

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ СКОРОСТИ  
ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНЕ  
МЕТОДОМ ВСП

Алик Нариманович Касимов  
ООО «ПетроГеоСкан»

Вениамин Андреевич Редкоп  
(ООО «ВимСейс Технологии»)

«ВСП – метод экспериментального изучения процесса распространения сейсмических волн в реальных средах, основанный на наблюдениях во внутренних точках среды (скважинах).» Е.И.Гальперин.

Р.М.Гальперина.

«Некоторые результаты изучения обменных проходящих волн методом вертикального сейсмического профилирования.» Экспериментальная сейсмология (Сборник статей). Москва «Наука», 1971.

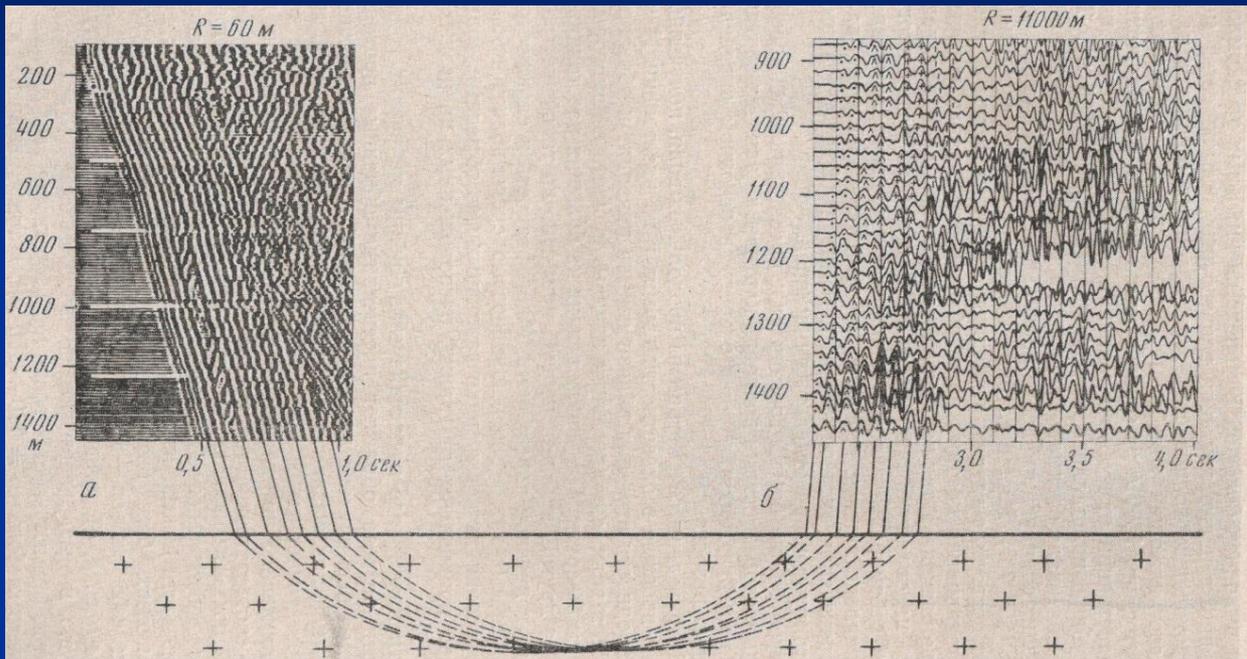


Рис.1. Сейсмограммы продольных волн по вертикальному профилю.

а-в окрестности взрыва - 60м (сейсмограмма переменной плотности; б-на расстоянии 11 км (выкопировки осциллографических записей); разными знаками обозначены разные волны; дуги окружностей соединяют однотипные волны.

Работа выполнена в связи с планированием расширения работ методом обменных проходящих волн. При этом не было надежных и обоснованных критериев уверенного отождествления Р и PS волн соответствующих одной границе.

### Вывод Р.М.Гальпериной.

« ... результаты экспериментального изучения обменных проходящих волн в сейсморазведочном частотном диапазоне частот методом ВСП,..., ставят под сомнение разведочные возможности метода обменных проходящих волн в первую очередь применительно к задачам изучения границ, расположенных на больших глубинах» -

# Поясняющие сведения об анизотропии и параметрах Томсена

## Закон Гука для анизотропной среды

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= C_{11}e_{xx} + C_{12}e_{yy} + C_{13}e_{zz} + C_{14}e_{yz} + C_{15}e_{xz} + C_{16}e_{xy} \\ \tau_{yy} &= C_{21}e_{xx} + C_{22}e_{yy} + C_{23}e_{zz} + C_{24}e_{yz} + C_{25}e_{xz} + C_{26}e_{xy} \\ \tau_{zz} &= C_{31}e_{xx} + C_{32}e_{yy} + C_{33}e_{zz} + C_{34}e_{yz} + C_{35}e_{xz} + C_{36}e_{xy} \\ \tau_{yz} &= C_{41}e_{xx} + C_{42}e_{yy} + C_{43}e_{zz} + C_{44}e_{yz} + C_{15}e_{xz} + C_{16}e_{xy} \\ \tau_{xz} &= C_{51}e_{xx} + C_{52}e_{yy} + C_{53}e_{zz} + C_{54}e_{yz} + C_{55}e_{xz} + C_{56}e_{xy} \\ \tau_{xy} &= C_{61}e_{xx} + C_{62}e_{yy} + C_{63}e_{zz} + C_{64}e_{yz} + C_{65}e_{xz} + C_{66}e_{xy}\end{aligned}$$

$$C_{ij} = C_{ji} \quad i, j = (1, \dots, 6) \quad (1)$$

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$e_{xy} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]; \quad e_{xz} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right]; \quad e_{yz} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right];$$

$u, v, w$  – смещения по осям  $X, Y, Z$

$e_{ij}$  – деформации

# Виды симметрии

## Триклинная

$$\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\
 & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\
 & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\
 & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\
 & & & & C_{55} & C_{56} \\
 & & & & & C_{66}
 \end{array}$$

