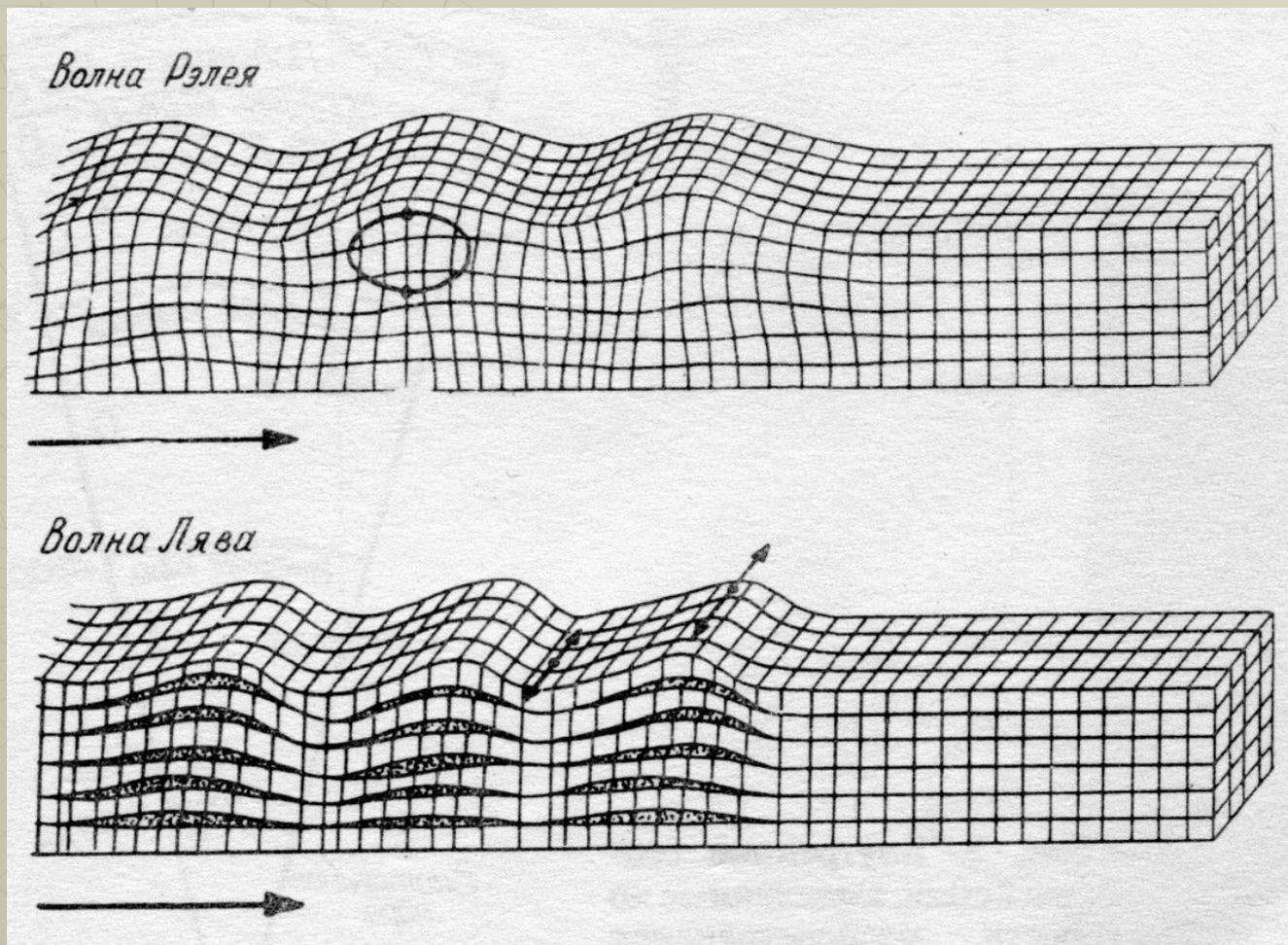
В результате упругих деформаций в природных объектах возникают упругие волны, основными из которых являются **продольные**  $V_p$  и **поперечные**  $V_s$ . Эти волны называются объемными. Продольные волны возникают вследствие процессов расширения-сжатия поперечные - процессов сдвига.

$P$  – волны – волны растяжения – сжатия

$S$  – волны – волны сдвига (колебания в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны)



На свободной поверхности возникает особый вид колебаний, называемый поверхностными волнами (волны Релея и Лява)



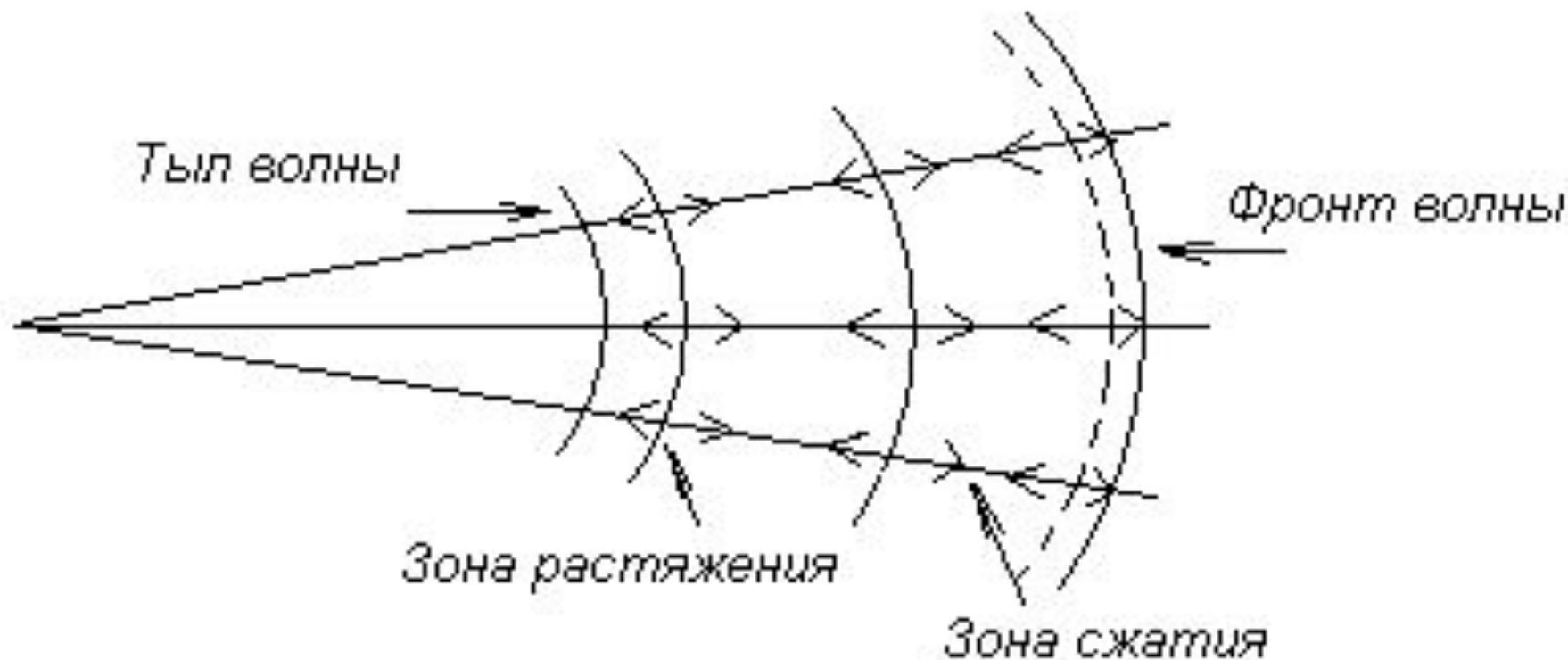
Продольные и поперечные волны связаны с показателями упругости следующими соотношениями:

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\delta(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\delta \cdot (1 + \nu)}}$$

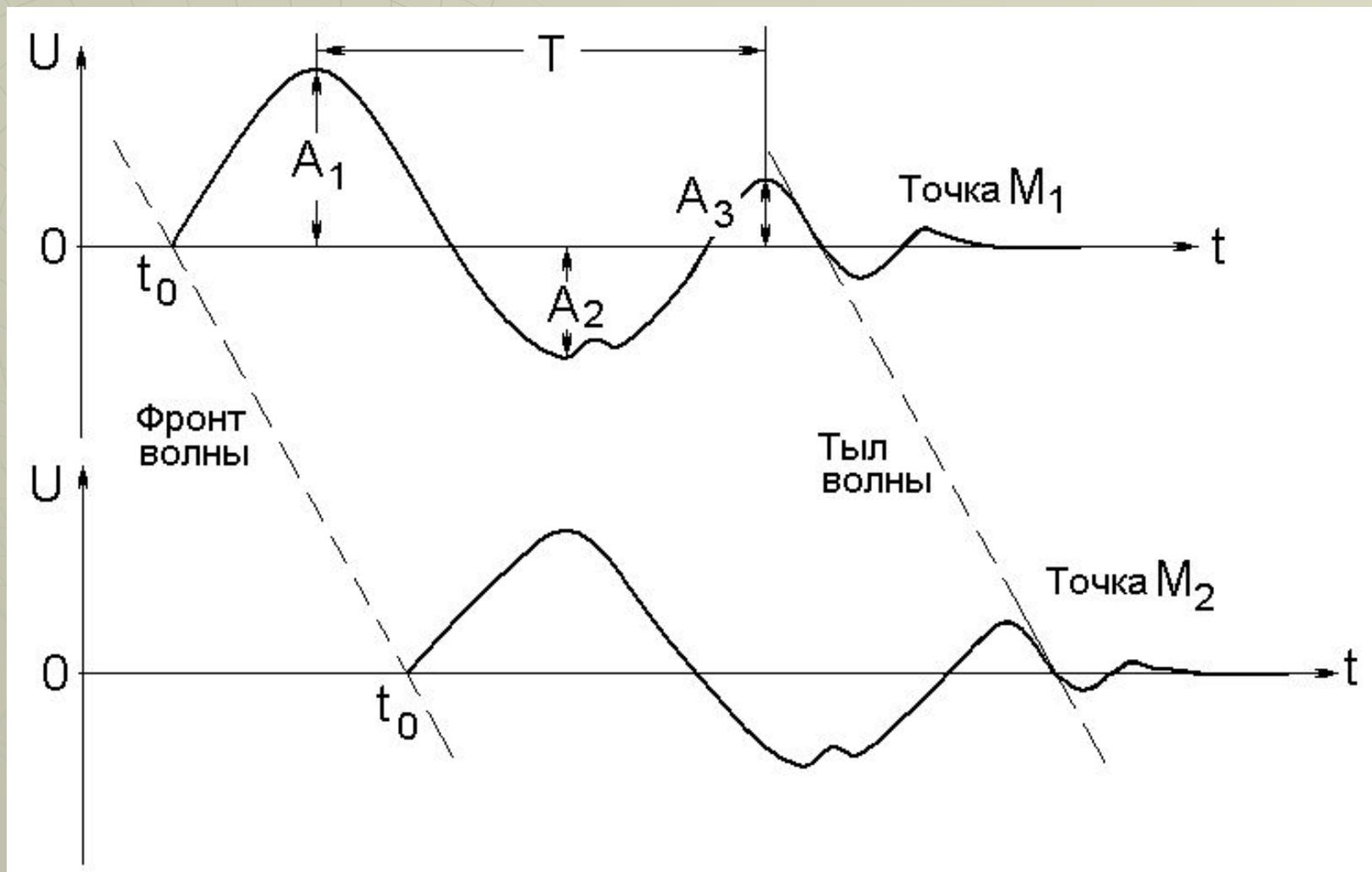
$\delta$  – плотность пород

Наиболее эффективными источниками сейсмических колебаний являются взрывы, которые производятся при сейсморазведочных работах в специально пробуренных шпурах или скважинах. Взрывы выполняют под покровными отложениями, то есть ниже зоны малых скоростей (ЗМС), где сейсмические волны интенсивно затухают. К другим источниками сейсмического поля относятся удары. Разработаны специальные невзрывные источники, которые позволяют выполнять многократные возбуждения необходимые для накапливания сигналов

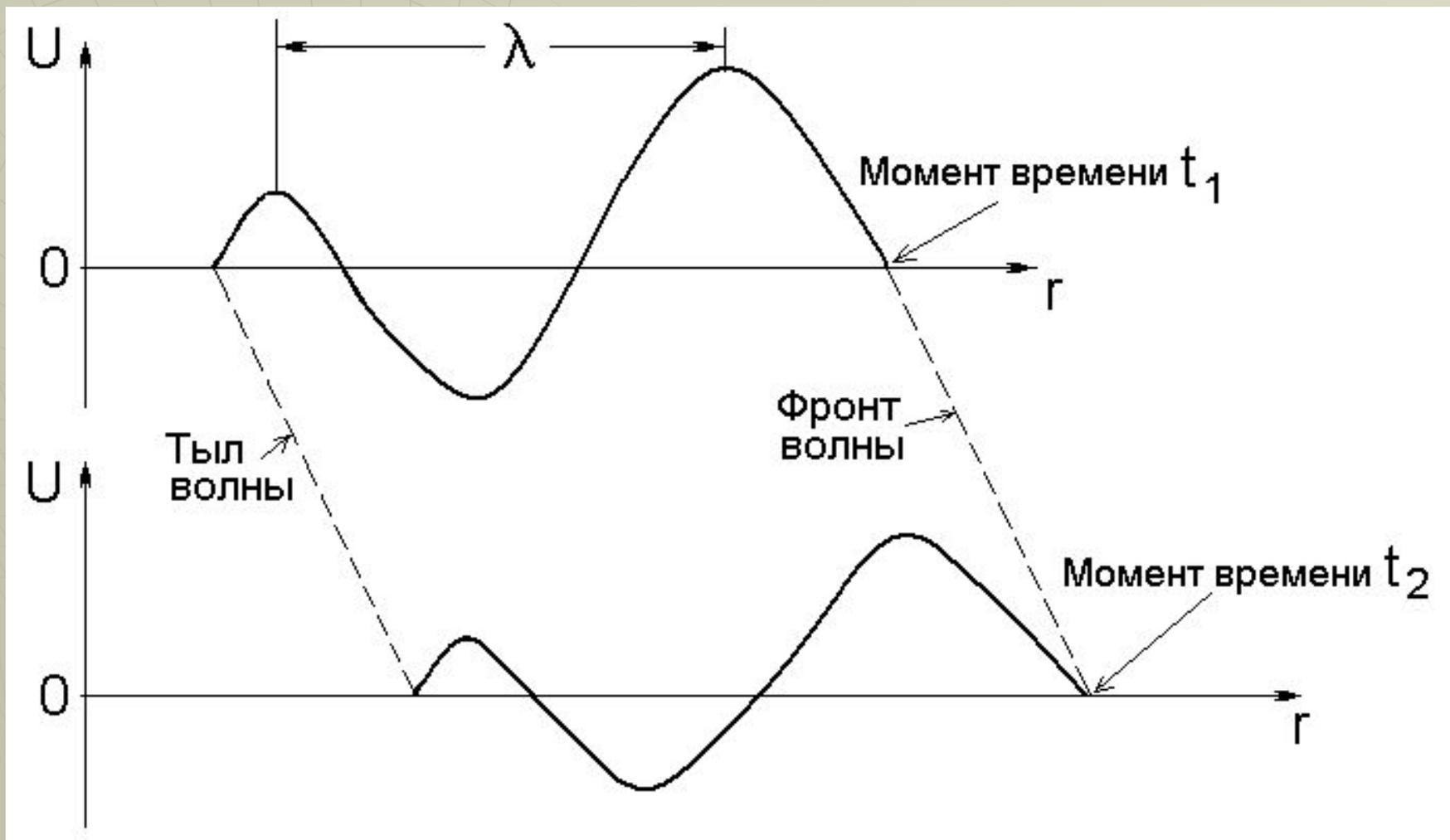
# Области распространения сейсмической волны



# Графики колебаний частиц среды в точках $M_1$ и $M_2$ (запись трассы волны)



# Профили волны между точками $M_1$ и $M_2$ в моменты времени $t_1$ и $t_2$



Затухание волны описывается формулой:

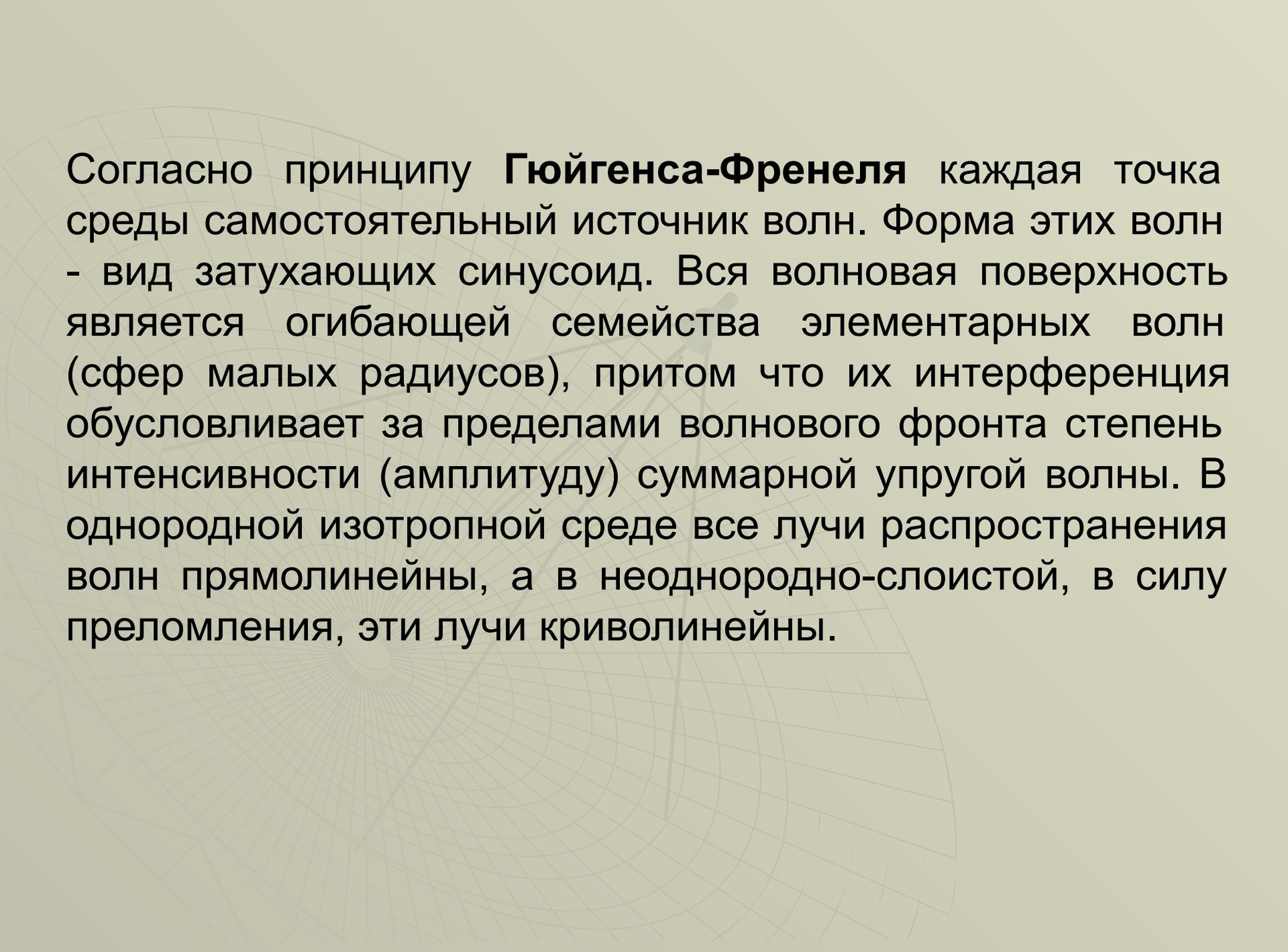
$$A = A_0 * e^{-\alpha r} * f(r)$$

$A_0$  - начальная амплитуда волны,  $e$  - основание натурального логарифма,  $\alpha$  - коэффициент затухания,  $r$  - расстояние между источником волны и приемником колебаний,  $f(r)$  - функция распределения волн различного типа  $f(r) = 1/r$  для  $V_p$  и  $f(r) = 1/r^2$  для  $V_s$ .

Промежуток времени, разделяющий два соседних одноименных экстремума, называют видимым периодом колебаний  $T$ , а расстояние  $\lambda$  между такими же экстремумами – видимой длиной волны. . Показатели  $T$  и  $\lambda$  связаны соотношением:

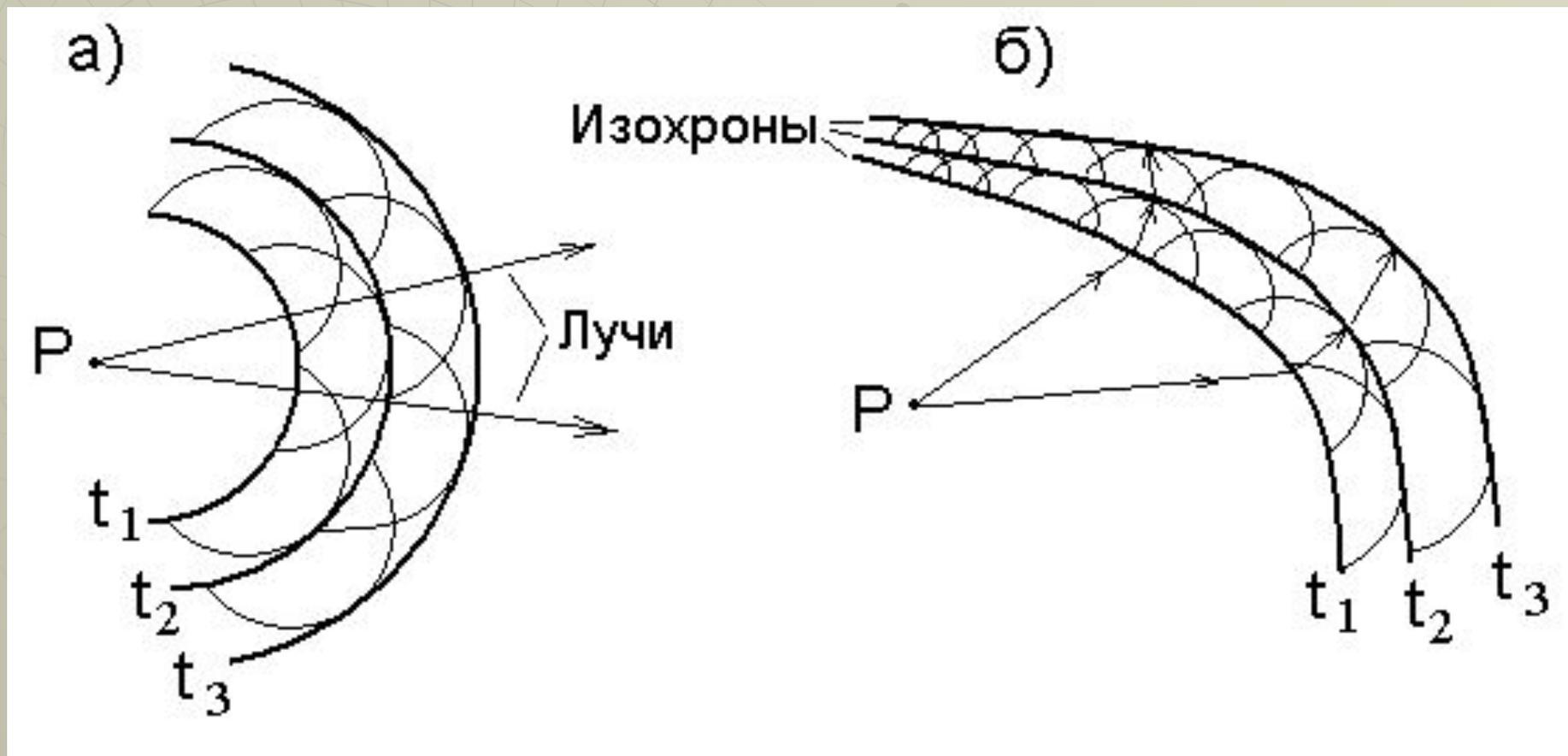
$$\lambda = V \times T = V / f$$

где  $V$  – скорость,  $f$  – частота.

The background features a faint, light-colored diagram illustrating the Huygens-Fresnel principle. It shows a series of concentric circles representing wavelets emanating from a point source, with a grid of lines overlaid on them. The text is centered over this diagram.

Согласно принципу **Гюйгенса-Френеля** каждая точка среды самостоятельный источник волн. Форма этих волн - вид затухающих синусоид. Вся волновая поверхность является огибающей семейства элементарных волн (сфер малых радиусов), притом что их интерференция обуславливает за пределами волнового фронта степень интенсивности (амплитуду) суммарной упругой волны. В однородной изотропной среде все лучи распространения волн прямолинейны, а в неоднородно-слоистой, в силу преломления, эти лучи криволинейны.

# Принцип Гюйгенса для нахождения плоского волнового фронта в однородной (а) и неоднородной (б) средах

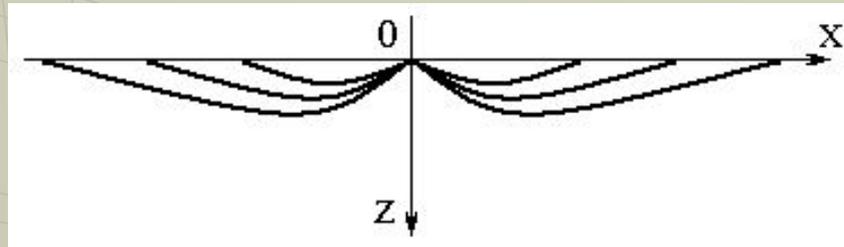


## Типы волн используемых в сейсморазведке

Если в геологической среде создать источник упругих (сейсмических) колебаний, то от него, соответственно, по всевозможным направлениям будут расходиться сейсмические волны. Последние принято разделять на волны полезные, к которым относятся **отраженные** и **преломленные (головные)**, и второстепенные: **дифрагированные, интерференционные и боковые**.

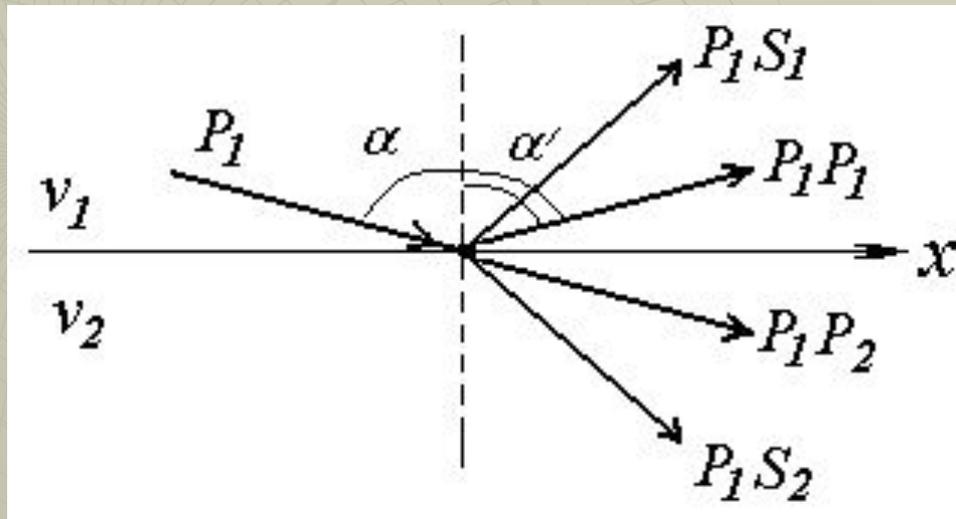
Если выделить распространяющуюся от источника единичную, падающую под углом  $\alpha$  продольную волну, то в среде, где есть границы раздела, между которыми находятся слои отличающиеся по акустической жесткости  $A$  (произведение скорости  $V$  на плотность  $\delta$ , то есть  $A = V * \delta$ ), образуется еще четыре волны:  $P_1S_1$  – отраженная поперечная,  $P_1P_1$  – отраженная продольная волна,  $P_1P_2$  – проходящая продольная волна,  $P_1S_2$  – проходящая поперечная волна

# Схема выхода лучей к земной поверхности за счет рефракции



## Образование различных типов волн на границе двух твердых сред

$\alpha$  и  $\alpha'$  - углы падения и отражения волны

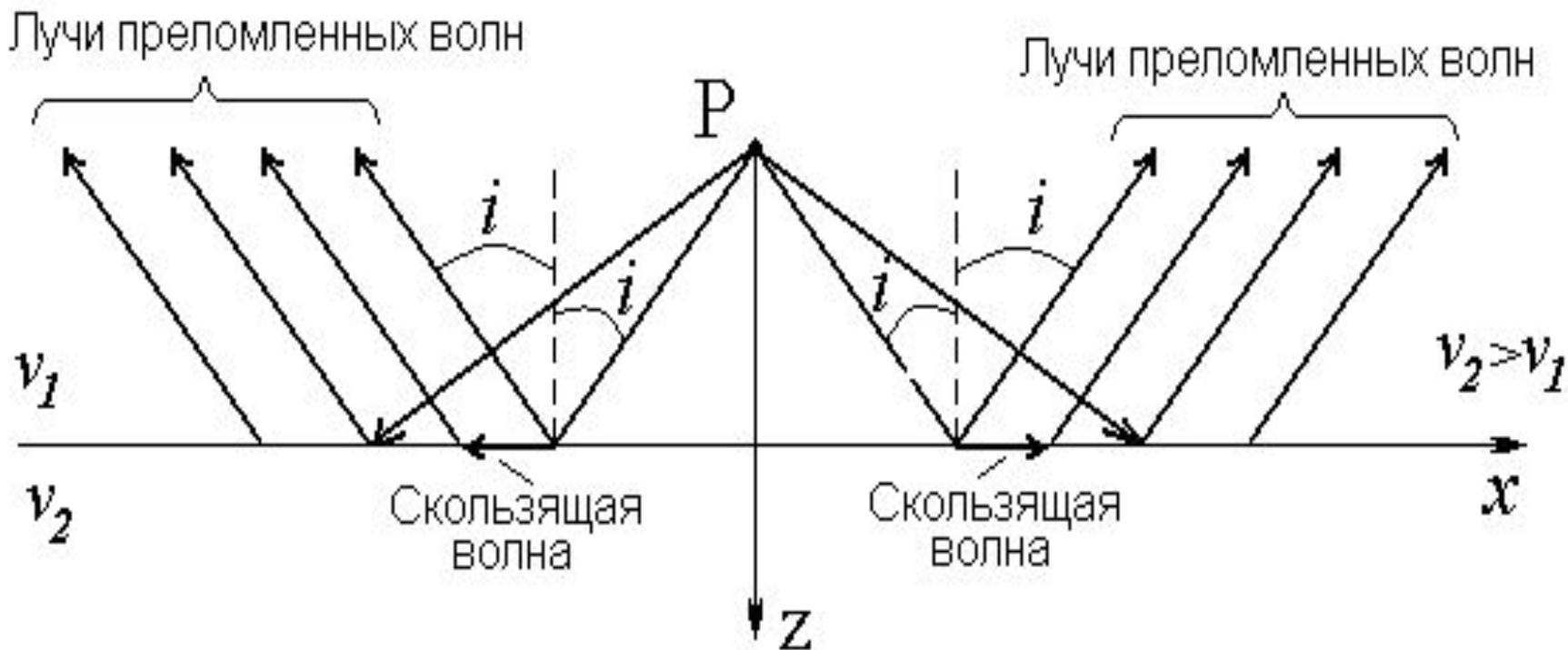


Если существует граница (границы) разделяющая среды, где нижележащий слой имеет скорость  $v_2$  большую, чем у вышележащих слоев, скорость которых  $v_1$ , то при падении лучей (сейсмических волн) на такую границу создаются головные (преломлённые) волны. Они образуются только на определенном удалении от источника, когда возникает скользкая вдоль границы волна при угле падения  $\alpha$ , равному некоему критическому углу  $i$ :

$$\sin(\alpha = i) = \frac{v_1}{v_2}$$

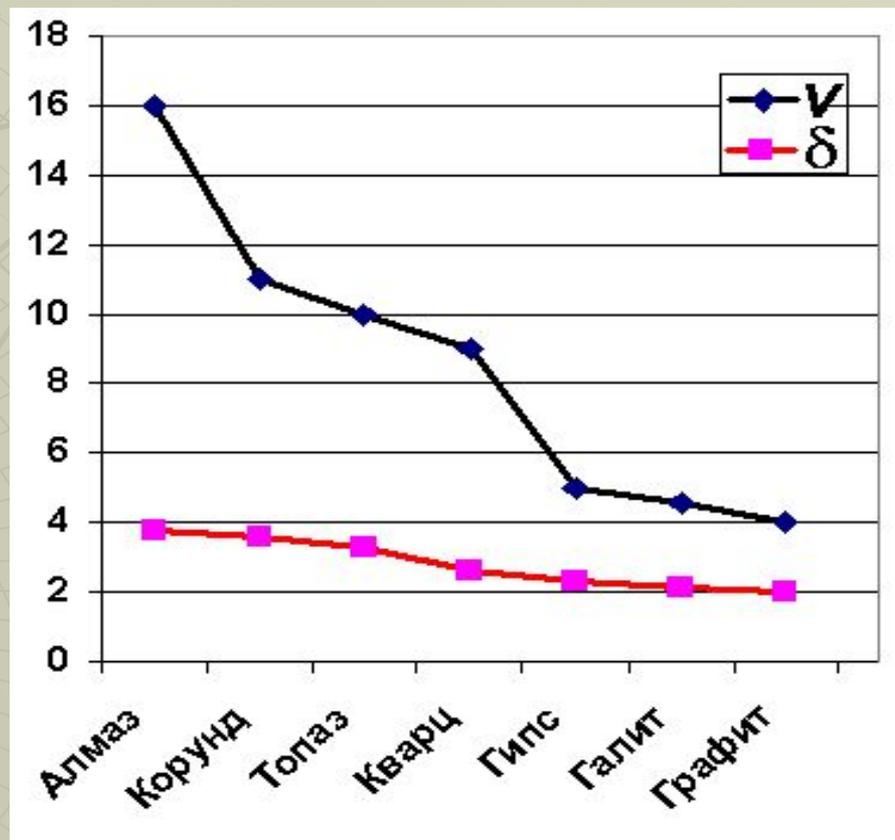
Головные волны параллельны друг другу. Скорость головных волн больше, чем падающих и отраженных, поскольку  $v_2 > v_1$ . Эти волны имеют и значительно бо́льшую амплитуду. Однако, приведенная картина не означает, что на рассматриваемой границе нет других волн. Соответственно присутствуют и отраженные и второстепенные волны.

