

# Волновой акустический каротаж

Презентацию  
выполнила:  
студентка группы 06-829  
Фаляхова Алия

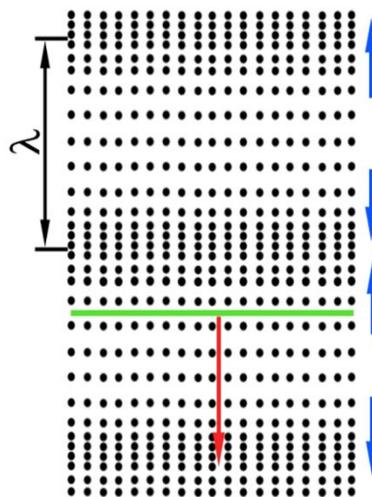
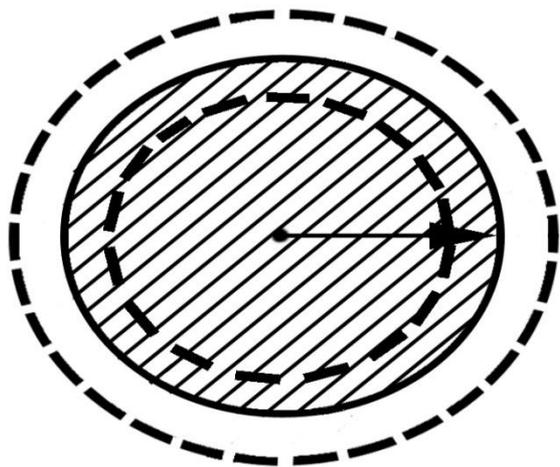
Казань, 2018

# Упругие волны: определения и условия распространения

**Упругие волны** – это изменения состояния среды (упругие возмущения), распространяющиеся в твёрдой, жидкой и газообразной средах, сопровождающиеся переносом энергии упругой деформации без переноса вещества.

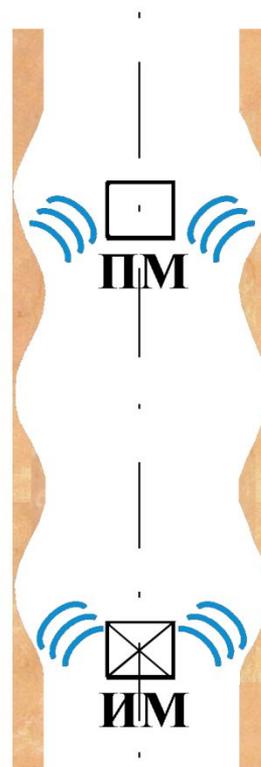
Как исключение, в интенсивном неоднородном звуковом (акустическом) поле могут возникать *регулярные течения жидкой и газообразной сред* (акустические течения; акустический или звуковой ветер), при которых происходит перенос вещества. На материалах акустического каротажа (АК), при проведении которого применяются источники колебаний небольшой мощности, проявление акустических течений не обнаружено.

# Измерительные зонды с монополярными преобразователями



**РАЗРЕЖЕНИЕ**

**СЖАТИЕ**

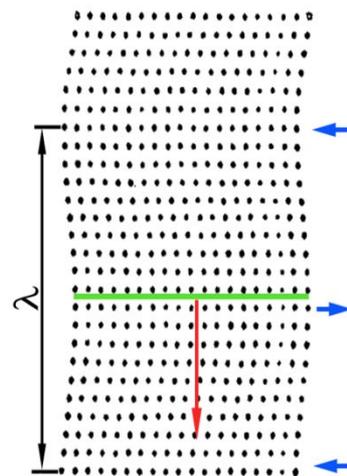
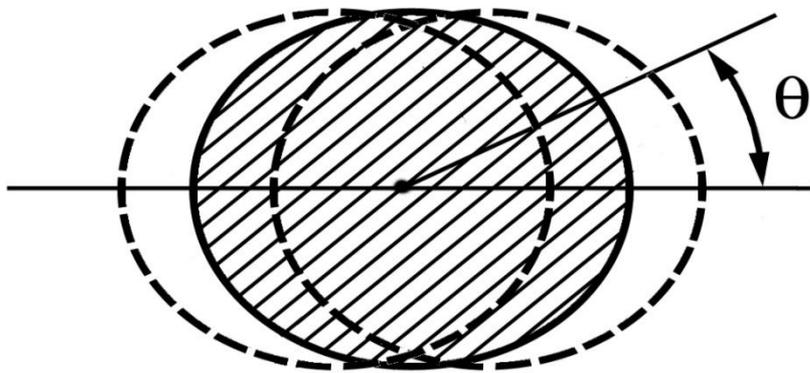


**РАЗРЕЖЕНИЕ**

**СЖАТИЕ**

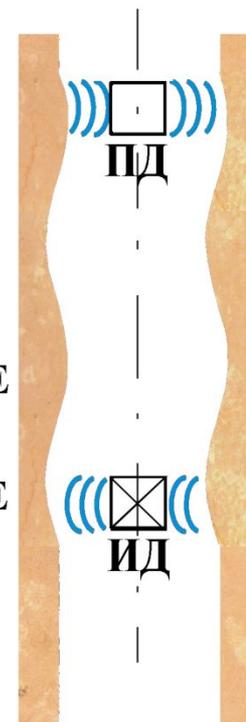
пунктирными линиями показаны изменения поверхности возбуждённого преобразователя

# Измерительные зонды с дипольными преобразователями



РАЗРЕЖЕНИЕ

СЖАТИЕ



СЖАТИЕ

РАЗРЕЖЕНИЕ

# Волновое уравнение для жидкости

Условия существования волны:

закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \operatorname{div} \sigma \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

-уравнение движения жидкости:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\sigma} \nabla p' = 0 \quad (2)$$

$p$  – давление сил упругости, создаваемое волной;  
 $\sigma$  – плотность среды в состоянии равновесия;  
 $p'$  и  $\sigma'$  – малые изменения  $p$  и  $\sigma$ , обусловленные волной;

$\mathbf{v}$  – вектор колебательной скорости частиц среды,

равный  $\mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$  (он не имеет ничего общего со скоростью

распространения волны);

$\mathbf{u}$  – вектор смещения частиц от положения равновесия;

$t$  – время;

$\nabla$  – градиент

Для удобства решения вводят потенциал скорости:  $\mathbf{v} = \nabla \varphi$  Уравнение (1)

с учетом (2) может быть переписано в виде **волнового уравнения**:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - v_P^2 \Delta \varphi = 0$$

Единственное его решение:

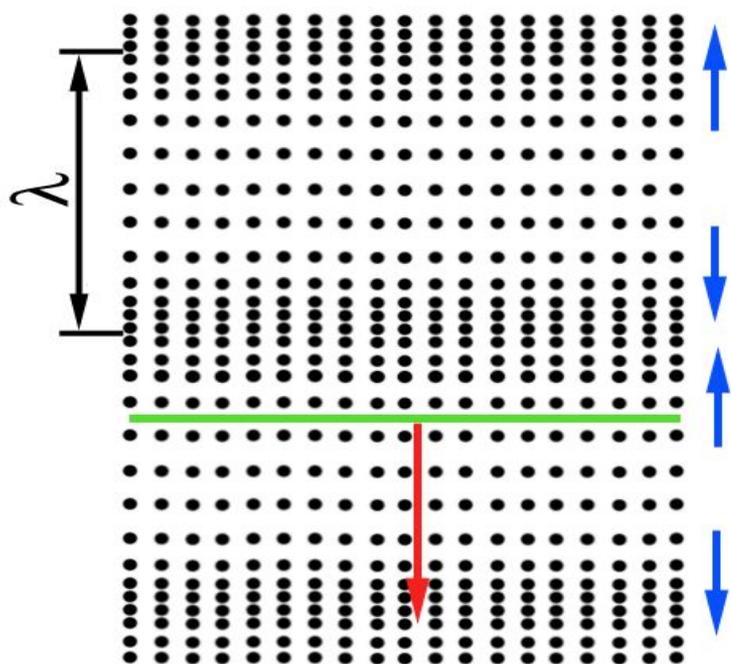
$$v_P = \sqrt{\frac{K}{\sigma}}$$

$\Delta$  – оператор Лапласа (Лаплассиан)

$K$  – модуль объёмного сжатия;

определяет скорость  $v_P$  продольной волны (P) в жидкости и газе

# Схематическое изображение движения частиц жидкости при прохождении продольной волны



-  - фронт волны
-  - направление движения волны и частиц среды

$\lambda$   
-длина волны —  
расстояние между двумя  
максимумами или  
минимумами возмущения

$$T = \frac{\lambda}{v_p}$$

- период колебания волны

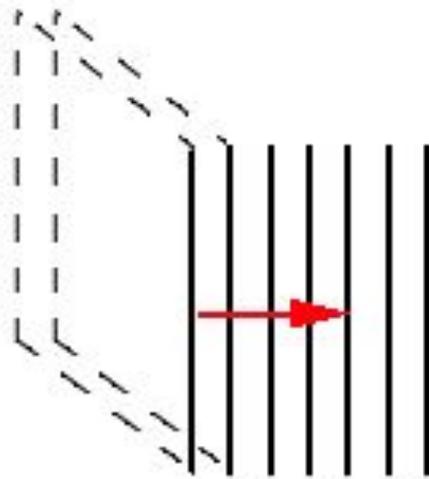
Частота:  $f = \frac{1}{T}$  ( $\Gamma_{\text{ц}} = 1/c$ ). Соответственно:  $\lambda = \frac{v_p}{f}$

Если ввести понятие круговой частоты  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  (рад/с) и волнового числа  $k = 2\pi/\lambda$ ,

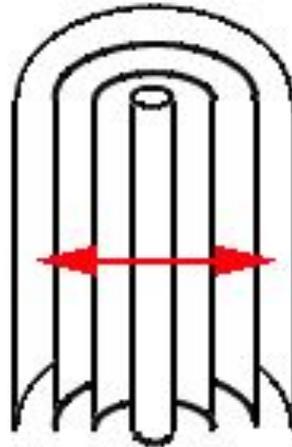
то  $\lambda = 2\pi/k$ ;  $T = 2\pi/\omega$

# Типы объёмных волн

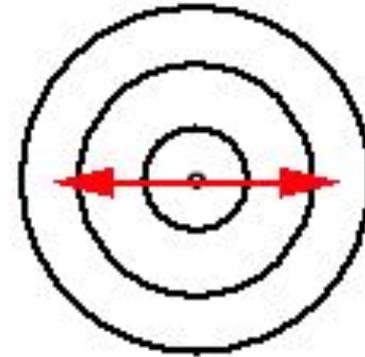
а



б



в



плоская (а),

цилиндрическая (б),

сферическая (в)

Условия распространения:

бесконечная по простиранию излучающая пластина (а), бесконечный по протяжённости излучающий стержень (б), точечный излучатель (в)

# Волновое уравнение для твёрдого тела

Условия существования:

- уравнения движения частиц среды
- закон упругости, согласно которому деформации среды пропорциональны приложенным напряжениям
- геометрические соотношения (система координат)

$$\sigma \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\Lambda + G) \text{grad } \Theta + G \Delta \mathbf{u} + \sigma \chi$$

$\mathbf{u}$  – вектор смещения частиц под действием внешней объёмной силы  $\chi$ ;  
 $\Theta$  – дилатация (объёмное расширение среды);  
 $\sigma$  – плотность среды;  
 $\Delta$  – оператор Лапласа

После преобразований получим **два волновых уравнения**:

$$\frac{\partial^2 u_P}{\partial t^2} - v_P^2 \Delta u_P = 0$$

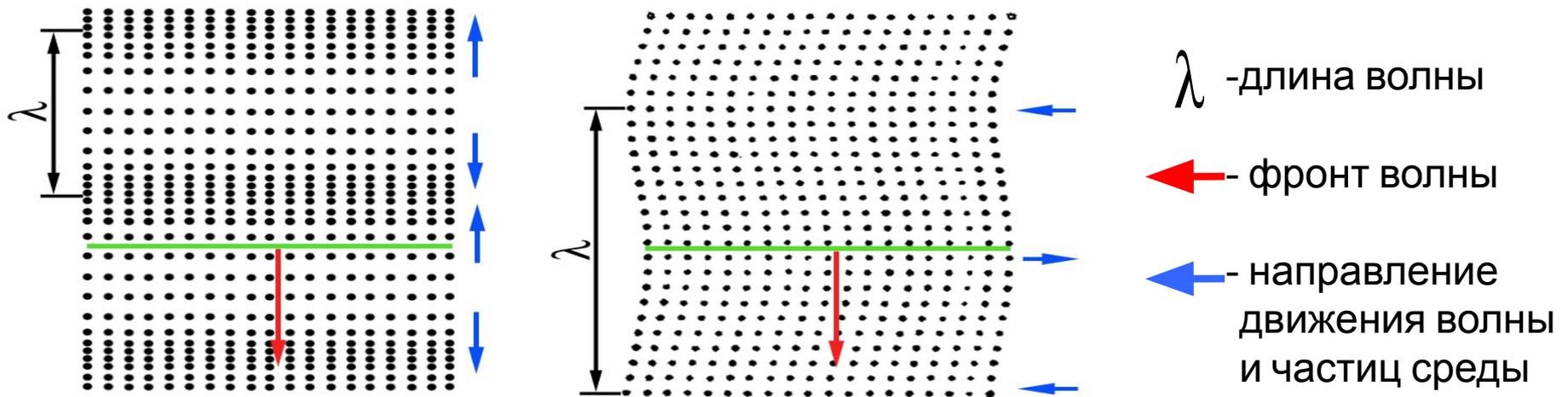
**Их решения:**

$$\frac{\partial^2 u_S}{\partial t^2} - v_S^2 \Delta u_S = 0$$

$$v_P = \sqrt{\frac{\Lambda + 2G}{\sigma}}; \quad v_S = \sqrt{\frac{G}{\sigma}}$$