## Моноклинная

$$\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & C_{16} \\
 & C_{22} & C_{23} & & & C_{26} \\
 & & C_{33} & & & C_{36} \\
 & & & C_{44} & C_{45} & \\
 & & & & C_{55} & \\
 & & & & & C_{66}
 \end{array}$$

## Орторомбическая

$$\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\
 & C_{22} & C_{23} & & & \\
 & & C_{33} & & & \\
 & & & C_{44} & & \\
 & & & & C_{55} & \\
 & & & & & C_{66}
 \end{array}$$

## Тетрагональная

$$\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\
 & C_{11} & C_{13} & & & \\
 & & C_{33} & & & \\
 & & & C_{44} & & \\
 & & & & C_{44} & \\
 & & & & & C_{66}
 \end{array}$$

## Гексагональная (VTI, HTI, TTI)

$$\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{13} & C_{13} & & & \\
 & C_{33} & (C_{13} - 2C_{44}) & & & \\
 & & C_{33} & & & \\
 & & & C_{44} & & \\
 & & & & C_{66} & \\
 & & & & & C_{66}
 \end{array}$$

## Кубическая

$$\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{13} & C_{13} & & & \\
 & C_{11} & C_{13} & & & \\
 & & C_{11} & & & \\
 & & & C_{66} & & \\
 & & & & C_{66} & \\
 & & & & & C_{66}
 \end{array}$$

## Изотропная среда.

$$\begin{array}{cccccc}
 (\lambda + 2\mu) & \lambda & \lambda & & & \\
 & (\lambda + 2\mu) & \lambda & & & \\
 & & (\lambda + 2\mu) & & & \\
 & & & \mu & & \\
 & & & & \mu & \\
 & & & & & \mu
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 (\lambda + 2\mu) &= \rho V_p^2; \\
 \mu &= \rho V_s^2
 \end{aligned}$$

## Параметры Томсена для поперечно изотропной (VTI) среды

$$V_{p0} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}; \quad V_{s0} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}; \quad \varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} = \frac{V_{P(\theta=90)}^2 - V_{P(\theta=0)}^2}{V_{P(\theta=0)}^2};$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} = 4 \left( \frac{V_{P(\theta=45)}}{V_{P(\theta=0)}} - 1 \right) - \left( \frac{V_{P(\theta=90)}}{V_{P(\theta=0)}} - 1 \right);$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{C_{44}} = \frac{V_{S(\theta=90)}^2 - V_{S(\theta=0)}^2}{V_{S(\theta=0)}^2};$$

## Параметры Томсена для ортотропной среды

$$\varepsilon_{13} = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}; \quad \gamma_{13} = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}; \quad \delta_{13} = \frac{(C_{13} + C_{55})^2 - (C_{33} - C_{55})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{55})};$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{C_{22} - C_{33}}{2C_{33}}; \quad \gamma_{23} = \frac{C_{66} - C_{55}}{2C_{55}}; \quad \delta_{23} = \frac{(C_{23} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})};$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{C_{11} - C_{22}}{2C_{22}}; \quad \gamma_{12} = \frac{C_{55} - C_{44}}{2C_{44}}; \quad \delta_{23} = \frac{(C_{12} + C_{66})^2 - (C_{22} - C_{66})^2}{2C_{22}(C_{22} - C_{66})};$$

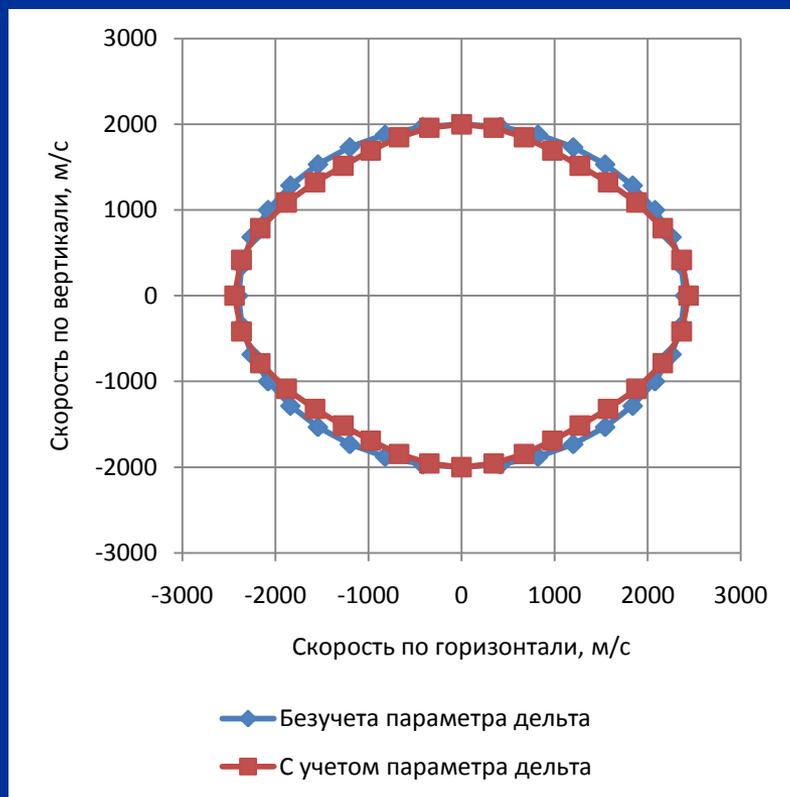
# Смысл параметров Томсена

$\epsilon$  – эллиптичность изменения скорости  $P$  волны в зависимости от отклонения направления от вертикали.

$\delta$  – отклонение от эллиптичности изменения скорости  $P$  волны.

$\gamma$  – эллиптичность изменения скорости  $SH$  волны в зависимости от отклонении направления от вертикали.