## Схема образования головных волн



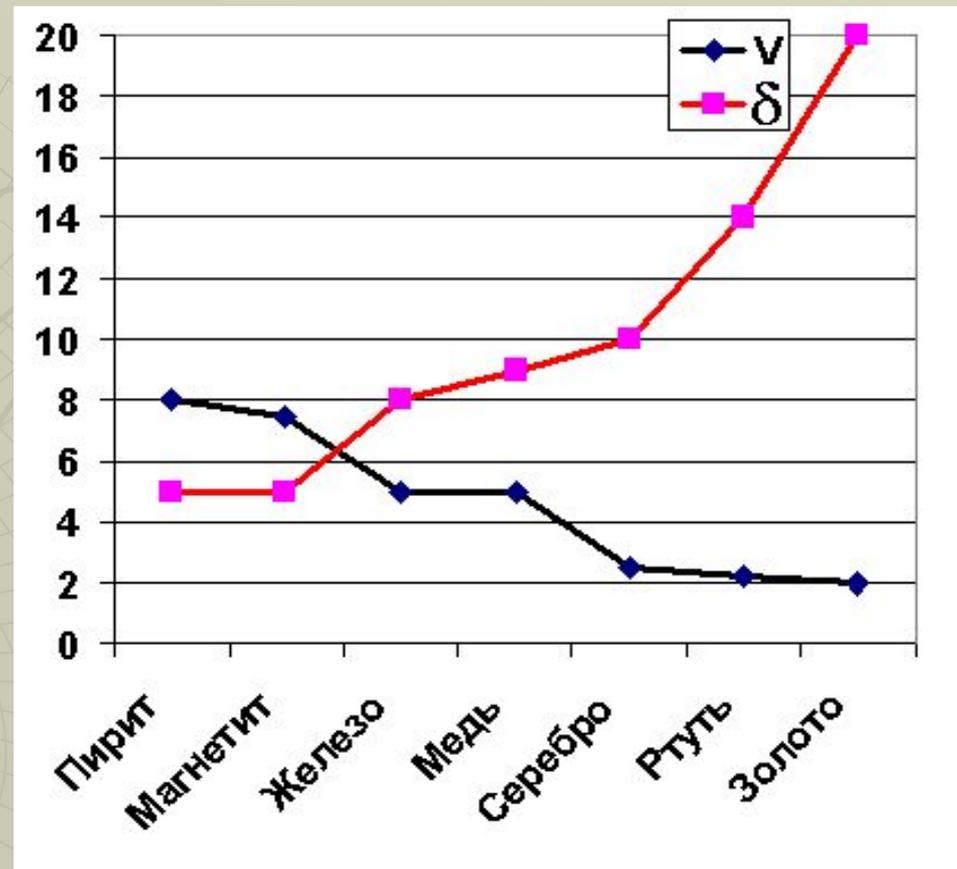
# Изменения плотности и скорости распространения упругих волн в ряду силикатных и частично окисных минералов

Минералы	$V$	$\delta$
Алмаз	16	3,8
Корунд	11	3,6
Топаз	10	3,3
Кварц	9	2,6
Гипс	5	2,3
Галит	4,6	2,16
Графит	4	2

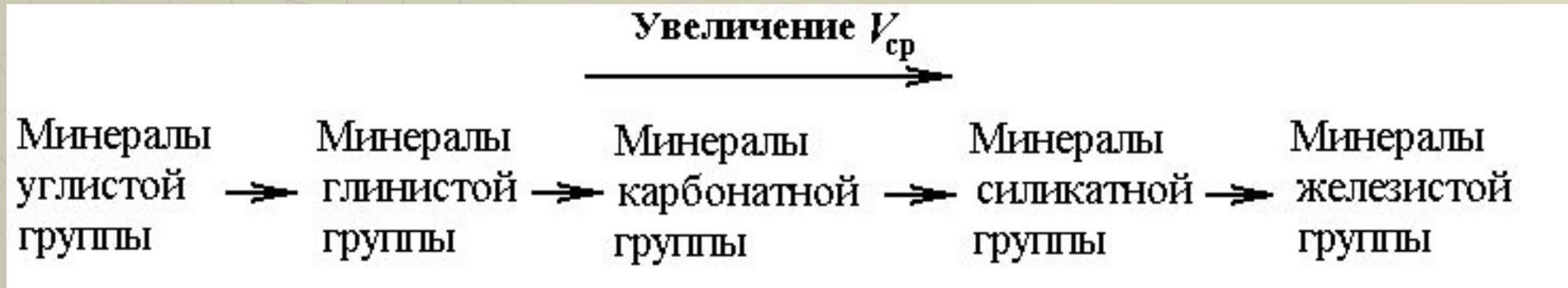


# Изменения плотности и скорости распространения упругих волн в ряду тяжелых (рудных) минералов

Минералы	$V$	$\delta$
Пирит	8	5
Магнетит	7,5	5
Железо	5	8
Медь	5	9
Серебро	2,5	10
Ртуть	2,2	14
Золото	2	20



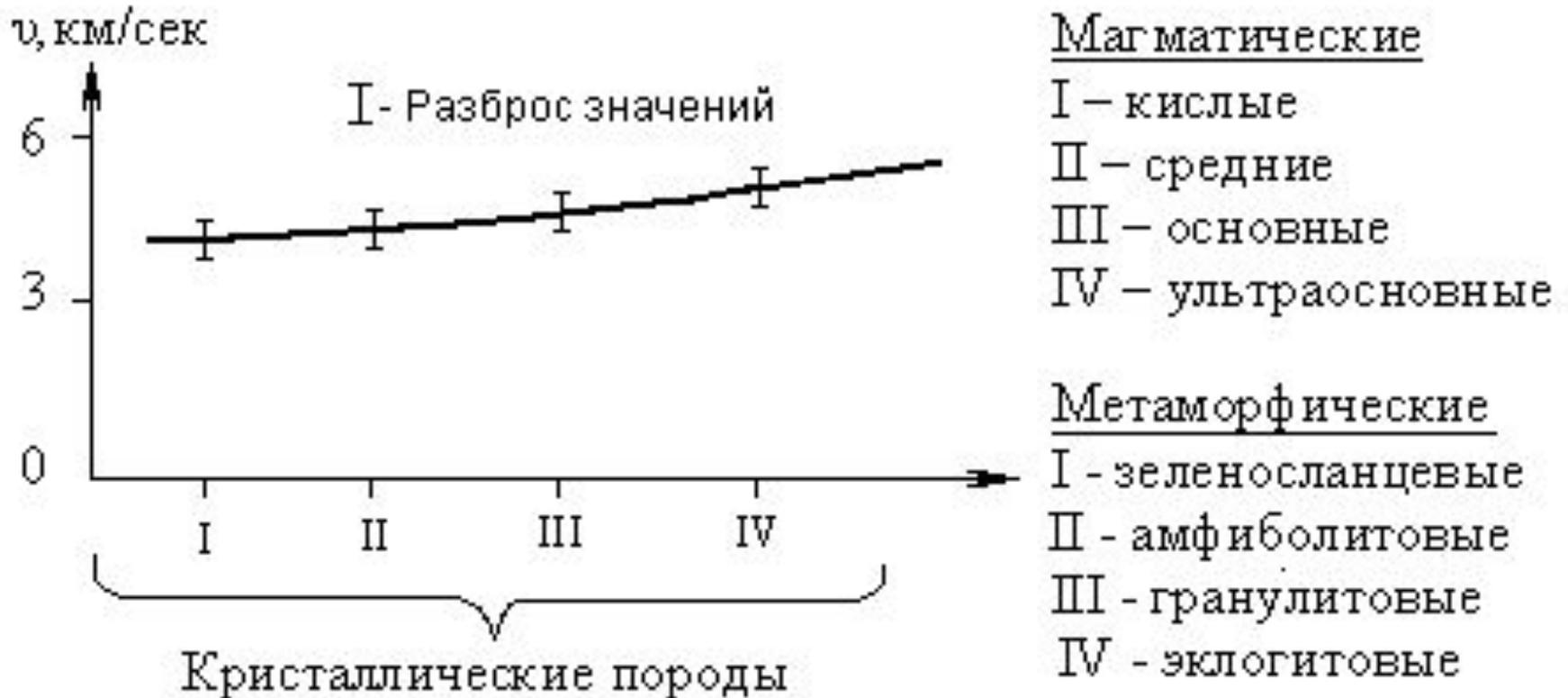
# Тенденция изменения скорости распространения упругих волн у минералов различных по химическому составу групп



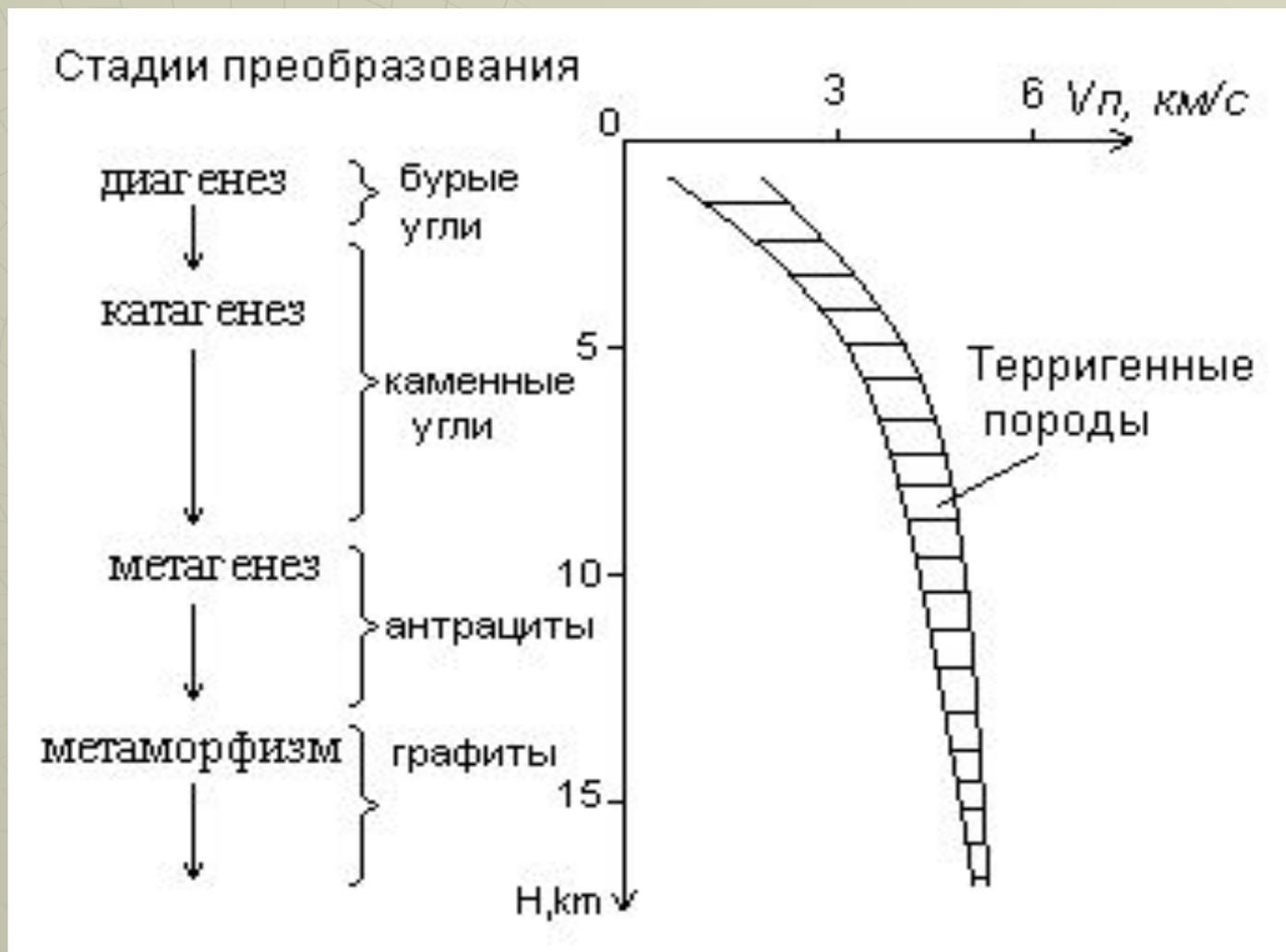
В жидкостях распространяются только продольные волны. Показатель  $V_p$  дистиллированной воды – 1,45 км/с или 1450 м/с.  $V_p$  нефти – 1,3 км/с или 1300 м/с.  $V_p$  воды растет с увеличением давления и с увеличением минерализации и зависит от температуры  $t$ .

В газах, как и в жидкостях, распространяются только продольные волны  $V_p$ .  $V_p$  воздуха – 0,33 км/с.  $V_p$  метана – 0,49 км/с.

# Тенденция изменения скорости распространения упругих волн у кристаллических пород



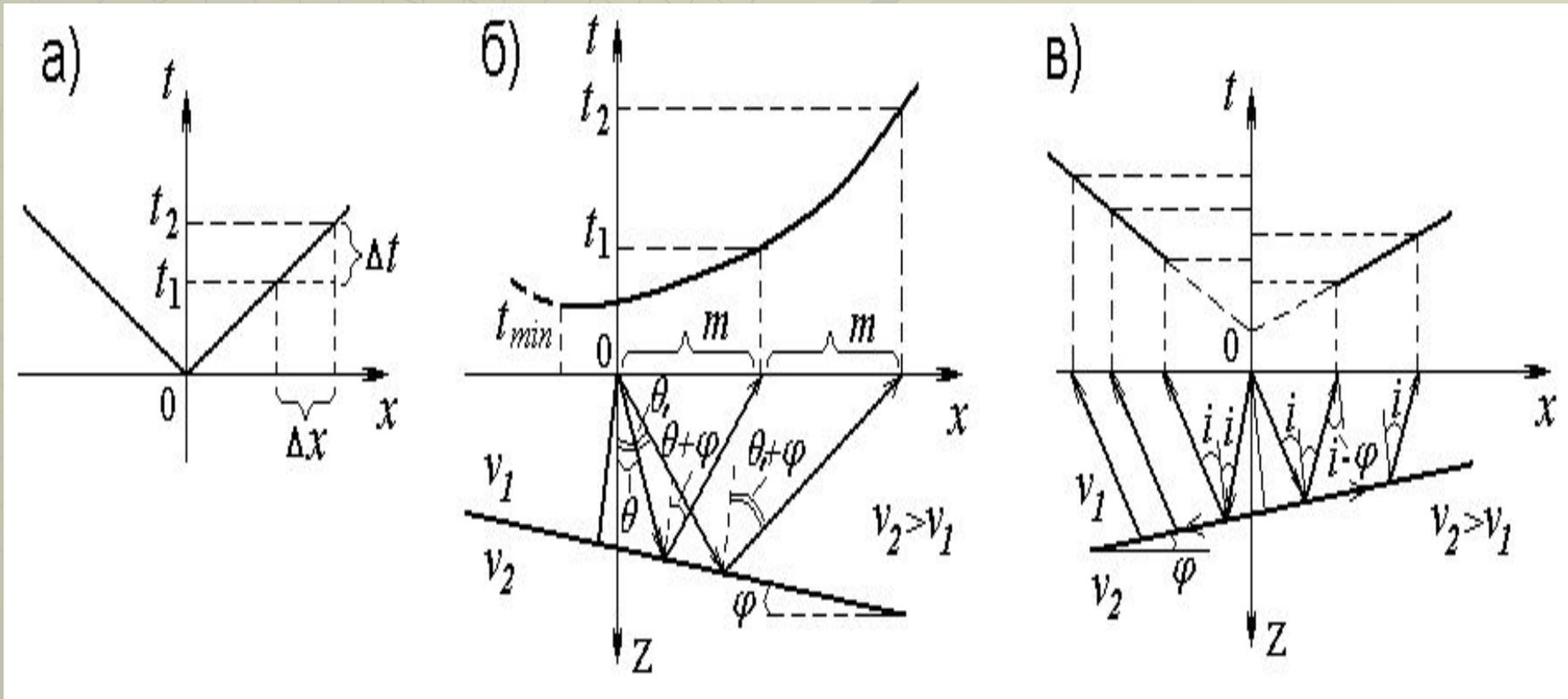
# Тенденция изменения скорости распространения упругих волн осадочных терригенных пород в зависимости от стадий их преобразования



## Графическое изображение полей сейсмических возмущений

При сейсморазведочных работах определяют времена прихода волны  $t_i$  в точки дневной поверхности  $x_i$ , расположенные с заданным шагом вдоль профиля от пункта возбуждения. Зависимость  $t$  от  $x$  носит название годографа. Построение таких графиков для известных моделей геологической среды составляет прямую задачу сейсмической разведки, а процесс сравнения (подбора) годографов, построенных по наблюдаемым значениям, с таковыми для модельных сред – суть решения обратной задачи сейсморазведки.

# Годографы прямой (а), отраженной (б) и преломленной (в) волн



## Лекция 10

Технология проведения сейсморазведочных работ.

Автоматизированная (цифровая) обработка данных. Применение сейсморазведки при решении структурных задач

Методы, основанные на регистрации отраженных и преломленных волн, получили название **МОВ** - метод отраженных волн и **МПВ** - метод преломленных (головных) волн.

В МОВ подбирают такую мощность источника, чтобы сейсмические волны имели достаточную амплитуду. Тогда на фоне многократно отраженных волн создаются условия для преимущественного выделения однократных волн. Наиболее применим в МОВ способ, получивший название **ОГТ** - общей глубинной точки (центр между ПВ и ПП). При этом появляется возможность «привязывать» наблюдения на отражающей горизонтальной границе к каждой конкретной её точке или к площадке, образуемой вместо точки по восстанию отражающей наклонной границы.

## Схемы размещения ПВ и ПП в методе ОГТ

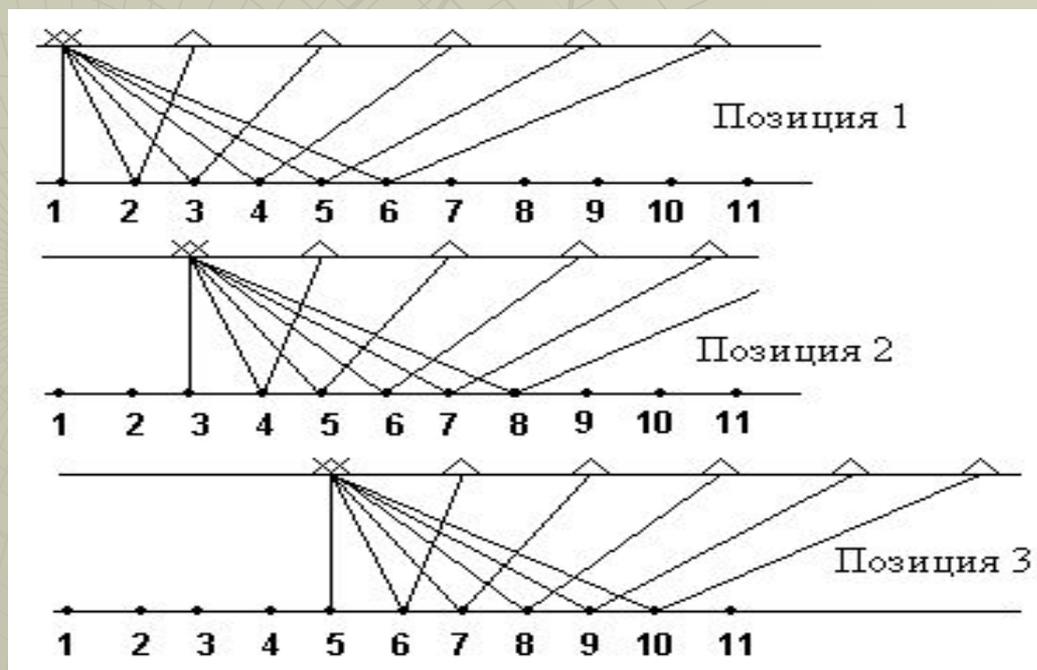
а)



б)



Замечательная особенность ОГТ в создании перекрытий. Суть в том, что всю линию источник-приемник последовательно «сдвигают» (перемещают) по профилю с заданным шагом. При этом не охватываются только первые и последние расстановки сейсмоприемников. Преимущества технологии очевидны: осуществляется накопление и суммирование сигналов и появляется возможность фильтровать полезные сигналы (однократные волны) на фоне волн помех.



Методика работ МПВ учитывает факт возникновения преломленных волн на определенном удалении от источника. Расстояние  $x$  между источником и первым сейсмоприемником оценивают по формуле:

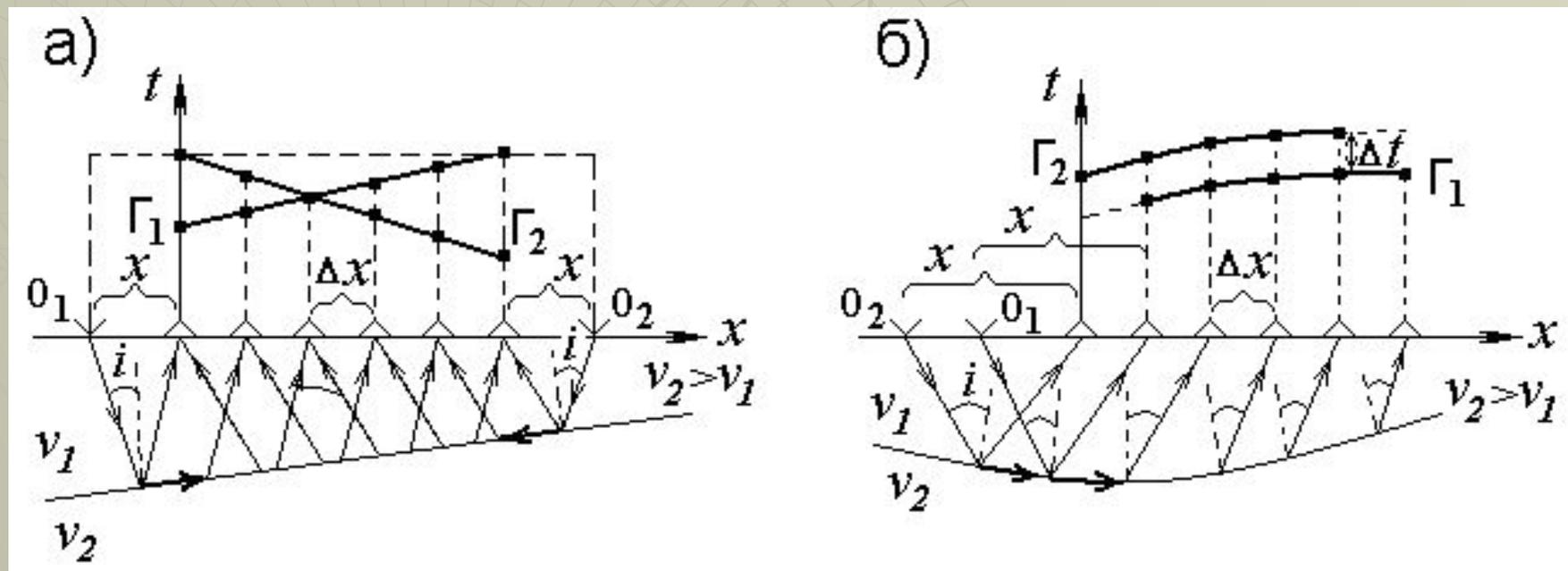
$$x \geq h_0 \cdot \operatorname{tgi},$$

где  $i$  - критический угол,  $h_0$  – толщина слоев до отражающе-преломляющей границы (кратчайшее эхорасстояние).

Величина  $x$  может составлять от первых до нескольких десятков и даже сотен метров, в зависимости от глубины залегания преломляющей границы раздела.

При работах МПВ различают расстановку сейсмоприемников с расположением пунктов возбуждения на двух или одном флангах. По результатам наблюдений в первом случае строятся встречные, а во втором нагоняющие годографы.

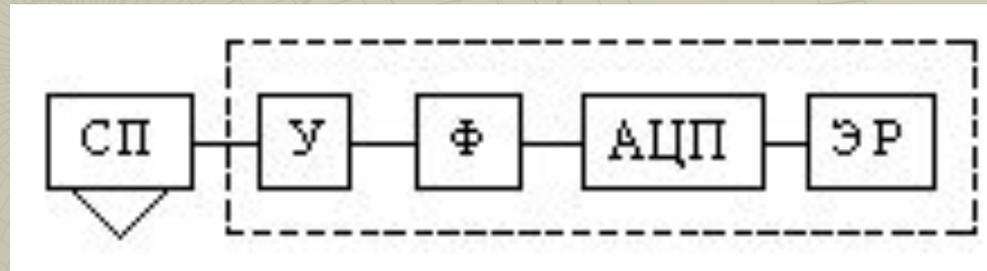
Система встречных годографов за счет их увязки во взаимных точках  $O_1$  и  $O_2$ , позволяет уверенно распознавать волны от преломляющих границ и их прослеживание по площади (а), а система нагоняющих годографов, построенных по данным возбуждений в двух односторонних пунктах, дает возможность проследить непрерывность преломляющей границы по признаку параллельного смещения годографов на величину  $\Delta t$  (б)



# Аппаратура и технология сейсморазведочных работ

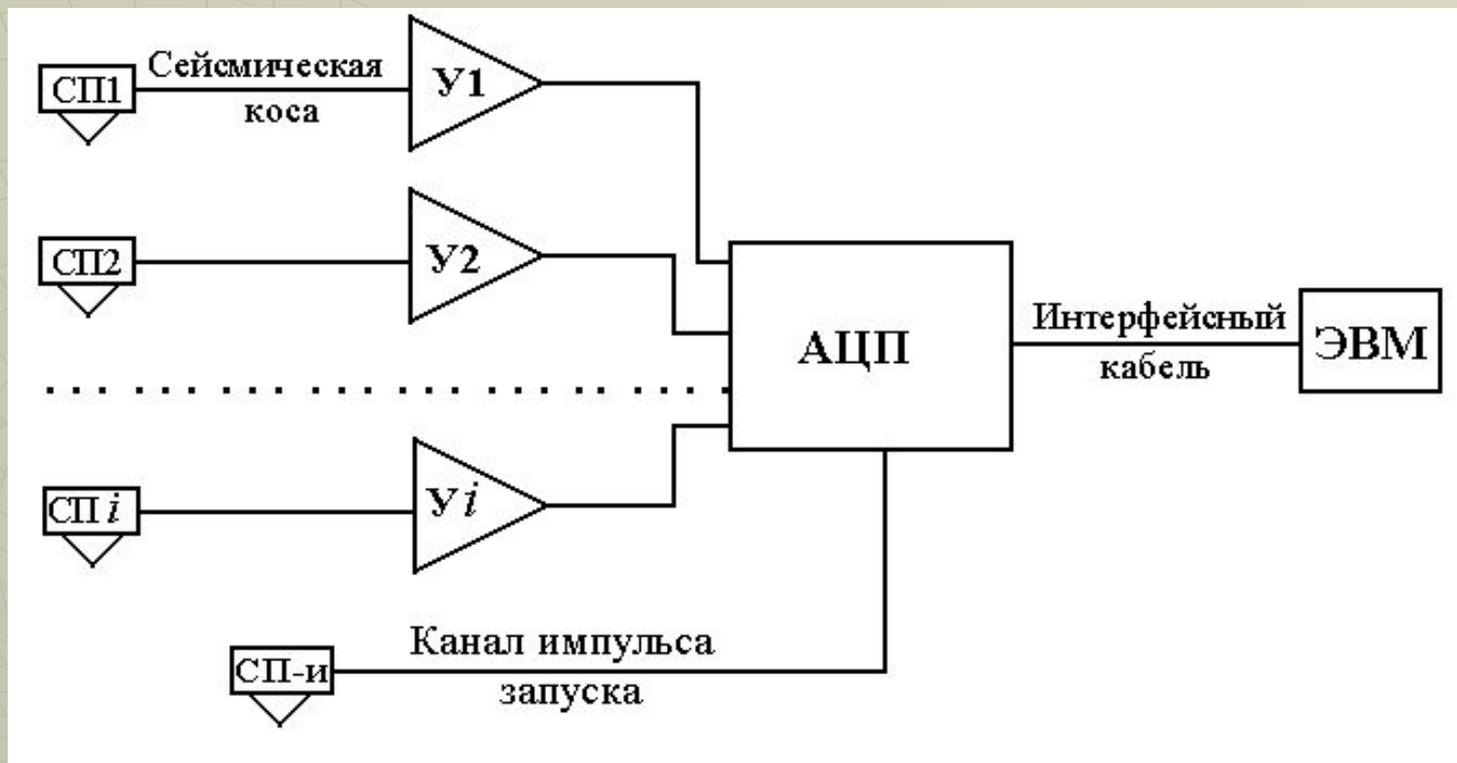
Для выделения полезных волн, возникает необходимость использования систем накопления и суммирования сигналов, предусматриваются разнообразные способы группирования и расстановки сейсмоприемников. Сигналы поступают на усилители и далее регистрируются в цифровом виде. Предусматривается визуализация результатов на экране дисплея.

## Функциональная схема сейсморазведочного канала



СП – сейсмоприемник, У – усилитель, Ф – фильтр, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, Э.Р. – электронный регистратор

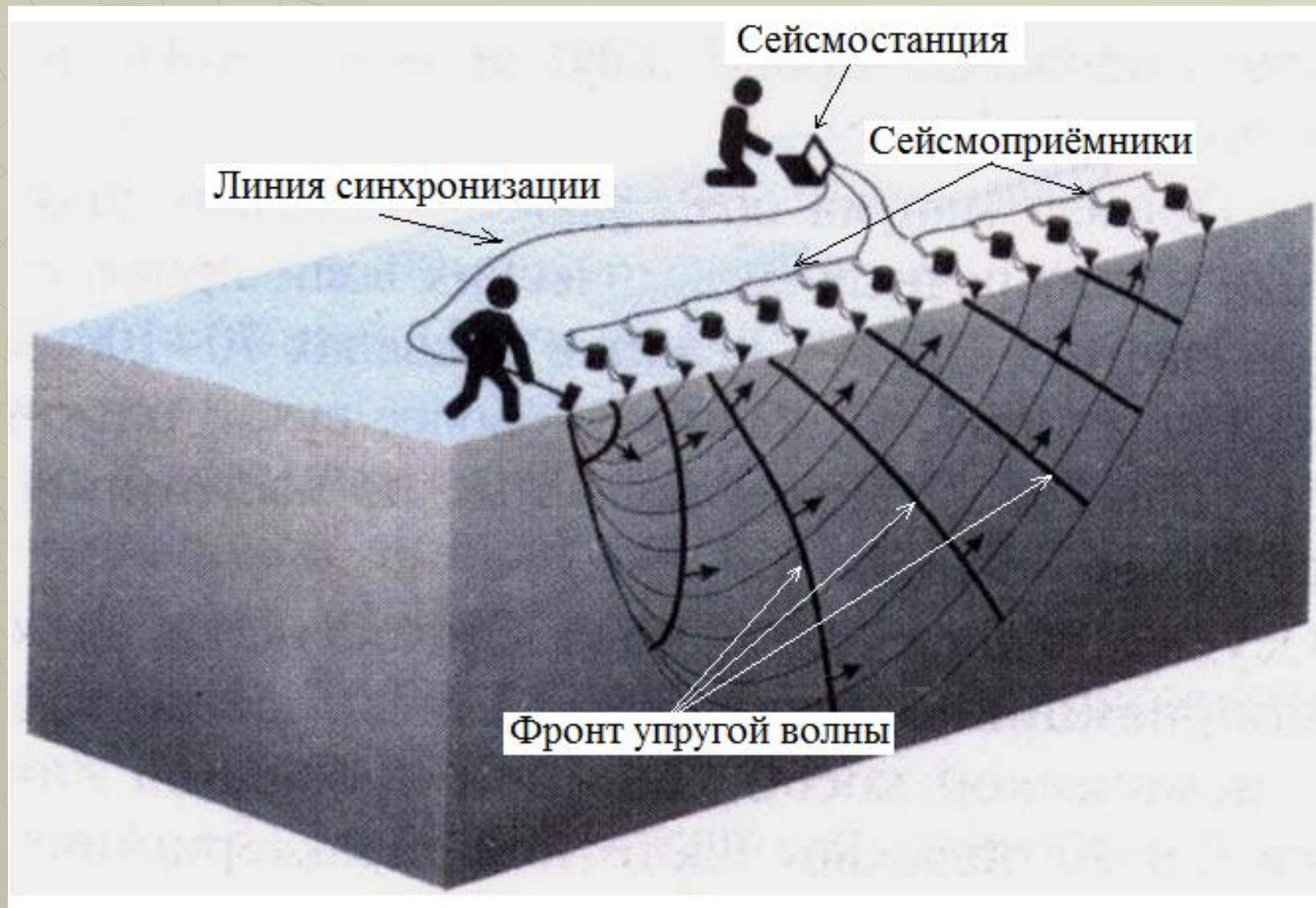
Совокупность усилительных каскадов и регистрирующих устройств составляют **сейсморазведочную станцию**.



Кодирование сигналов начинается с момента поступления сигнала синхронизации с усилителя-формирователя импульса запуска, на вход которого подключается сейсмоприемник, устанавливаемый на землю рядом с пунктом возбуждения.

Технологии сейсморазведочных работ объединяют операции подготовки и производства наблюдений. Это изучение геолого-геофизических условий, оценка местности, разбивка профилей, выбор аппаратуры и технических средств, топографическая привязка, составление и оперативная корректировка последовательности работ и.т.д. Технологии существенно отличаются при проведении сейсморазведки на суше, акваториях, в скважинах и горных выработках. Основные отличия заключаются как в специфике самих работ, так и в применяемых аппаратурных модулях и технических средствах. Используются различные сейсмостанции, сейсмические косы (многожильные сейсмические кабели) и присоединяемые к ним сейсмоприемники, буровые станки, передвижные пункты взрыва, установки невзрывного возбуждения, вспомогательный транспорт и.т.д.

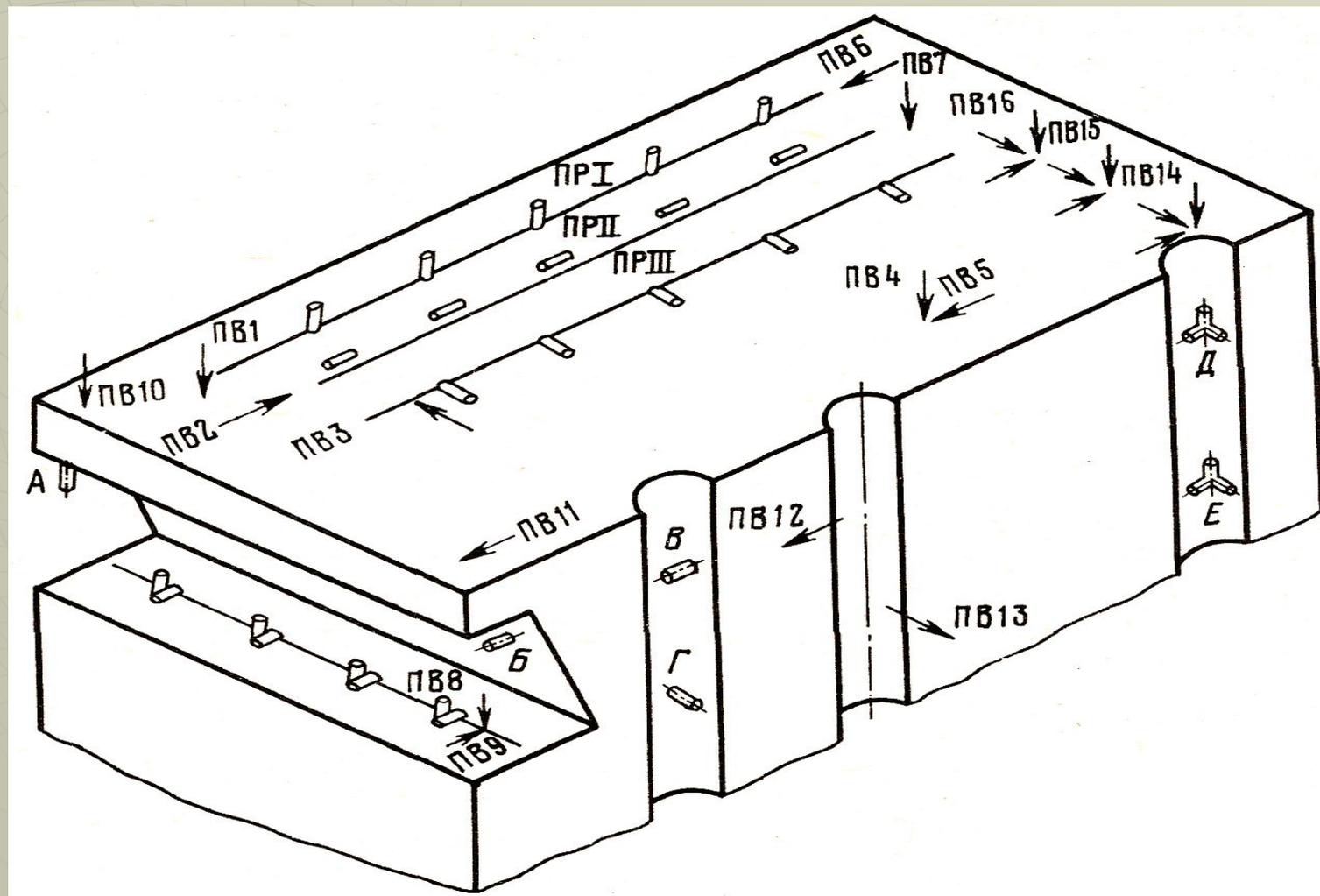
# Общая схема сейсмических наблюдений



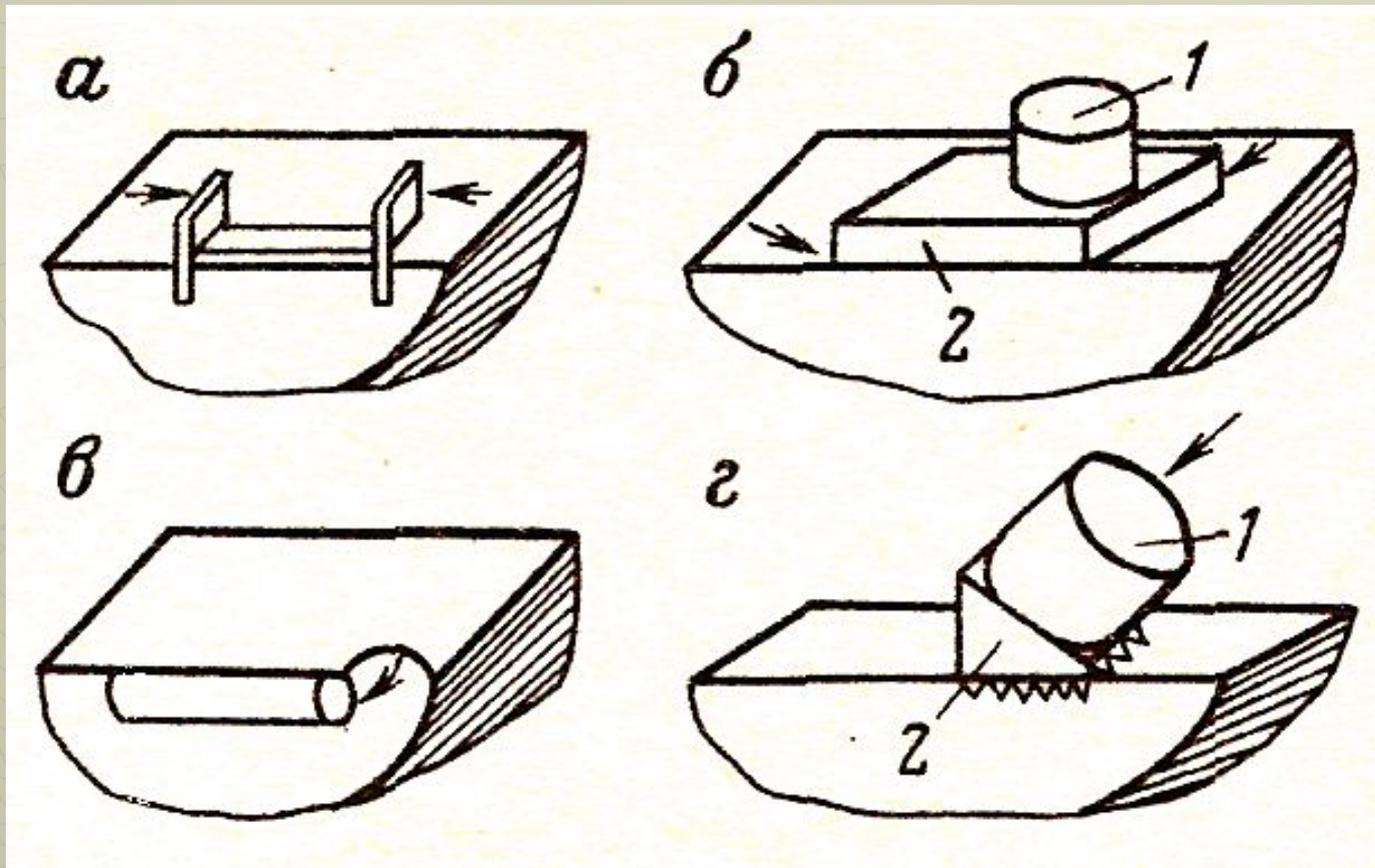
# Процесс производства сейсморазведочных работ



Схемы проведения различных видов сейсмических работ по схемам: **Z-Z** (ПР I, ПВ 1), **X-X** (ПР II, ПВ 2), **Y-Y** (ПР III, ПВ 3), **X-Z** (ПР II, ПВ 6) и **Z-X** (ПР II, ПВ 7)



# Устройства для возбуждения SH-волн



а – скоба; б – брус (1 – груз, 2 - деревянный брус); в – бревно; г -  
подставка с бороной (1 - взрывная камера пневматической или  
газовой пушки,  
2 - подставка с бороной для передачи импульса).