$v_p, v_s$  – скорости продольной и поперечной волн;  
 $K$  – модуль объёмного сжатия;  
 $G$  – модуль сдвига;  
 $\Lambda = K - 2G$

# Схематическое изображение движения частиц среды при прохождении продольной (а) и поперечной (б) волн



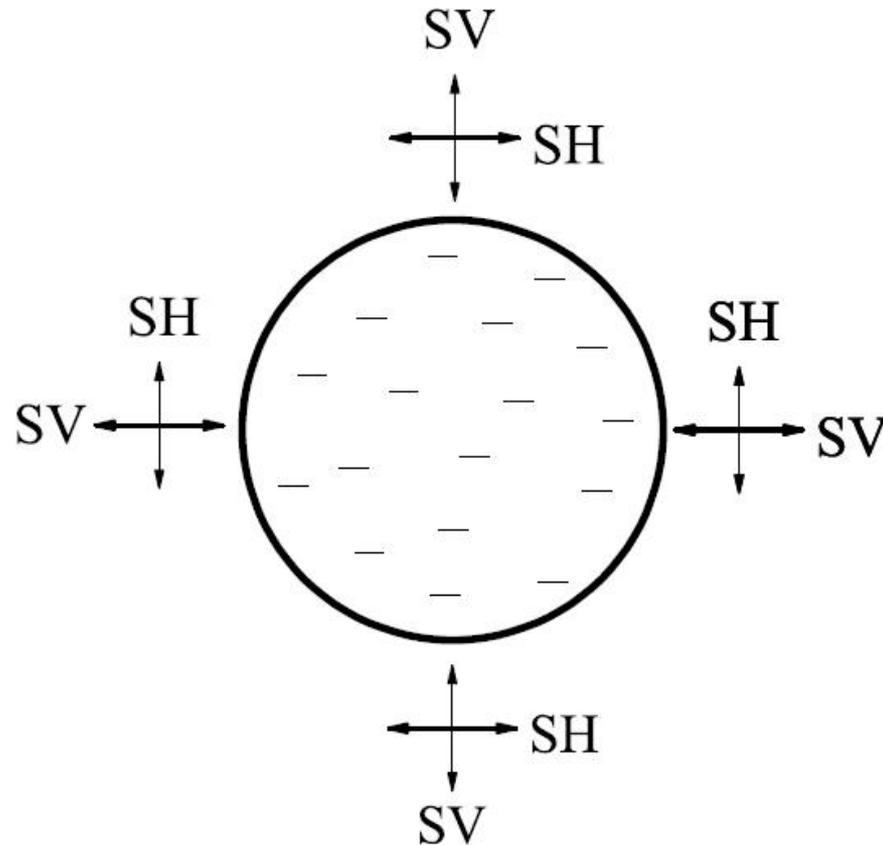
(а)

$$v_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\sigma}};$$

(б)

$$v_S = \sqrt{\frac{G}{\sigma}}$$

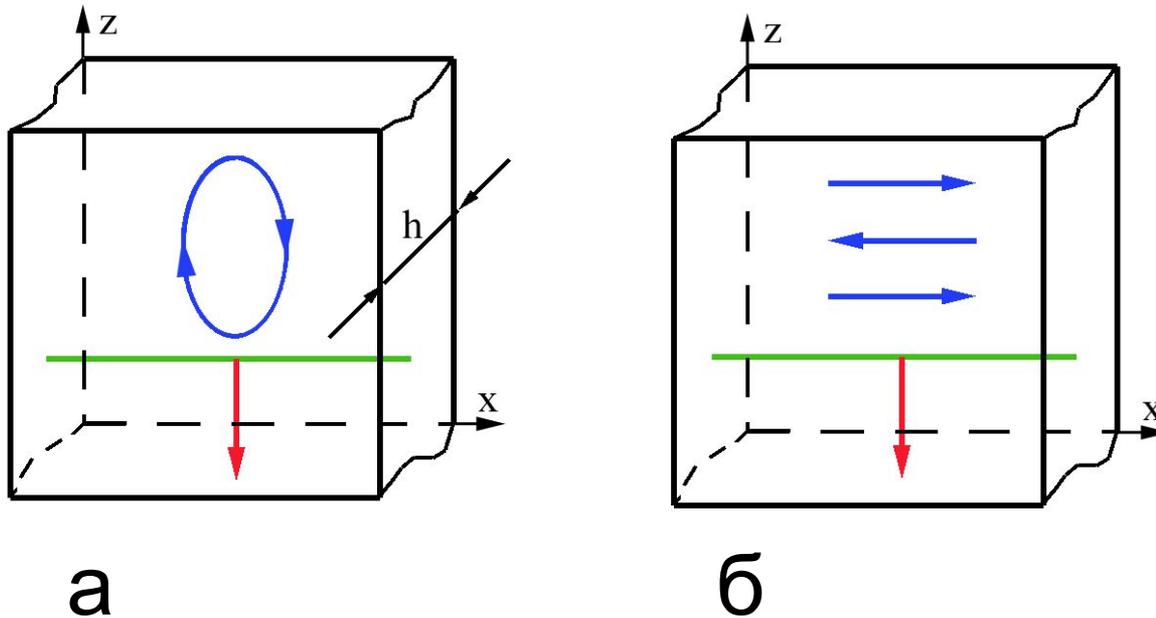
# Колебания частиц среды при распространении поляризованных вертикальной SV и горизонтальной SH поперечных волн



Направления движения происходят в плоскости, перпендикулярной оси скважины

# Нормальные волны

Удовлетворяют требованиям волнового уравнения для твёрдых тел и граничным условиям на поверхности волновода, т.е. отсутствию на ней механических напряжений. Это условие удовлетворяется, если волновод окружен средой с упругими модулями, меньшими модулей волновода.



Схематическое изображение нормальных волн, распространяющихся в пластине, продольных (волн Лэмба) (а) и поперечных (б):

$h$  - толщина пластины

# Нормальные волны

Количество симметричных и антисимметричных продольных (Лэмба) и поперечных волн значительно: оно тем больше, чем больше значение  $\omega h/v_s$ , где  $\omega$  - круговая частота,  $h$  – толщина пластины

В обсадной колонне ( $\omega h \ll 1$ ) возможно распространение только волн нулевого порядка: двух продольных и одной поперечной. Симметричная продольная волна называется **волной Лэмба** (L) соответствует Р волне в неограниченном пространстве.

$$V_L = V_P \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)^2}}$$

$V_P$  – скорость Р-волны в массиве

$\nu$  – коэффициент Пуассона

Приближенно  
:

$$V_L \approx 0,9V_P$$

# Поверхностная волна Рэлея

**Волна Рэлея** распространяется вдоль границы твёрдого тела с вакуумом или разрежённым газом. Сочетает свойства Р и S волн. Условия её распространения подчиняются тому же волновому уравнению (см. слайды 3 и 5), но с другими условиями на границах. Условие совместимости этой системы после преобразований может быть сведено к уравнению

$$\eta^6 - 8\eta^4 * 8(3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0$$

где:  $\eta = \frac{\omega}{kV_S} = \frac{V_R}{V_S};$

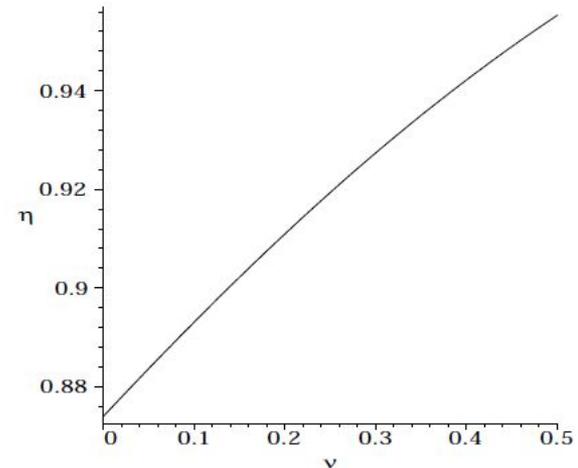
$k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  
 $\omega$  — круговая частота

$$V_R = \omega / k;$$

$$\xi = V_S / V_P = \sqrt{(1 - 2\nu) / 2(1 - \nu)};$$

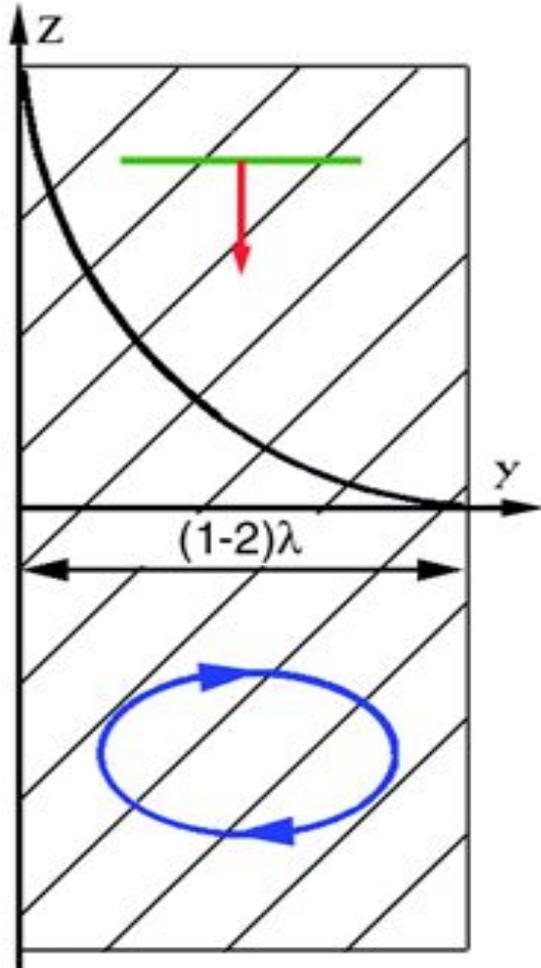
$\nu$  — коэффициента Пуассона

Скорость волны Рэлея не зависит от частоты, а зависит только от скоростей продольных и поперечных волн в среде



Зависимость отношения скорости волн Рэлея к скорости поперечных волн от коэффициента Пуассона  $\nu$

# Схематическое изображение колебаний частиц в волне Релея распространяющейся на границе твёрдого тела и вакуума



Скорость  $v_R$  распространения волны Рэлея приблизительно определяется выражением:

$$\frac{v_R}{v_S} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}.$$

Ещё более приближенно:

$$v_R \approx 0,9v_S,$$

где:  $\nu$  - коэффициент Пуассона

$v_S$  - скорость поперечной волны в среде

# Волна Стоунли

**Волна Стоунли** распространяется вдоль границы твёрдого тела с жидкостью. Условия: ① равенство давлений в жидкости и твёрдом теле, ② отсутствие касательных напряжений, ③ равенство колебательных скоростей частиц в обеих средах.