Индикатриса скорости  $P$  волны ( $VTI$  среда)



$$V_{P(\theta=0)} = 2000 \text{ м/с};$$

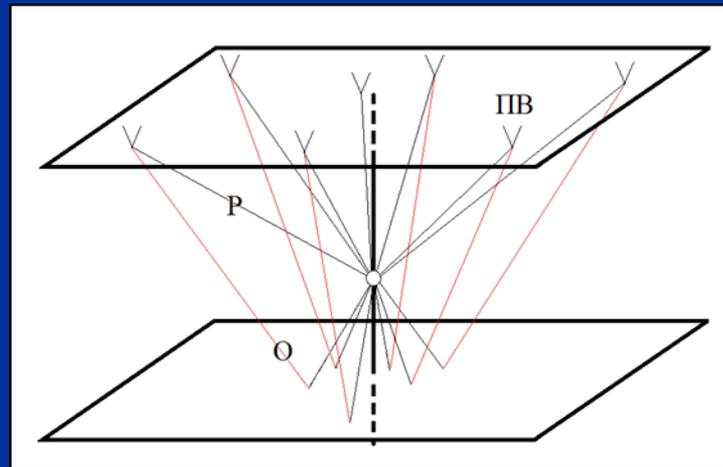
$$V_{P(\theta=90)} = 2400 \text{ м/с};$$

$$\epsilon = 0.2;$$

$$\delta = -0.2.$$

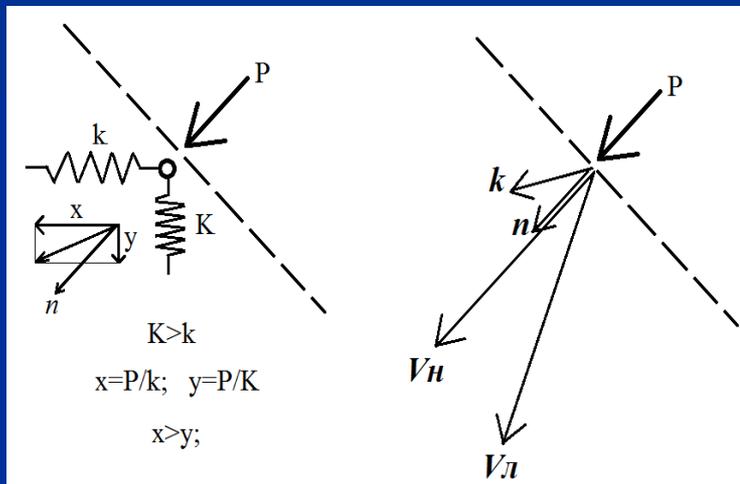
## Последовательность решения задачи по определению параметров анизотропии посредством наблюдений в скважине

1. Анализ геолого-геофизической априорной информации и прогнозирование возможного типа анизотропии.
2. Согласование параметров анизотропии, которые могут быть получены в результате работ ВСП с заказчиком.
3. Проектирование системы наблюдений с целью получения скоростей  $P$  и  $S$  волн с удалений и направлений, обеспечивающих решение поставленной задачи.
4. Выполнение полевых наблюдений с точностью обеспечивающей расчет требуемых параметров.
5. Обработка полевых данных и вычисление требуемых параметров.



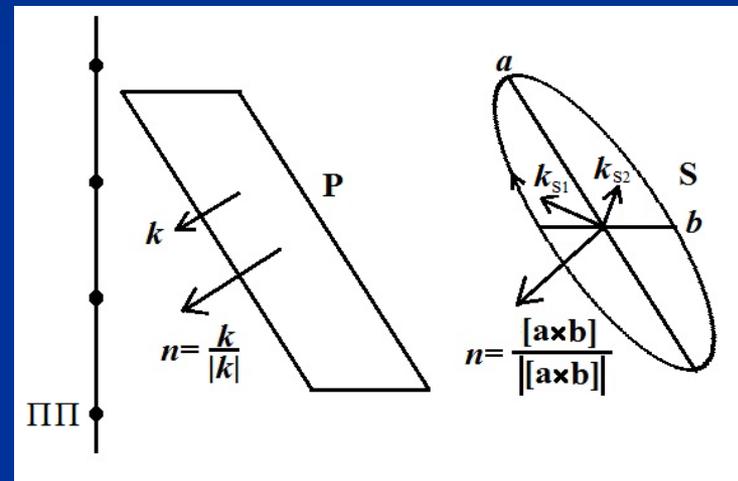
# Пояснения к измерению направления распространения и скорости волн

Возможная схема векторов для плоской Р волны



$k$  - вектор смещения Р волны.  
 $n$  – нормаль к фронту волны.  
 $V_n$  – нормальная скорость.  
 $V_{л}$  – лучевая скорость.

Принятая нами схема векторов для Р и S волн



Вектор нормали параллелен вектору смещения Р волны и ортогонален векторам смещений S1 и S2 волн. Вектора смещений  $k_{s1}$  и  $k_{s2}$  ортогональны.