Стрелками показано направление воздействия.

# Инженерная сейсмическая станция **SGD-SEL**



Цифровой  
акселерометр **SGD-AD**



Источник возбуждения  
колебаний



# Электромагнитный источник возбуждения сейсмических колебаний «ГЕОТОН-6»



Группа из четырёх электромагнитных источников возбуждения сейсмических колебаний «ГЕОТОН-30»



# Электромагнитный импульсный источник возбуждения сейсмических колебаний «Енисей СЭМ-100»

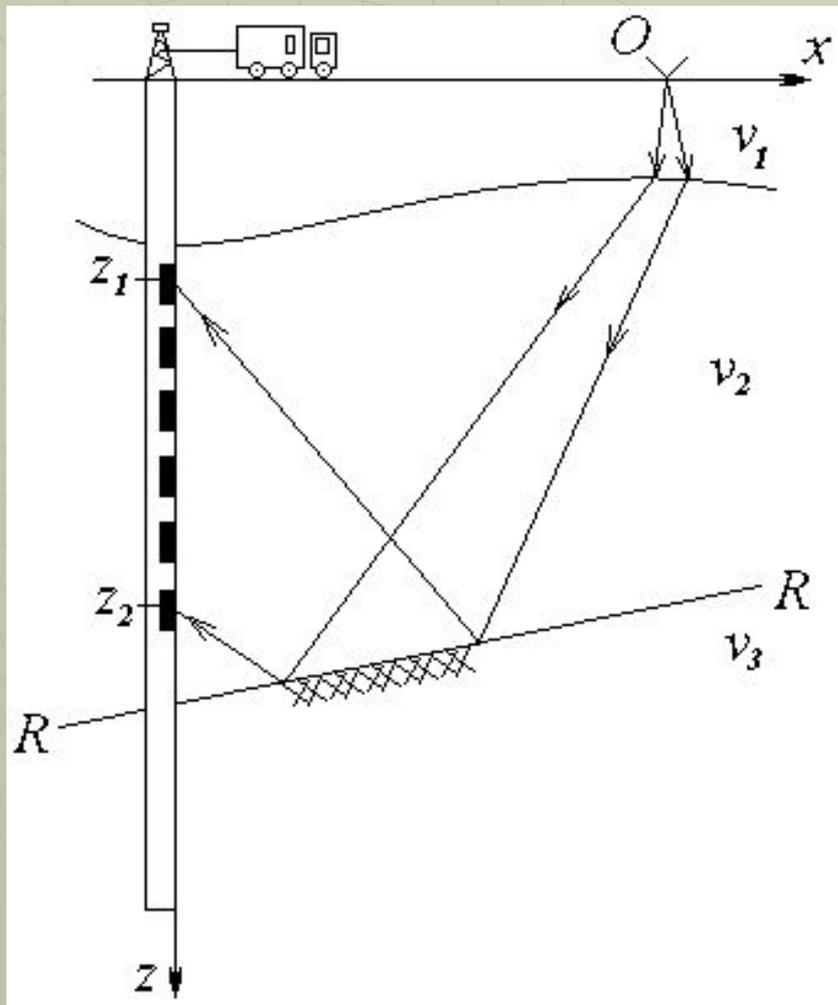


В морской сейсморазведке применяют специально оснащенные плавсредства (суда), на которых устанавливаются сейсмостанция, оборудование для буксирования источников и приемных устройств (кос), навигационная аппаратура и др. Сейсмические косы являются цифровыми (**стримеры**) и делятся на плавающие и донные (при работах на мелководье и малых водоемах). Сейсмическими источниками служат группы пневмо- и (или) электроискровых (**спаркеры**) излучателей. Все это, как и в наземной сейсморазведке, определяет различные системы наблюдений методами МПВ и МОВ. Сейсморазведка 2D выполняется, как правило, в виде продольного многократного профилирования с одной косой, а сейсморазведка 3D реализуется с помощью буксируемой базы наблюдений (один источник и несколько параллельных кос).

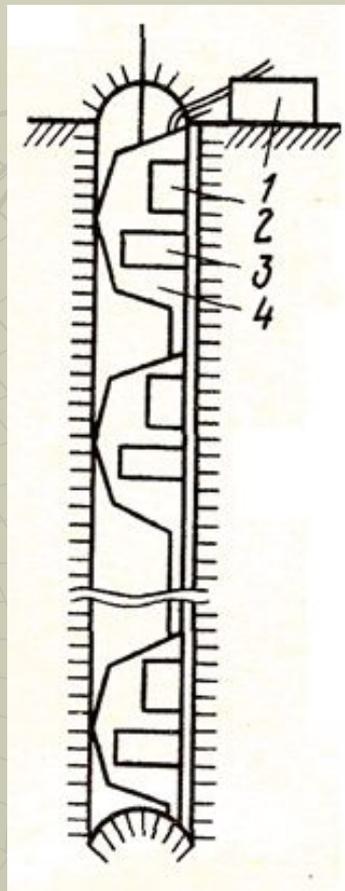
Скважинная сейсморазведка в основном состоит из **сейсмокаротажа** (определение средних и пластовых скоростей распространения упругих волн в межскважинном пространстве) и **вертикального сейсмического профилирования – ВСП** (изучение волновой картины в стратиграфическом разрезе).

Исследования выполняются в глубоких буровых скважинах по схеме скважина-поверхность. Для выполнения работ требуется термостойкая скважинная сейсморегистрирующая аппаратура, устанавливаемая на спецавтомобиле, на котором помимо цифровой сеймостанции находится лебедка с многожильным каротажным кабелем.

## Схема наблюдений методом ВСП



## Многоточечный двухкомпонентный зонд для скважинных сейсмических наблюдений



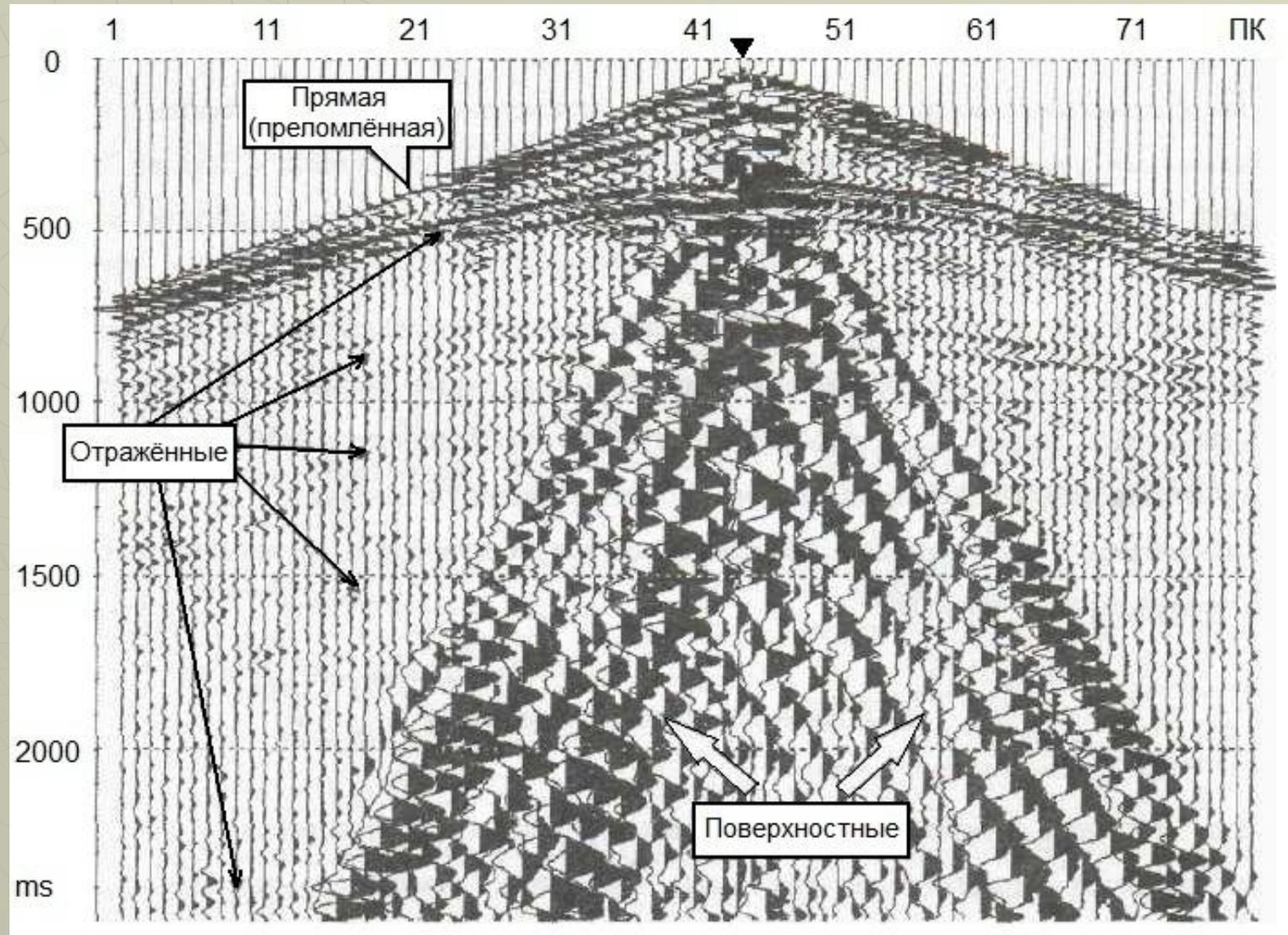
1 – регистратор;  
2, 3 – приемники;  
4 - прижимное  
устройство

# Интерпретация сейсморазведочных данных

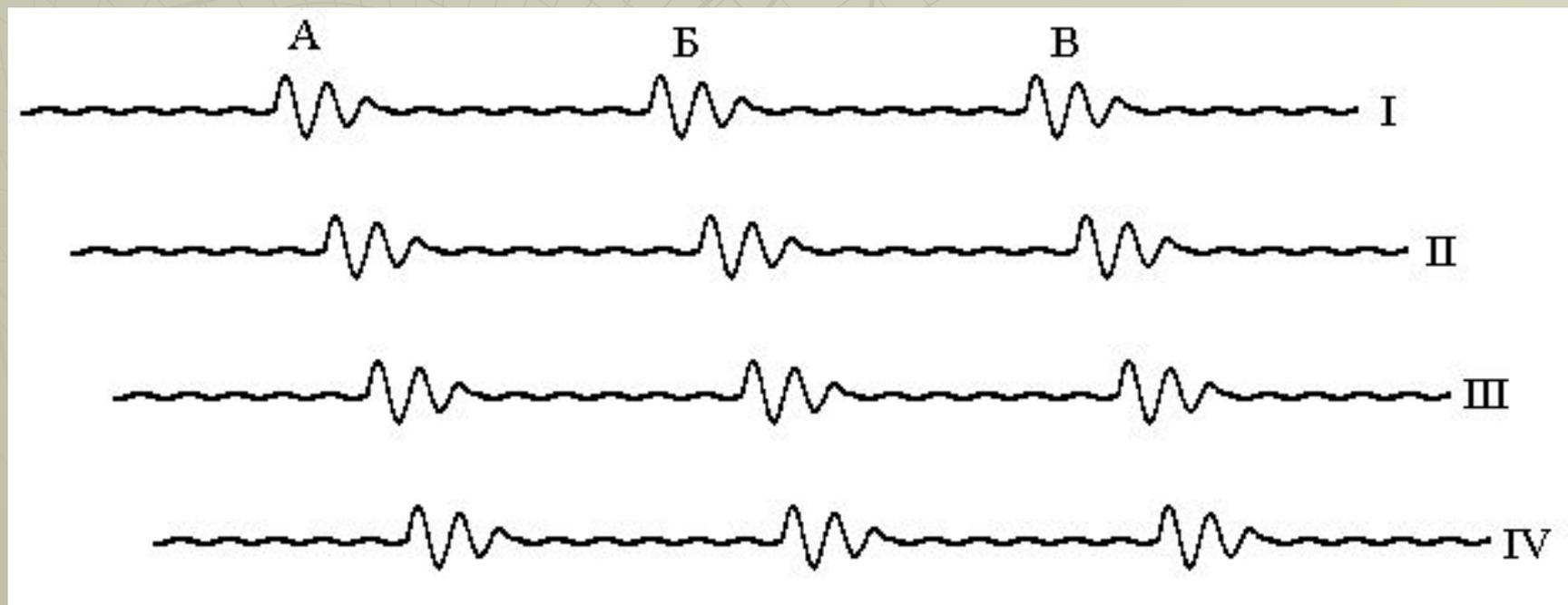
Процесс многоуровневый и включает, как для других геофизических разделов, на два этапа: 1) собственно **сейсмическая интерпретация** (интерпретация сейсмотрасс), 2) **геологическая интерпретация**, то есть решение обратной задачи сейсморазведки.

Сейсмическая интерпретация состоит из визуального воспроизведения записей (на бумажном носителе или на экране дисплея) с их последующим нормированием (выравниванием) и фильтрацией в различных частотных диапазонах по сейсмотрассе. Правильность ввода данных и качество первичного (полевого) материала оценивается при анализе волновой картины. Для этого все введенные данные визуализируются на дисплее ЭВМ (повальный вывод) в том порядке, в каком они были получены в поле, то есть в сортировке ОПВ без применения процедур обработки.

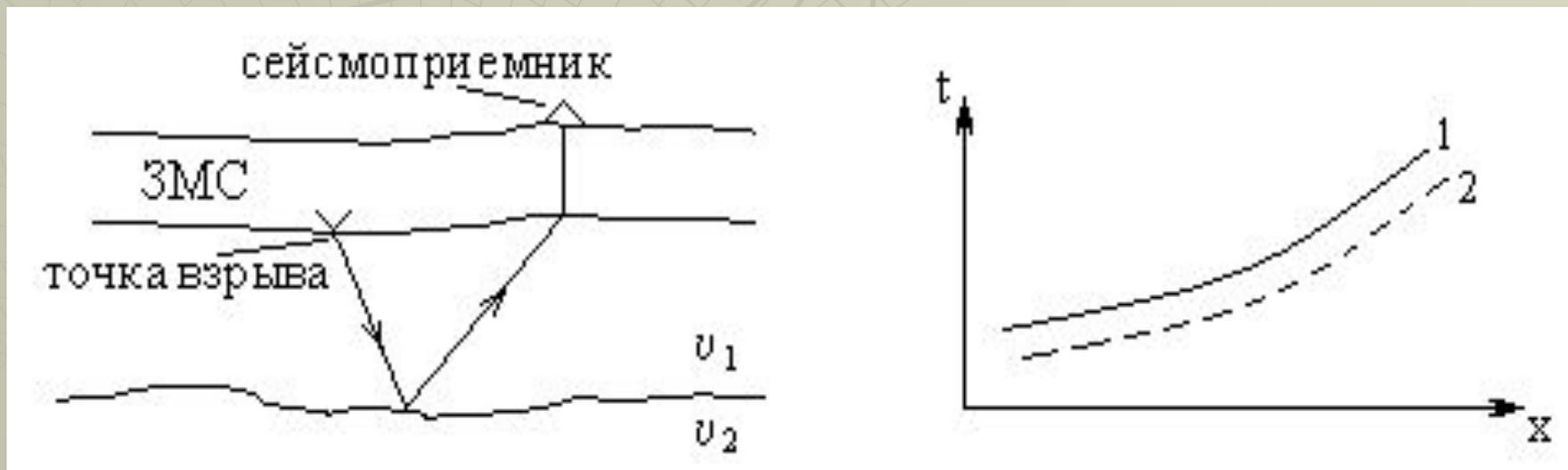
# Сейсмограмма ОПВ при расположении ПВ между ПК-44 и ПК-45



Основная задача сейсмической интерпретации - выделить однократные волны, которые несут полезную информацию на фоне многократных волн-помех. Далее производится сопоставление отфильтрованных сейсмограмм, то есть их корреляция. В процессе фильтрации однократных волн последние уверенно выделяются когда толщина слоев сопоставима с длиной волны.



Последующий процесс многоуровневой интерпретации сейсмических записей сводится к анализу годографов: по сейсмотрассам в каждой точке приёма анализируются годографы, прослеживается непрерывность той или иной границы. Обязателен учет влияния ЗМС.



1,2 - годографы, построенные по экспериментальным (1) и исправленным значениям (2)

Конечным результатом сейсмической интерпретации является восстановление волновой картины. Монтаж сейсмотрасс носит название **временного разреза**.

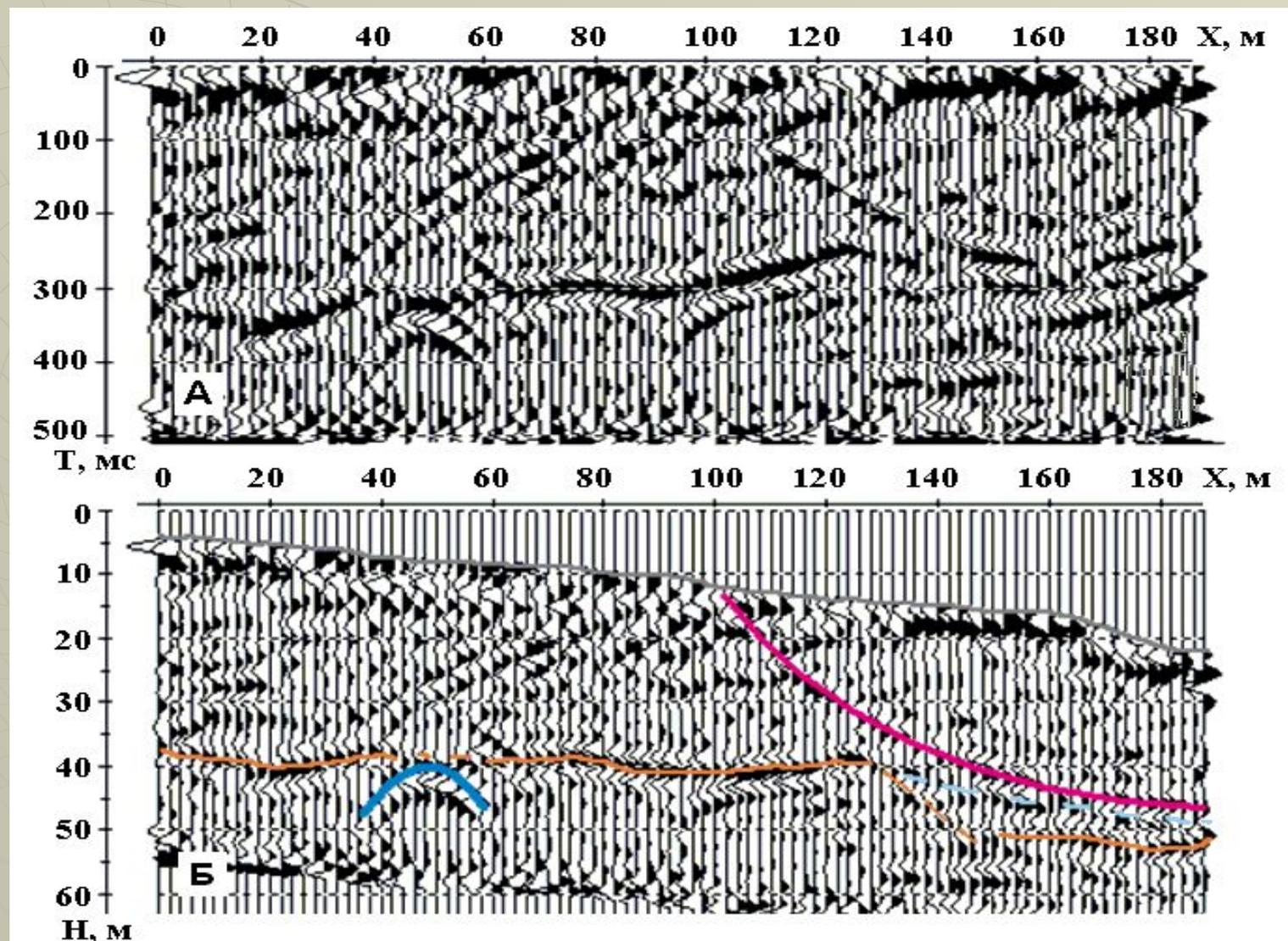
Временный разрез характеризует общее строение геологического разреза и не позволяет оценить глубины залегания тех или иных пластов. Поэтому **производится перевод временного разреза в глубинный**, на котором расстояния между точками наблюдения и отражающей границей соответствуют толщине по вертикали. Перевод временного разреза в глубинный требует машинной обработки. Используется формула:

$$F_o(t) * t = \Phi_o(t),$$

где  $\Phi_o(t)$  – функция глубинного разреза  $F_o$  – функция сейсмотрасс однократных волн.

При построении глубинных разрезов обязателен учет априорных данных, к которым относятся в первую очередь результаты бурения и других геофизических методов.

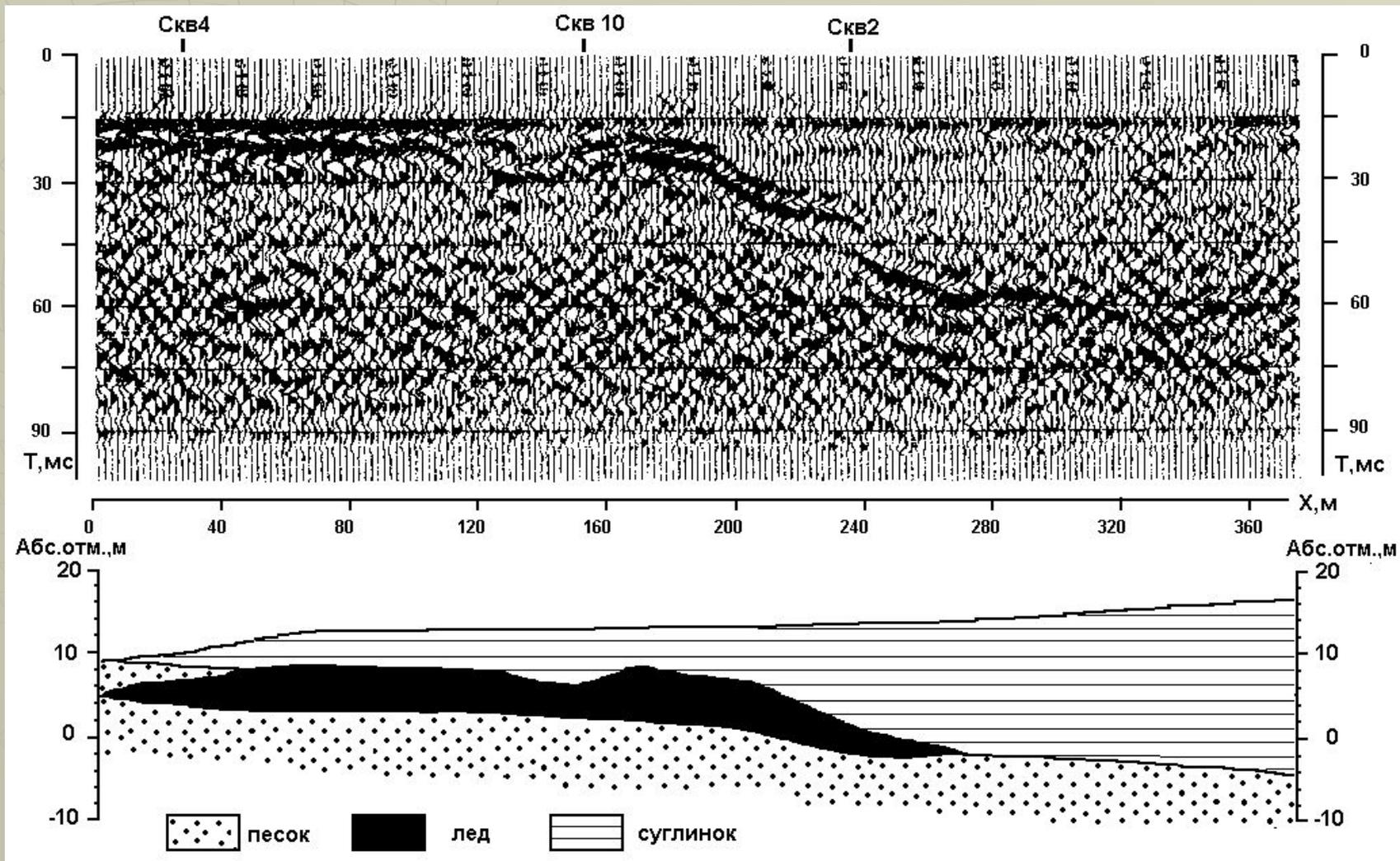
# Временной (А) и глубинный (Б) разрезы ОГТ на оползневом участке



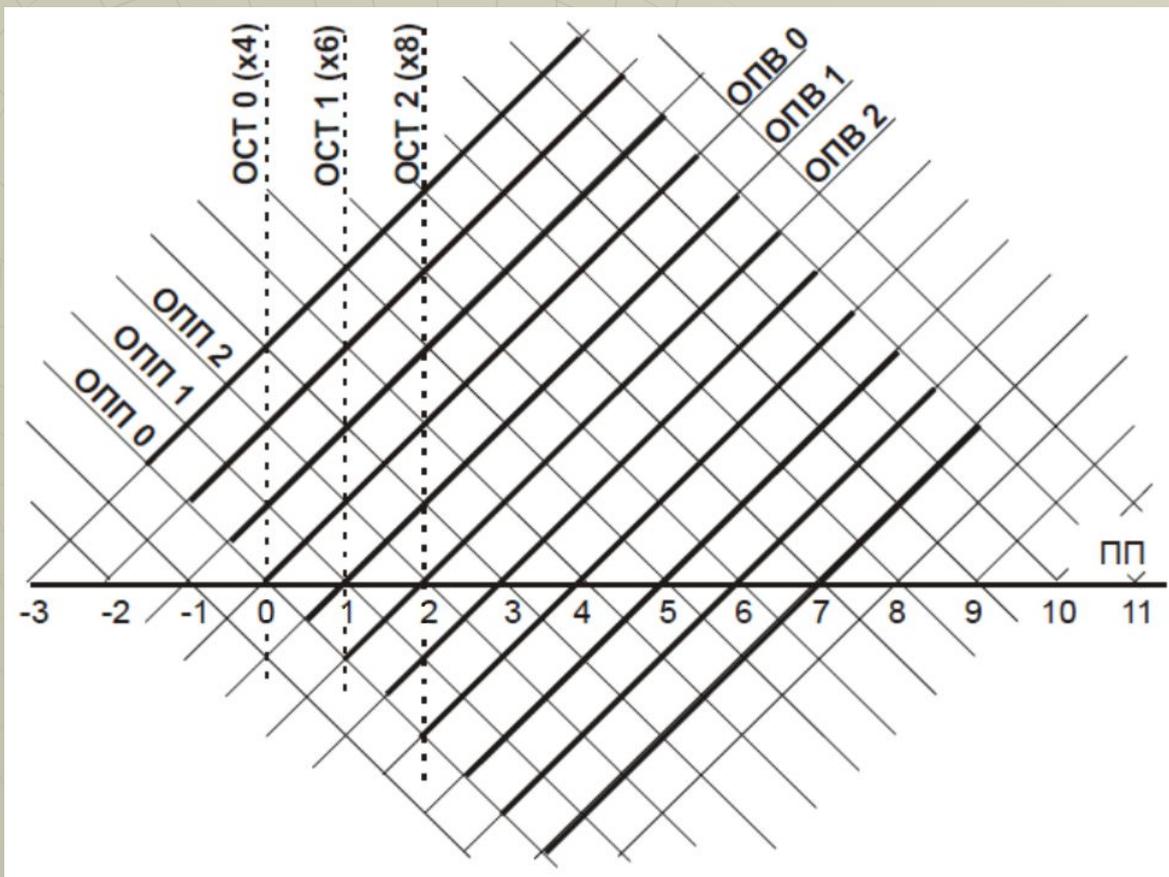
Геологическая интерпретация заключается в переводе сейсмогеологического разреза в геологический. Предусматривается определение количественных показателей, то есть глубины залегания стратиграфических слоев, изменения их мощности (толщины) и строения. Обязательно определение скорости распространения упругих волн для каждого интервала между отражающими границами, сопоставление данных с бурением, электроразведкой и гравиразведкой.

Временные и глубинные разрезы строятся с помощью специальных компьютерных программ. Поэтому современные технологии сейморазведки предусматривают регистрацию сейсмических данных в специальных форматах, чтобы обрабатывающие системы прежде всего могли автоматически распознавать и считывать первичную информацию, относящуюся к «описанию» всех необходимых для сейсмических трасс данных (дата, участок, профиль, регистрирующие параметры и т.д.).

# Временной сейсмический и соответствующий ему геологический разрез на участке распространения пластовых льдов (Ямал, газоконденсатное месторождение)



# Изображение системы наблюдений на обобщенной плоскости



ПП – пункты приема  
(совмещенные с  
пунктами возбуждения  
– ПВ),  
ОПП – линии общего  
пункта приема,  
ОПВ – линии общего  
пункта возбуждения,  
ОСТ – линии общей  
средней (глубинной)  
точки

**Преимущества представления системы наблюдений на обобщённой плоскости в том, что положения ПВ и ПП для каждого отдельного наблюдения отображаются вполне однозначно.**

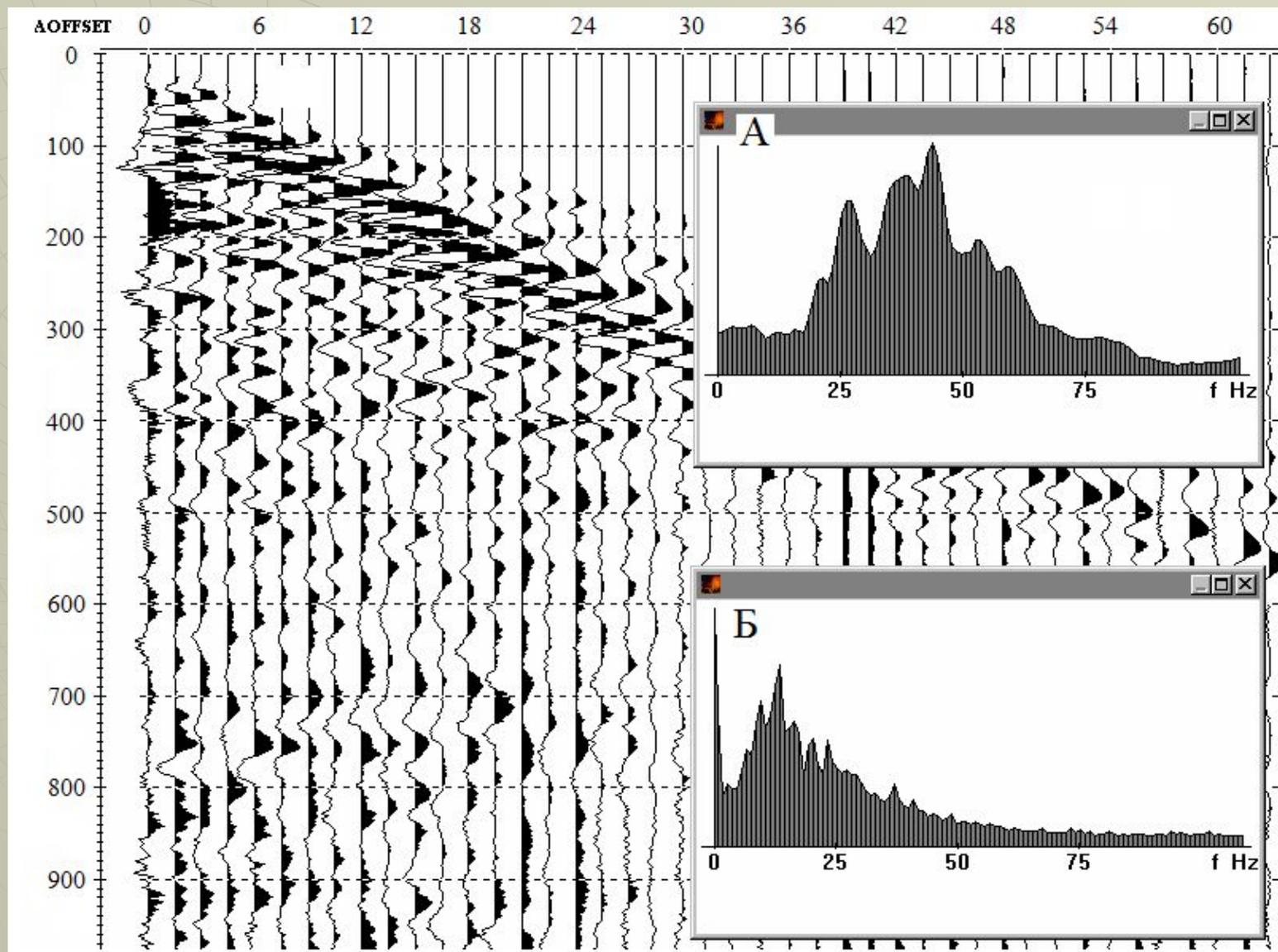
Для того, чтобы показать, на каком интервале профиля расположены ПП (интервал наблюдений) при возбуждении на каком-либо определённом ПВ, на вспомогательной линии, исходящей от этого ПВ под углом  $45^{\circ}$ , **зачерняют тот интервал, на который проецируется линиями под углом  $-45^{\circ}$  интервал расположения ПП.** Следовательно, изображение на обобщённой плоскости не только однозначно определяет положение ПВ и ПП на профиле, но в случае многократных перекрытий позволяет легко формировать сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ), общего пункта приёма (ОПП), общих удалений (ОУ), общей глубинной (ОГТ) или средней (ОСТ) точки.