Волновое уравнение для волны Стоунли:

$$(2 - \eta^2)^2 - 4\sqrt{1 - \eta^2}\sqrt{1 - \xi^2\eta^2} + \beta\eta^4 \frac{\sqrt{1 - \xi^2\eta^2}}{\sqrt{1 - \alpha^2\eta^2}} = 0$$

где:  $\eta = \frac{\omega}{k v_S} = \frac{v_{St}}{v_S}$ ,

$$\xi = v_S / v_P = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}},$$

$$\alpha = v_S / v_{ж}, \quad \beta = \sigma_{ж} / \sigma$$

$k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,

$\omega$  — круговая частота,

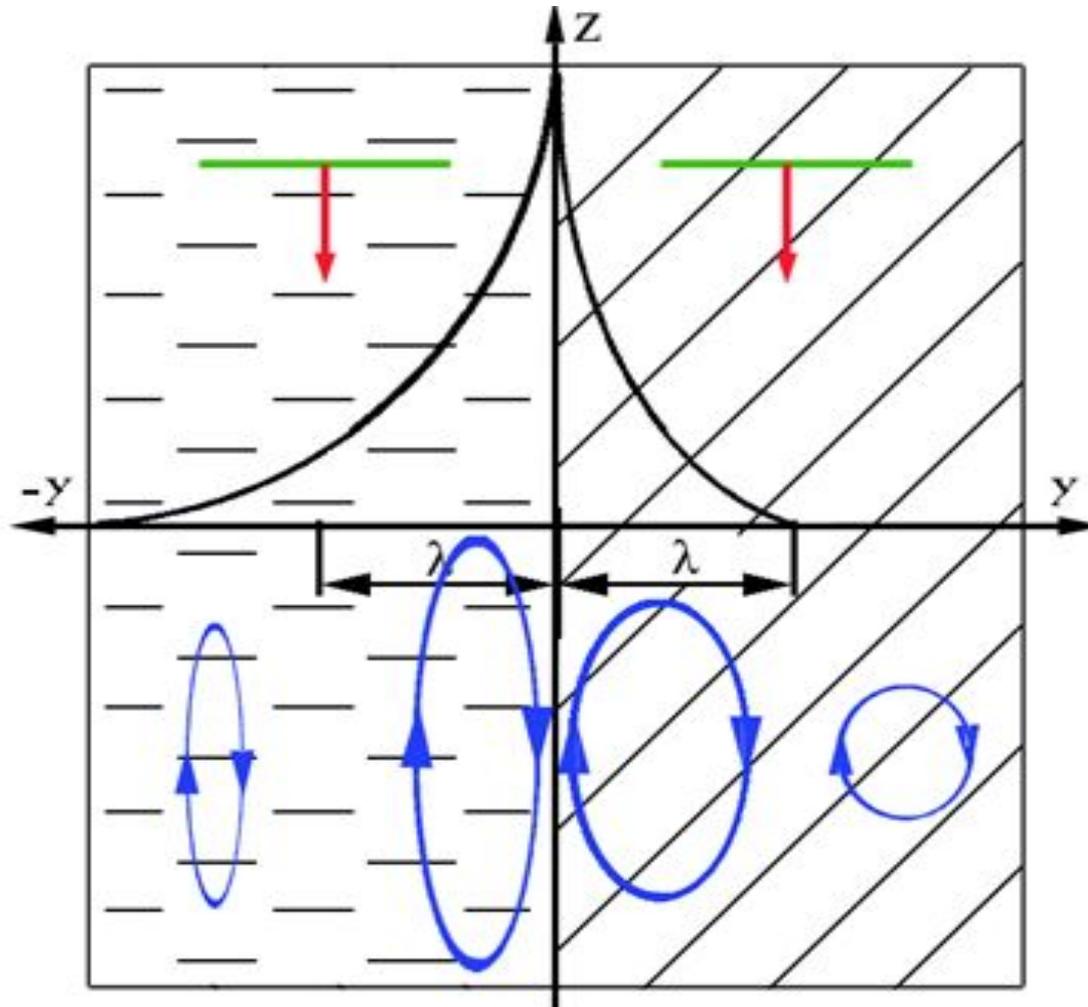
$\sigma_{ж}$  — плотность жидкости,

$\sigma$  — плотность твёрдого тела

$$v_{St} = \frac{\omega}{k} \quad - \text{ фазовая скорость волны Стоунли.}$$

Если плотность жидкости  $\sigma_{ж}=0$ , то уравнение для волны Стоунли вырождается в уравнение волны Рэлея

# Схематическое изображение колебаний частиц в волнах Стоунли на границе твёрдого тела и жидкости



# Волна Стоунли

Скорость  $v_{St}$  волны Стоунли меньше скорости распространения упругих волн в обеих средах, то-есть  $v_{St} > v_P, v_S, v_{ж}$ .

Для частот, стремящихся к нулю, и  $v_S > v_{ж}$  :

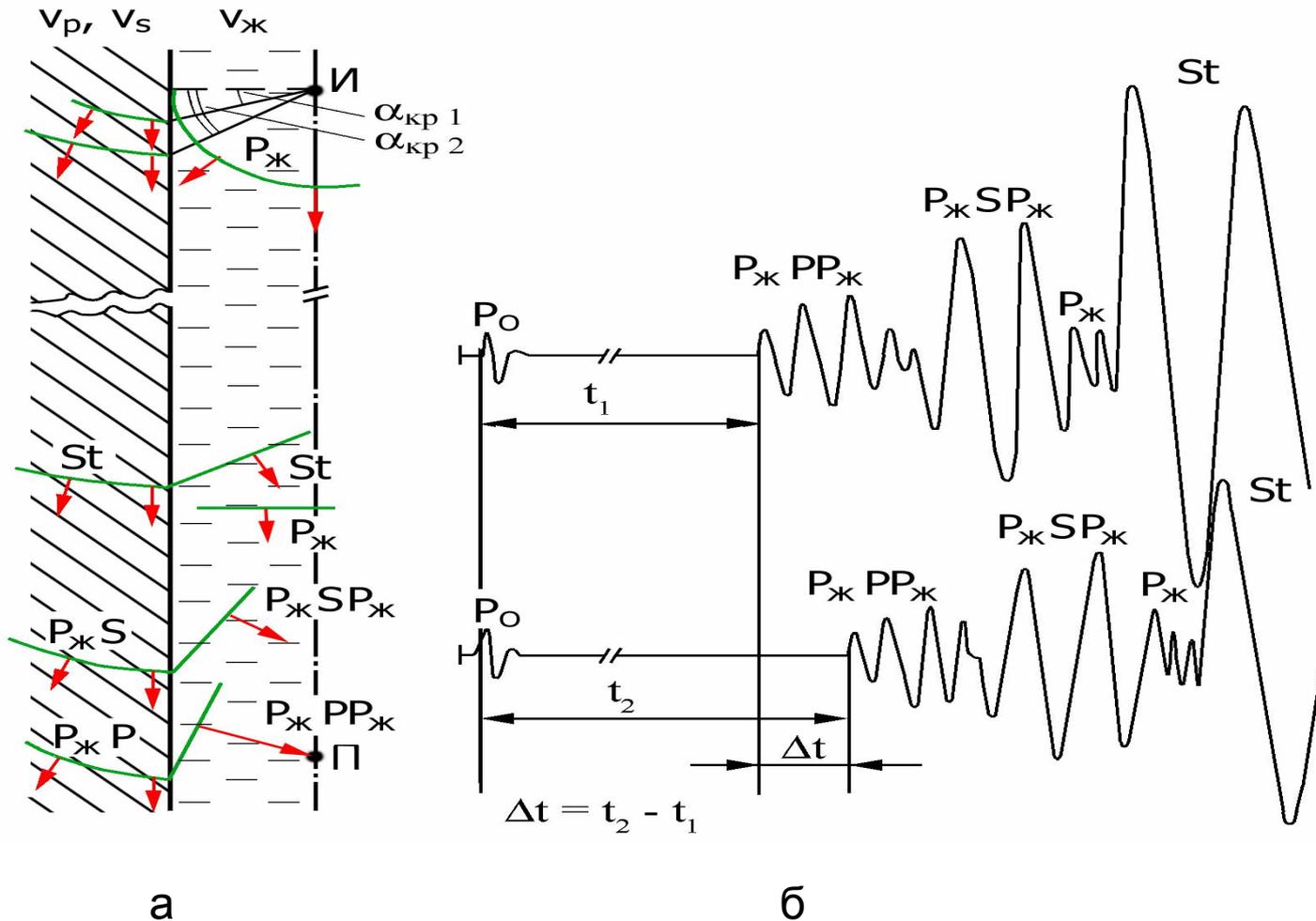
$$v_{St} \approx v_{ж} / \sqrt{1 + \frac{\sigma_{ж} v_{ж}^2}{\sigma v_{SV}^2}}.$$

Если  $v_S < v_{ж}$ , для выполнения условия  $v_S < v_{St}$  это уравнение необходимо переписать в виде:

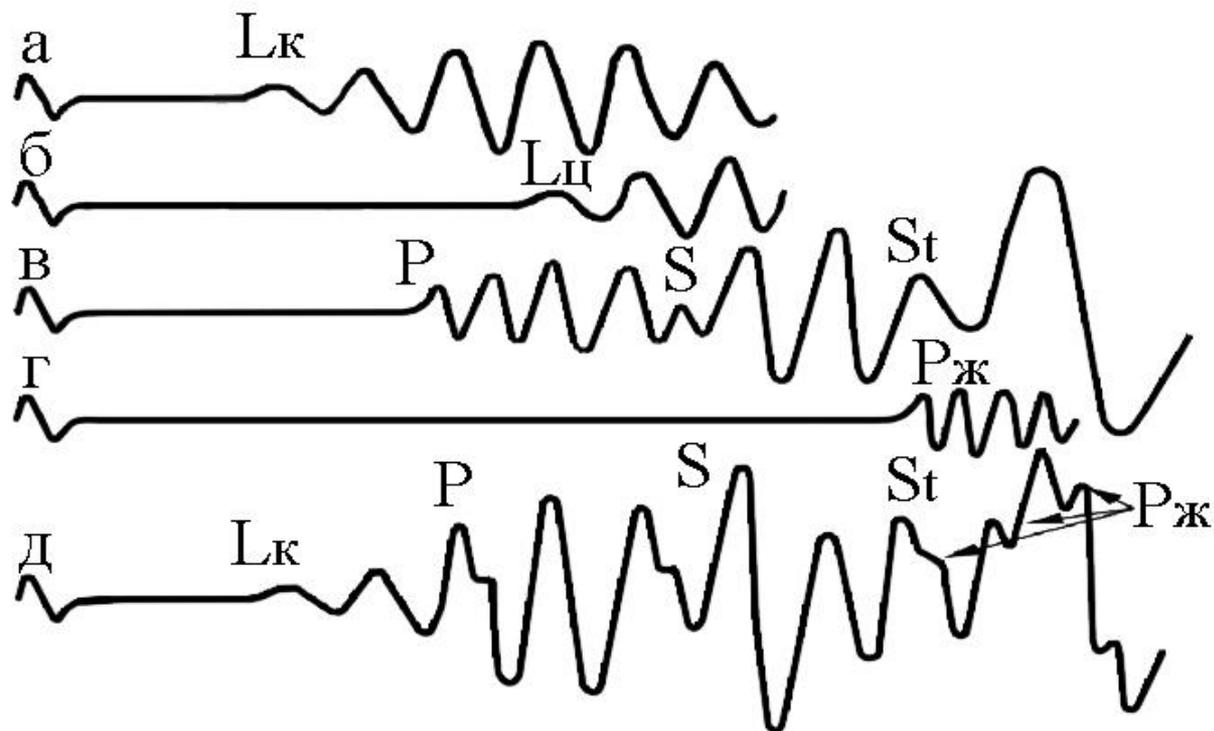
$$\frac{v_{SV}}{v_{St}} \approx \sqrt{\frac{\sigma_{ж}}{\sigma} + \frac{v_{SV}^2}{v_{ж}^2}}$$

Для распространения незатухающей волны Стоунли необходимо, чтобы выражение под корнем было больше единицы. Так как применительно к горным породам в большинстве случаев  $\sigma_{ж}/\sigma \approx 1/2$ , то условие распространения незатухающей волны определится, как  $v_{SV} > \approx 0,71 v_{ж}$ . При меньших значениях  $v_{SV}$  волна Стоунли вырождается