## Измерения скорости Р и S волн в зависимости от направления.

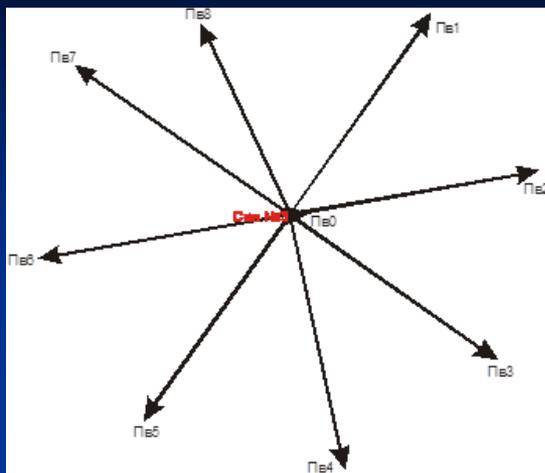
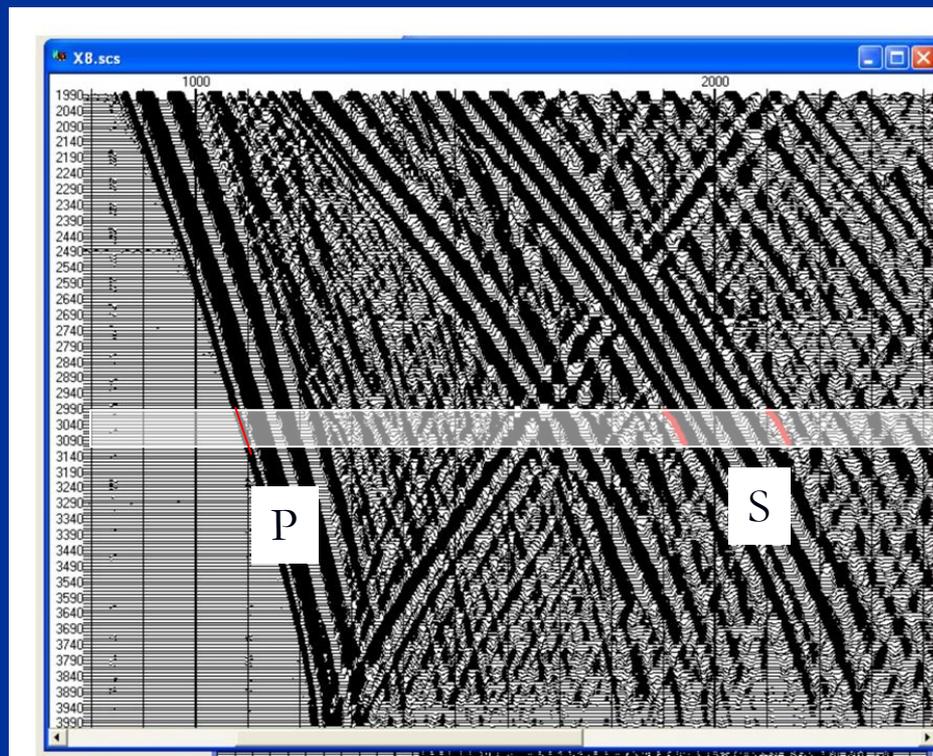


Схема наблюдения состояла из одного ближнего ПВ и восьми дальних. Расстояние до удаленных от скважины ПВ составляло 1200-1500м. Определение скорости проводили по годографу прямой волны в интервале 3000-3100м.



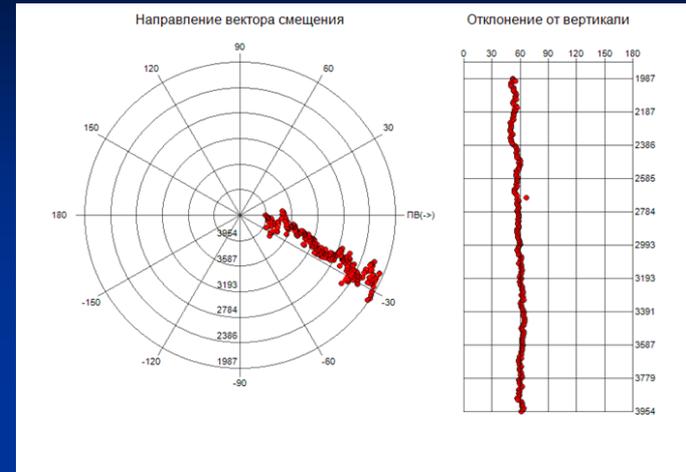
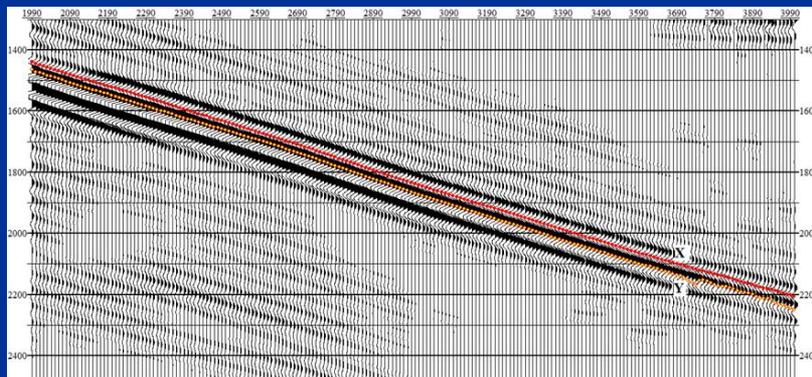
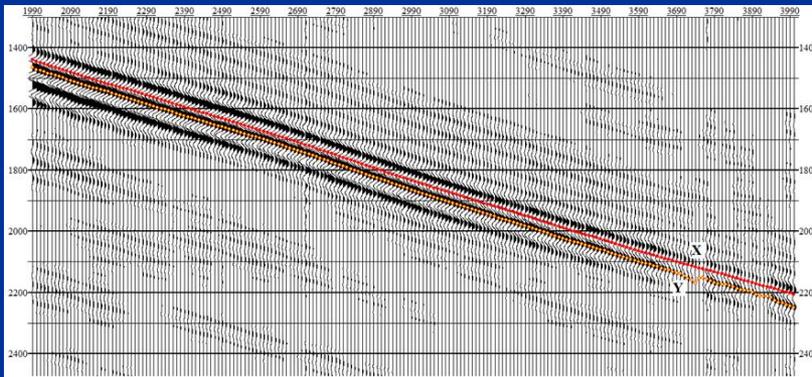
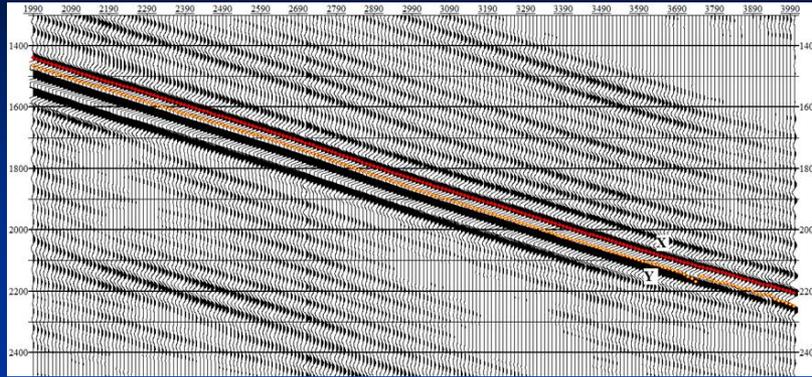
На рисунке показана сейсмограмма X –компоненты одного из 9ти ПВ.