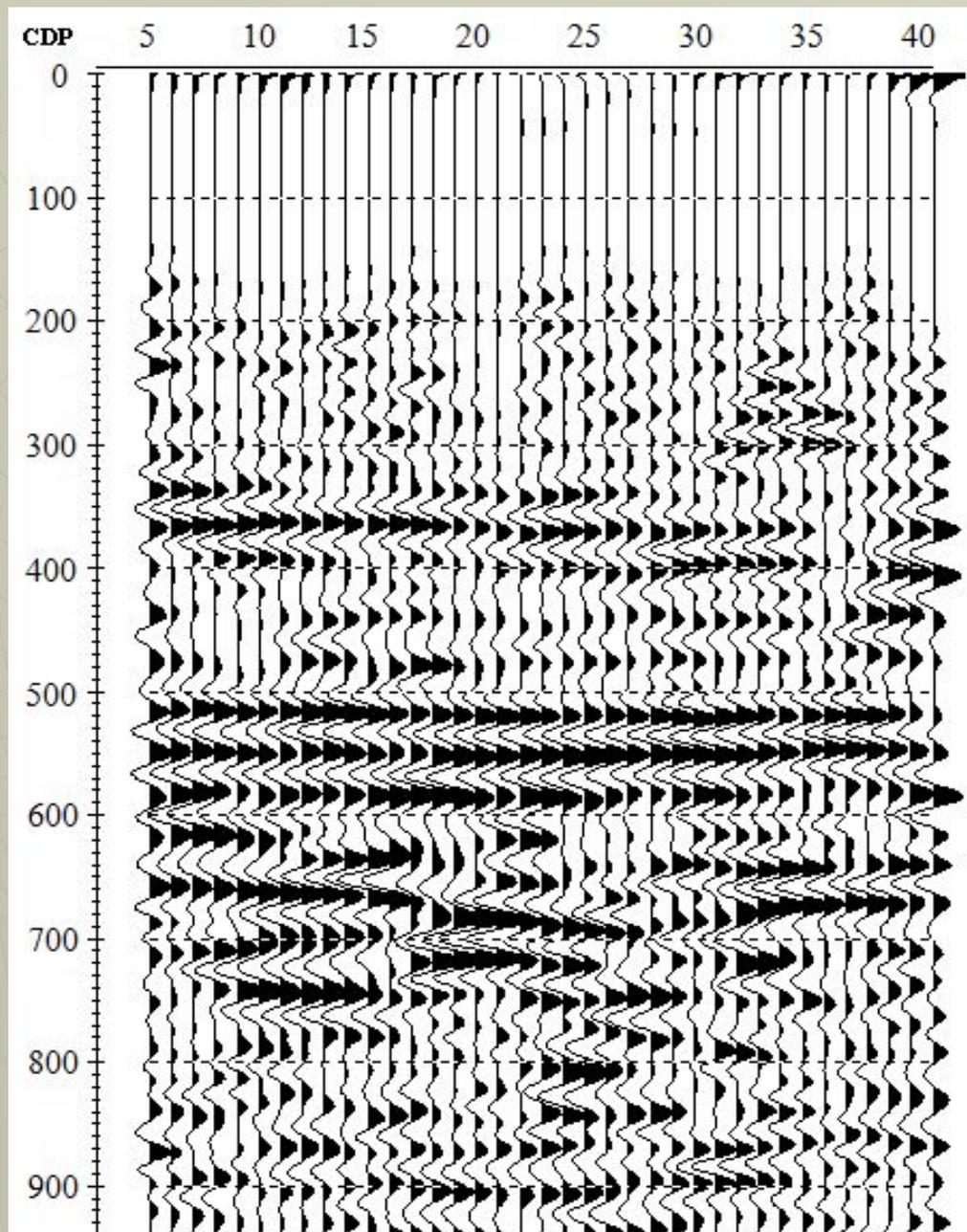
Процесс обработки данных сейсморазведки МПВ предусматривает:

- 1) чтение, визуализацию и фильтрацию сейсмограмм;
- 2) редактирование трасс и ввод поправок;
- 3) корреляцию первых вступлений волн;
- 4) построение и редактирование годографов;
- 5) определение сейсмических скоростей и построение преломляющих границ.

Обработка производится в интерактивном (диалоговом) режиме и при возникновении каких-либо невязок или сомнений возможен возврат на несколько шагов назад.

# Сейсмограмма ОГТ, частотные спектры сигнала (А), помехи (Б)





Временной разрез  
ОГТ после  
применения  
полосовой  
частотной и  
пространственной  
фильтрации

## Применение сейсморазведки при решении геологических задач

Сейсморазведка в наибольших объемах применяется для изучения структурных форм геологических разрезов. Особое внимание уделяется геологическим структурам и зонам, где можно предполагать наличие нефти и газа. При этом, ввиду высокой стоимости сейсморазведочных работ, принято их планировать для решения только таких задач, которые не могут быть решены другими методами. При изучении глубинных геологических структур, перспективных на нефть и газ, основное значение имеет МОВ-ОГТ. Наиболее эффективны эти технологии на акваториях, где бурение скважин обходится очень дорого, а качество сейсмических данных значительно лучше, чем на суше.

Применение сейсморазведки помимо структурной и нефтегазовой геологии эффективно в рудной и угольной геологии. С помощью как МПВ, так и МОВ удастся регистрировать волны, возникающие в ослабленных зонах, связанных с тектоническими нарушениями. Последние важны для изучения в рудной геологии в связи с приуроченностью к тектоническим зонам рудных скоплений, а, в угольной геологии опережающий прогноз тектонических разрывов, особенно малоамплитудных, необходим при проектировании строительства и в процессе эксплуатации шахт и карьеров, поскольку непредвиденная встреча тектонических нарушений резко снижает эффективность добычи углей.

В инженерной геологии и гидрогеологии сейсморазведкой изучают особенности строения верхней части разреза, в связи с чем наблюдают преимущественно проходящие и преломленные волны, реже – отражённые. С помощью МПВ решаются задачи отбивки границ между покровными и коренными отложениями, определения уровня грунтовых вод, оценки карстово-суффузионной опасности, строения дна водоемов и т.д.

## Лекция 11

Общие сведения о радиоактивности.

Радиометрические методы разведки для решения задач поисков и разведки полезных ископаемых, в геоэкологии, инженерной геологии и др.

**Ядерная геофизика** – раздел разведочной геофизики, основанный на изучении распределения в земной коре естественных и искусственно созданных радиационных полей, изучаемых двумя основными группами методов:

а) радиометрическими, основанными на измерении естественных  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$  - излучений горных пород и обусловленных кларковыми или аномальными содержаниями в них радионуклидов, или концентрацией изотопов радона в почвенном воздухе,

б) ядерно-физическими, предусматривающими поэлементный анализ горных пород путем изучения вызванной радиоактивности.

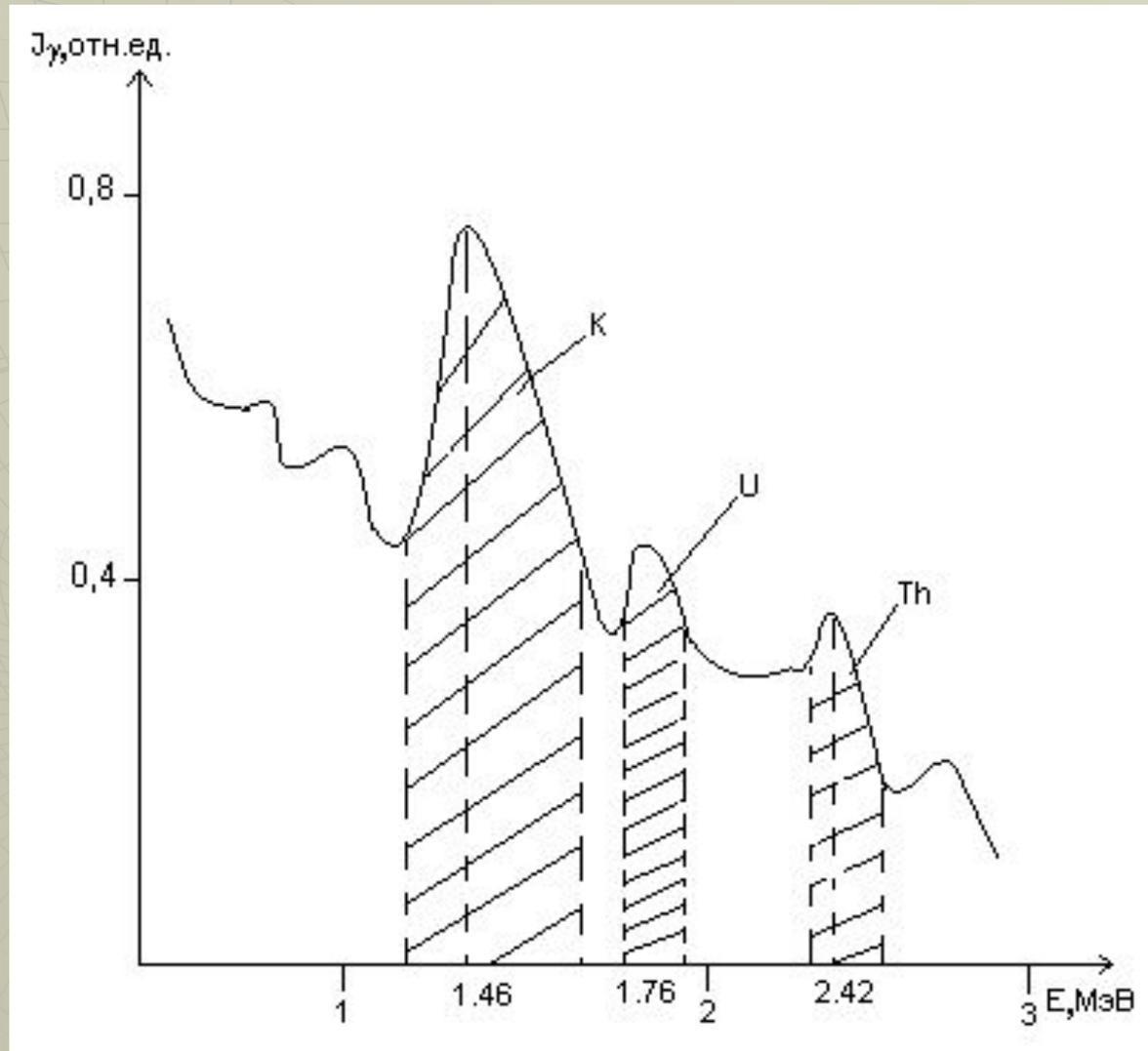
Поле ионизирующих излучений (**естественной радиоактивности**) присуще Земле, как космическому объекту, и складывается из:

- 1) космического излучения;
- 2) радиоактивного распада элементов земной коры;
- 3) дегазации радиоактивных газов, выходящих на поверхность (радон Rn, торон Th).

В результате на дневной поверхности формируется **радиационный фон**. В этом фоне доля космического излучения около 50% и составляет 3-6 мкР. С увеличением высоты космический радиационный фон возрастает в среднем на 1,5 мкР на каждый километр отметки рельефа местности. Остальная доля радиационного фона приходится на естественную радиоактивность горных пород.

Радиоактивному распаду подвергается достаточно большое количество химических элементов, в основном с порядковым номером в таблице Менделеева большим 82. Известно более 230 радиоактивных изотопов (ядра атомов различным числом нейтронов). Однако основной вклад в естественную радиоактивность вносят три радиоактивных элемента уран (U), торий (Th) и калий (K). Они находятся в горных породах и других природных объектах в виде изоморфных примесей и самостоятельных минералов. Их вклад следующий: K 60%, U 30%, Th 10%. Интенсивность естественного  $\alpha$ -излучения ( $J\gamma$ ) наибольшая у K и наименьшая у Th. Излучение происходит при различных энергиях.

# Спектр естественного гамма-излучения



Калий – его материнские породы – преимущественно силикаты магматических пород, полевые шпаты, слюды. Слюды и полевые шпаты преобразуются в различные глинистые минералы. Большая часть калия поступает в породы из водных растворов.

Уран – его материнские породы – силикаты магматических пород. Высокая миграционная способность благодаря образованию хорошо растворимого урания–иона.

Торий – его материнские породы – силикаты магматических пород. Соединения Th нерастворимы, при выветривании они концентрируются в бокситах, тяжелых и глинистых минералах.

Закон радиоактивного распада выражается формулой:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda * N$$

где  $dN$  – число распадающихся ядер из общего количества  $N$  за время  $dt$ ,  $\lambda$ - постоянная распада. связана с другой единицей  $T_{1/2}$  – периодом полураспада соотношением:

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Закон радиоактивного распада описывает последовательное превращение одних элементов в другие и заканчивается образованием устойчивых нерадиоактивных изотопов. Основными являются ряды U и Th. Они включают до 15–18 изотопов. Конечный продукт – радиогенный свинец.

Родоначальники радиоактивных семейств (U, Th) относятся к долгоживущим элементам. У них  $T_{1/2} > 10^8$  лет. В состав семейств урана входят радий (Ra) с  $T_{1/2} = 1620$  лет и радиоактивный газ радон (Rn) с  $T_{1/2} = 3,82$  суток.

При распаде радиоактивных элементов в радиоактивных рядах возникает состояние радиоактивного равновесия:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \lambda_n N_n$$

Калий (K) относится к одиночным радионуклидам, у которых радиоактивный распад ограничивается одним актом превращений.

**Искусственная** (наведенная) **радиоактивность** преимущественно связана с гамма- и нейтронным излучением.

**γ-кванты** – электронейтральные частицы, имеющие более высокую проникающую способность, нежели заряженные **α-** и **β-частицы**. Они представляют собой поток электромагнитного излучения очень высокой частоты ( $f > 10^{18}$  Гц). Проникающая способность квантов в воздухе достигает нескольких сотен метров. В природных объектах, в том числе в горных породах, излучение резко ослабляется вследствие процессов **фотоэффекта**, **комpton-эффекта**, **образования электрон-позитронных пар**. Перечисленные процессы происходят при различных энергиях.

Фотоэффект.  $\gamma$ -кванты взаимодействуют с электронной оболочкой атома:

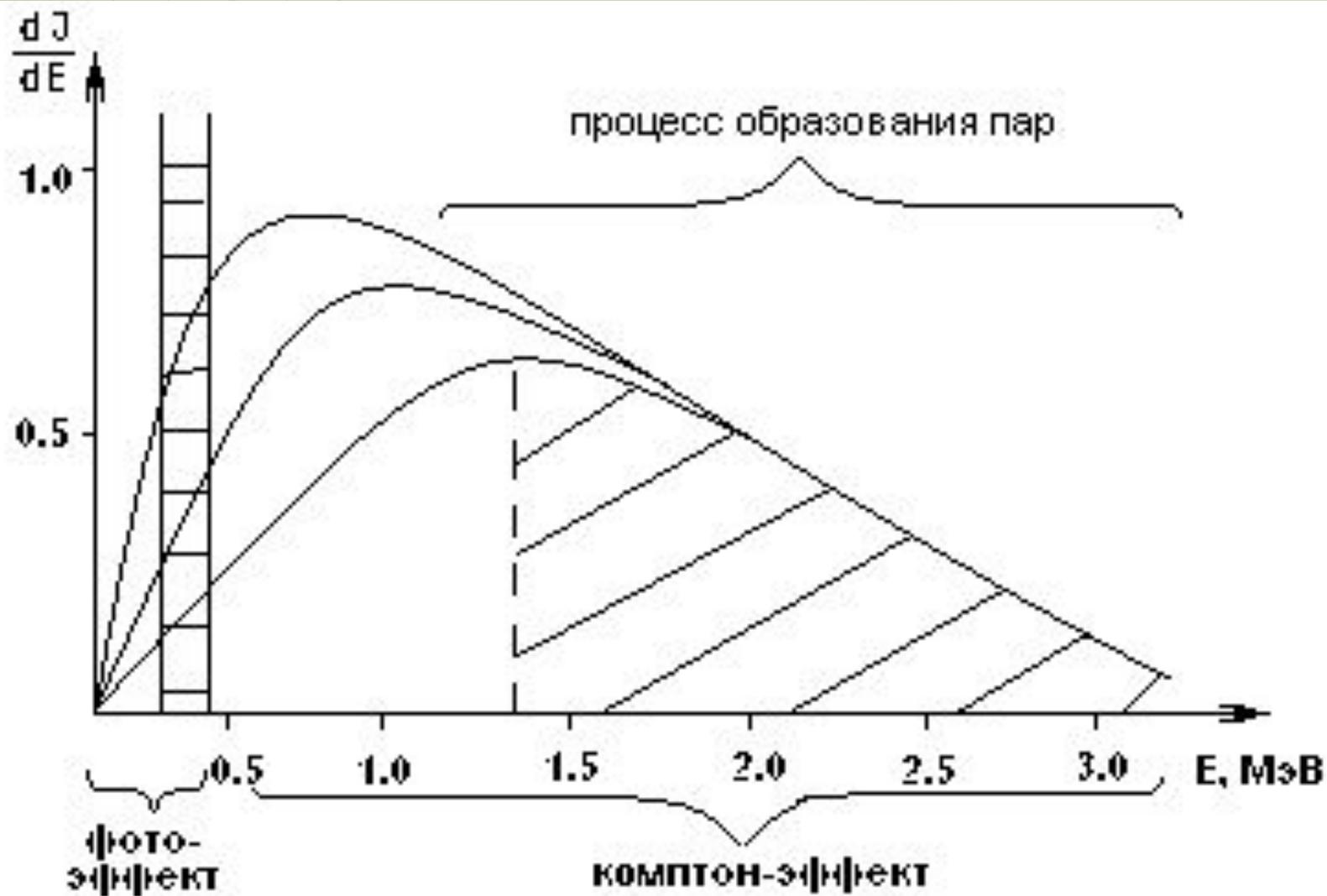
$$E = h\nu - E_0 ,$$

где  $h = 6,62 \text{ Дж}\cdot\text{с}$ ,  $\nu$  – частота электромагнитных колебаний,  $E_0$  – энергия связи электрона в атоме. Процесс идет при  $E < 0,5 \text{ МэВ}$ . Сильная зависимость от  $Z$  (порядкового номера).

Комптоновский эффект.  $\gamma$ - кванты взаимодействуют с электронами, передавая им часть энергии, а затем испытывают многократные рассеяния. Процесс идет в основном при  $0,2 < E < 3 \text{ МэВ}$

Процесс образования электронно-позитронных пар сводится к возникновению последних из фотонов в поле ядер атомов и происходит при энергии  $E > 1,02 \text{ МэВ}$ .

# Спектр многократно рассеянного $\gamma$ -излучения



Главное значение имеет комптон-эффект. В этом диапазоне энергий интенсивность рассеянного гамма-излучения ( $J_{\gamma\gamma}$ ) зависит от плотности среды. Чем больше плотность, тем меньше  $J_{\gamma\gamma}$ . В частности, для моноэлементной среды справедлива формула:

$$n_e = \frac{\delta \cdot N_A \cdot Z}{A}$$

где  $n_e$  – число электронов в единице объема,  $N_A$  – число Авогадро,  $A$  – массовое число,  $Z$  – порядковый номер,  $\delta$  – плотность.

Единицами измерения радиоактивности являются:

- 1) Беккерель (Бк),  $1\text{Бк} = 1\text{ расп/с}$  – системная единица;
- 2) Кюри (Ки) - внесистемная единица, где  $1\text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{ Бк}$ ;
- 3) Удельная массовая активность  $\text{Бк/кг}$  – системная единица;
- 4) Удельная объемная активность  $\text{Бк/м}^3$  – системная единица;
- 5) Мощность экспозиционной дозы ( $\text{А/кг}$ ) – системная единица;
- 6) Микрорентген в час ( $\text{мкр/час}$ ) - внесистемная единица.

**Нейтронное излучение** – возникает при фотоядерных реакциях путем взаимодействия  $\alpha$ -частиц с ядрами легких элементов (бериллий, бор и др.).

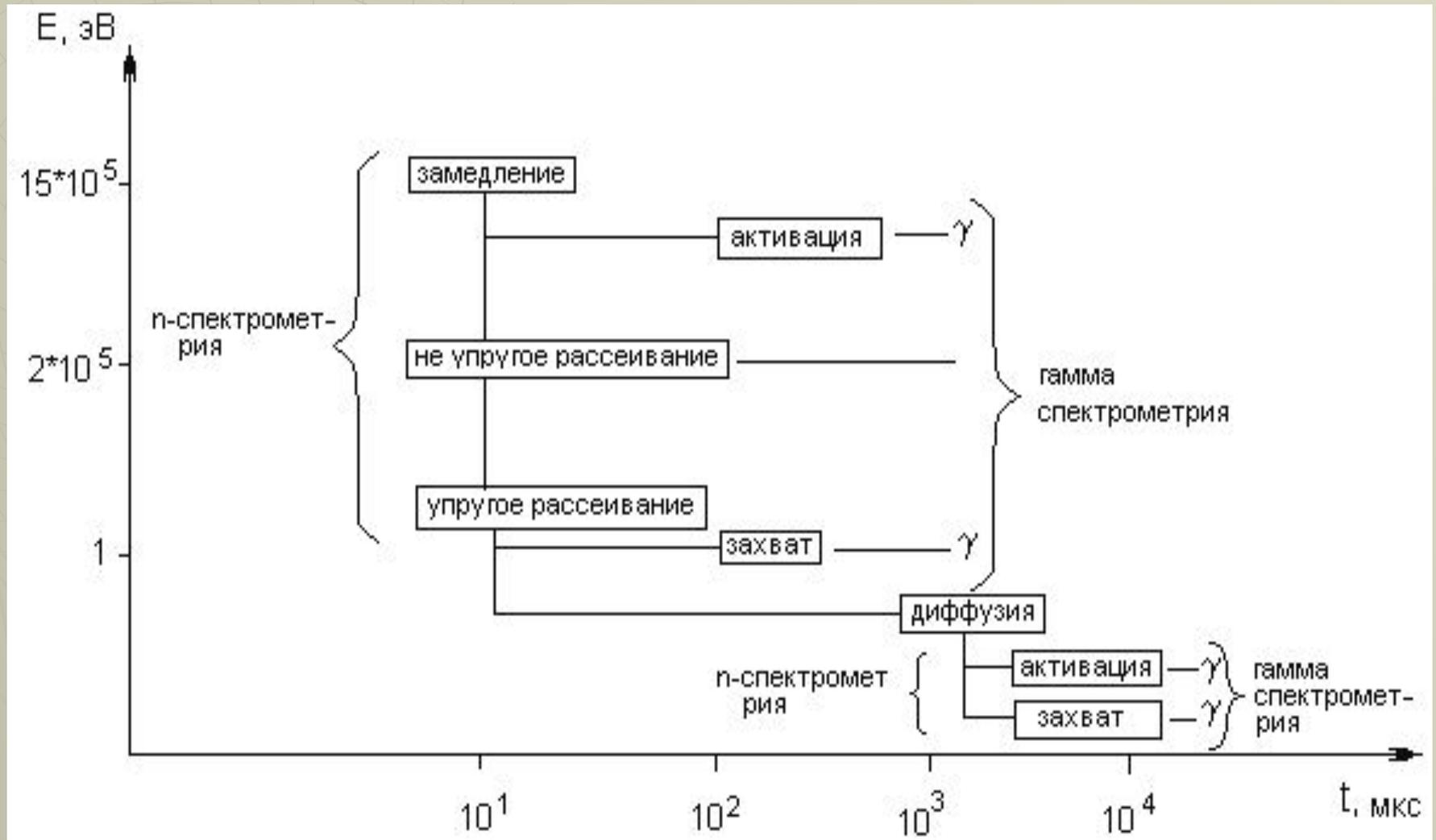
Нейтроны:

1) как и  $\gamma$ -кванты, являются электронейтральными частицами и из всех видов излучений обладают наибольшей проникающей способностью;

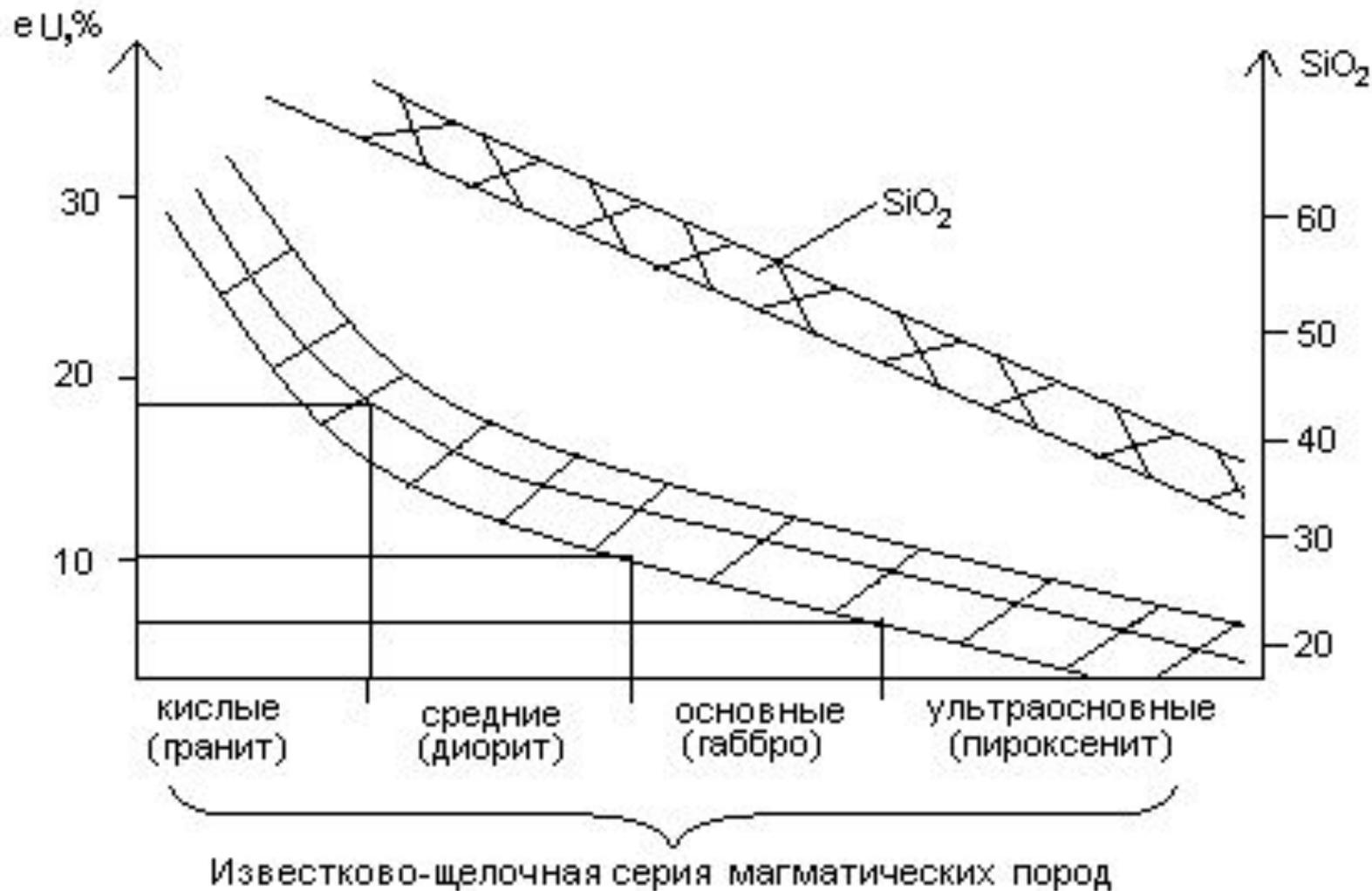
2) разделяются по энергетическому спектру в диапазоне энергий  $E = 10^7 \div 10^{-3}$  эВ на быстрые, промежуточные, медленные, резонансные, надтепловые, тепловые, холодные.

При взаимодействии нейтронов с природными объектами имеют место два основных, разделенных во времени, процесса: а) замедление быстрых нейтронов ( $t < 10^{-2}$  с), б) диффузия тепловых нейтронов ( $t > 1$  с).

# Диаграмма процессов замедления быстрых и диффузии тепловых нейтронов



# Изменение естественной радиоактивности в щелочноземельном ряду магматических пород



# Изменение естественной радиоактивности в зависимости от степени метаморфизма пород



## Нейтронные свойства пород

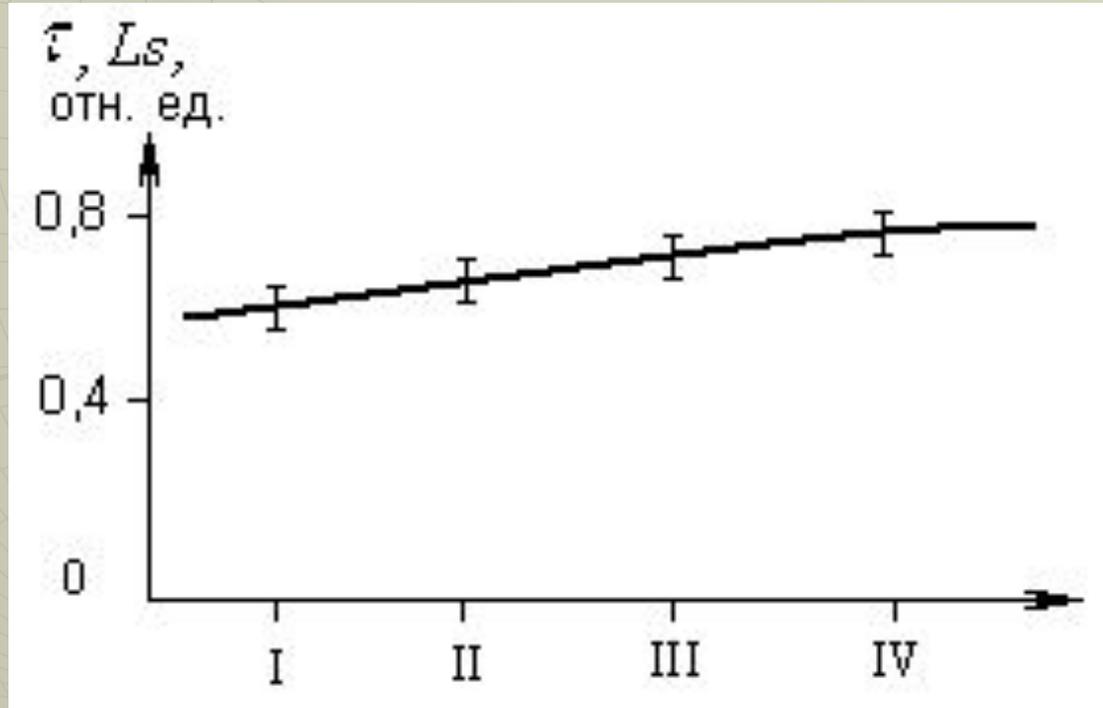
Среди горных пород по воздействию на них нейтронов можно выделить 3 крупные группы:

- 1) породы высокого водородосодержания;
- 2) резонансные замедлители;
- 3) тяжелые замедлители.

Основную роль в формировании нейтронных свойств горных пород играют: 1) водород и породообразующие минералы различных классов; 2) содержание химически связанной воды.

Показателями нейтронных свойств являются время жизни ( $\tau$ ) и длина замедления ( $L_s$ ). Эти показатели имеют между собой линейную связь: чем больше  $\tau$  тем больше  $L_s$ .