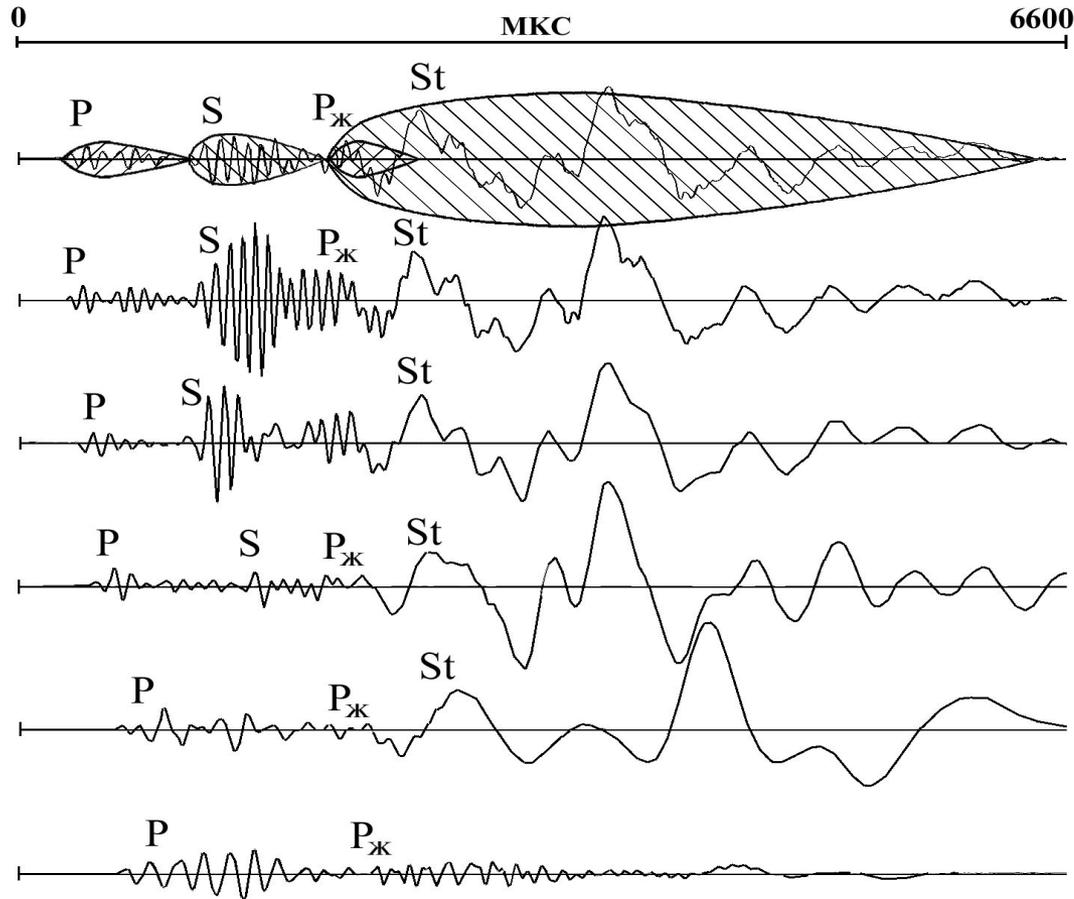
Схема образования в скважине преломленных волн (а) и форма полных акустических сигналов, регистрируемых приёмником (П) скважинного прибора АК на двух разных удалениях от источника И колебаний (б)



# Искусственное построение волнового пакета с использованием синтетических отображений колебаний различных волн



# Формы волновых пакетов, зарегистрированные в породах различного литологического состава измерительным зондом ИП длиной 4,0м



а – карбонатная порода;

б – карбонатная порода;

в – песчаник крепко-цементированный;

г – песчаник слабо-цементированный

д – аргиллит;

е – аргиллит;

площади заштрихованных участков соответствуют энергиям P, S, P<sub>ж</sub> и St волн

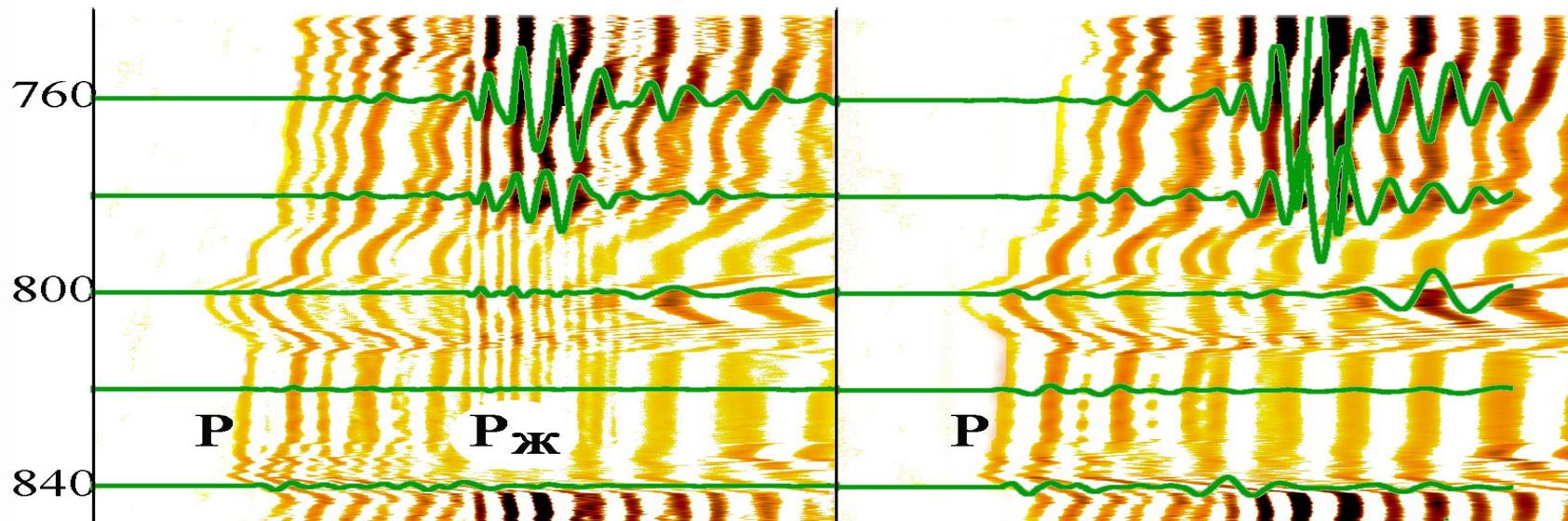
# Волна в скважинной жидкости

Жидкость в скважине не является волноводом, т.к. не выполняется условия отсутствия механических напряжений на границе со стенкой скважины и соотношения длины волны и диаметра скважины. Скорость  $v_{\text{ж}}$  равна скорости в массиве жидкости.