Красными линиями отмечены волны, по которым были рассчитаны скорости Р и S волн.

Определение пластовых скоростей Р и S волн проводили по годографам отмеченным красными линиями.

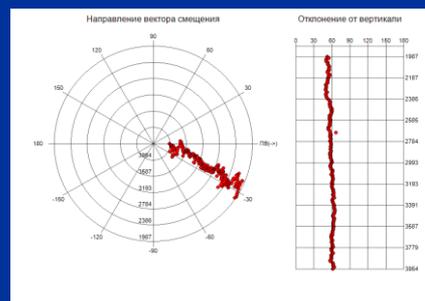
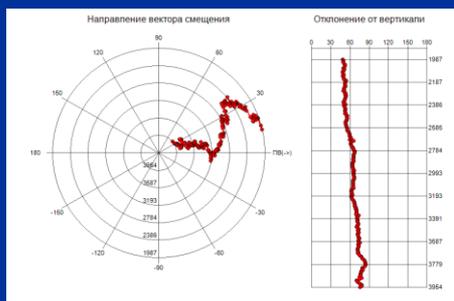
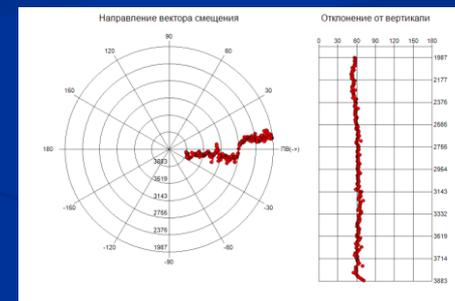
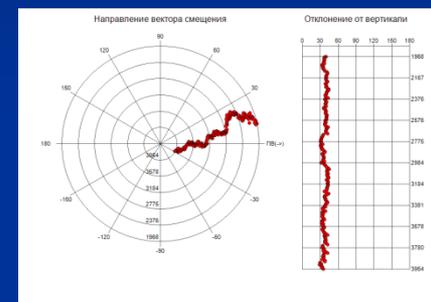
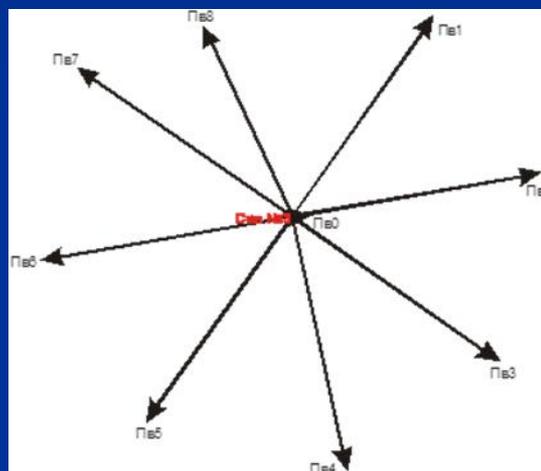
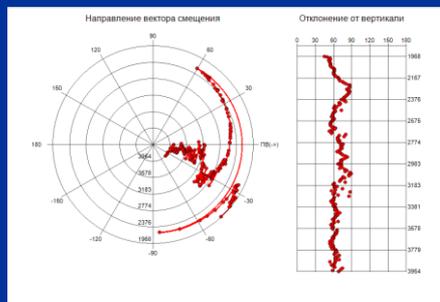
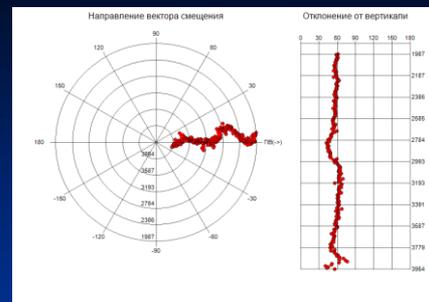
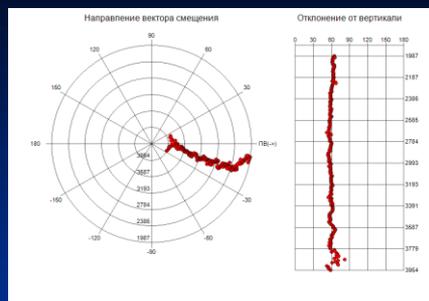
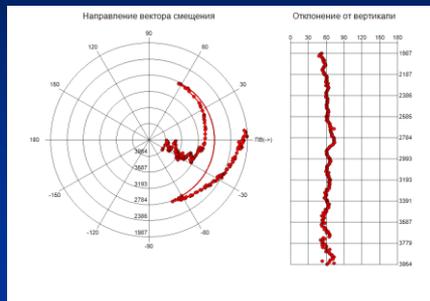
Интервал - 3000-3100м.