# Тенденция изменения нейтронных свойств у кристаллических пород



Магматические породы

I – кислые

II – средние

III – основные

IV – ультраосновные

Стадии метаморфизма

I - зеленосланцевые

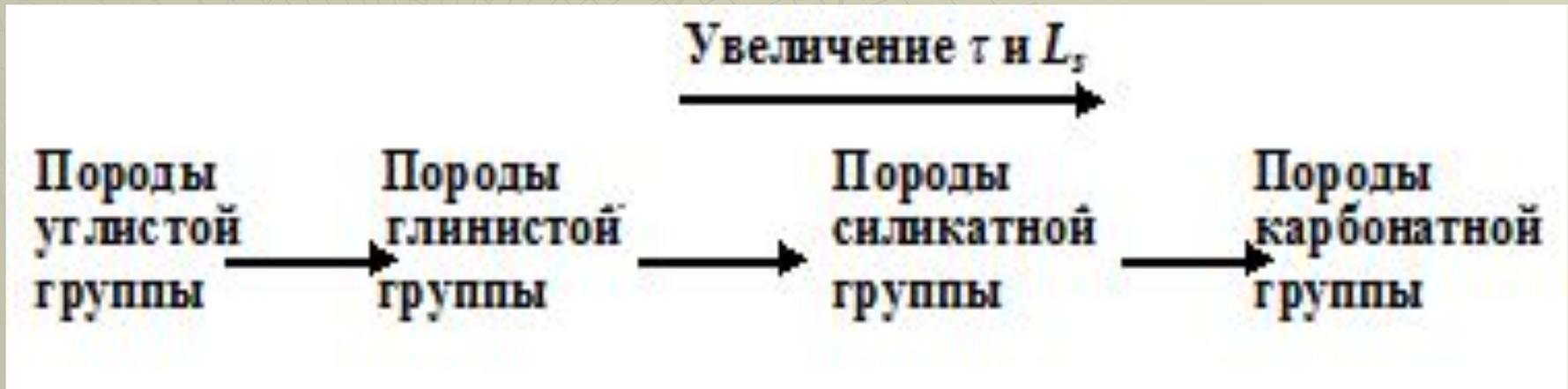
II - амфиболитовые

III - гранулитовые

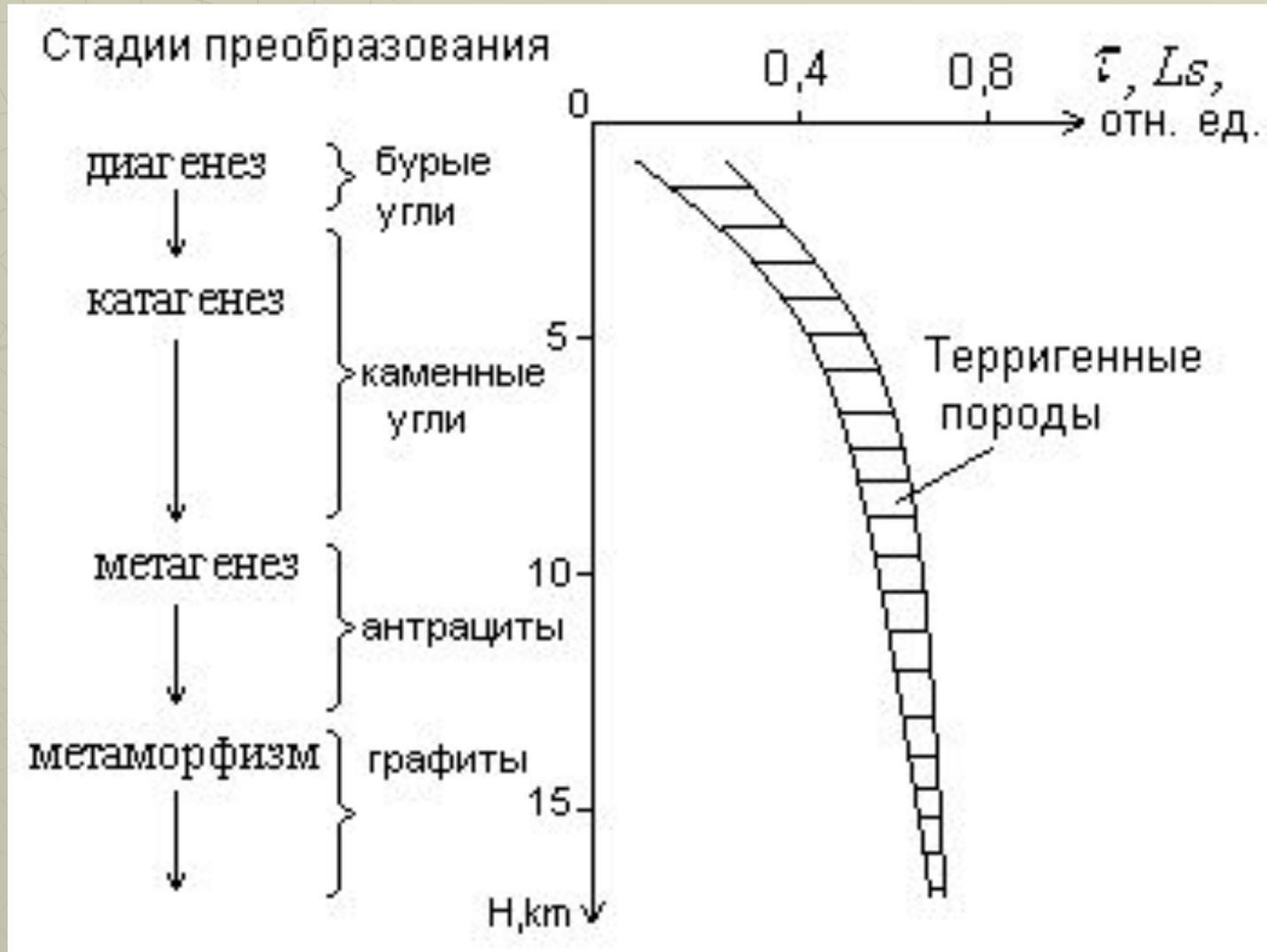
IV – эклогитовые

## Осадочные породы

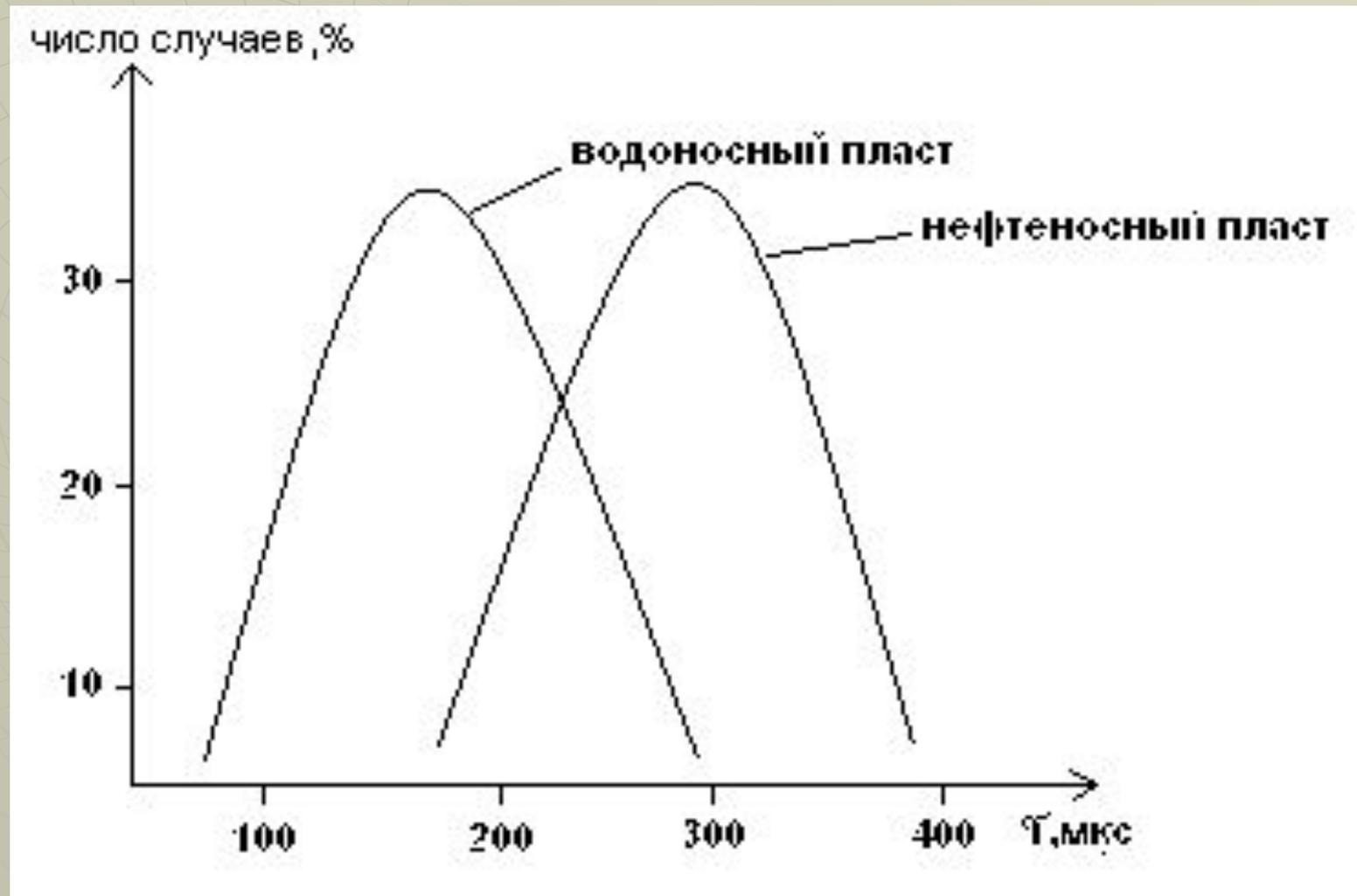
Самым сильным замедлителем нейтронов в осадочных горных породах является водород. Второстепенное значение имеют глинистые и совсем незначительное карбонатные и силикатные минералы. Для одноименных стадий в зависимости от вещественно-петрографического (литологического) состава тенденция изменения показателей  $\tau$  и  $L_s$  для основных групп пород следующая:



# Тенденция изменения $\tau$ и $L_s$ в зависимости от стадий преобразования (окаменения) терригенных пород



# Среднее время жизни нейтронов в водо- и нефтегазонасыщенных пластах

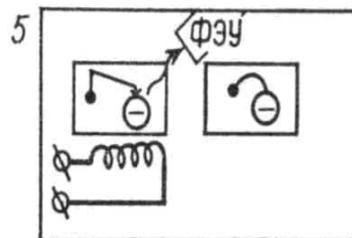
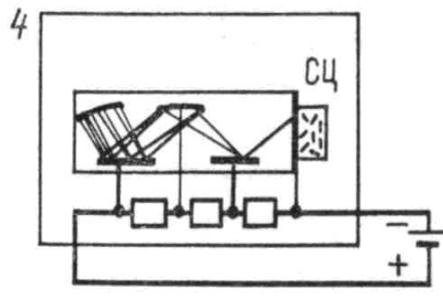
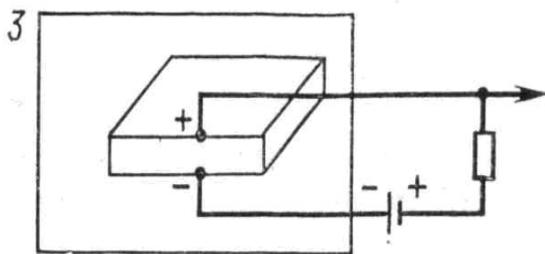
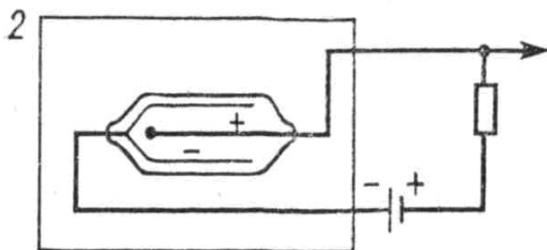
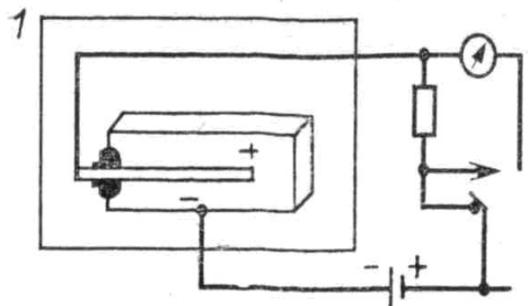


## Аппаратура для ядерно-геофизических исследований

В качестве чувствительных элементов используют ионизационные камеры, счётчики Гейгера-Мюллера, полупроводниковые детекторы, сцинтилляционные счётчики, термолюминесцентные кристаллы.

Приборы для ядерно-геофизических исследований кроме чувствительных элементов содержат усилители тока, индикаторы (для визуального отсчета), регистраторы (для автоматической записи) интенсивности либо естественного ( $J_\gamma$ ) гамма-излучения, либо концентрации эманации радона, либо искусственно вызванных излучений ( $J_{\gamma\gamma}$ ).

# Схемы чувствительных элементов (детекторов) для приборов, используемых при ядерно-геофизических наблюдениях



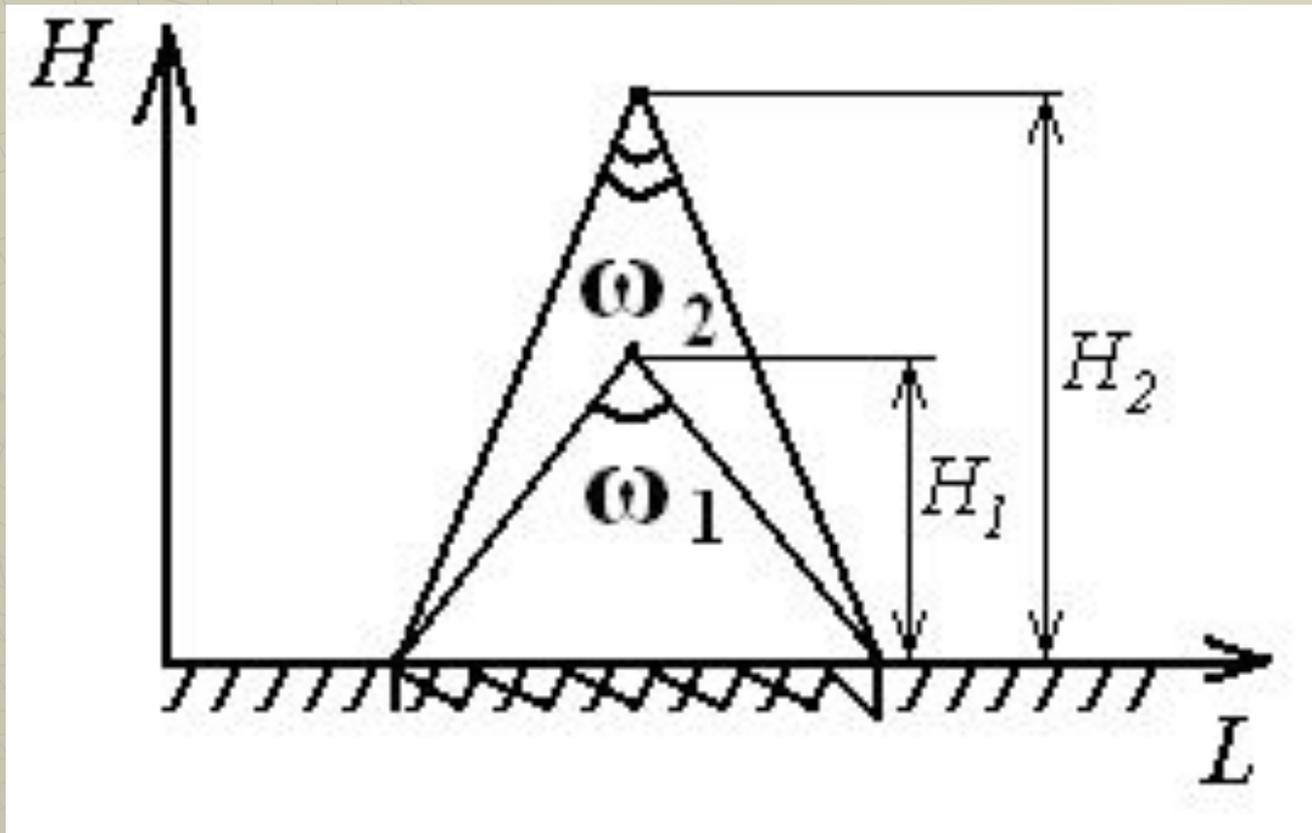
1 — ионизационная камера;  
2 — счетчик Гейгера —  
Мюллера;  
3 — полупроводниковый  
кристалл;  
4 — сцинтилляционный  
счетчик;  
5 — термолюминесцентный  
кристалл;  
СЦ — сцинтиллятор;  
ФЭУ — фотоэлектронный  
умножитель

При ядерно-геофизических исследованиях различают открытые ореолы, выходящие на поверхность и закрытые, то есть развивающиеся на некоторой глубине от поверхности. По генетическим признакам выделяют:

- Первичные ореолы, образовавшиеся одновременно с формированием рудного тела. Их элементный состав близок к составу самих руд. Формы подобны формам рудных тел, а размеры превышают размеры залежи;
- Вторичные ореолы, образующиеся при разрушении или преобразовании руд и первичных ореолов в приповерхностной части. Образование вторичных ореолов является результатом переноса радиоактивного вещества и элементов-спутников в твердой, жидкой и газообразной формах.

Вокруг ореолов существуют области рассеивания, подразделяющиеся на солевую, водную, газовую.

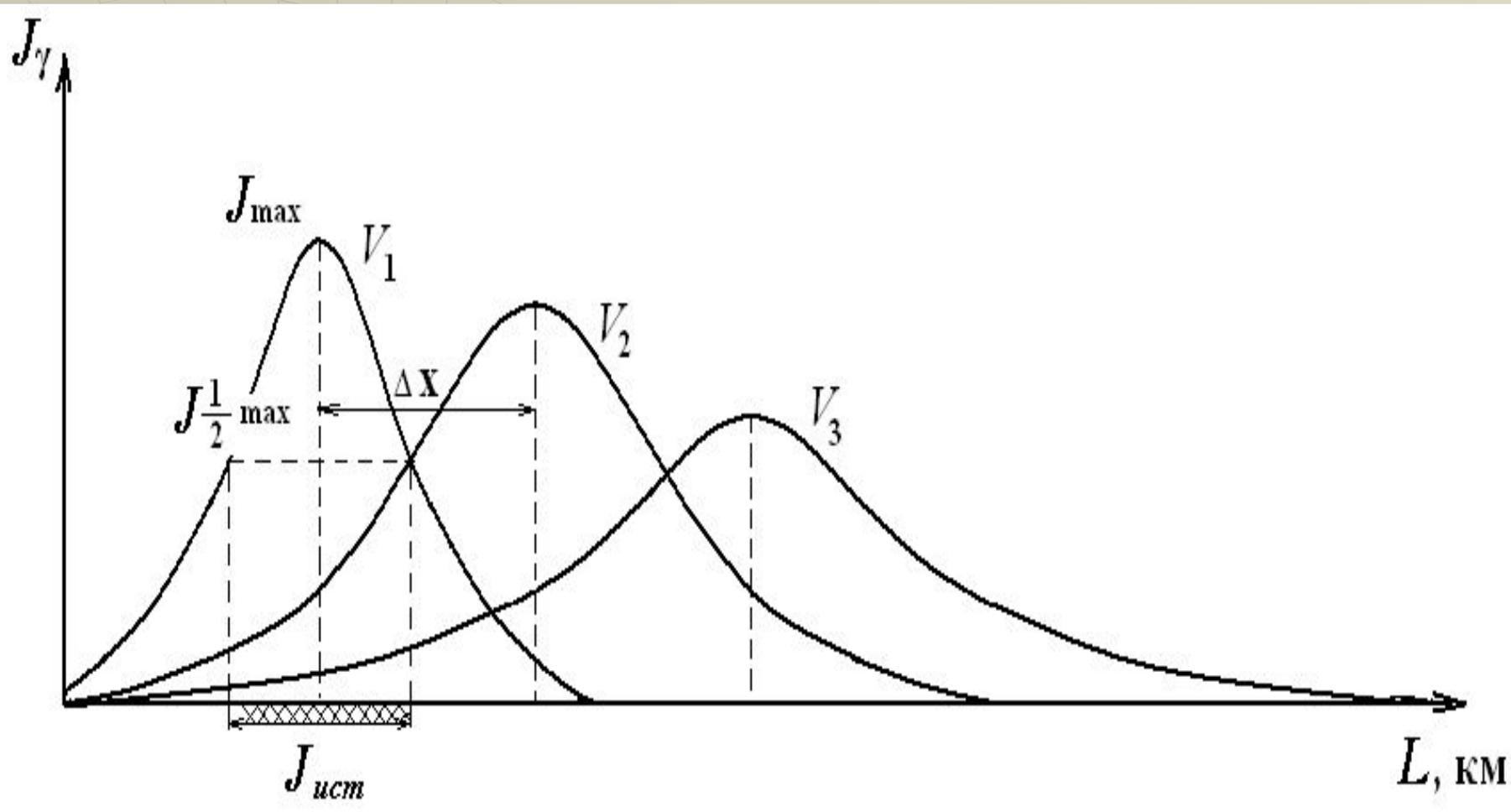
# Соотношение гамма-излучения горных пород и фона



$$H_1 < H_2, \quad \omega_1 > \omega_2, \quad J_H = J \cdot \omega_2; \quad \omega = S/4\pi H_2^2;$$

$S$  – площадь аномалии

# Снижение аномальных значений гамма-интенсивности от скорости летательного аппарата



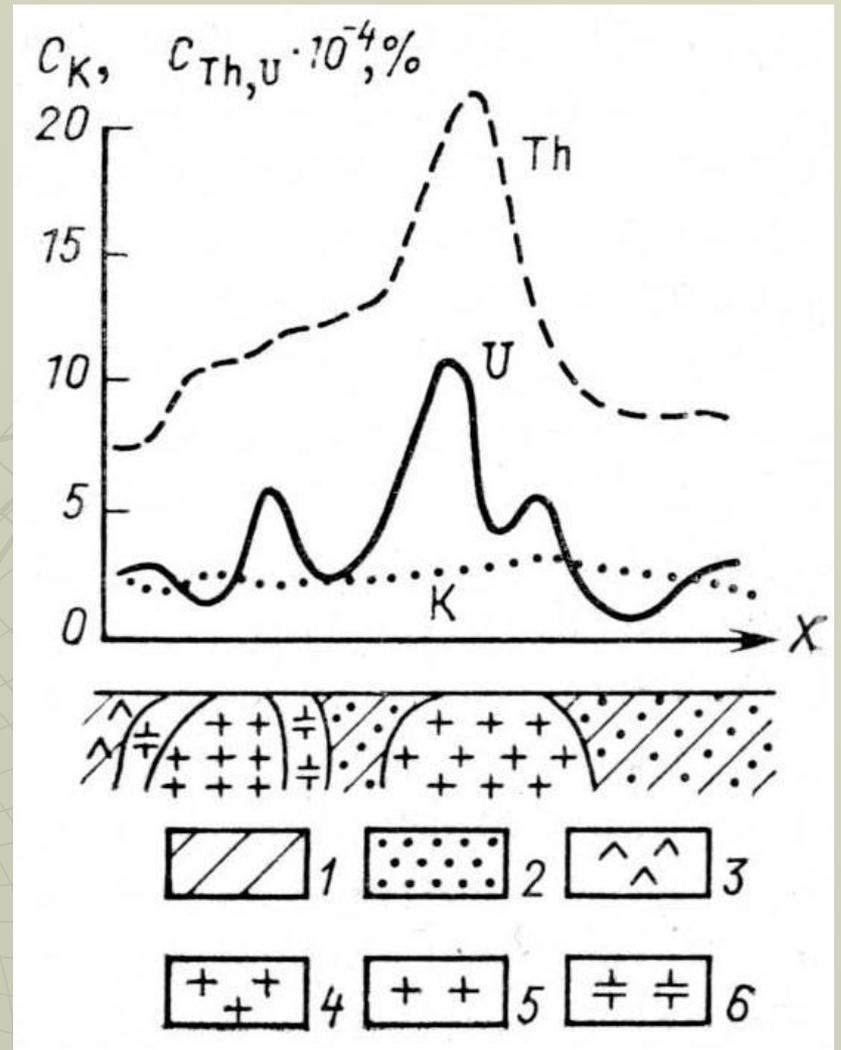
**Автогамма-съёмка** представляет собой скоростную наземную гамма-съёмку во время движения автомобиля с автогамма-спектрометром.

Результаты автогамма-съёмки представляют в виде лент аналоговой регистрации. Выявленные аномальные участки закрепляют на местности, «привязывают» инструментальным способом и проверяют наземными гамма-спектрометрическими съёмками. После первичной обработки материалов строят *карты графиков* и *карты  $\Delta J_\gamma$* . На них визуально (или с помощью ЭВМ) выявляют аномалии. Сравнивая их с геологическими картами и другой информацией, оценивают перспективность территорий на радиоактивные элементы.

**Пешеходная (поверхностная) гамма-съёмка** — один из основных поисковых и разведочных методов радиометрических исследований. Её проводят с помощью полевых радиометров и спектрометров. Рекомендуется ежедневно проверять режим работы прибора с помощью малых контрольных ториевых или радиевых источников.

В результате наземной гамма-съёмки строят графики, карты графиков и карты интенсивности  $\Delta J_{\gamma}$  эквивалентные гамма-активности пород  $\Delta J_{\gamma} = J_{\gamma} - J_{нф.}$

Обработка данных спектрометрической гамма-съёмки сводится к вычислению концентраций (С) урана, тория и калия по  $J_{\gamma}$  на разных энергиях. На рисунке приведен пример результатов спектрометрической гамма-съёмки в Восточной Сибири.



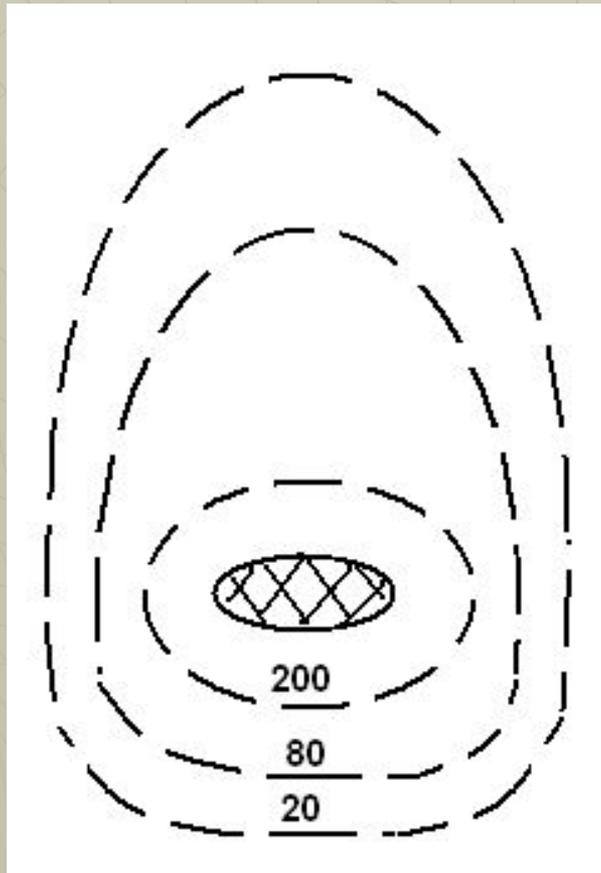
1 — породы песчано-сланцевой толщи; 2 — ороговикованные породы; 3 — диабазовые порфириды; 4 — двуслюдяные мусковитовые граниты; 5 — порфировидные мусковитовые граниты; 6 — амазонит-альбитовые граниты

## ЭМАНАЦИОННЫЙ МЕТОД (ЭМ)

ЭМ основан на изучении концентрации радиоактивных эманаций в почвенном воздухе. По названиям соответствующих эманаций практическое применение в полевых условиях получили радоновый и тороновый ЭМ. Их применение используется при крупномасштабных съемках урана и тория на территориях закрытых рыхлыми отложениями, а также для прослеживания тектонических нарушений, прогноза землетрясений и др.

*Преимущество* ЭМ в высокой глубинности исследований, а *ограничения* обусловлены невозможностью применения в малопроницаемых, сильно увлажненных и мёрзлых грунтах.

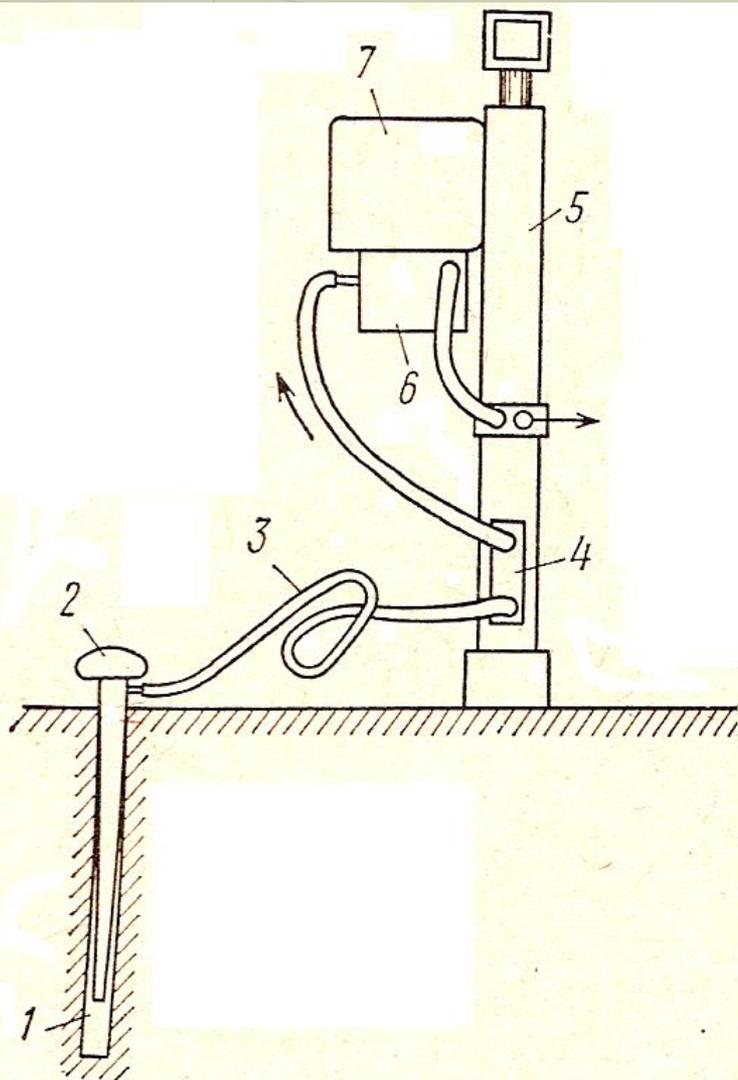
# Схема формирования газового ореола



Перемещению эманации в вертикальном направлении способствуют следующие процессы:

- диффузия за счет градиента давления в земной коре;
- эффузия за счет градиента давления в земной коре;
- тепловая конвекция за счет геотермального градиента;
- фильтрация восходящих воздушных потоков (гравитационное перераспределение);
- турбулентные эффекты в почвенном воздухе при изменении внешних условий.

## Схема отбора подпочвенного воздуха при ЭМ

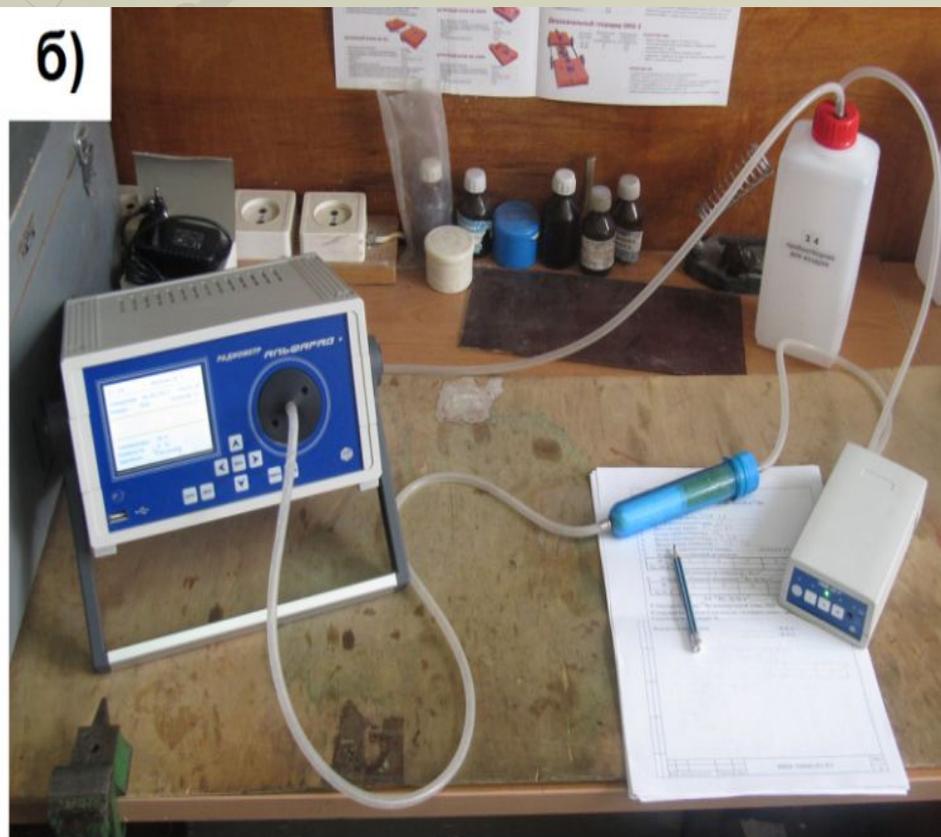
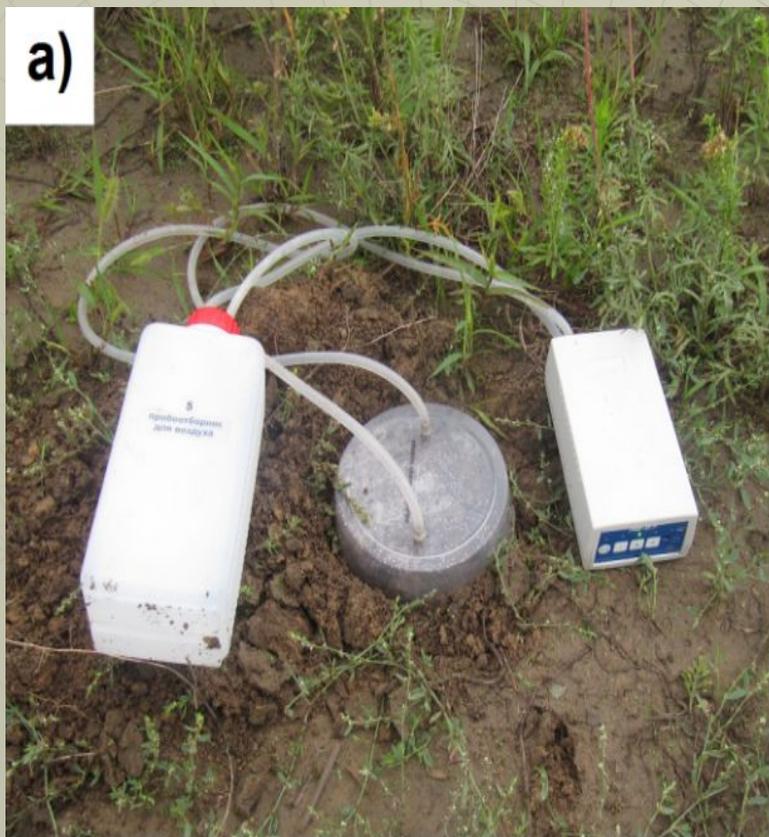


- 1 — шпур; 2 — зонд-пробоотборник;
- 3 — резиновый шланг;
- 4 — пылеулавливатель;
- 5 — насос-держатель;
- 6 — сцинтилляционная камера;
- 7 — пульт эманометра

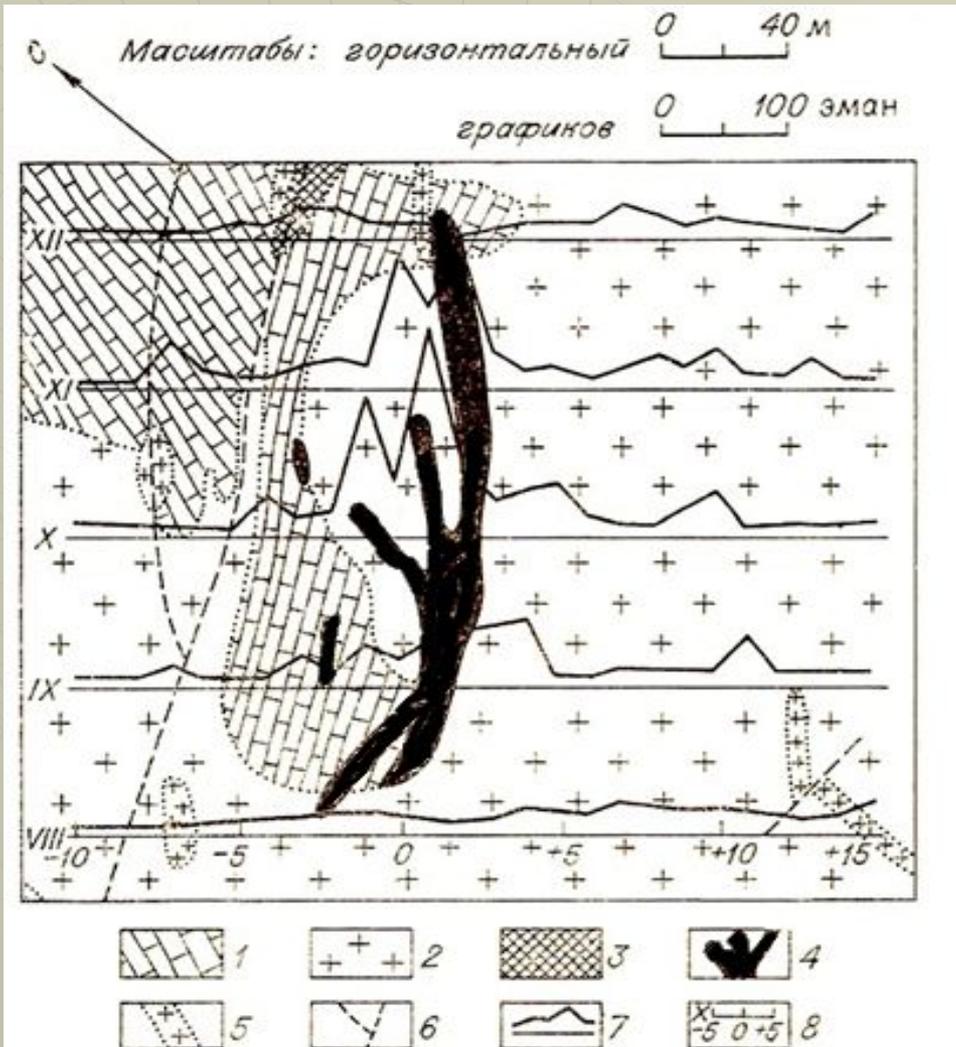
# Выполнение измерений объёмной активности радона $^{222}\text{Rn}$ в пробах прибором АВ-07

а) отбор проб почвенного воздуха

б) определение содержания в пробах радона



# Графики концентраций радона в почвенном воздухе на участке развития скарновой зоны



- 1 — мраморизированные известняки;
- 2 — порфировидные граниты;
- 3 — кварциты по известнякам;
- 4 — рудные тела;
- 5 — графит-порфиры;
- 6 — тектонические разломы;
- 7 — графики концентрации радона;
- 8 — профили и точки отбора проб.

**Ядерно-физические методы разведки** основаны на использовании искусственных радиоактивных источников. Изучению подвергаются горные породы посредством их облучения **гамма-квантами** или **нейтронами**. Облучать можно также с помощью специальных генераторов нейтронов. Меняя источники облучения, их энергию, длительность облучения, изучая разные ядерные реакции источников облучения с электронами и ядрами атомов облучаемых горных пород и руд, можно получить информацию о их химическом составе, физико-механических свойствах, степени насыщенности пород разными флюидами (нефть, вода).

К **радиоизотопным гамма-методам** относятся методы изучения физико-химических свойств горных пород путем облучения их источниками гамма-квантов разных энергий:

- 1) фотонейтронный анализ, или гамма-нейтронный метод (ГНМ);**
- 2) плотностной гамма-гамма метод (ГГМ-П);**
- 3) рентгенорадиометрический метод (РРМ);**
- 4) радиоизотопные нейтронные методы, включающие активационный анализ, нейтронный анализ, гамма-спектральный нейтронный анализ и др.**

# Стадийность ядерно-геофизических исследований

**Региональные исследования** в радиометрии проводятся для выделения потенциально рудоносных территорий и установления критериев рудоносности. Используются дистанционные методы исследований (космические, аэрометоды). Масштабы съёмки 1: 2 500 000 и 1: 1 000 000.