Наименее интенсивная из всех волн, регистрируемых в скважине

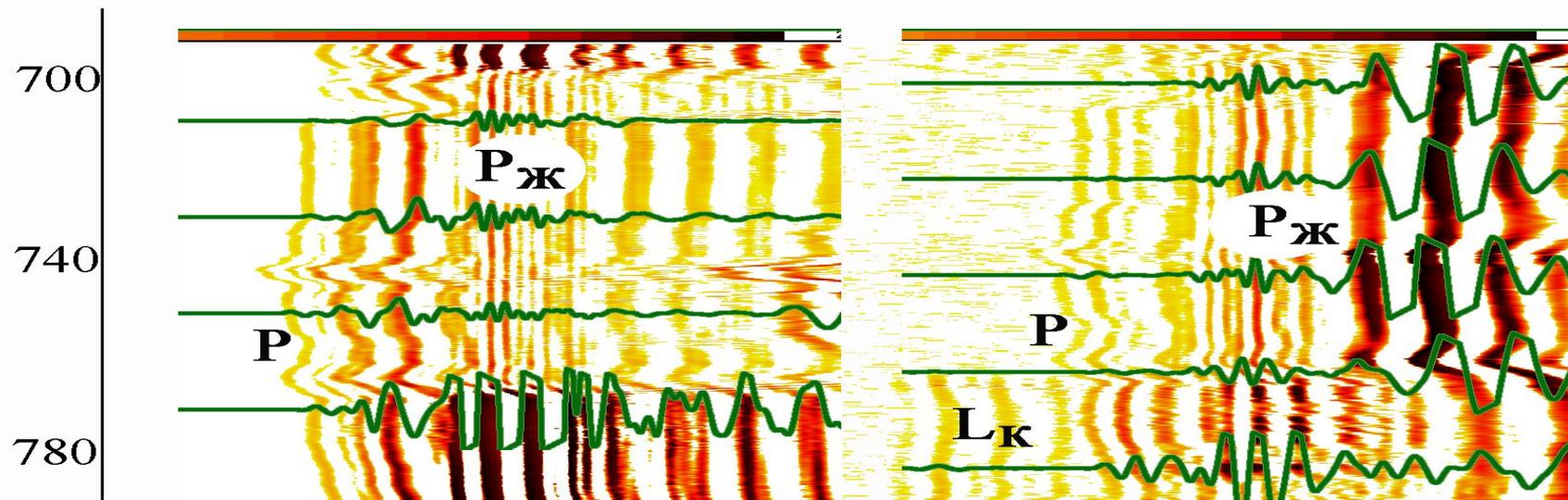
частота излучателя 20 кГц

частота излучателя 10 кГц



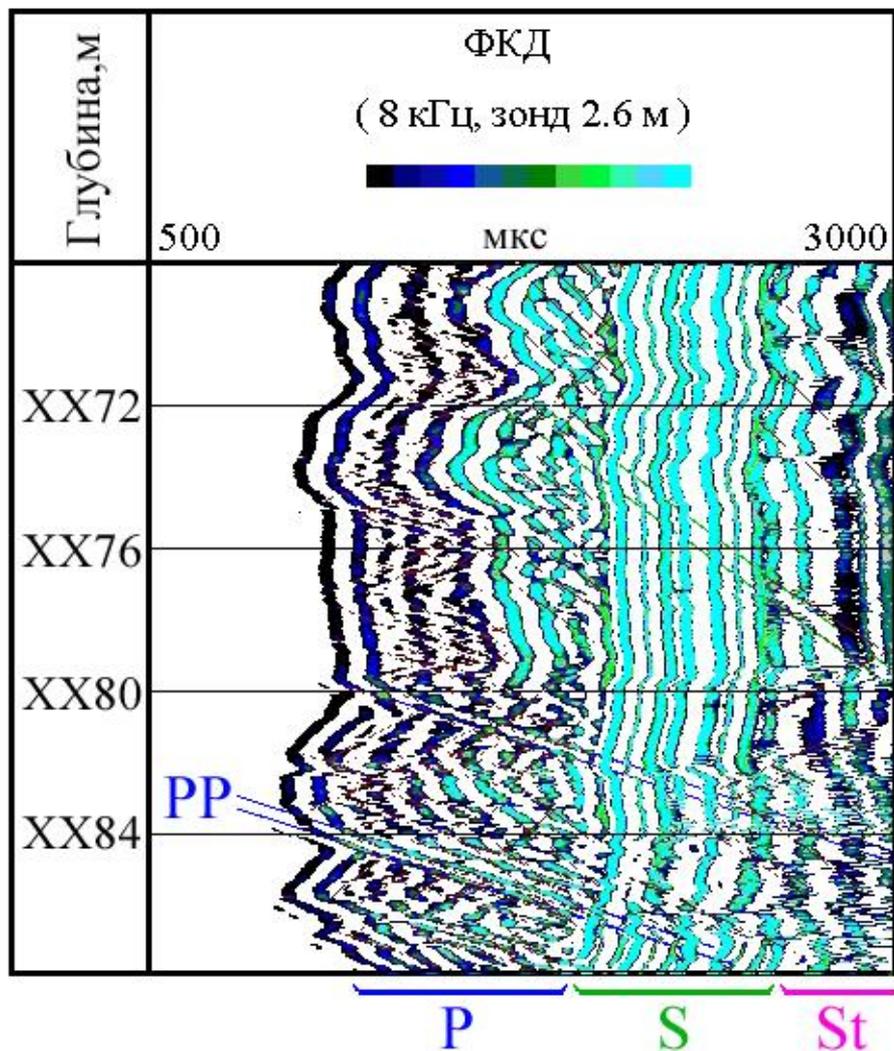
открытый ствол

через обсадную колонну





# Выделение на ФКД отражённых продольной (PP) и поперечной (SS) волн

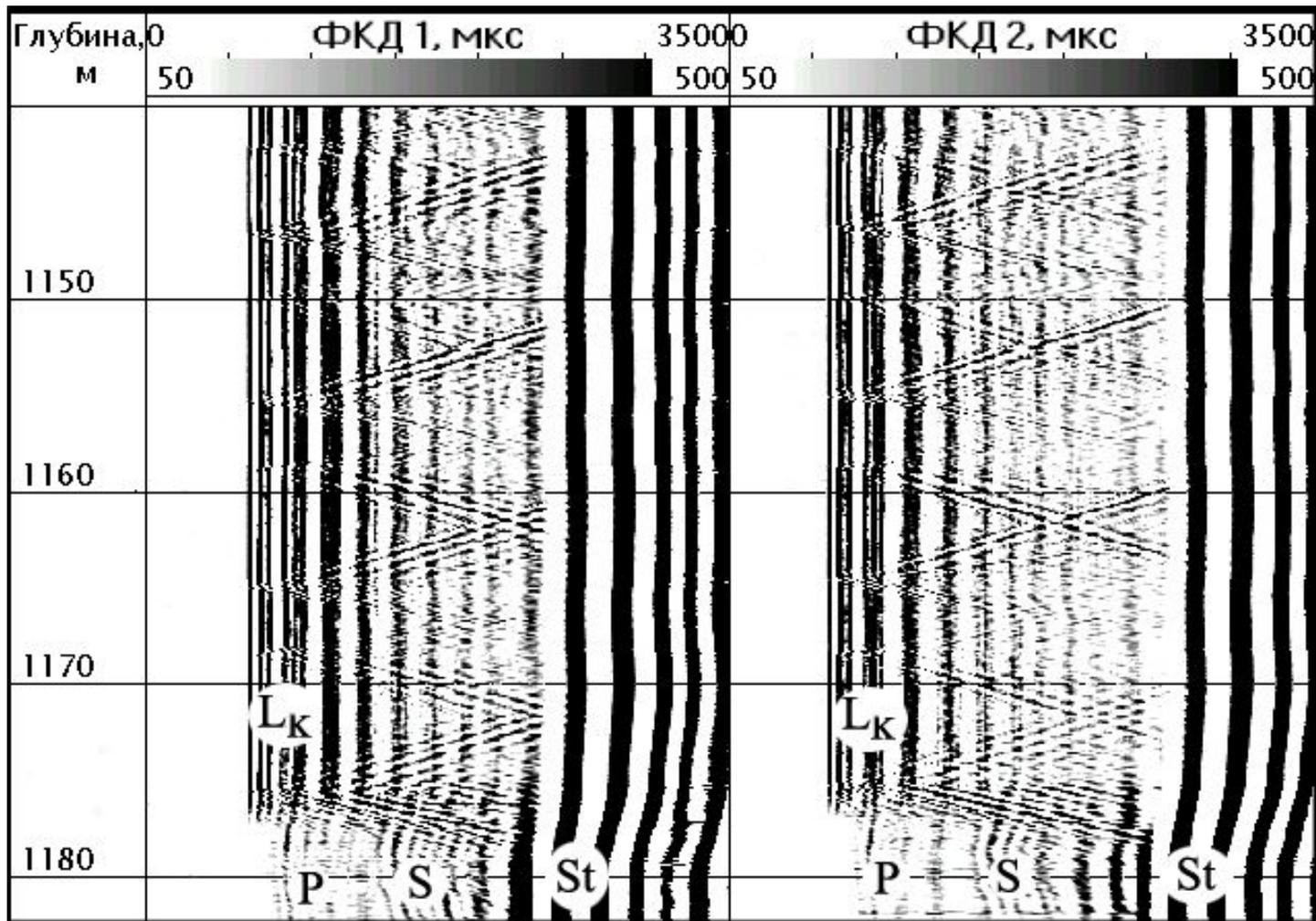


отложения баженовской свиты;  
отражения происходят на границах  
литологических прослоев и  
трещинах;

шаг регистрации по глубине – 0.05м;

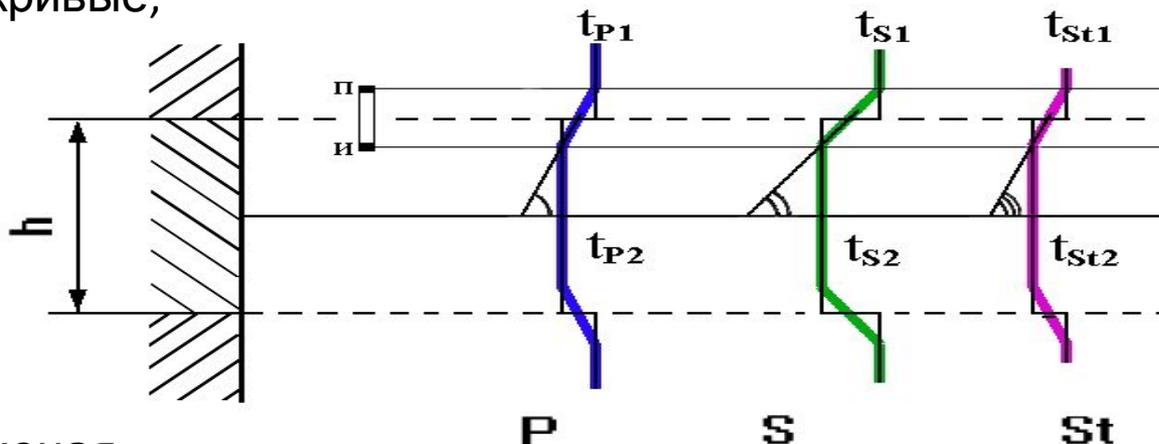
шаг регистрации времени – 2мкс

# Отображение на ФКД волн, отражённых на муфтовых соединениях обсадной колонны

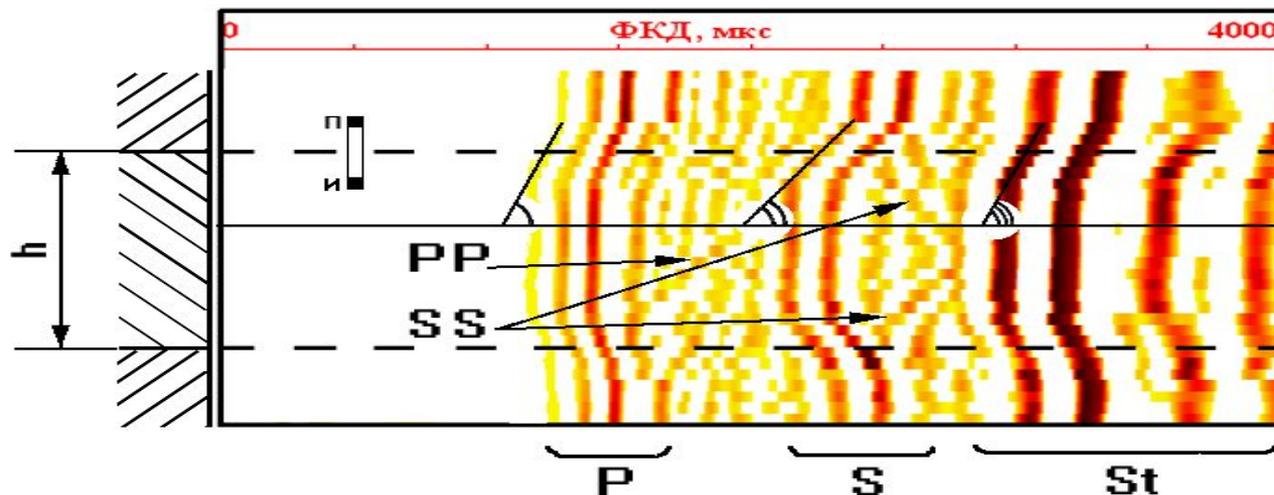


# Схема выделения волн различных типов на фазокорреляционных диаграммах:

а – теоретические кривые;

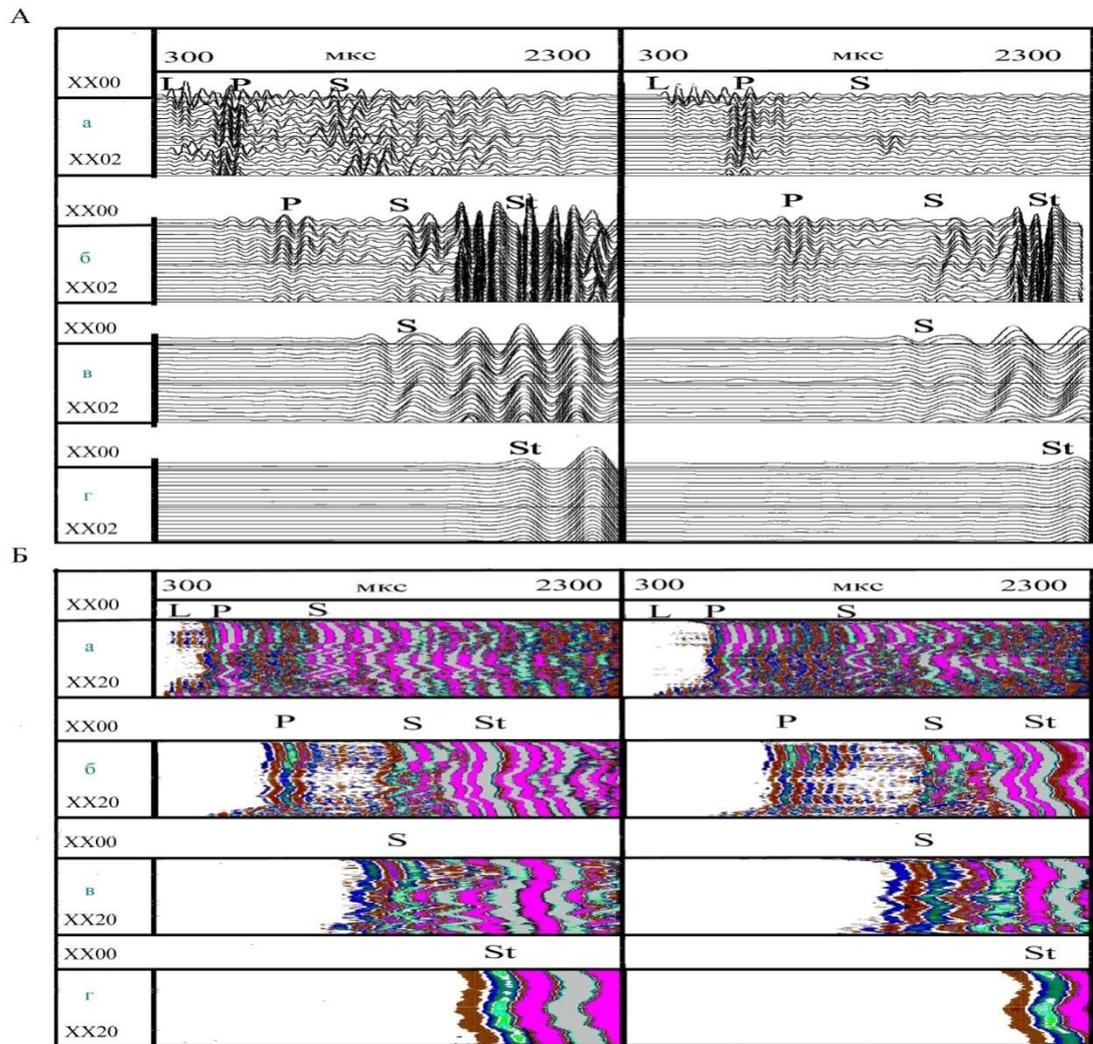
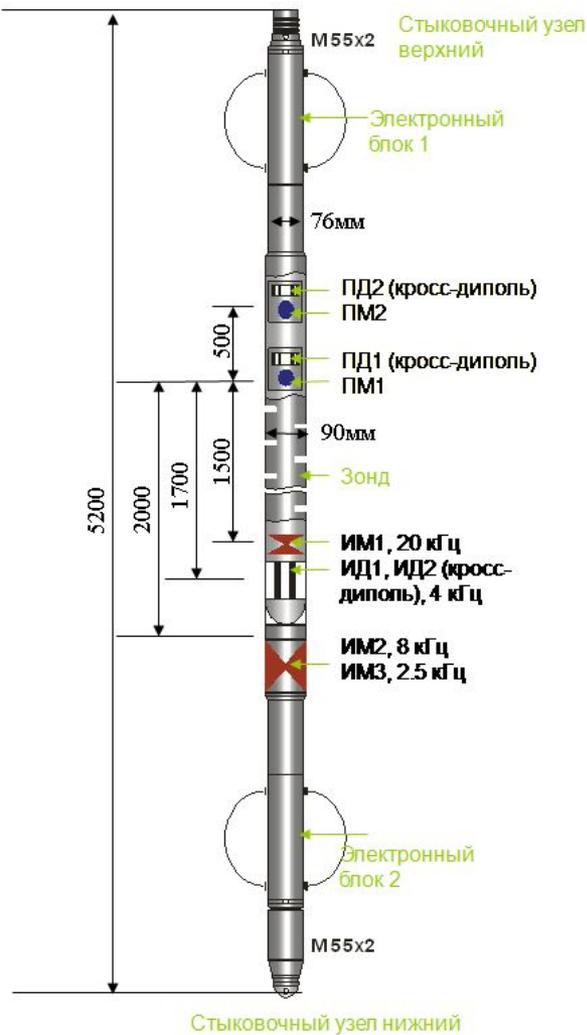


б – фазокорреляционная диаграмма;