# Направления и траектории смещений для падающей S волны измеренные по записям после выделения S волны.

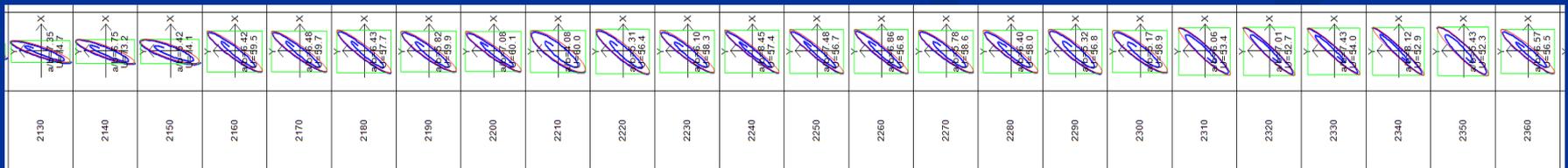
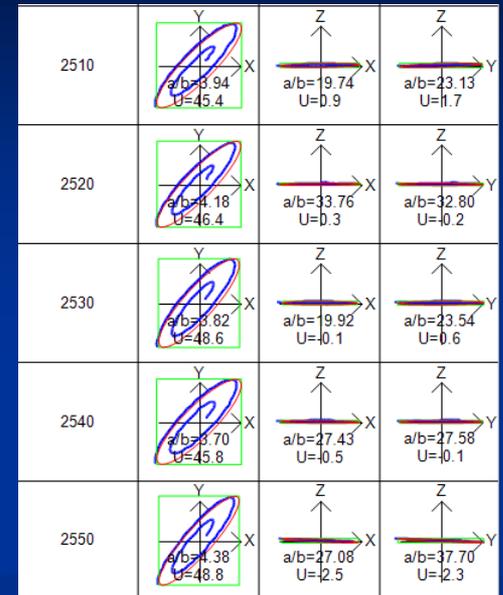
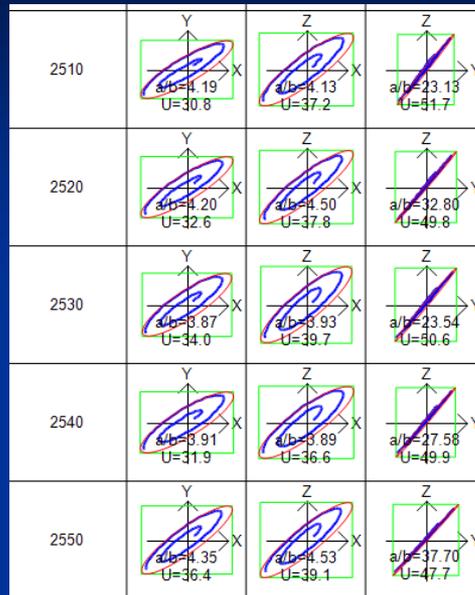
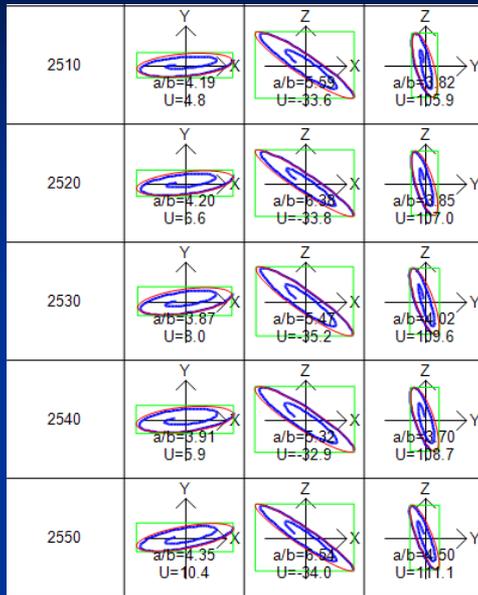


111	3090			
112	3100			
113	3110			
114	3120			
115	3130			

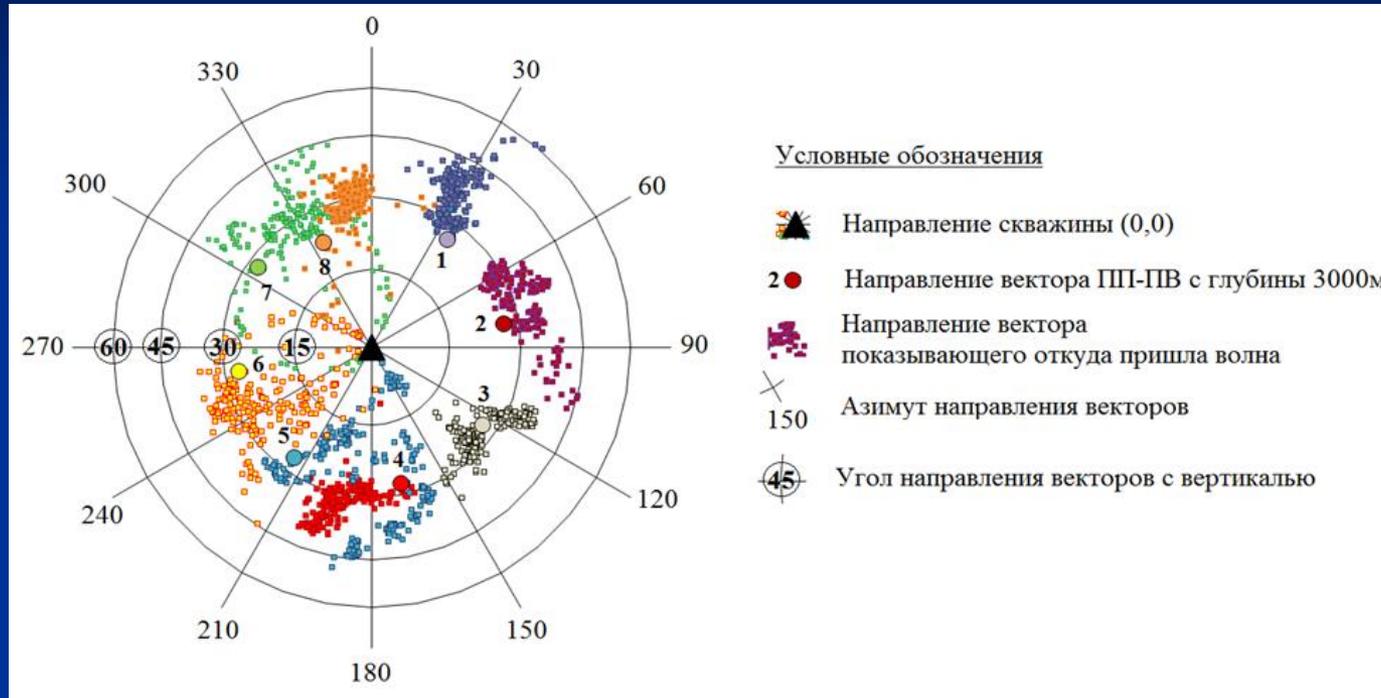
# Направления векторов смещения относительно направления на ПВ