**Специальные геологические съёмки** проводятся на территориях перспективных рудных районов для оконтуривания и прогноза потенциальной рудоносности. Изучаются геологическое строение района, закономерности размещения проявлений оруденения. Масштабы съёмки 1:200 000 и 1: 50 000.

**Поисково-оценочные работы** проводятся с целью геолого-экономической оценки перспективных объектов, оконтуривания месторождений в плане, прослеживания оруденения на глубине, прогнозной оценки запасов, оценки технологических свойств руд, условий их эксплуатации. Масштаб съёмки 1: 10 000.

**Предварительная разведка** проводится на месторождениях, получивших положительную геолого-экономическую оценку.

**При детальной разведке** выясняется геологическое строение месторождения, состав и техническое условие эксплуатации руд с полнотой и достоверностью, достаточной для передачи месторождения в освоение с составлением проекта строительства горнодобывающего предприятия.

## Лекция 12

Тепловое поле Земли и его  
циклические изменения.

Региональные, поисково-  
разведочные и инженерно-  
гидрогеологические  
термические исследования

**Терморазведка** – раздел разведочной геофизики, основанный на изучении распределения в земной коре преимущественно естественных и реже искусственно созданных тепловых полей специальными приборами при проведении аэро-, аква- и наземных геофизических съемок в рамках региональных геотермических исследований и при поисково-разведочных геотермических работах.

**Тепловое поле**, равно как и другие физические поля, связывают с материальной средой, в которой возникают и взаимодействуют тепловые потоки. Последние, воздействуя на материальные, в частности природные объекты, определяют их тепловой режим, обуславливая деформацию теплового поля.

Тепловое поле Земли формируется под действием следующих энергетических процессов:

- 1) Солнечная энергия (получаемая и переизлучаемая обратно);
- 2) Геотермическая потеря теплоты;
- 3) Энергия, теряющаяся при замедлении вращения Земли;
- 4) Упругая энергия, высвобождающаяся при землетрясениях.

Одним из главных источников современной тепловой энергии в земной коре является радиоактивный распад долгоживущих изотопов. Источником тепла является также процесс дифференциации вещества мантии.

Есть смысл характеризовать тепловое поле посредством параметров потенциала  $U$  и напряженности  $E$ . Однако в результате сложившихся многолетних представлений оперируют понятиями теплового потока, геотермической ступени и др. В большинстве случаев изучают тепловой поток. Он обозначается  $Q$ , единица измерения  $Вт/м^2$ , формула – уравнение теплопроводности:

$$Q = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial Z} \right)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности ( $Вт/м^*К$ ),  $\frac{\partial t}{\partial Z}$  - вертикальный градиент изменения температуры  $К/м$ . Знак «-» указывает на убывание температуры.

Зональность земных недр по распределению теплового потока изучена недостаточно в силу отсутствия инструментов проникновения вглубь геосфер.

К тепловым свойствам природных объектов относятся теплопроводность  $\lambda$ , единица измерения которой Вт/м\*К и удельная теплоемкость  $C$ , измеряемая в единицах Дж/кг\*К.

1) Теплопроводность ( $\lambda$ ) – направленный процесс распределения теплоты, приводящий к выравниванию температуры среды:

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad} T},$$

где  $q$  – удельный тепловой поток,  $\text{grad} T$  – градиент температуры.

2) Удельная теплоёмкость  $C$  – величина характеризующая теплоёмкость тела массой  $m$ , при увеличении температуры на  $1^\circ$  при действии количества теплоты  $Q$ . Единица измерения Дж/кг\*К.

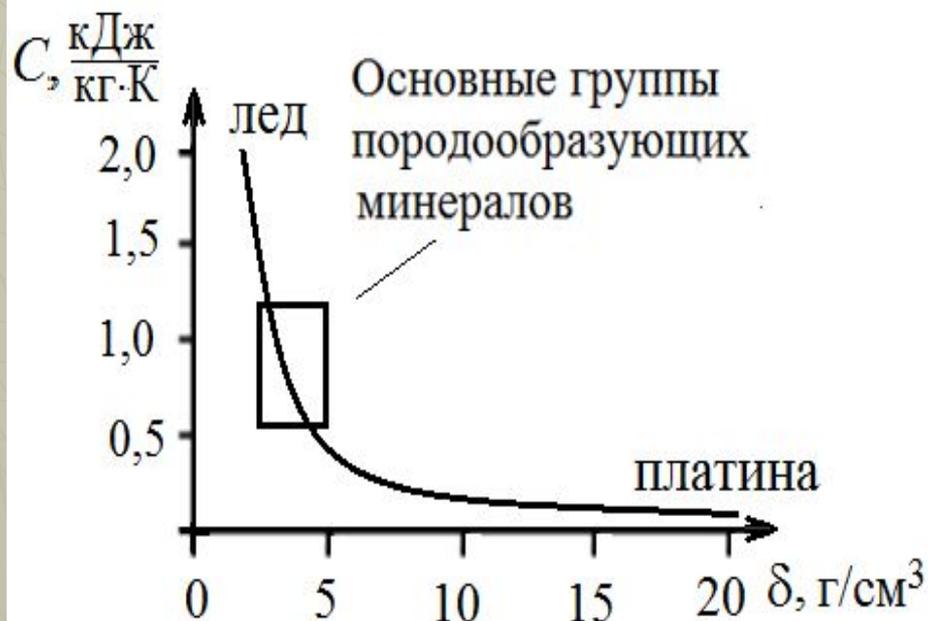
$$C = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)},$$

где  $m$  – масса тела,  $Q$  – количество теплоты,  $T_2 - T_1$  – изменение температуры тела.

Теплопроводность минералов изменяется в пределах 0,3 (серы)÷420 (серебро) Вт/м\*К и зависит от минерального состава, формы, размеров и пространственной ориентации кристаллов или зерен, температуры и давления. Примерный ряд убывания  $\lambda$  для минералов:

Группы минералов	$\lambda$ , Вт/м*К.
Графит, алмаз	120
Сульфиды	20
Оксиды	10
Хлориды	6
Карбонаты	4
Силикаты	3,5
Сульфаты	2,8
Нитраты	2
Серы, селен	0,8

Теплоемкость минералов изменяется в пределах  $0,125 \div 4$  кДж/кг\*К и зависит от их химического состава и структуры. Так как плотность ( $\delta$ ) также определяется составом и структурой, то наблюдается тесная связь  $C$  и  $\delta$



Возрастание теплоемкости минералов в ряду:

самородные минералы

сульфиды

оксиды

сульфаты

карбонаты

силикаты

**Теплопроводность нефти** при  $t = 20^\circ$   $0,13 \div 0,14$  Вт/м\*К.

$\lambda$  убывает в породах при увеличении нефтенасыщенности и увеличивается с ростом давления.

**Теплоемкости воды и нефти** составляют:

$$C_{\text{воды}} = 4 \text{ кДж/кг*К}, \quad C_{\text{нефти}} = 1,8-2,7 \text{ кДж/кг*К}.$$

Средние значения **теплопроводности воздуха и природных газов** :

$\lambda_{\text{воздуха}} = 0,02441$  Вт/м\*К,  $\lambda_{\text{метана}} = 0,034$  Вт/м\*К,  
 $\lambda_{\text{этана}} = 0,021$  Вт/м\*К. Эти значения возрастают с ростом температуры и давления.

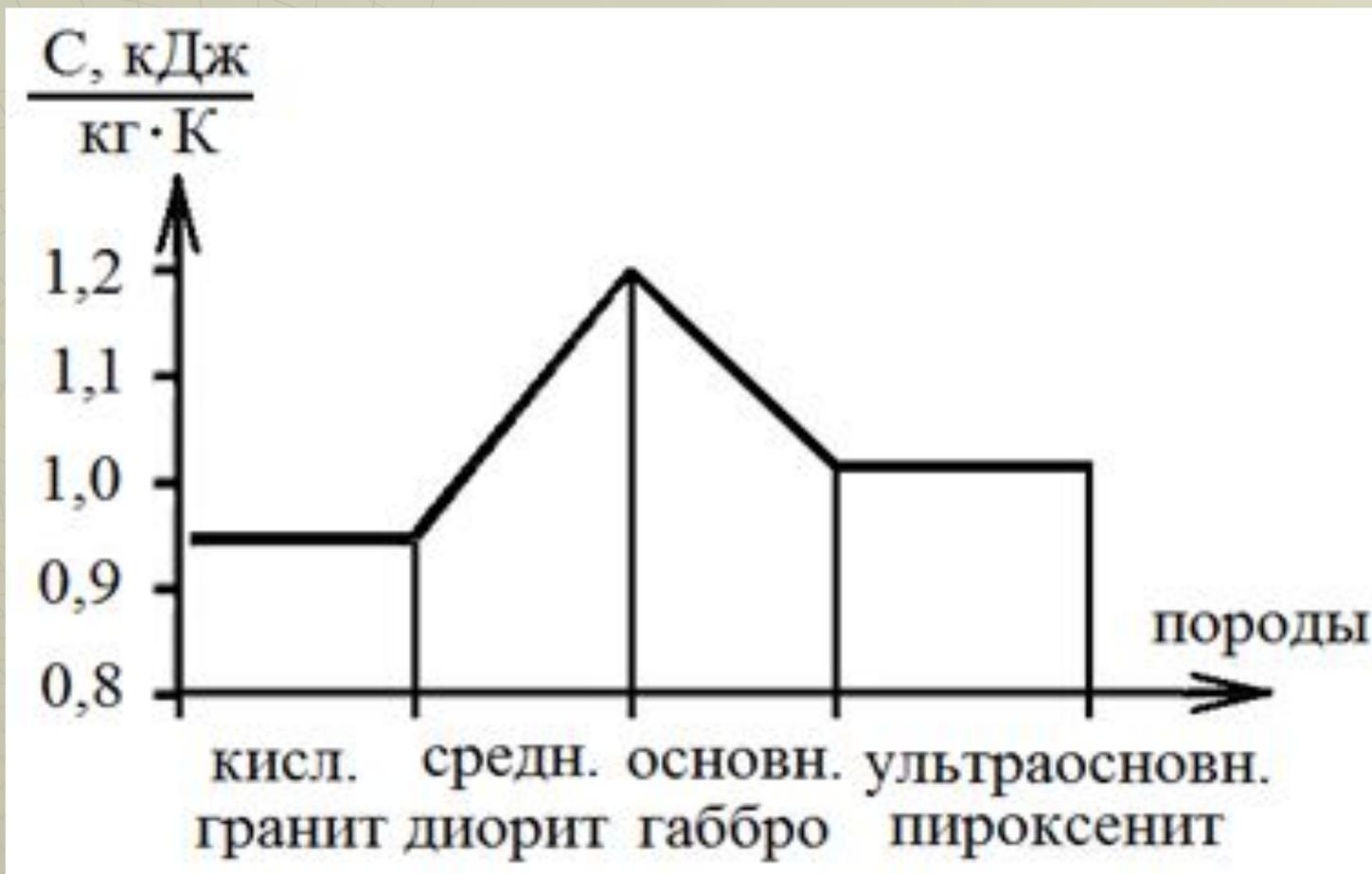
**Теплоемкость воздуха и природных газов:**

$$C_{\text{воздуха}} = 1 \text{ кДж/кг*К},$$
$$C_{\text{метана и этана}} = 2,6 \div 3,6 \text{ кДж/кг*К}.$$

# Изменение теплопроводности в щелочноземельном ряду магматических пород



## Изменение теплоёмкости в щелочноземельном ряду магматических пород



**К оптическим свойствам пород относятся:**

- 1. альbedo**, характеризующее отражательные свойства поверхности (%);
- 2. коэффициент яркости**, т. е. отношение яркости поверхности в рассматриваемом направлении к яркости белой идеально рассеивающей поверхности;
- 3. степень черноты**, показывающая, во сколько раз плотность излучения данного объекта меньше плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре, и др.

Перечисленные свойства оказывают влияние на результаты инфракрасной съемки. .

*Решение прямых задач терморазведки*, то есть расчёт аномалий теплового потока над нагретыми телами простой геометрической формы (шар, столб, цилиндр, пласт и др.), осуществляется по аналитическим формулам. Для более сложных физико-геологических моделей (ФГМ), например, теплового поля над реальными средами, используются программы математического моделирования геотермии (численные расчеты). При этом должны быть известны геометрические параметры и тепловые свойства как объектов поиска, так и вмещающей среды.

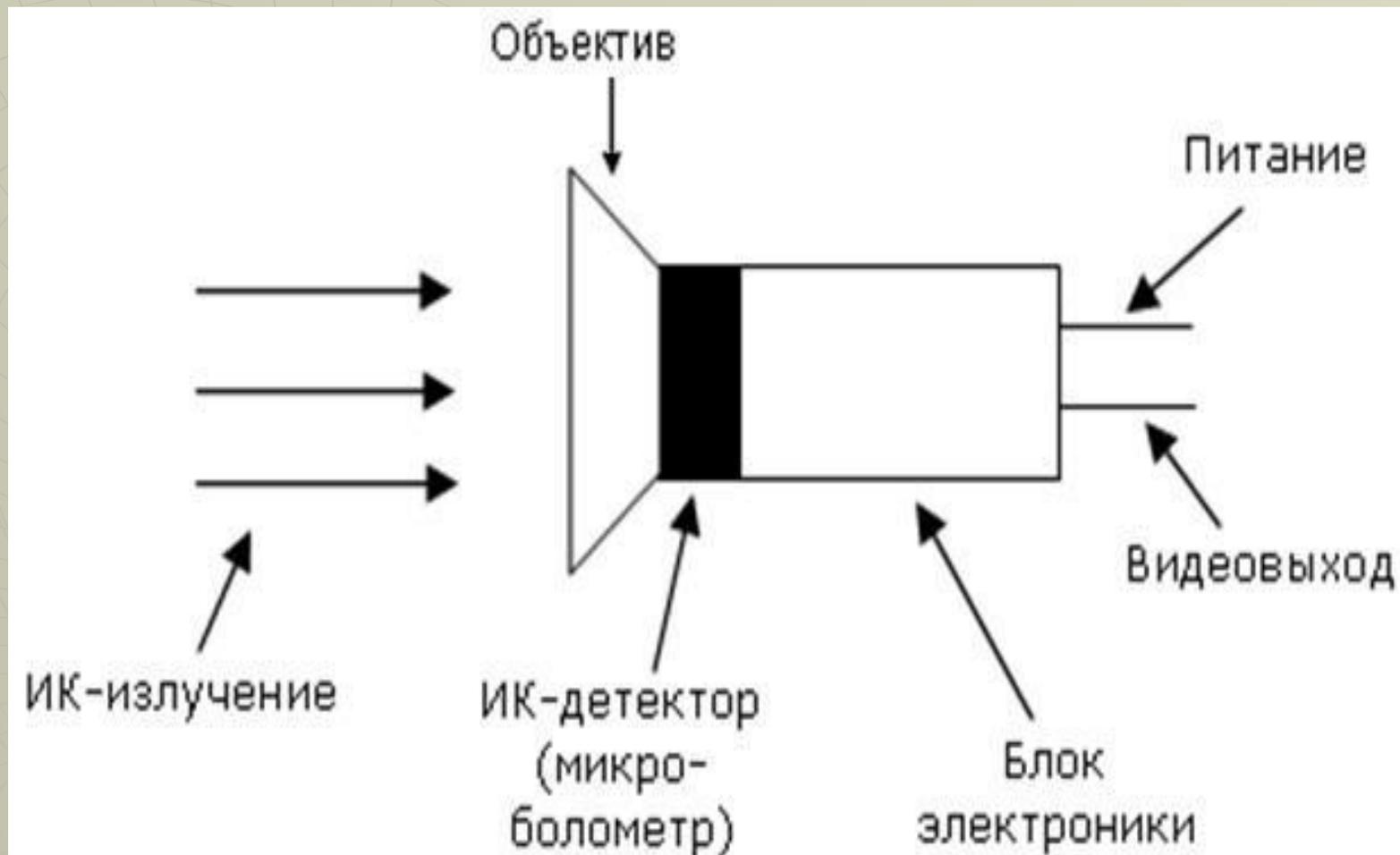
*Решение обратных задач терморазведки* сводится к определению параметров объектов, создавших тепловые аномалии, путем сравнения этих параметров с теоретическими, рассчитанными в ходе математического моделирования. Параметры совпавшей модели можно перенести на изучаемый объект. При этом, как и в любом геофизическом методе, в геотермии обратная задача решается не однозначно. Поэтому при решении обратных задач может рассматриваться несколько ФГМ. В ходе геологического истолкования результатов из них можно выбрать те (или ту), которые в наибольшей степени отвечают всем известным геолого-геофизическим данным.

## Аппаратура для геотермических исследований

Для геотермических исследований используют разного рода тепловизоры, термометры, термоградиентометры и тепломеры.

**Тепловизоры** используются для дистанционных *аэрокосмических — радиотепловых и инфракрасных съемок (РТС и ИКС)*. Они работают в участках спектра длин электромагнитных волн от микрометрового до миллиметрового диапазона, где имеются так называемые окна прозрачности для разной облачности. *Фоточувствительными элементами (фотодетекторами)* тепловизора служат особые кристаллы, чувствительные к электромагнитному излучению.

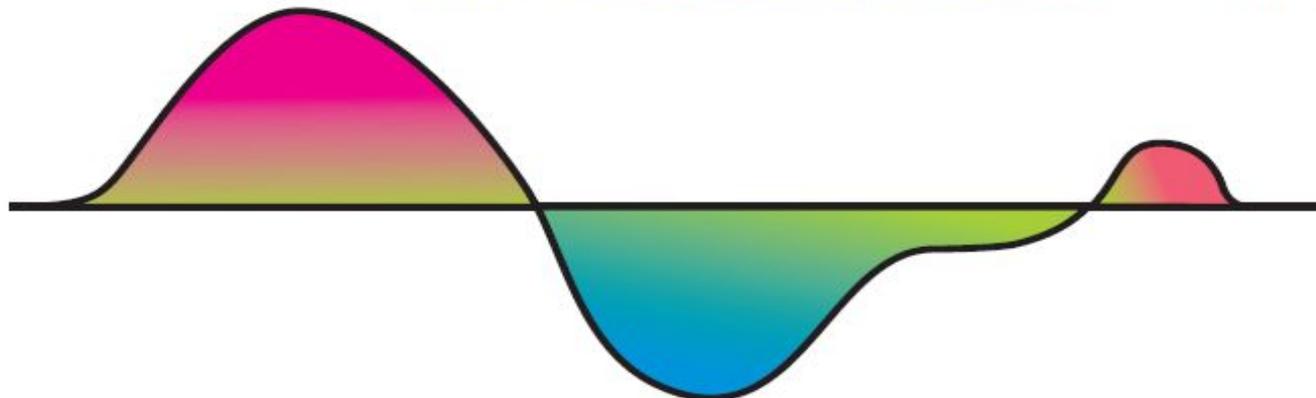
## Типовая блок-схема тепловизора



# Изменение локального теплового поля осадочного чехла при ранжировании объектов по относительной перспективности на залежи углеводородов



min  max



*Тепловизоры-спектрометры* содержат устройства спектрального разделения принятых излучений на разных частотах. В тепловизорах аэрокосмической съёмки имеется сканирующее электронно-механическое устройство для развертки фотодетектора перпендикулярно к направлению полета носителя техники, чтобы осуществить развертку изображения по строкам и кадрам, т. е. провести обзорную площадную съёмку. Обработка информации проводится с помощью ЭВМ.

**Термометры** служат для измерения температуры пород или воды в скважинах (шпурах) или донных осадках. Чувствительным элементом таких термометров являются *термочувствительные датчики*, в качестве которых используются *терморезисторы*, *полупроводниковые резисторы-термисторы*, *термочувствительные пьезокристаллы*, *включаемые в измерительные мостовые схемы с источником тока*. Существуют шпуровые, скважинные и донные термометры с разной инерционностью (измерения могут длиться до 25 мин), погрешностью измерений температур (до  $\pm 0,02$  °С) и с градуировочной точностью (до  $\pm 0,01$  °С).

## Современные технологии терморазведки

В настоящее время для исследования состояния теплового поля Земли и ее природных ресурсов применяются **радиотепловые (РТС) и инфракрасные (ИКС) аэрокосмические съёмки**. Ценным их преимуществом является возможность проводить измерения в темноте, а при соответствующем выборе длин волн — и практически при любой погоде.

*Аномалии* на полученных снимках формируются за счет: 1) тепловых потоков из недр, 2) отражения солнечной энергии и зависят от оптических, тепловых и в меньшей степени электромагнитных свойств горных пород верхней части геологической среды.

Недостатком радиотепловых и инфракрасных съёмок является то, что они осложняются термическими помехами, связанными с неравномерным тепловым обменом земной поверхности и атмосферой, изменяющимися климатическими и метеорологическими условиями, состоянием атмосферы и другими факторами.

Контактные измерения теплового поля Земли носят название **геотермических съёмок**, которые сводятся к высокоточному (погрешность не более  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) неоднократному измерению температур, их приращений, иногда тепловых потоков в разведочных скважинах, горных выработках шахт и рудников, донных осадках озёр, морей и океанов.

Чтобы исключить влияние сезонных колебаний температур, замеры на суше ведут на глубинах свыше 50-100 м, а на акваториях — при толще воды свыше 100 м. Термические измерения с целью восстановления температур, нарушенных вскрытием недр, проводят через несколько месяцев после бурения глубоких скважин, через несколько недель или дней после бурения неглубоких скважин или часов после пробивки шпуров.

По результатам геотермических съёмок создаются **базы и банки данных температур**, по которым строятся **региональные термические карты** больших территорий континентов и океанов. Это возможно в связи с тем, что в глубоких горных выработках, в скважинах и на дне океанов температуры не меняются.

Графики и карты распределения температур и градиентов температур служат как самостоятельным источником геотермической информации, так и для расчетов тепловых потоков.

Терморазведка в комплексе с другими геофизическими методами может применяться как в процессе *поисков* и *разведки* нефтяных, газовых, рудных, нерудных и угольных месторождений, так и при эксплуатации этих месторождений. Чаще всего измерения температур пород проводятся в скважинах наземного и подземного бурения и донных осадках океанов, морей в установившемся (за часы, сутки, месяцы в зависимости от глубины скважин) тепловом поле. Кроме того, температуры можно измерять в шпурах, пробуриваемых на земной поверхности глубиной 0,5-2 м. При этом следует учитывать, что в первые минуты или часы существует неустановившееся тепловое поле.

Природа термических аномалий объясняется:

- 1) на месторождениях нефти и газа миграцией углеводородов (УВ) к земной поверхности, особенно по субвертикальным зонам трещиноватости, окружающим нефтегазовые ловушки (антиклинальные, структурно-тектонические и др.);
- 2) на рудных полиметаллических месторождениях бо'льшей теплопроводностью руд по сравнению с вмещающими породами;
- 3) над неметаллическими полезными ископаемыми типа кимберлитовых трубок, из которых до 10 % алмазоносны, - видимо инфильтрацией к кровле трубок поверхностных вод по системам пор и трещин, а также физико-химическими процессами в теле трубок.

Аэрокосмические дистанционные радиотепловые и инфракрасные съёмки дают информацию для исследования природных ресурсов Земли и, в частности, для изучения районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности, геологического картирования и поисков некоторых полезных ископаемых, инженерно-геологических и гидрогеологических съёмок, решения задач почвоведения и мелиорации, изучения снежного, ледяного покрова и динамики ландшафтов, охраны природной среды и др.

Одной из интересных практически важных проблем, решаемых региональной термометрией и терморазведкой, является изучение *геотермических ресурсов*, то есть источников глубинной тепловой энергии недр Земли, используемых для выработки электроэнергии, теплофикации населенных пунктов, в курортологии, парниковых хозяйствах и т. п. Они связаны либо с высокотермальными подземными водами, либо с зонами перегретых пород по сравнению с окружающими массивами.

Термические исследования геологической среды могут использоваться при выделении локальных тепловых аномалий инженерно-геологической, гидрогеологической, мерзлотно-гляциологической и геоэкологической природы. В различных природных условиях получаемые геотермические профили и карты служат для оконтуривания многолетнемерзлых и талых горных пород с разными тепловыми свойствами, изучения динамики подземных вод (приток глубинных вод создает положительные аномалии температур, поверхностных — отрицательные), прогноза приближения забоя выработок к обводненным зонам и решения других задач.

Особый интерес представляет *определение скорости фильтрации подземных вод*. Для выявления мест фильтрации вод из водохранилищ, каналов, рек и стволов скважин, а также интервалов, где утечки отсутствуют, можно использовать измерения естественных и искусственных тепловых полей.

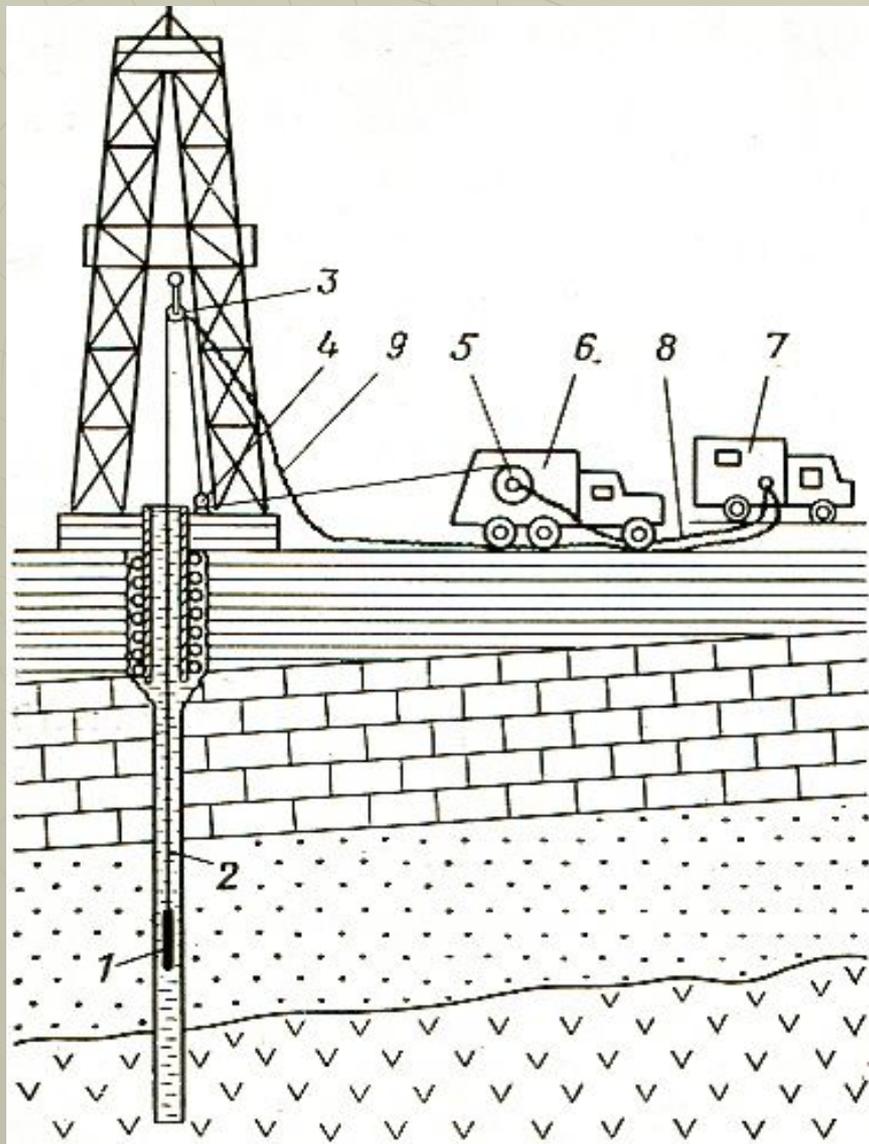
Участки сосредоточенной фильтрации в берега акваторий выделяют по температурным аномалиям, знак которых зависит от температуры вод. Более чёткие результаты получают *при искусственном электрическом подогреве воды*, например, в скважине. По скорости восстановления температур можно не только качественно выявить места утечек, но и оценить скорости фильтрации.

## Лекция 13

Скважина как объект  
геофизических исследований.  
Краткая характеристика  
методов.

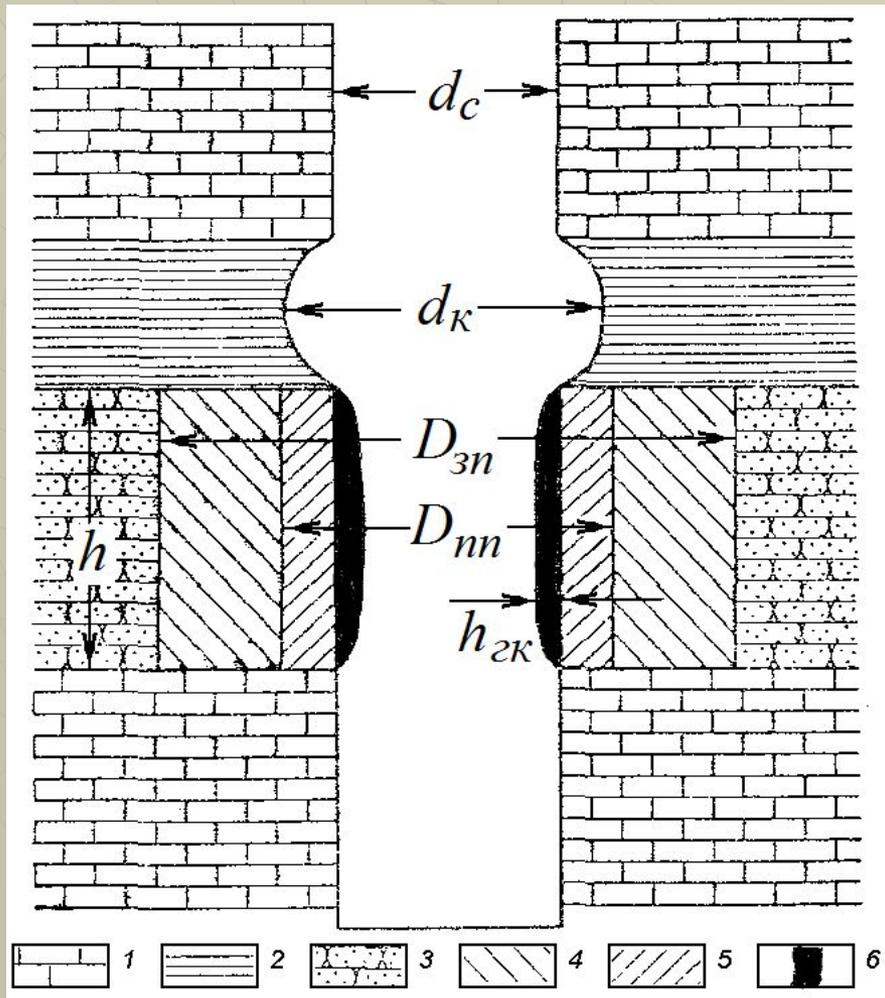
Основы техники и технологии  
производства работ.

# Схема работ методами ГИС



- 1 - скважинный прибор,
- 2 - каротажный кабель,
- 3,4 -подвесной и наземный блок-балансы,
- 5 - каротажная лебедка,
- 6 - операторская подъемника,
- 7 - измерительный блок (модуль),
- 8 - операторская каротажной станции,
- 9 - соединительные провода.

# Разрез околоскважинного пространства в месте пересечения продуктивного пласта

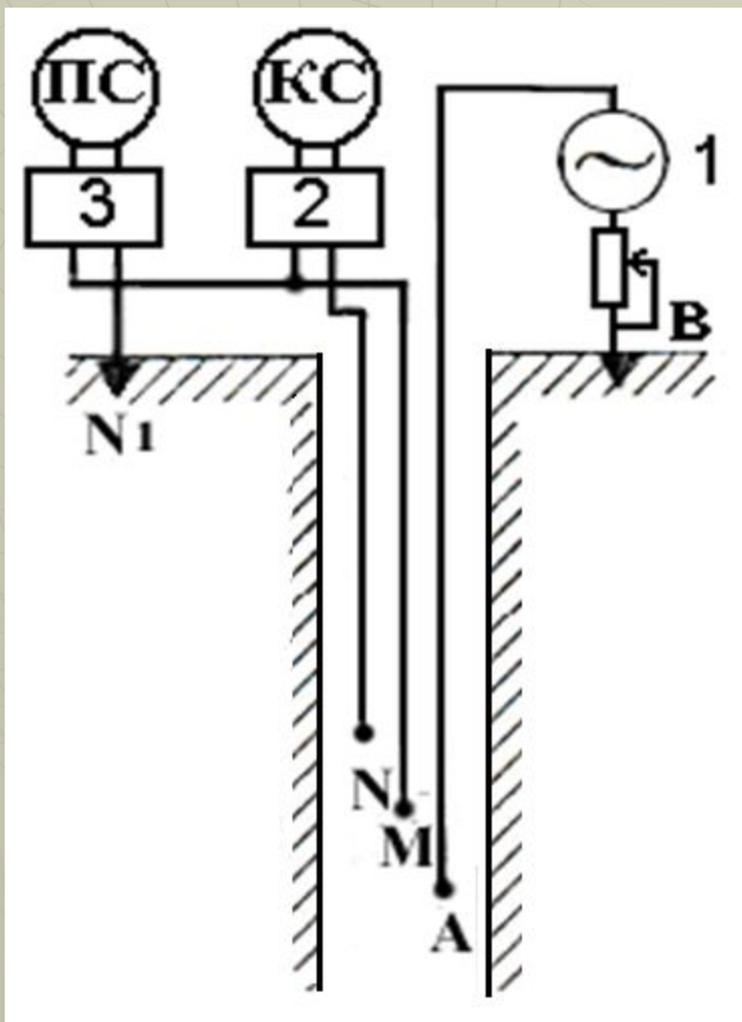


$d_c$  – диаметр скважины,  
 $d_k$  – диаметр каверны,  
 $d_{zn}$  – диаметр зоны  
проникновения,  
 $d_{пп}$  – диаметр промытой зоны,  
 $h_{гк}$  – толщина глинистой корки  
 $h$  – мощность продуктивного  
пласта

В практике геологоразведочных работ наибольшее применение, и соответственно разработку, получили электромагнитные и радиоактивные методы ГИС, несколько в меньшей степени акустические и ещё в меньшей степени магнито- и гравиметрические.

Особое место занимают методы контроля технического состояния скважин и сопровождающие работы в скважинах.