PP и SS – отражённые продольная и поперечная волны соответственно

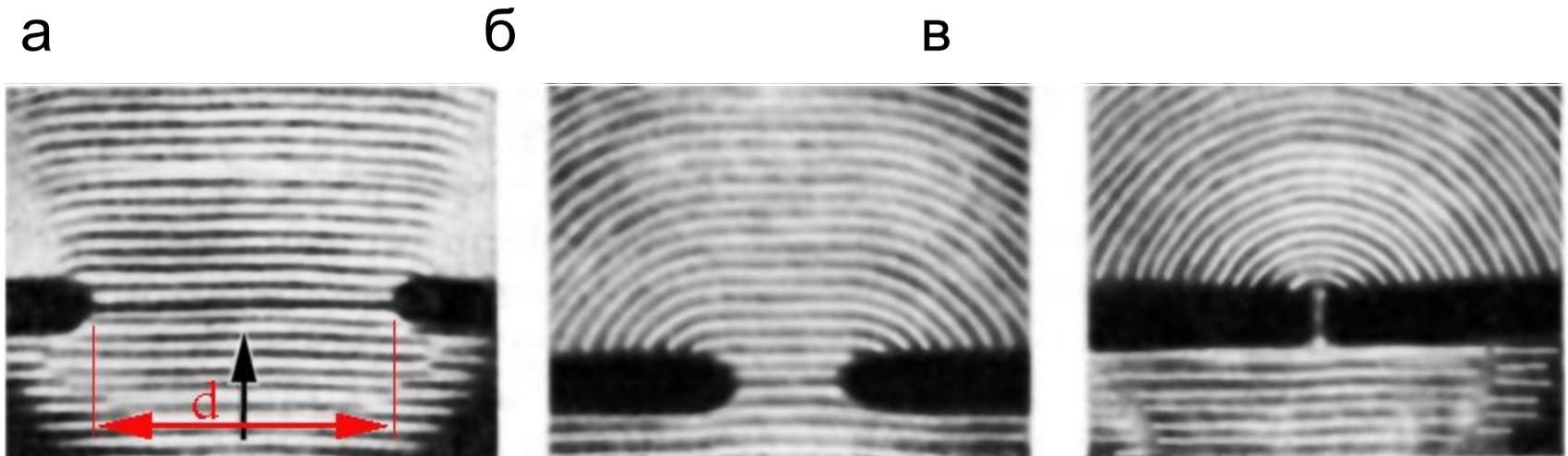
# Изменение волновых картин в зависимости от характеристик излучателя



Представление регистрируемых сигналов в форме волновых пакетов А и фазокорреляционных диаграмм Б  
 А, б, г – данные монополярных зондов с частотой излучателя 20, 8 и 2.5 кГц, соответственно; в – данные дипольного зонда;

L – волна по колонне; P – продольная волна; S – поперечная волна; St – волна Стоунли

# Дифракция плоской волны на отверстии в сплошном плоском экране



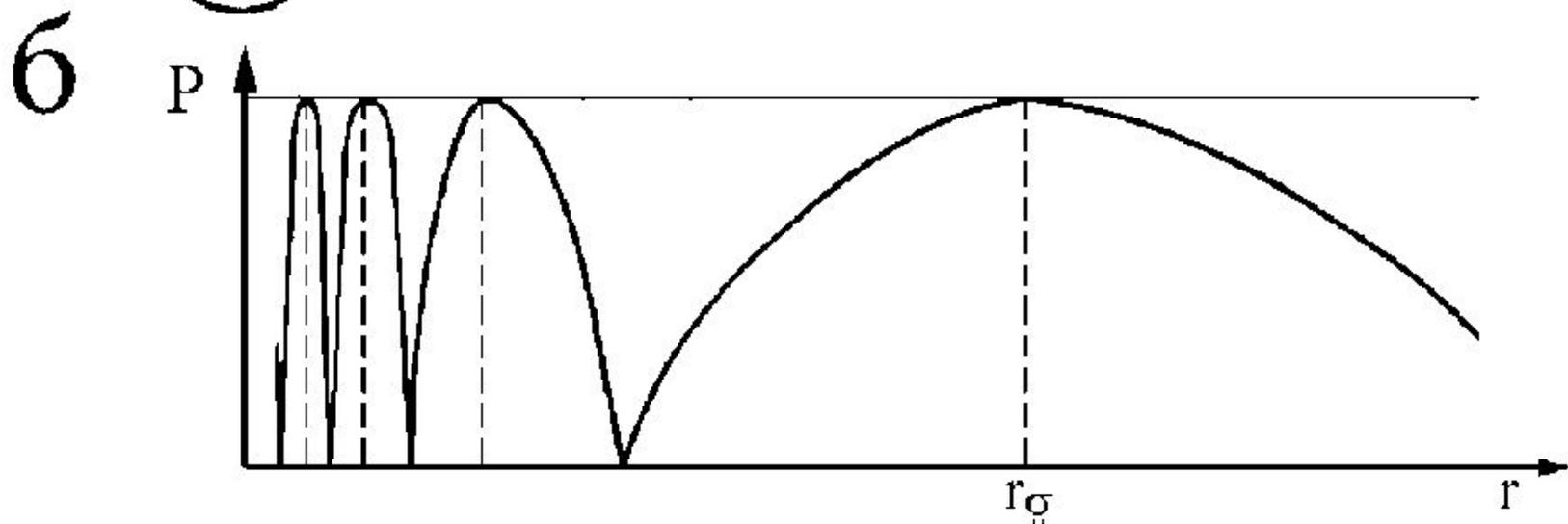
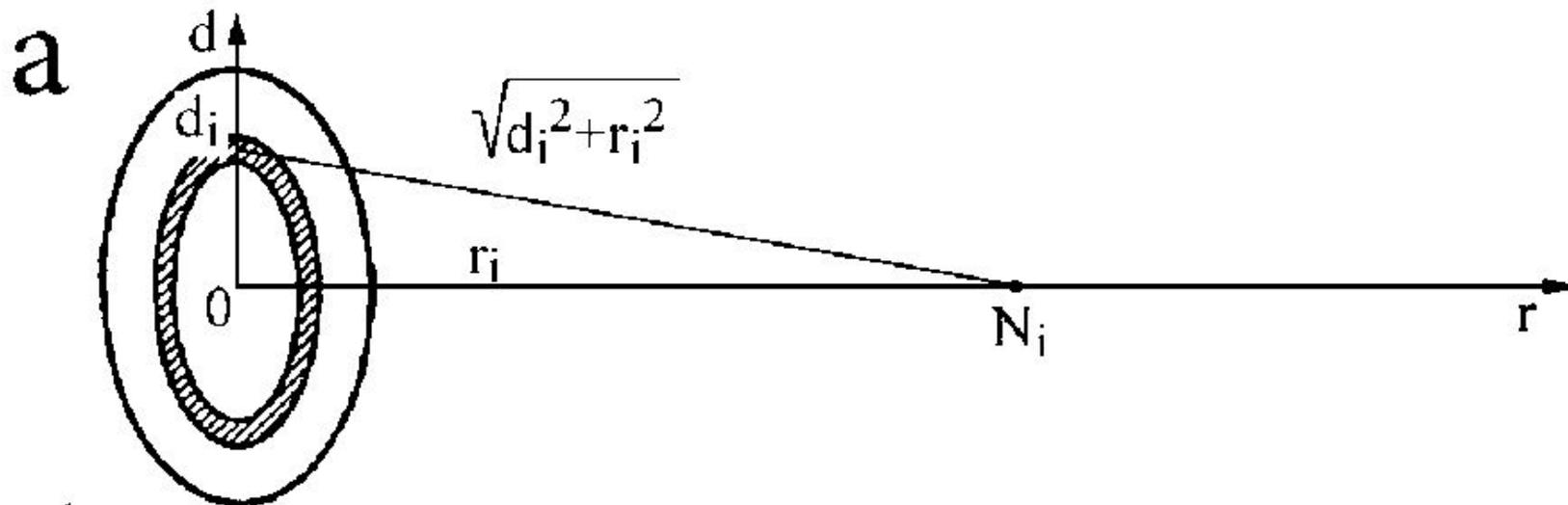
Формирование упругого поля от источника ограниченного размера обусловлено дифракцией упругой волны и определяется отношением размера источника к длине  $\lambda$  волны:

а) если  $d \gg \lambda$ , то форма фронта волны сохраняется на большом расстоянии от экрана, размываются лишь границы лучевого пучка;

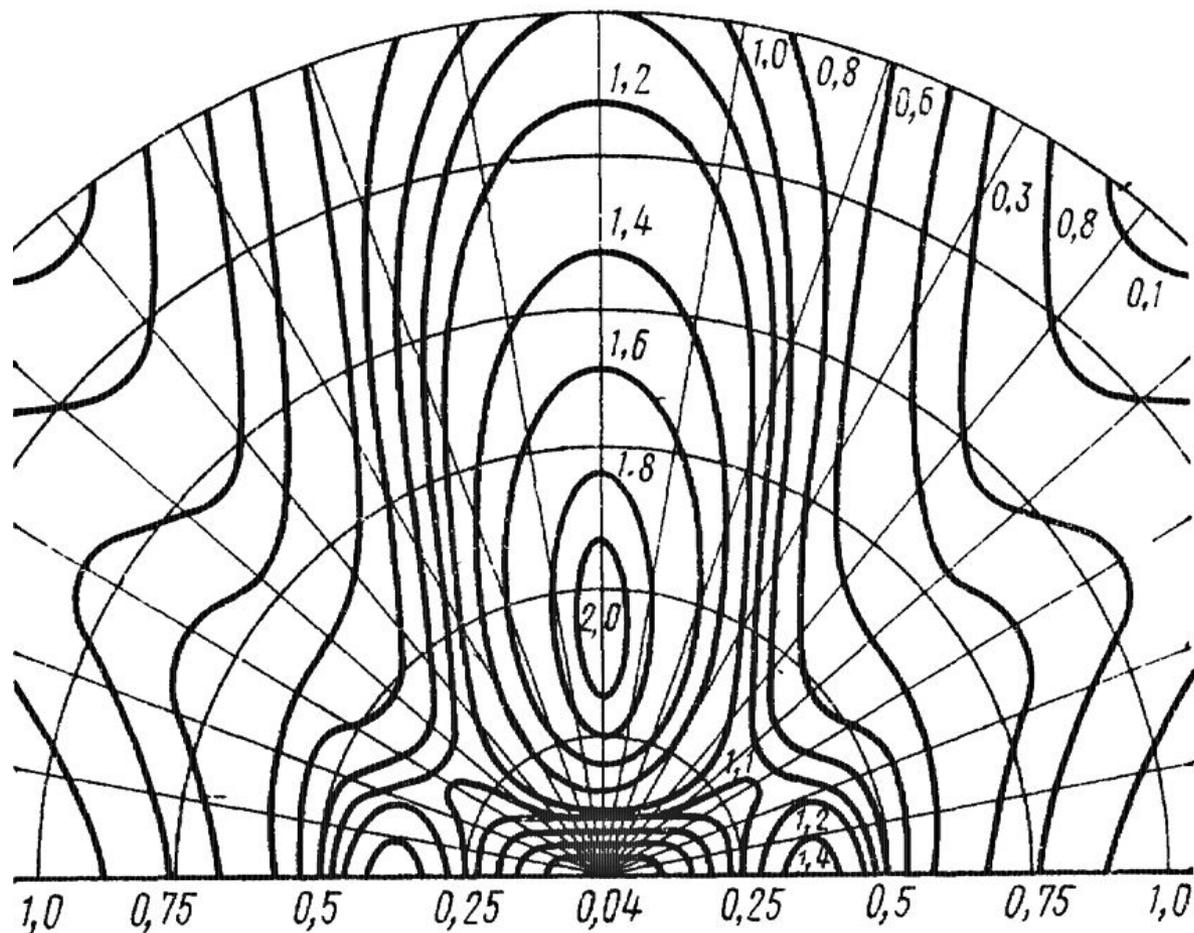
б) размеры плоского фронта уменьшаются, если размер  $d$  стремиться к  $\lambda$ ;

в) если  $d \ll \lambda$ , отверстие в экране становится точечным источником колебаний.