# Получение эллипса поляризации



# Направления подхода падающей S волны в сферической системе координат

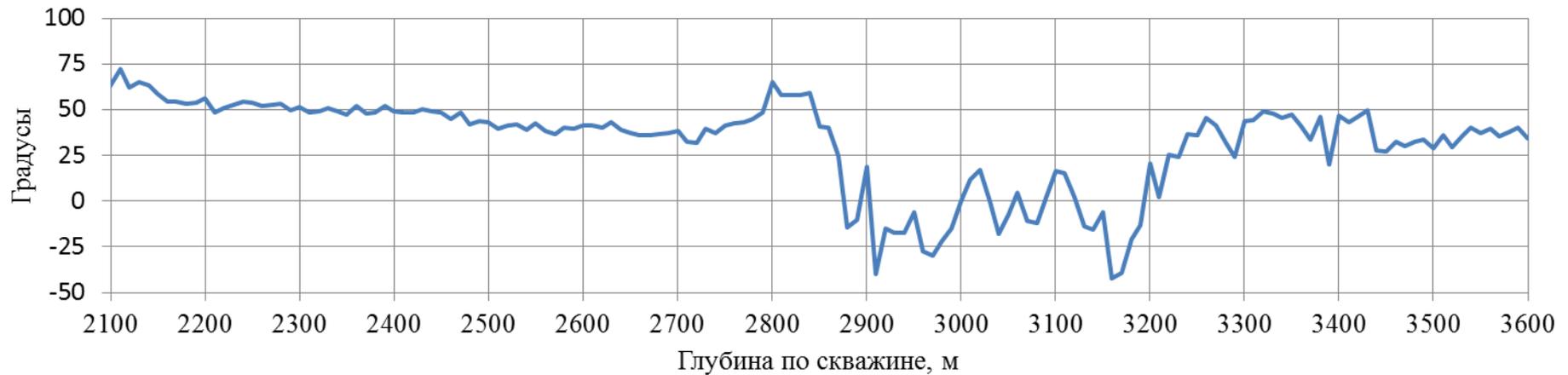


# Параметры эллипса поляризации

## Отношение полуосей эллипса поляризации



## Наклон большой оси эллипса поляризации

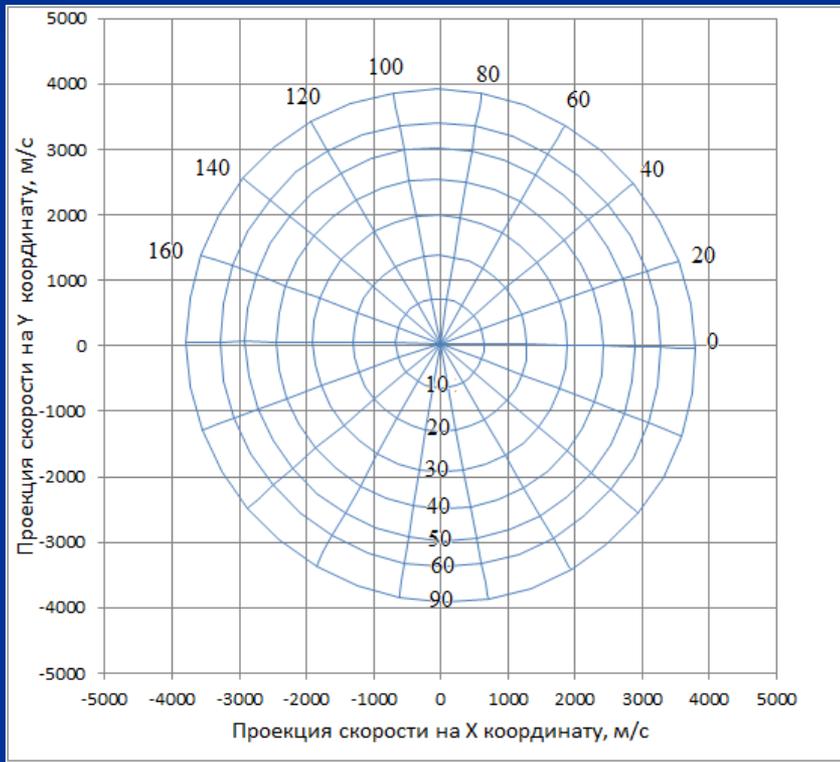


# Вычисление параметров эллипсоида и его изображение

1. Составляем уравнения (число уравнений  $> 6$ )

$$\begin{aligned}A(Vx_1)^2 + B(Vy_1)^2 + C(Vy_1)^2 + D(Vx_1Vy_1) + E(Vx_1Vz_1) + F(Vy_1Vz_1) &= 1 \\A(Vx_2)^2 + B(Vy_2)^2 + C(Vy_2)^2 + D(Vx_2Vy_2) + E(Vx_2Vz_2) + F(Vy_2Vz_2) &= 1 \\ \dots & \\A(Vx_k)^2 + B(Vy_k)^2 + C(Vy_k)^2 + D(Vx_kVy_k) + E(Vx_kVz_k) + F(Vy_kVz_k) &= 1\end{aligned}$$

Отображение эллипсоида скорости на плоскости X0Y



2. Из 1 найдем коэффициенты А-Г. определим вектор невязок.

3. Определим вектор невязок и проверим решение по некоторому критерию.

4. Если п.3 выполнен, решение А-Г представим в виде матрицы М.

$$M = \begin{bmatrix} A & D & E \\ D & B & F \\ E & F & C \end{bmatrix};$$

4. Найдем собственные значения (L) и собственные векторы (v) матрицы М.