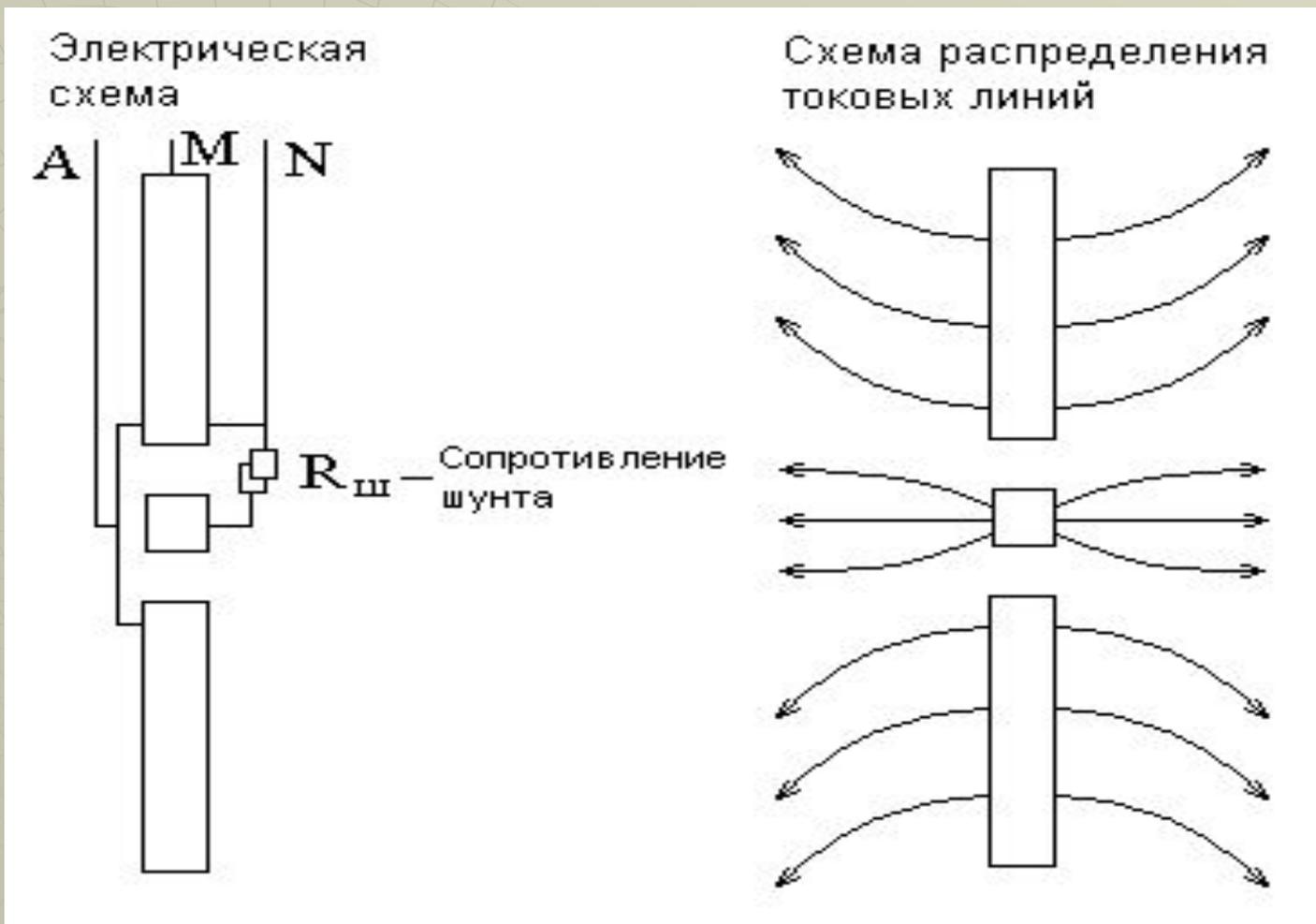
## Схема электрического каротажа КС и ПС



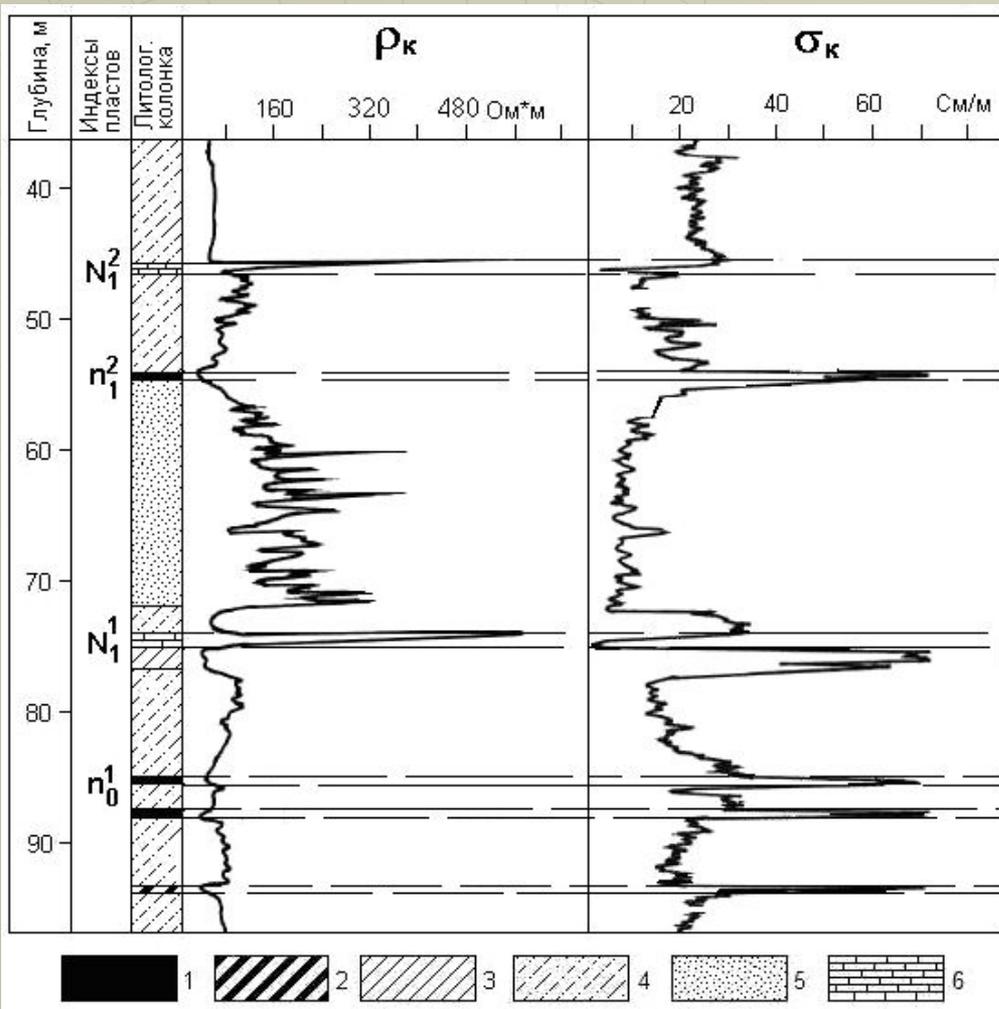
- 1 – генератор,
- 2 – измеритель,
- 3, 4 – фильтры,
- $A, B$  – питающие электроды,
- $M, N$  – измерительные электроды

# Боковой каротаж

Достоинство метода в фокусировке тока, что достигается специальной конструкцией зондов .



# Сопоставление каротажных диаграмм, зарегистрированных зондом БК в угольной скважине. Участок Садкинский-Северный (Восточный Донбасс)

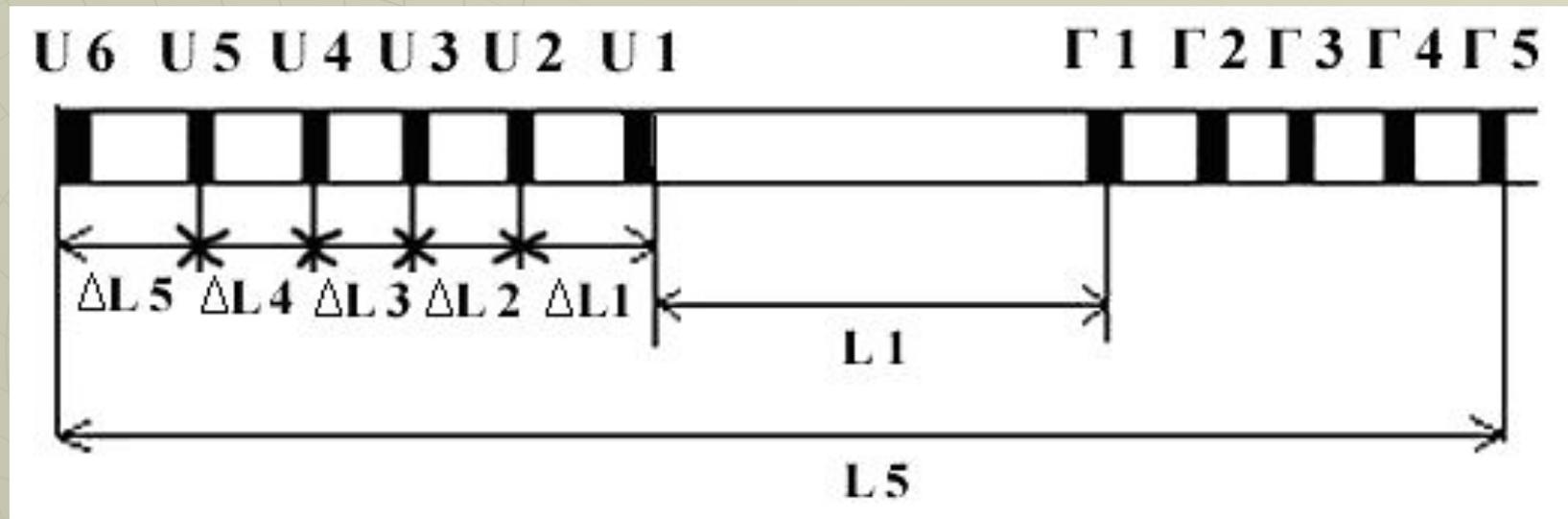


- 1 – уголь;
- 2 – углистый сланец;
- 3 – аргиллит;
- 4 – алевролит;
- 5 – песчаник;
- 6 – известняк

## Высокочастотный индукционный каротаж изопараметрических зондирований (ВИКИЗ)

ВИКИЗ – современная прогрессивная технология электромагнитного каротажа, в которой измеряются относительные фазовые характеристики. Это позволяет проводить геофизические измерения в скважинах с сильнопроводящим буровым раствором ( $\rho_c < 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Физические основы ВИКИЗ в том, что относительная разность фаз и амплитуд, измеренных в 2-х близрасположенных катушках, очень слабо зависит от параметров скважины в диапазоне частот  $10 \div 15 \text{ МГц}$ . Достигается высокий уровень сигналов в среде с удельным сопротивлением до  $120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

## Схема зонда ВИКИЗ



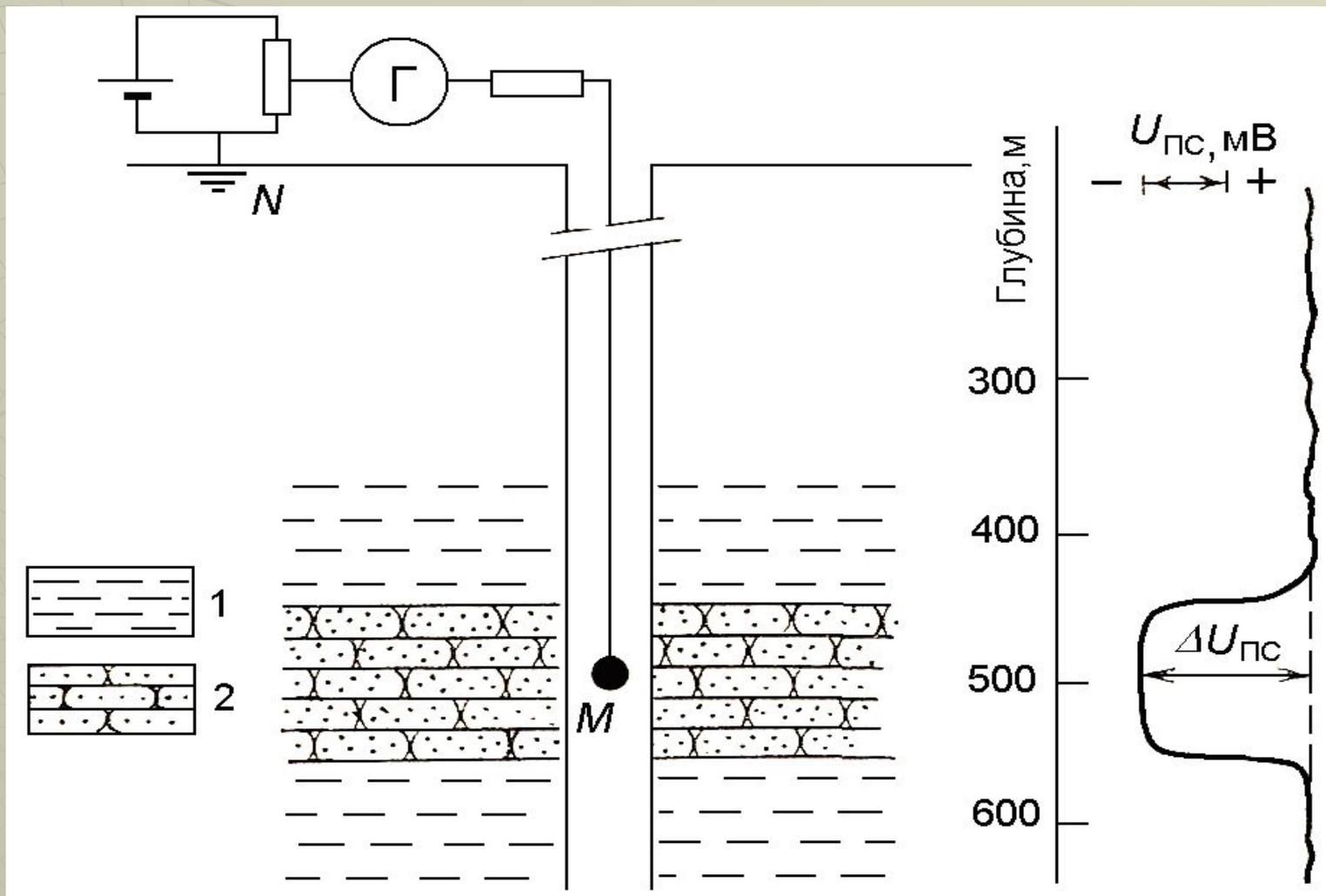
$L$  – длина зонда,  $\Delta L$  – длина базы – расстояние между измерительными катушками

## Метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС или СП)

Метод ПС основан на измерении естественного постоянного электрического поля Земли, которое создается в скважинах в основном вследствие диффузионно-адсорбционных процессов. Последние приводят к существованию на границах разделов сред двойных электрических слоев, суммарный потенциал которых и характеризует интенсивность поля ПС.

Метод весьма эффективный, входит в обязательный комплекс ГИС нефтегазовых и др. скважин. Измерение потенциалов естественного поля ( $U_{сп}$ ) сводится к замеру разности потенциалов между подвижным электродом  $M$  и неподвижным электродом  $N$ , находящимся на поверхности.

# Схема измерений методом ПС



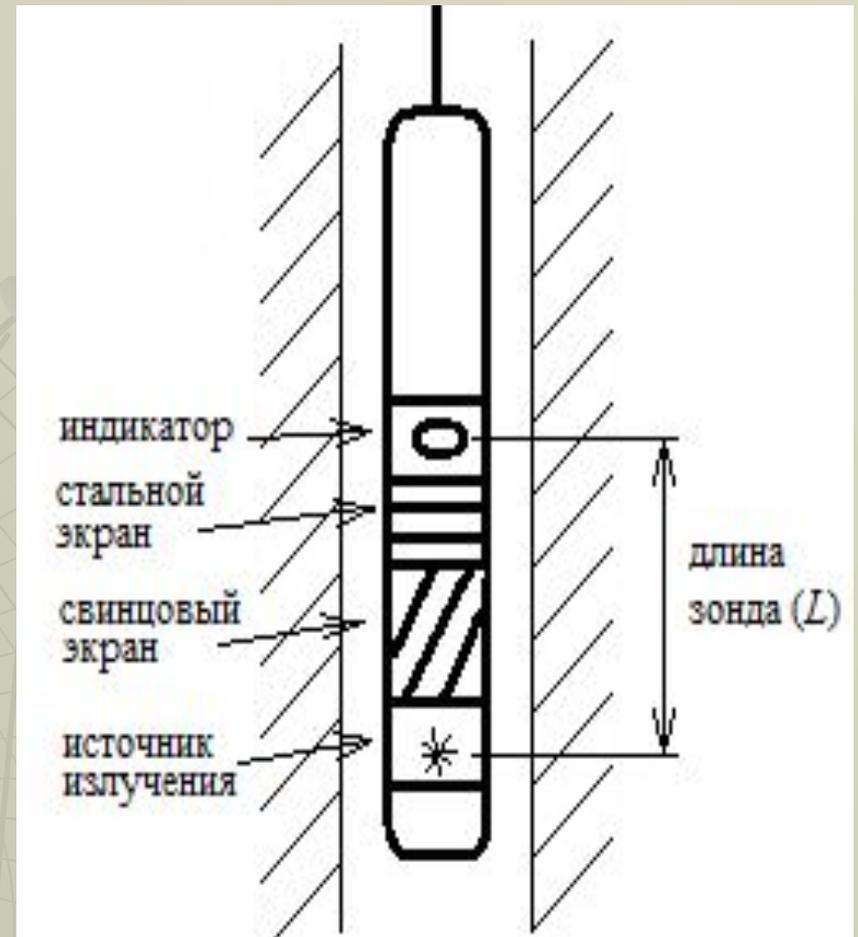
1 – глина, 2 – песчаник

**Радиоактивный каротаж (РК)** – совокупность методов, основанных на изучении распространения естественного или наведенного (искусственного) радиоактивного поля в разрезах скважин.

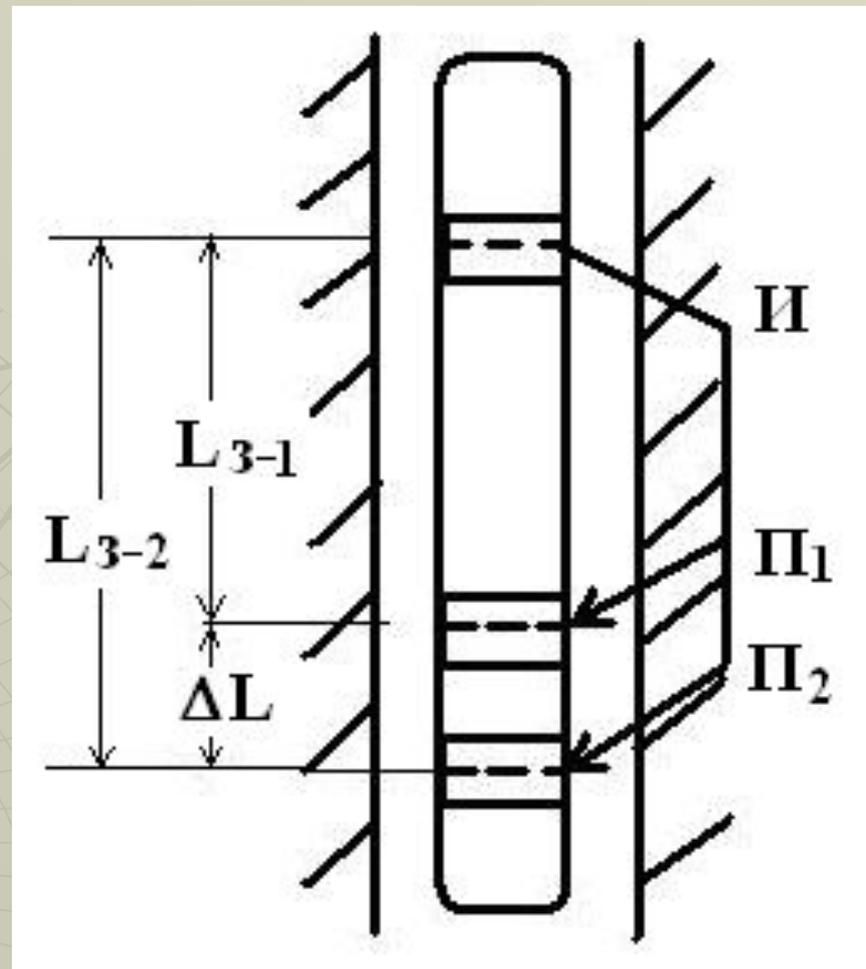
На основе поля естественной радиоактивности создан **метод гамма-каротажа (ГК)**, а на основе наведенной радиоактивности **методы гамма-гамма-каротажа (ГГК)** и **методы нейтронного каротажа (НК)**.

При каротаже **ГК** измеряют естественную радиоактивность ( $J_{\gamma}$ ) в скважине. Спектрометрическая модификация **ГК** имеет название **спектрометрического гамма-каротажа (СГК)**.

**Метод гамма-гамма каротажа (ГГК), или плотностной гамма-гамма метод (ГГК-П) создан на основе комптон-эффекта. Второй процесс взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом — фотоэффект положен в основу метода гамма-гамма селективного каротажа (ГГК-С)**



**Методы акустического каротажа (АК)** основаны на возбуждении упругих волн в полосе частот  $f = 1 \div 10$  кГц. Наибольшее распространение получили трехэлементные зонды.



И – пьезоисточник, П1, П2 – пьезоиндикаторы,  $L_{3-1}$ ,  $L_{3-2}$  – длины зондов,  $\Delta L$  – база измерений

Трехэлектродным зондом регистрируют параметры:

$t_{p1}$  – время первого вступления первого приемника,

$t_{p2}$  – время первого вступления второго приемника,

$\Delta t$  – интервальное время – разница времен прихода головной волны на второй и первый приемники,

$A_1$  – амплитуда сигнала на первом приемнике в заданной точке,

$A_2$  – амплитуда сигнала на втором приемнике в заданной точке,

$\alpha$  – коэффициент поглощения.

Наиболее информативной в АК является кривая  $\Delta t$ . Базу выбирают в соответствии требуемой разрешающей способностью. Чем меньше  $\Delta L$ , тем более тонкие пласты могут быть выделены.

## Лекция 14

# Интерпретация результатов геофизических исследований в скважинах

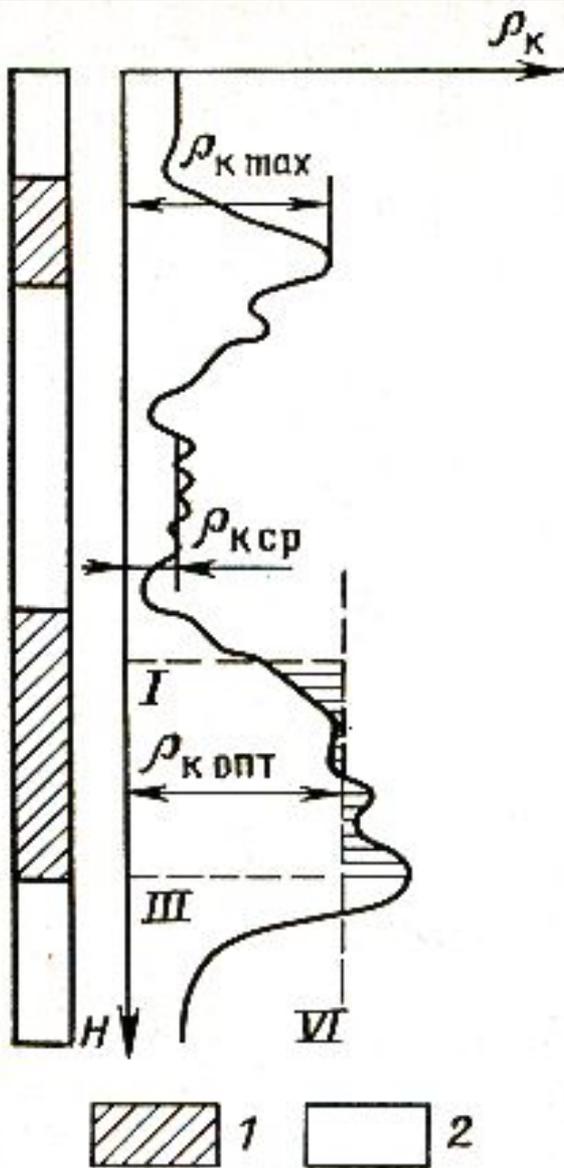
**Интерпретация методов ГИС** состоит в:

- 1) обработке диаграмм;
- 2) геофизической интерпретации;
- 3) геологической интерпретации.

**Обработка диаграмм** включает:

- а) приведение результатов к определенным глубинам и системе отсчетов;
- б) учёт и устранение аппаратурных и других помех;
- в) нахождение границ пластов и их толщин (мощности);
- г) снятие показаний.

Далее, с целью проведения последующей количественной интерпретации, снимают (определяют) «существенные значения». Например для кривых  $\rho_k$ , это либо средние ( $\rho_k^{\text{сред}}$ ), либо максимальные ( $\rho_k^{\text{max}}$ ), либо оптимальные ( $\rho_k^{\text{опт}}$ ) значения.



Определение существенных значений  $\rho_k$  на примере кривых КС, зарегистрированных градиент-зондом

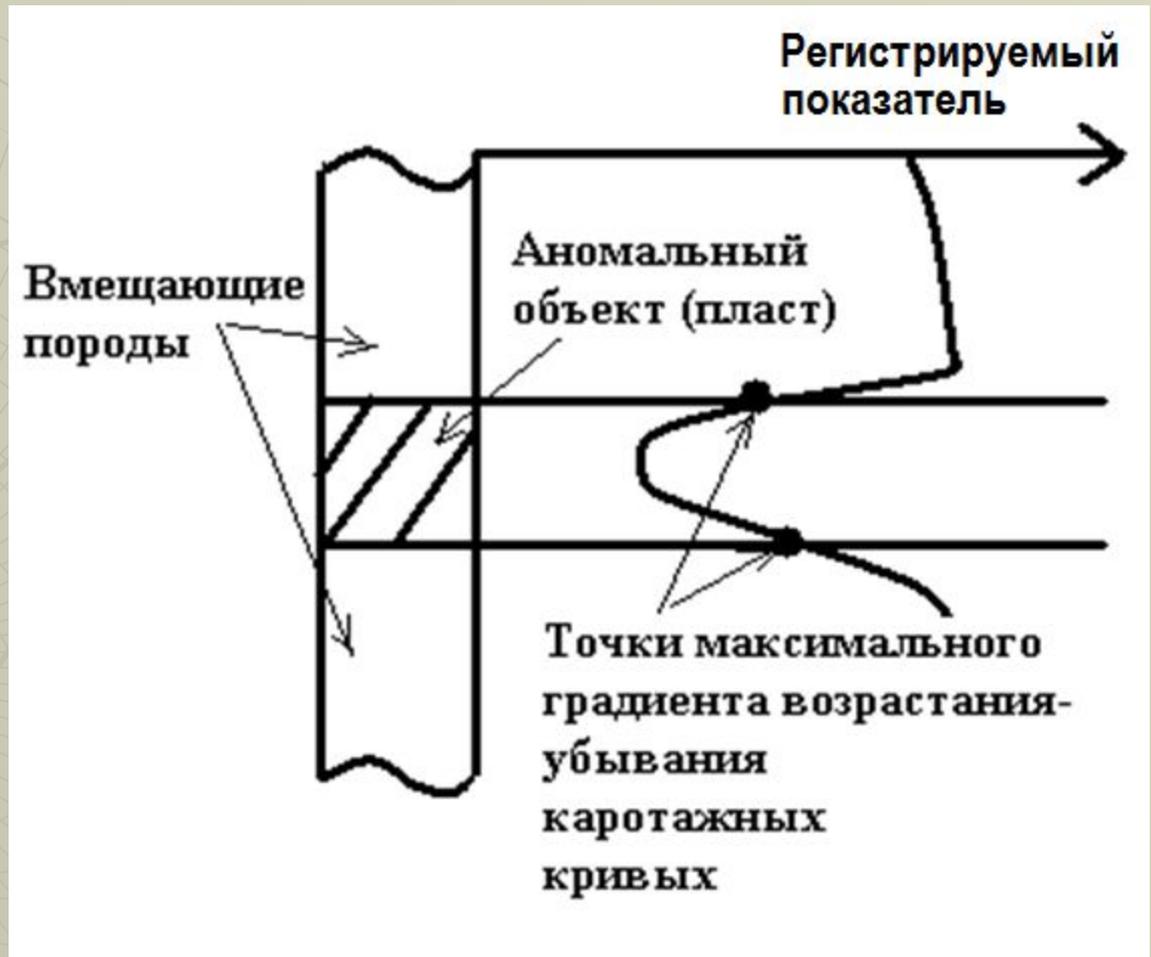
1 – исследуемый пласт,  
2 – вмещающие породы

**Геофизическая интерпретация** проводится с целью определения истинных параметров, например  $\rho_p$ , на основе решения обратной задачи, то есть методом подбора наблюдаемой кривой с одной из теоретических и привлечением априорных данных.

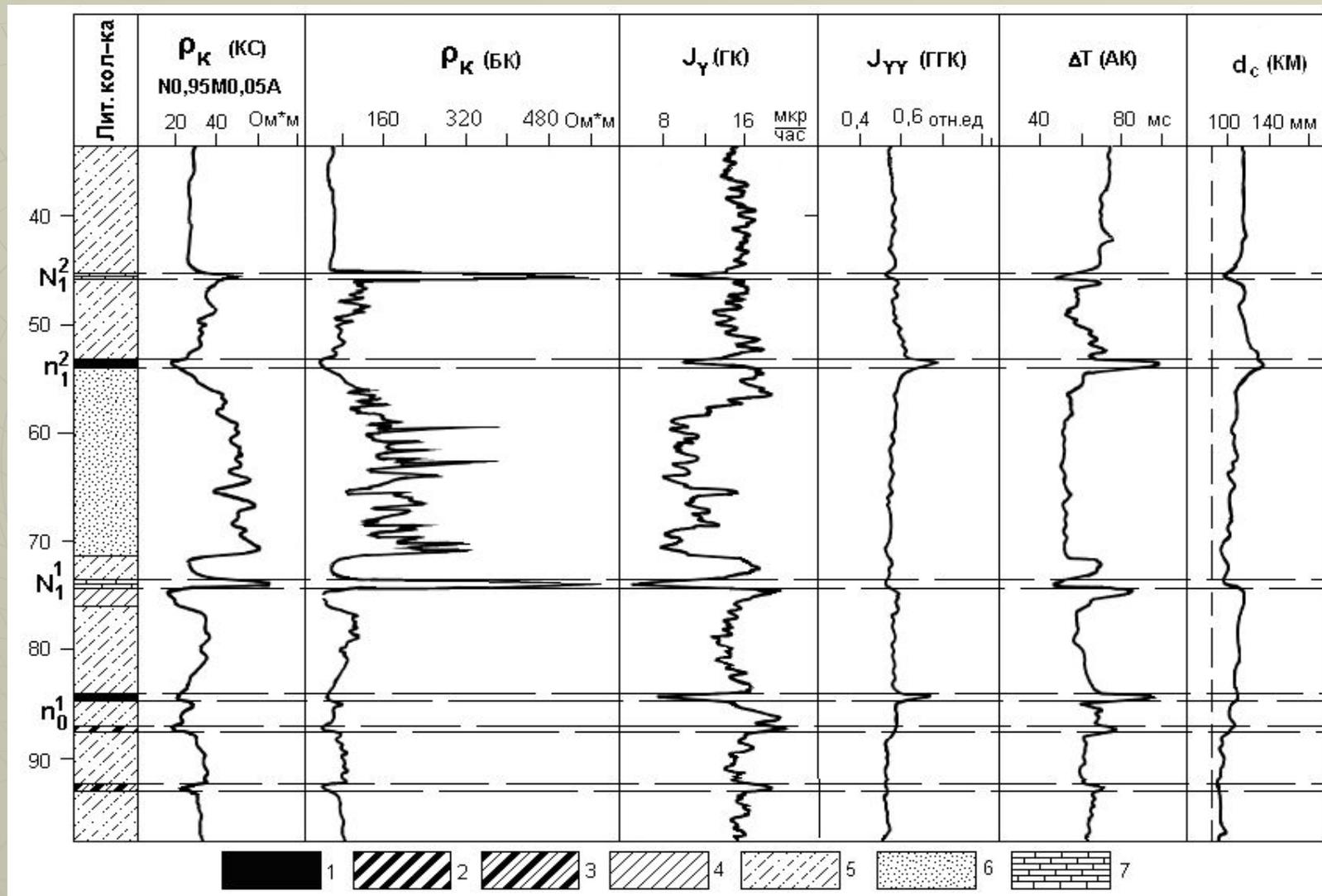
**Геологическая интерпретация** заключается в определении геологических характеристик разреза, в частности при истолковании электрических методов ГИС. Электропрофилирование применяют для нахождения границ пластов, а также в благоприятных условиях для литологического расчленения разрезов, выявления целевых объектов (нефте-, газо-, водоколлекторов, пластов угля, руд и т. д.).

# Пример определения границ пластов на каротажных диаграммах

Определения границ пластов в большинстве случаев сводится к нахождению точек, соответствующих градиентам максимального возрастания (убывания) кривых.