Схема определения давления ( $P$ ) звукового поля от точечных источников, размещённых в точках  $0$  и  $d_i$

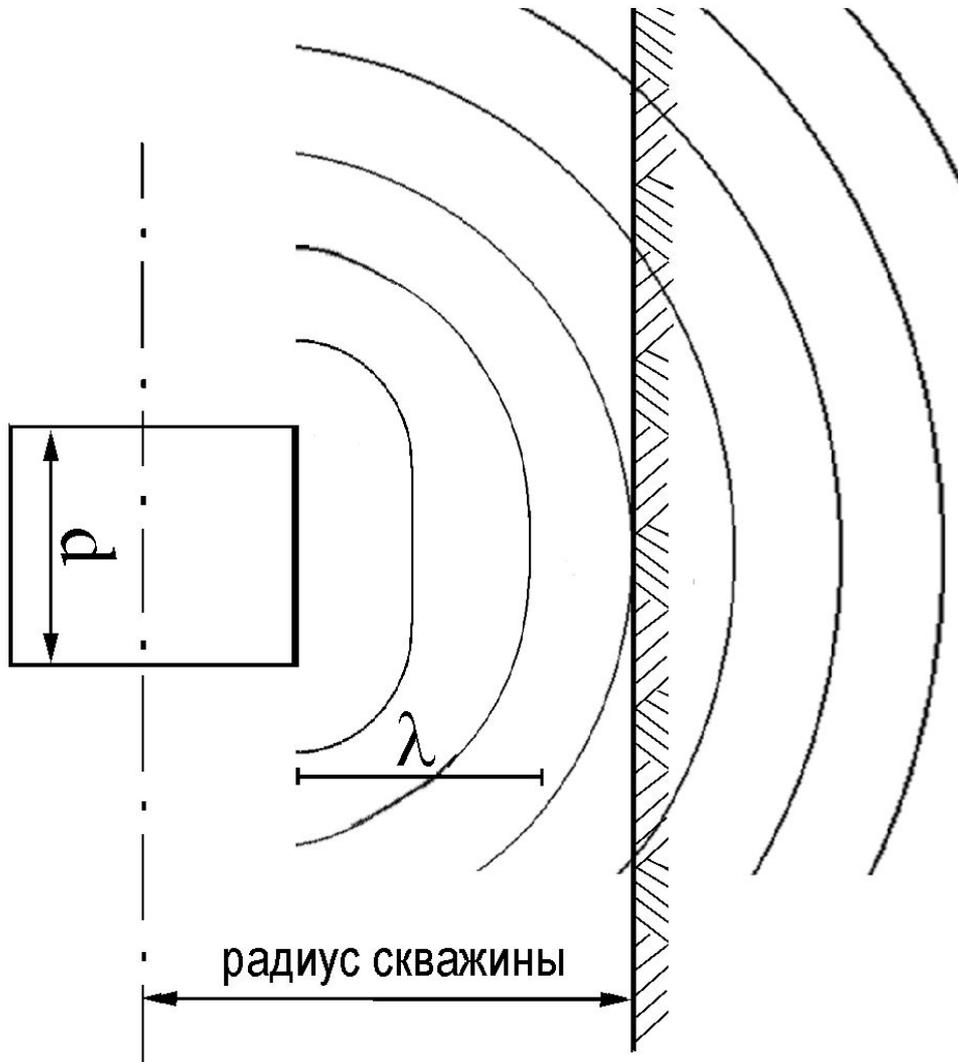


# Расчетное поле ближней зоны для круглого поршневого излучателя



Цифры у изобар обозначают отношение рассчитанного значения давления волны к давлению идеальной плоской волны

# Фронты и коэффициенты расхождения преломлённых объёмных Р и S волн, распространяющихся в горных породах

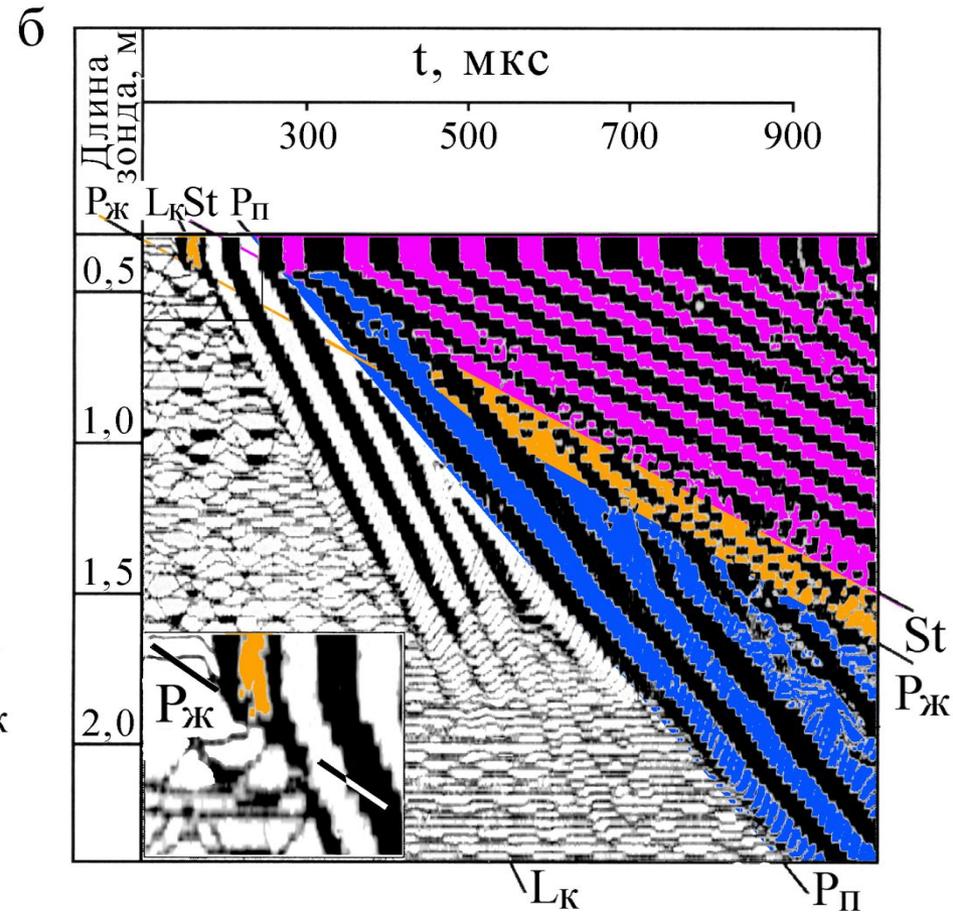
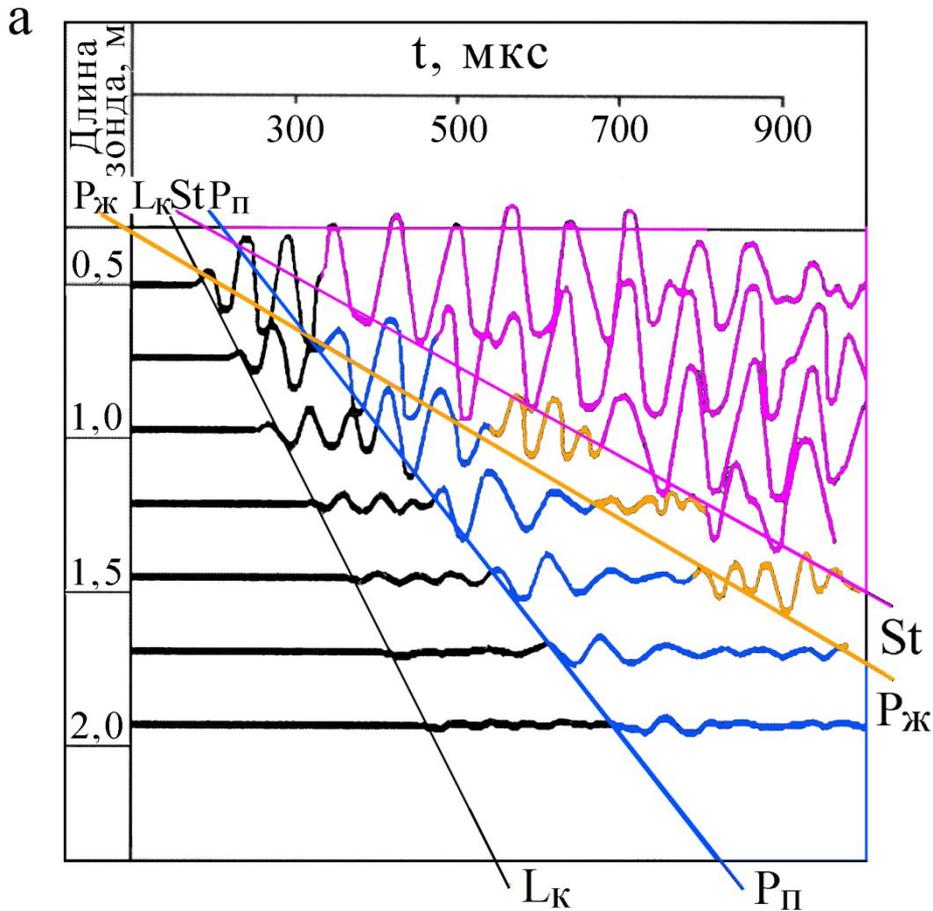


Размер  $r$  ближней зоны (Френеля), в которой волна становится практически сферической, определяется выражением:

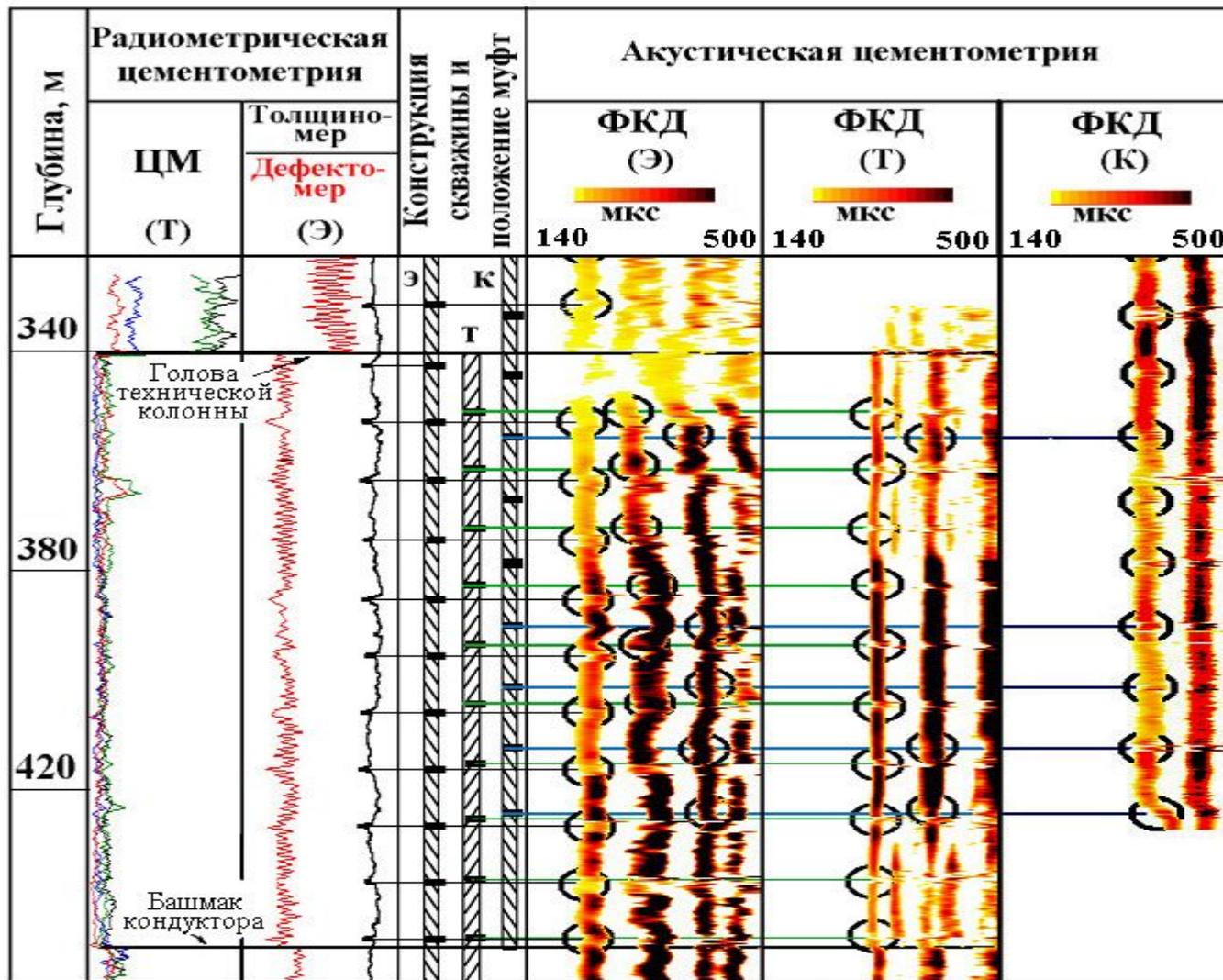
$$r = \frac{d^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}$$

где  $d$  - высота излучателя скважинного прибора,  $\lambda$  - длина волны, все величины выражены в метрах.