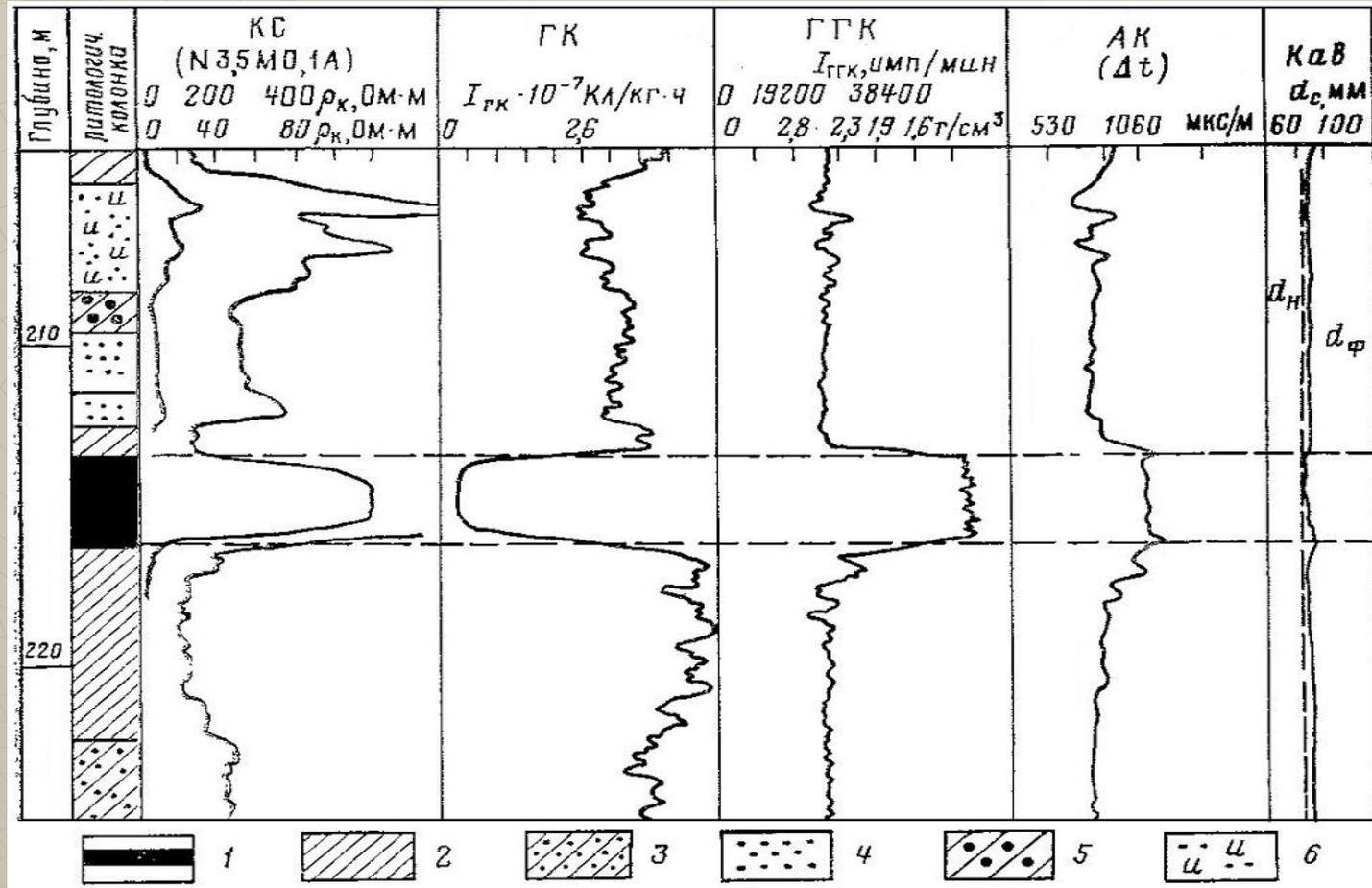
# Литологическое расчленение разрезов скважин



1 – уголь; 2 – углистый сланец; 3 – аргиллит; 4 – алевролит;  
5 – песчаник; 6 – известняк

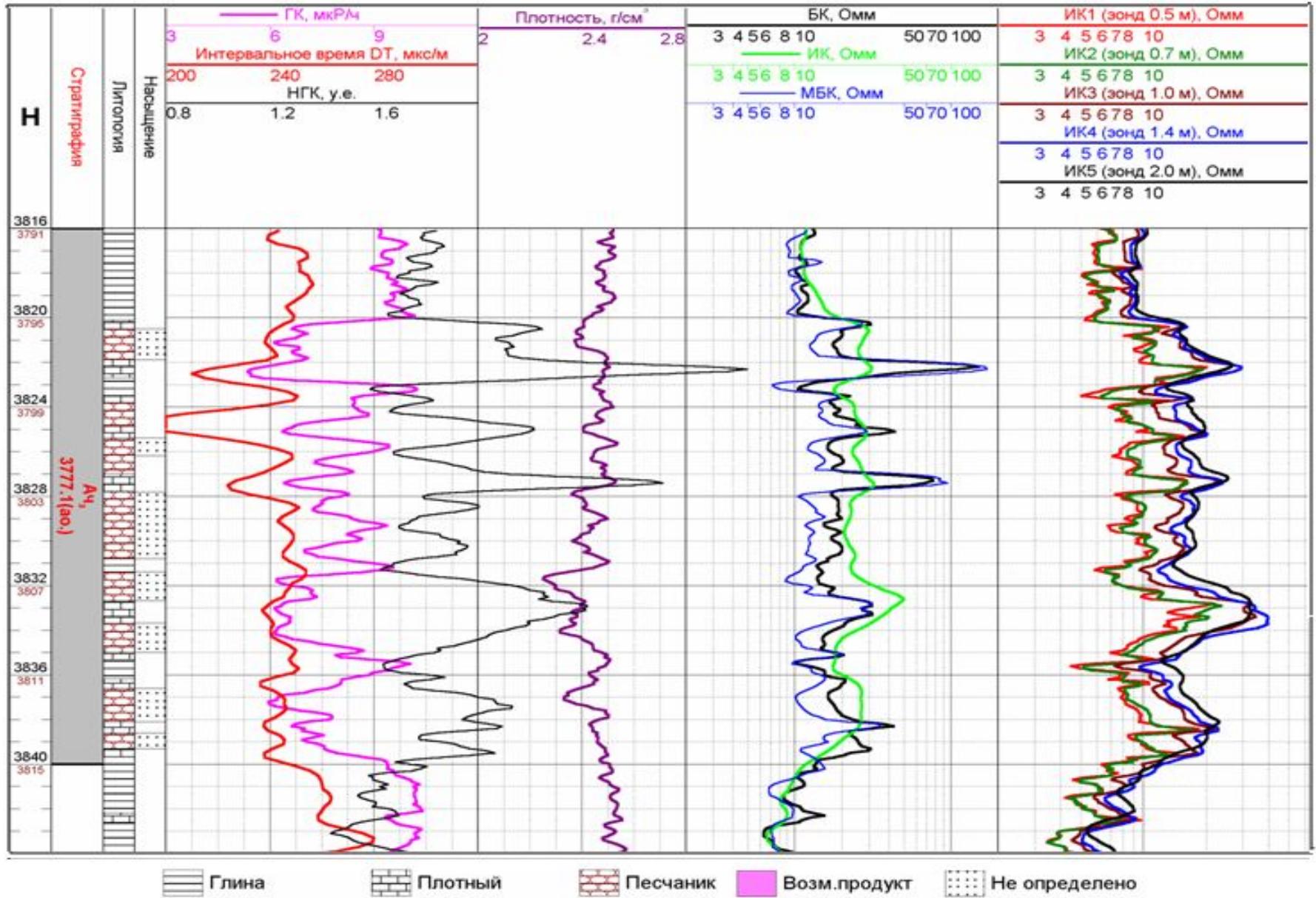
# Сопоставление диаграмм комплекса ГИС

## Печорский бассейн, уголь марки ДГ



1 – уголь; 2 – алевролит мелкозернистый; 3 – алевролит крупнозернистый; 4 – песчаник глинистый; 5 – переслаивание песчаников и алевролитов; 6 – песчаник карбонатный

**Скважина 1 Едэйская площадь**  
**Геолого-геофизическая характеристика пласта Ач<sub>3</sub>**

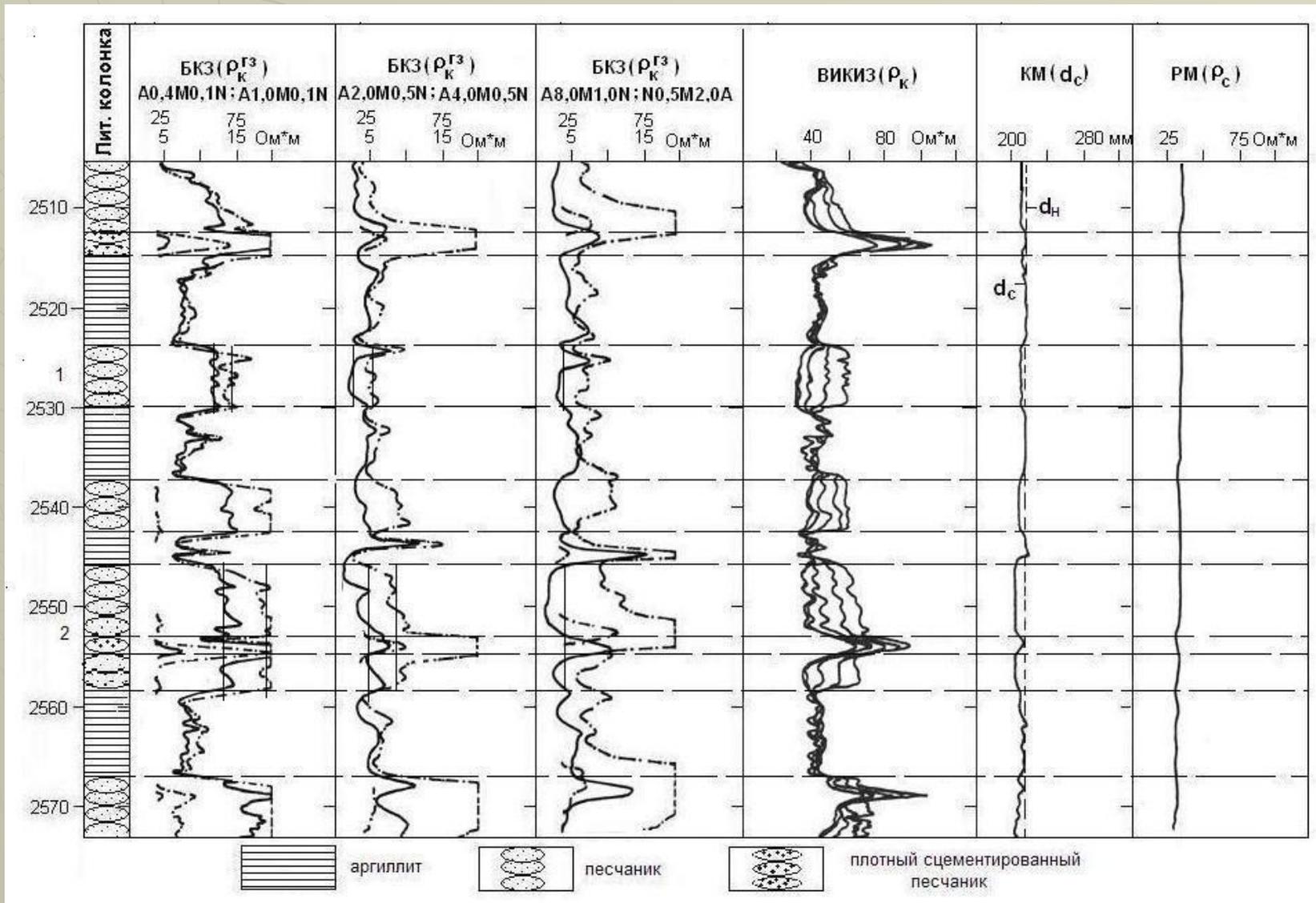


# Количественная интерпретация результатов ГИС

Основной способ интерпретации, как и в методах полевой геофизики, - подбор (сравнение) наблюденных (зарегистрированных в скважинах) кривых с теоретическими. Интерпретация может выполняться как вручную с помощью специальных палеток, так и в автоматизированном режиме с применением специальных программ.

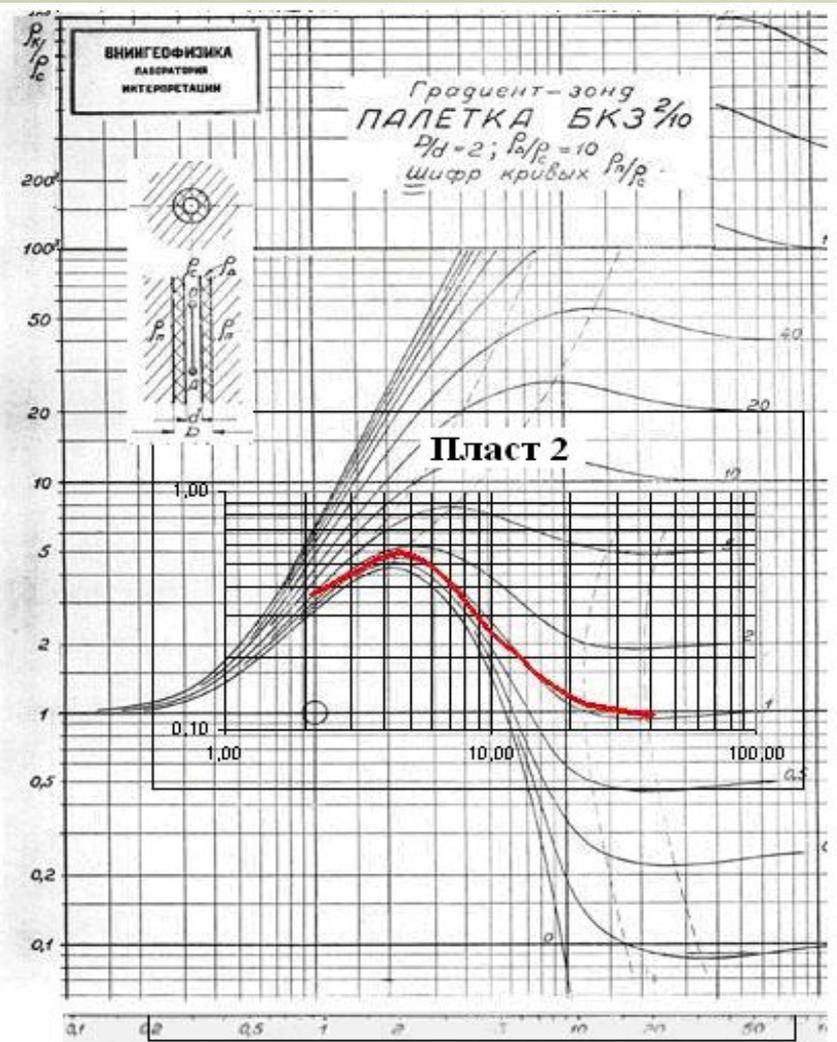
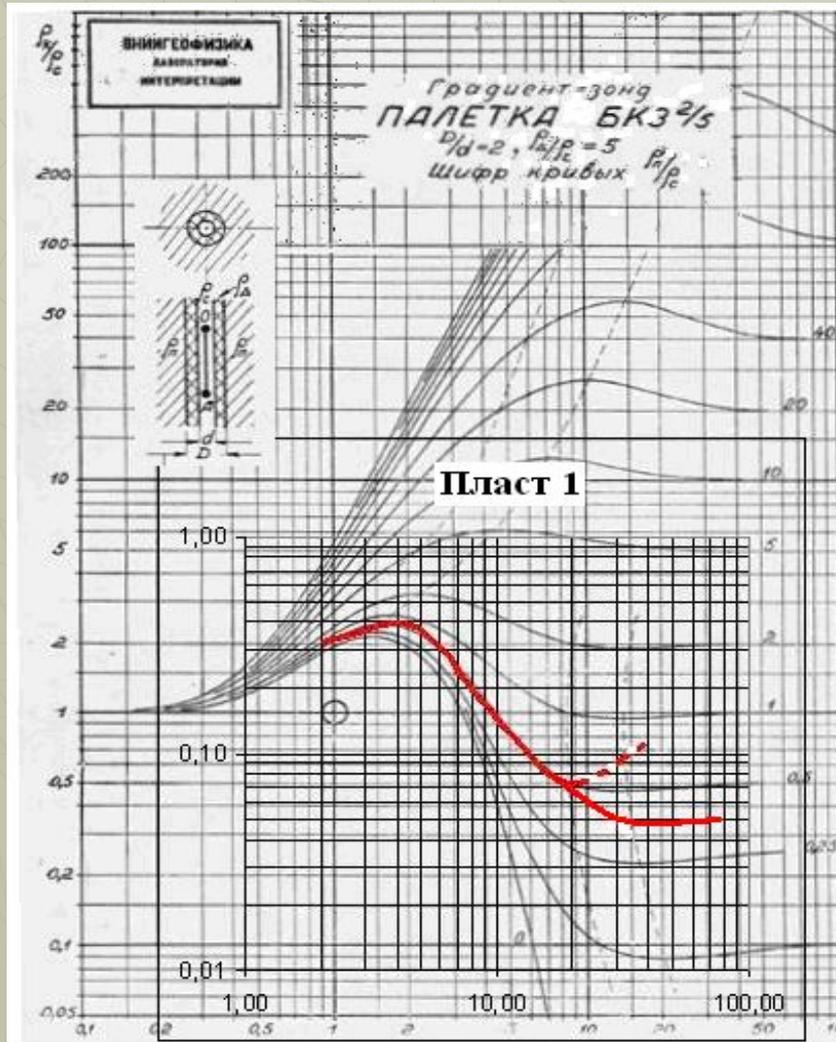
Компьютерная интерпретация основана на интерактивном (диалоговом) режиме. Как правило, в процессе интерпретации привлекается дополнительная геолого-геофизическая информация.

# Сопоставление каротажных диаграмм БКЗ и ВИКИЗ в разрезе нефтегазовой скважины (Западная Сибирь)





# Сопоставление (подбор) фактических кривых с теоретическими кривыми трёхслойных палеток



## Лекция 15

Понятие о геофизическом комплексе  
и принципы его выбора.

Качественная и количественная  
неоднозначность при решении  
прямых и обратных задач.

Интерпретация комплексных  
геофизических данных

**Комплексирование геофизических методов** - это сочетание и проведение в определенной последовательности различных геофизических исследований. Необходимость его обусловлена неоднозначностью (многозначностью) истолкования результатов геофизических исследований по определению геологической природы, формы и геометрии изучаемых *объектов*. Кроме того, необходимость комплексирования определяется тем, что те или иные элементы геологического строения по-разному отражаются в различных геофизических полях и методах.

Основная идея и цель комплексирования геофизических методов — достижение однозначного решения поставленных геологических задач, определение параметров исследуемых объектов и вмещающей среды. Для обоснованного проектирования геофизических работ и выбора комплекса методов вводится понятие **«физико-геологическая модель» (ФГМ)** объекта исследований. Под ФГМ в упрощенном виде понимают абстрактные тела простой геометрической формы (шар, горизонтальный цилиндр, столб, пласт и др.) с заданными соотношениями физических свойств тел и окружающей среды, для которых в аналитическом виде или численно с помощью компьютеров можно решать прямые задачи, т. е. рассчитывать аномалии, и обратные задачи, т. е. проводить интерпретацию аномалий в рамках выбранной модели.

ФГМ — это сочетание геологической и петрофизической моделей. **Геологическая модель** — система элементов геологического строения, обобщенно описывающая состав, структуру, форму (геометрию) изучаемого объекта и вмещающей среды. **Петрофизическая модель** — модель, характеризующая физическое поле в верхнем и нижнем полупространстве, в котором отражены интенсивность поля, его морфология, аномальные эффекты и различные типы помех.

При формировании ФГМ используют понятие о **прогнозно-поисковой модели**, определяемой по сочетанию поисковых геофизических признаков и критериев, которыми называют характерные и устойчивые (обнаруживаемые в большинстве случаев) особенности геофизических полей над искомыми объектами.

**Формирование ФГМ** какого-либо геологического объекта, процесса или явления предусматривает несколько последовательных операций, к которым относятся:

- \* постановка геологической задачи;
- \* выбор объекта моделирования с построением априорной геологической модели;
- \* расчет аномальных петрофизических параметров и построение петрофизической модели на основе структурно-вещественных комплексов;
- \* решение прямых задач геофизики для каждого метода;
- \* оценка адекватности сформированной ФГМ реальному объекту на эталонах, т. е. на объектах, аналогичных исследуемому, но с известным геологическим строением.

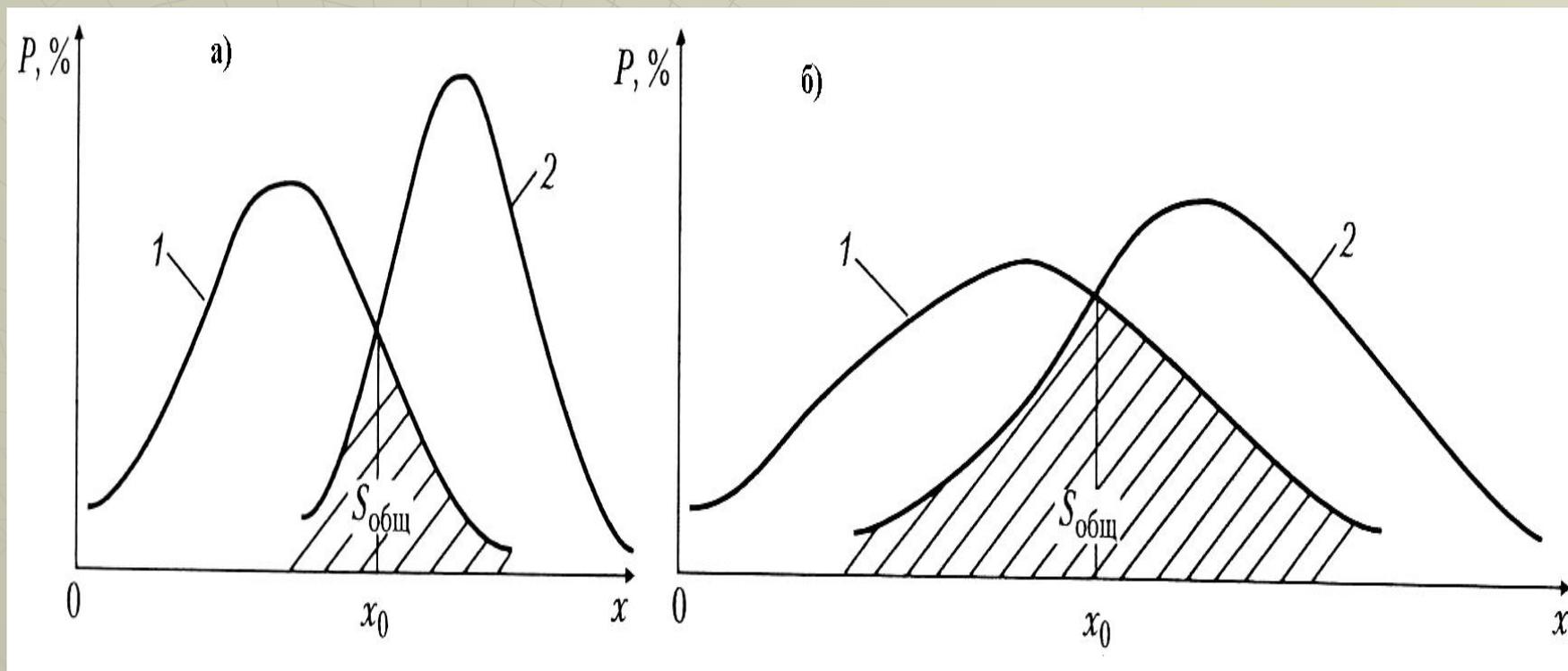
## **Условия эффективного применения геофизических методов:**

- 1) заметная дифференциация физических свойств искомым геологических объектов и вмещающей среды;
- 2) благоприятные геометрические размеры вызывающих аномалии объектов;
- 3) относительно низкий уровень помех геологического и негеологического происхождения.

Понятие **дифференциация (контрастность) физических свойств** изменяется в зависимости от метода и решаемых геологических задач.

При одинаковой разнице средних значений физических свойств, представленных для двух типов пород, те породы у которых меньшая дисперсия, выделяются более надежно. Удобной количественной мерой различия признаков является надежность разделения  $\gamma = 1 - q$ , где  $q$  — отношение площади перекрытия вариационных кривых ( $S_{общ}$ ) к сумме полных площадей под вариационными кривыми ( $S_1 + S_2$ ). Надежными для различия свойств считают значения  $\gamma$  от 75 до 100 %.

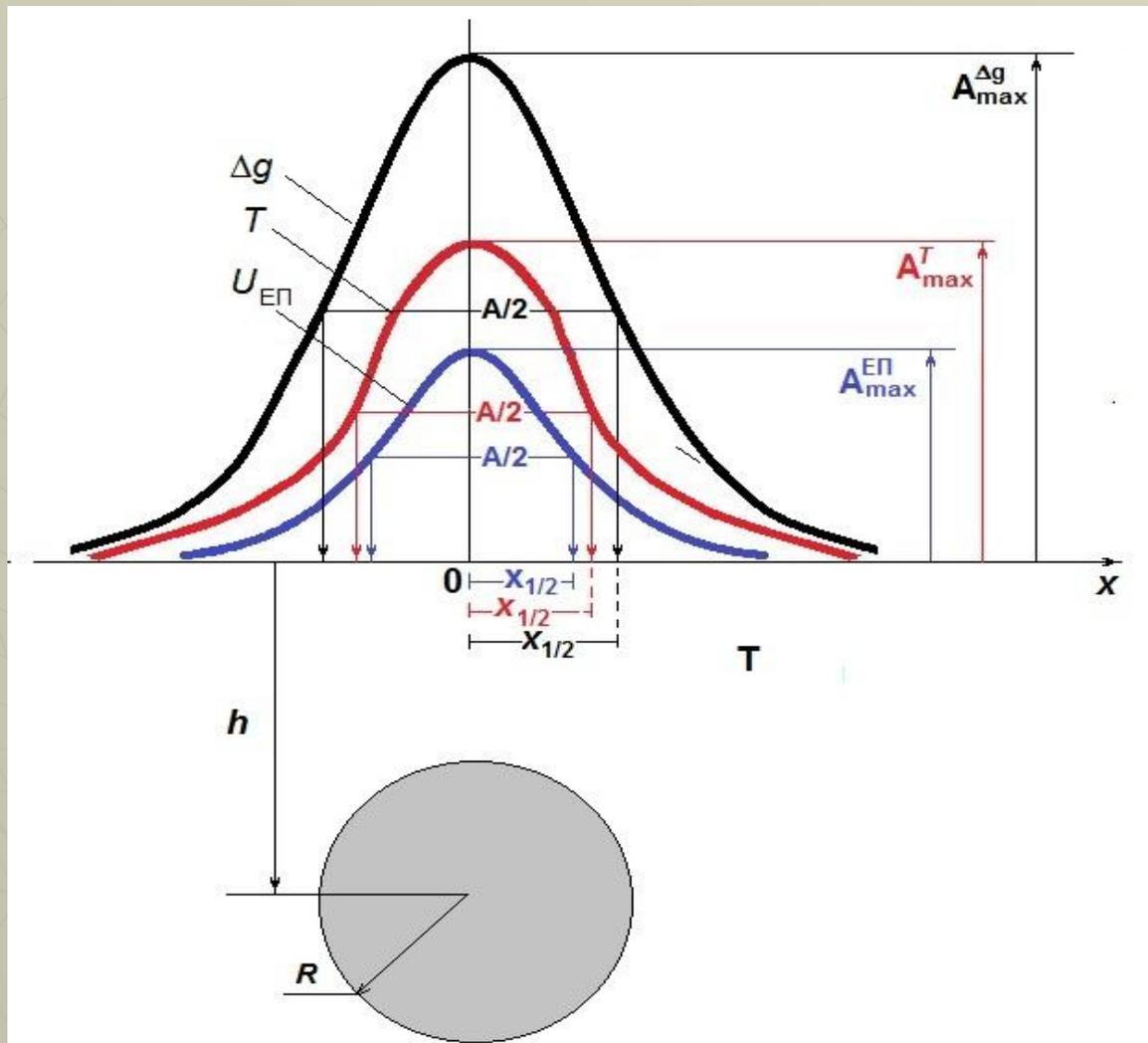
# Вариационные кривые физических свойств пород двух типов (1,2) при разной дисперсии (а, б)



**Геометрические соотношения размеров объектов и глубин их залегания** определяются величинами интенсивности аномалий. Например, в электроразведке методом ВЭЗ надежное определение слоя возможно, если отношение его мощности ( $h$ ) к глубине залегания ( $H$ ) удовлетворяет условию  $h/H > 2 \div 10$ . Слой практически не выделяется, если  $h/H < 0,1$ .

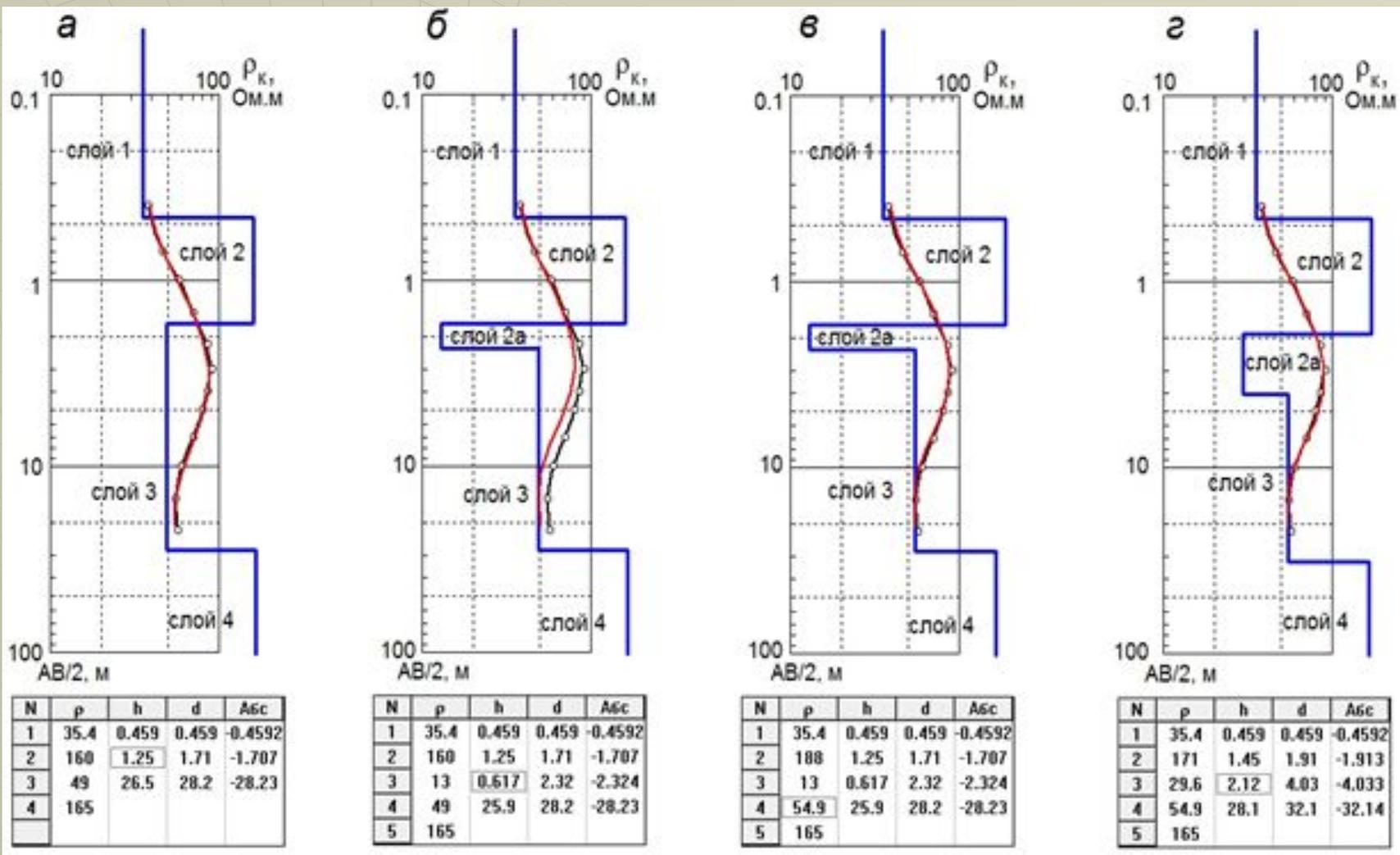
Предельная глубина залегания изометричных тел, определяемая разными методами геофизики, зависит от отношения радиуса тела ( $R$ ) к глубине ( $H$ ).

Различают «сильные» аномалии, выделенные визуально, и «слабые» аномалии, соизмеримые с уровнем помех и ниже этого уровня.



Аномалии  
гравитационного,  
магнитного и  
естественного  
постоянного  
электрических  
полей от модели  
изометричной  
фигуры в форме  
шара

# Форма кривых ВЭЗ и их количественная интерпретации в геоэлектрических разрезах без (а) и с наличием тонкого пласта (б, в, г)



Важным условием применимости геофизических методов является **уровень помех.**

Различают **помехи геологического и негеологического происхождения.**

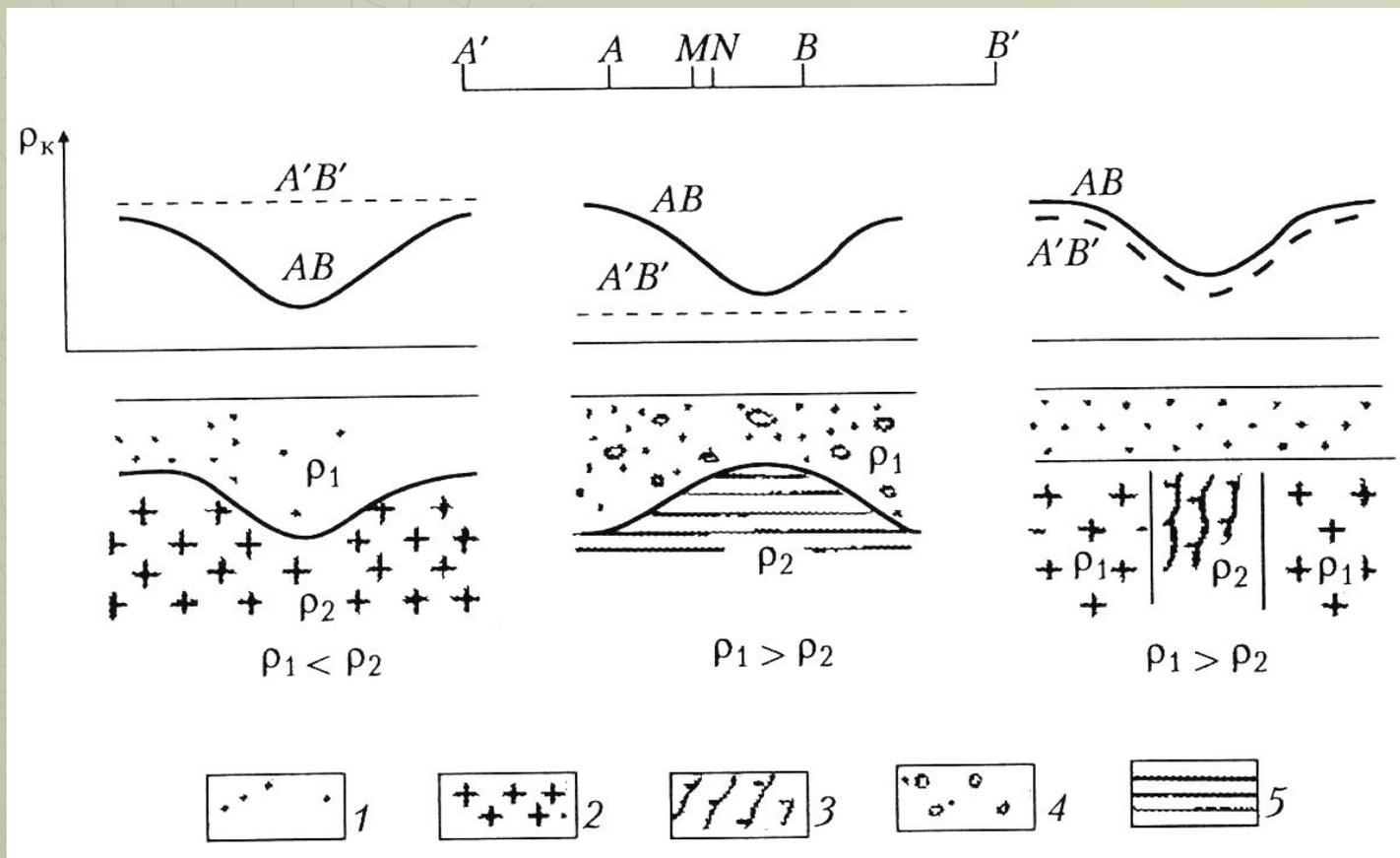
К первым относят влияние перекрывающих и подстилающих пород, рельефа местности, неоднородности свойств вмещающих пород и т. д.

К помехам негеологического происхождения относят временные вариации геофизических полей. В гравиразведке такие вариации вызываются относительными перемещениями Солнца и Луны и считаются предсказуемыми. В магниторазведке аналогичные вариации связанные с солнечной активностью и ее воздействием на ионосферу Земли непредсказуемы и требуют учёта.

**Неоднозначность решения обратных задач геофизики** или неопределенность решения имеет две стороны: первая из них касается качественного определения геологической природы выявленных геофизических аномалий, вторая - получения количественных геометрических характеристик объектов исследований: формы, размеров, глубины и других элементов залегания. К примеру, аномалии гравитационных, магнитных, электрических и других полей, обусловленные объектами исследования, очень часто не отличаются по форме, интенсивности и размерам от аномалий, создаваемых геологическими неоднородностями верхней части разреза, рельефом местности и другими факторами.

Природу аномалий (например, классификацию их на рудные и безрудные) можно иногда определять и с помощью какого-нибудь одного метода, применяя несколько его модификаций. Это будет **внутриметодное** комплексирование. Широко известен, например, способ разделения аномалий, выделенных электропрофилированием, на приповерхностные, связанные с неоднородностями в рыхлых отложениях, и глубинные, обусловленные коренными породами. Способ заключается в проведении работ на двух разносах питающих заземлений  $AB$  - меньшем и  $AB$  - большем.

# Графики электропрофилирования методом СЭП с двойными разносами над геологическими разрезами различных типов



1 – увлажненные наносы, 2 – граниты, 3 – зона трещиноватости, 4 – глыбовые песчаники, 5 – глины

При **комплексной интерпретации геофизических данных** различают комплексный анализ и комплексную интерпретацию полей.

*Под комплексным анализом* понимается отработка комплекса различных признаков для решения задач геокартирования и районирования исследуемой площади (или разреза) на несколько классов, а также перспективных на полезные ископаемые участков.

*Комплексная интерпретация* состоит в построении согласованной по всем полям комплексной физико-геологической модели, т. е. модели с оценками петрофизических свойств, формы и геометрии изучаемых объектов или геосреды.

В качестве **признаков** для **геофизических полей** используются: **статистические** (среднее значение, дисперсия и т.д.); **градиентные** (горизонтальные градиенты поля, полный градиент); **корреляционные** (интервал корреляции) и **спектральные** (видимый пространственный период или видимая частота) измеряемых параметров полей. На эталонных объектах проводится оценка информативности признаков, т. е. способности признака (метода) различать сравниваемые объекты. Такая способность зависит от того, как часто определенные значения признаков поля встречаются у объектов прогнозируемого класса и как широко они распространены за их пределами.

При **выборе комплекса геофизических методов** в зависимости от имеющейся априорной информации возможны различные варианты. Первый из них связан с привлечением всех методов, которые в принципе способствуют решению поставленной геологической задачи (**типовой комплекс методов**).

Выбор **рационального комплекса** проводится тогда, когда имеются данные об информативности отдельных методов и их различных сочетаний при решении конкретной задачи, а также экономические показатели методов.

## Выбор геофизического комплекса :

- \*Включение методов, которые обеспечивают *получение разнородной информации.*
- \*Соблюдение *определенной последовательности* геофизических исследований.
- \*Разделение методов на *основные* и *детализационные*, когда с помощью основного (или основных) метода исследуют всю площадь по равномерной сети наблюдений, а остальные методы играют роль дополнительных.
- \*Учёт геоморфологии и других факторов, отражаемых в схемах районирования территории по условиям применения геофизических методов.
- \**Многократное чередование* геологических, геофизических, геохимических и горнобуровых средств геологической разведки.

## Формирование геофизического комплекса

- *Типовой комплекс*, создаваемый для достаточно обобщенных геологических условий проведения работ.
- *Рациональный комплекс* - обоснованное сочетание геофизических методов с целью эффективного решения поставленной задачи.
- *Внутриметодное комплексирование*, при котором используются различные модификации одного геофизического метода.
- *Внешнее комплексирование* - сочетание геофизических методов с геохимическими и горно-геологическими исследованиями.
- *Технологический комплекс* — сочетание геофизических методов, связанных единой технологией проведения работ по месту и по уровню наблюдений

## Заключение

Отличительная особенность прочитанного курса лекций – в одинаковом структурировании всех разделов, начиная с понятия того или иного геофизического поля, далее формулировки решения геологических задач, изучения физико-геологических предпосылок, разработки, применения и экономической результативности методов, способов и приемов. Такое изложение курса, по мнению автора, способствует более глубокому усвоению достаточно сложной и ёмкой дисциплины, какой является разведочная геофизика, методы которой эффективно используются для решения геологических задач.