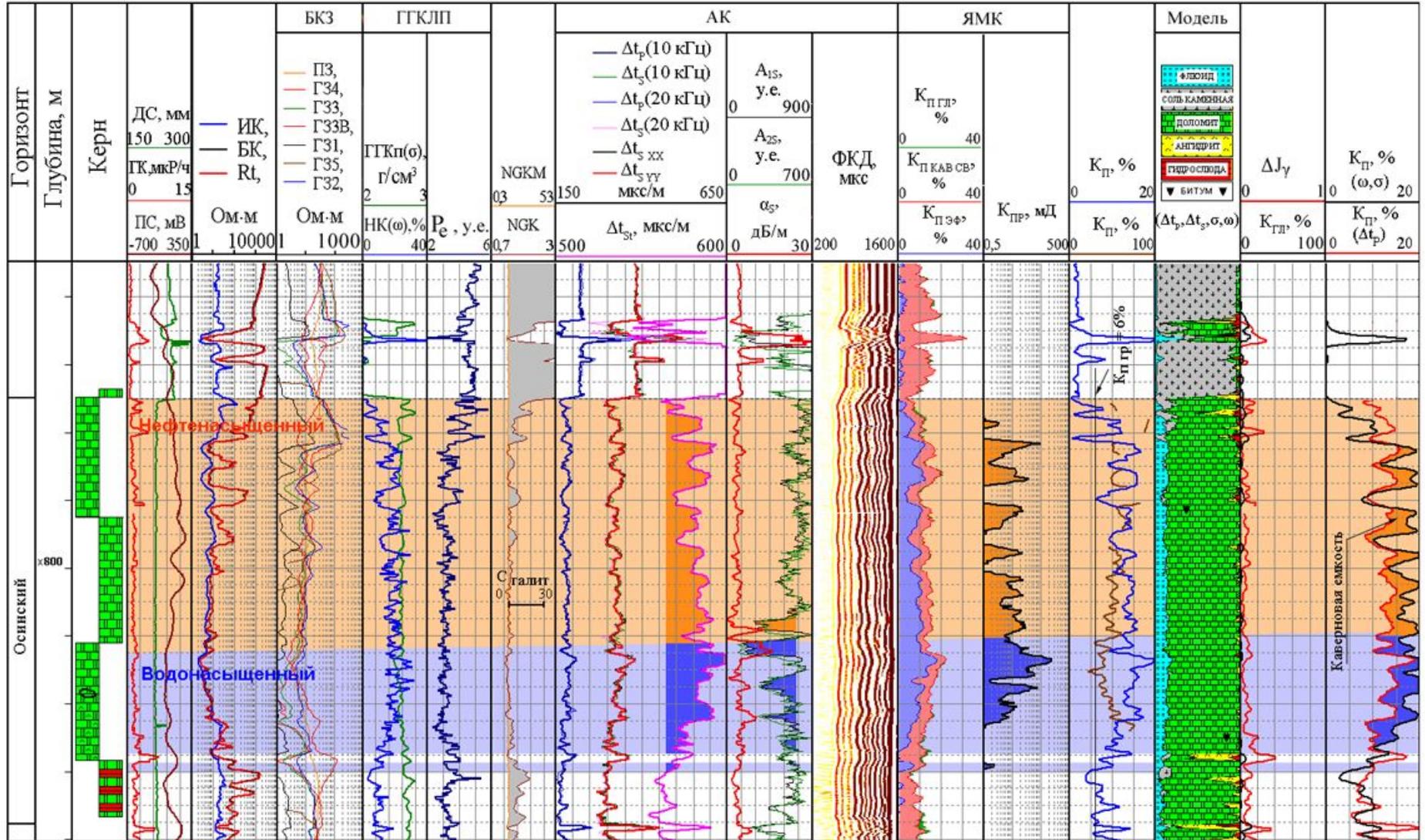
# Сводный годограф построенный с учетом данных двух каналов



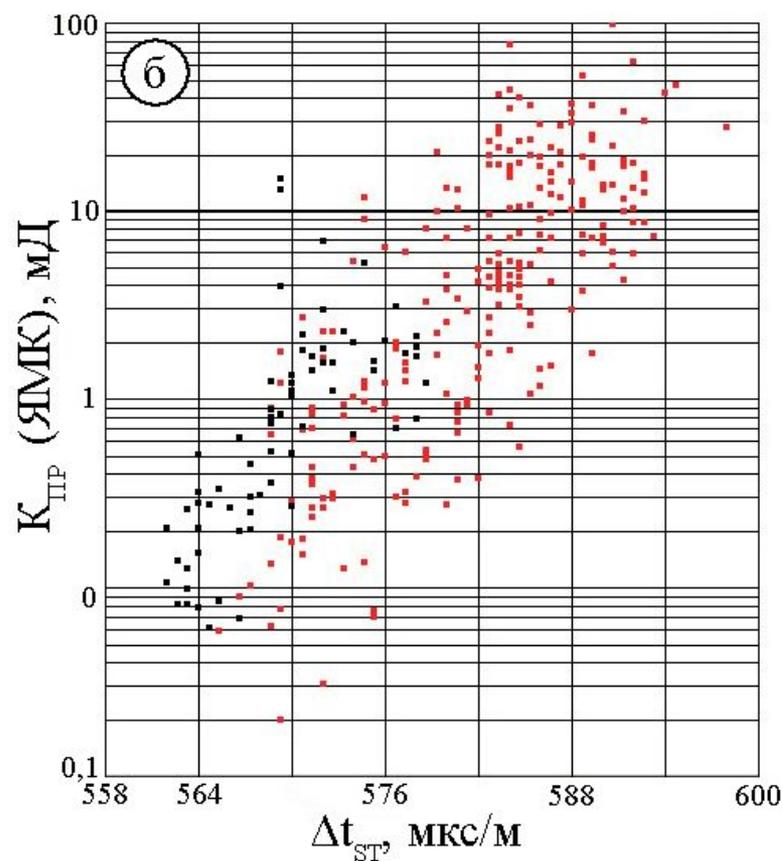
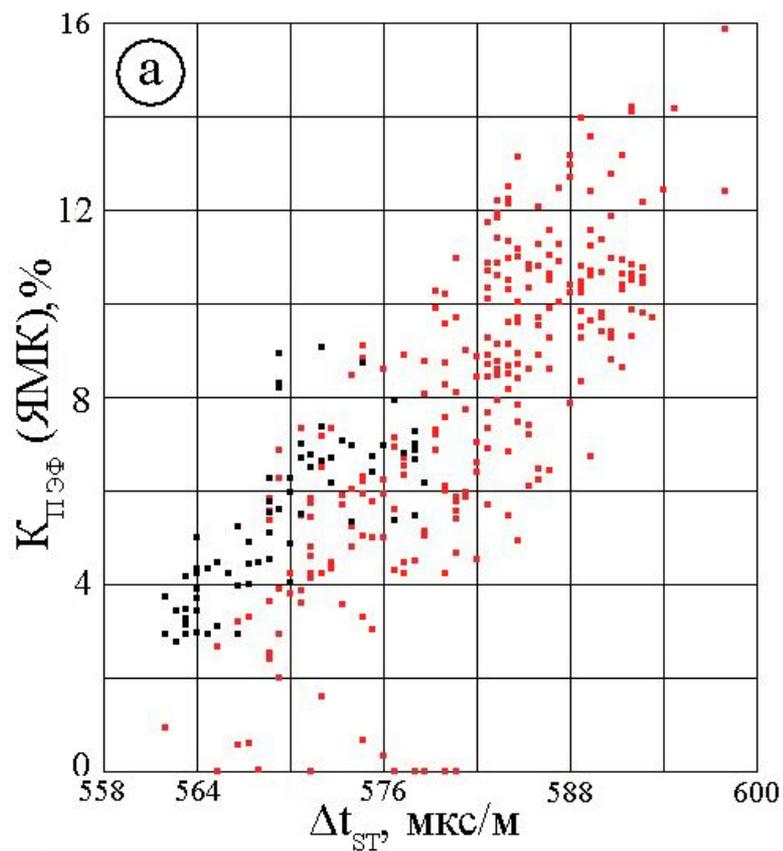
# Влияние плохого состояния контакта цемент – колонна на данные полученные при АКЦ последующих элементов конструкции скважины



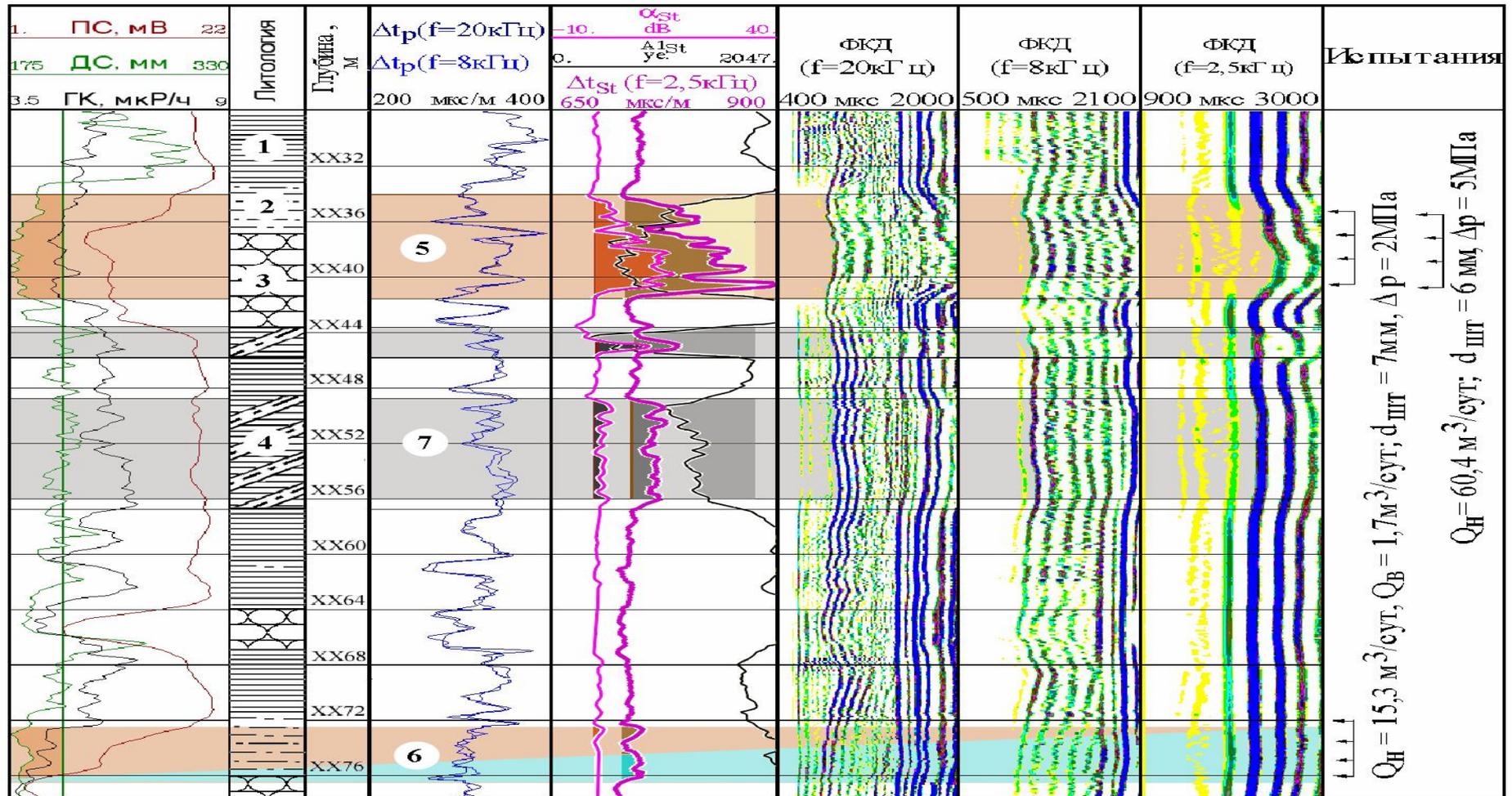
# Первичные данные ГИС и испытаний, результаты геологической интерпретации данных . Скв. Талаканского месторождения



# Сопоставление $\Delta t_{St}$ с $K_{пэф}$ и $K_{пр}$ , определенными по данным ЯМК



# Выделение в обсаженной скважине перфорированных продуктивных интервалов и интервалов предположительно проницаемых пород с использованием параметров волны Стоунли



1 – аргиллит; 2 – алевролит; 3 – песчаник; 4 – переслаивание алевролитов и аргиллитов; 5, 6 – нефте- и нефтеводонасыщенные породы; 7 – породы, обладающие признаками коллекторов, но не испытанные

Верхний перфорированный интервал сложен нефтенасыщенными песчаниками и алевролитами, нижний нефтеводонасыщенными алевролитами. Для них характерно увеличение  $\Delta t_{St}$ ,  $\alpha_{St}$  и уменьшение  $A_{St}$

**Спасибо за  
внимание!**