5. По собственным значениям найдем скорости по осям  $V_i = (L_i)^{-1/2}$ , а по собственным векторам – положение осей и углы поворота (углы Эйлера).

6. Найденные скорости представим в и виде матрицы (V):

$$V = A^T \begin{bmatrix} V_x & 0 & 0 \\ 0 & V_y & 0 \\ 0 & 0 & V_z \end{bmatrix} A = \begin{bmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{bmatrix}$$

где А – матрица углов поворотов

7. Из V получим изображение эллипсоида на координатные плоскости.

# Аппроксимация интервальной скорости трехосным эллипсоидом.

## Скорости P волн

№ПВ	Удаление м	Азимут градусы	Угол градусы	Vк м/с	Vпл м/с	Vэл м/с	Погрешность %
0	122	71	4	4266	4258	4274	0.4
1	1410	35	39	5260	4088	4105	0.6
2	1440	80	36	5023	4064	4076	0.3
3	1450	125	34	5028	4168	4106	1.6
4	1500	168	32	4779	4053	4133	1.9
5	1450	215	34	5006	4150	4099	1.1
6	1460	260	40	5283	4047	4056	0.3
7	1500	305	46	5840	4057	4090	0.7
8	1220	335	36	5235	4235	4191	1.1

## Скорости S волн

№ПВ	удаление,	Азимут, °	Vs	Vэл	V(%)
0	122	86.7	2373	2408	1.5
1	1410	37.2	2258	2232	-1.2
2	1440	69.3	2129	2160	1.5
3	1450	133.1	2190	2151	-1.8
4	1500	194.1	2136	2239	4.8
5	1450	206.9	2389	2322	-2.8
6	1460	224.2	2482	2462	-0.8
7	1500	301.9	2503	2518	0.6
8	1220	354.3	2312	2304	-0.3

### Скорости P волн вдоль осей эллипсоида:

3773м/с, 3933м/с, 4295м/с.

Большая ось (4295) – направлена вверх,  
отклонение от вертикали примерно 7 градусов.  
Азимут оси 3933 – -20 градусов.

### Коэффициенты анизотропии:

В направлении юг-север (вдоль оси 3933)

- 0.88;

В направлении запад-восток (вдоль оси 3773)

- 0.91;

### Скорости S волн вдоль осей эллипсоида:

1860 м/с, 2060м/с, 2560 м/с.

Большая ось (2560) – направлена вверх,  
отклонение от вертикали примерно 15 градусов.  
Азимут оси 1860 – -10 градусов.

### Коэффициенты анизотропии:

В направлении юг-север (вдоль оси 1860)

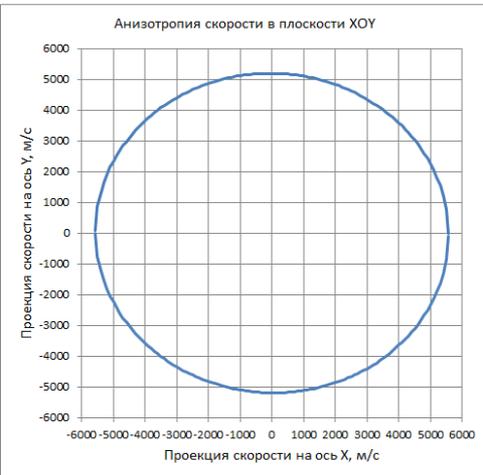
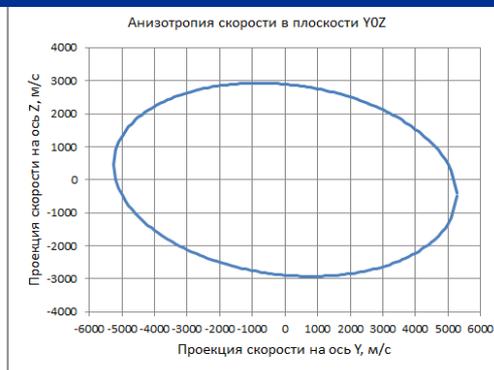
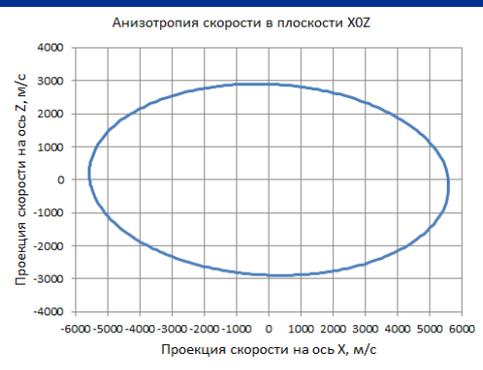
- 0.73;

В направлении запад-восток (вдоль оси 2060)

- 0.80;

# Аппроксимация лучевой скорости $P$ волны трехосным эллипсоидом.

№ПВ	Удаление	Азимут	Угол	$V_l$	$V_{эл}$	Погрешность
	м	градусы	градусы	м/с	м/с	
0	122	71	2	2866	2888	0.8
1	1410	35	25	2989	2980	0.3
2	1440	80	26	3051	3047	0.1
3	1450	125	26	3129	3145	0.5
4	1500	168	27	3242	3237	0.2
5	1450	215	26	3252	3243	0.3
6	1460	260	26	3203	3192	0.3
7	1500	305	27	3078	3097	0.6
8	1220	335	22	2996	2977	0.7



## Скорости вдоль осей эллипсоида:

5586м/с, 5287м/с, 2876 м/с.

Малая ось (2876м/с) – направлена вверх, отклонение от вертикали 7 градусов.

Большая ось направлена на запад, азимут оси 5586 – -92 градуса.

## Коэффициенты азимутальной анизотропии:

В направлении юг-север (вдоль оси 5287)  
- 1.83;

В направлении запад-восток (вдоль оси 5586)  
- 1.94;

## Параметры Томсена для ортотропной среды.

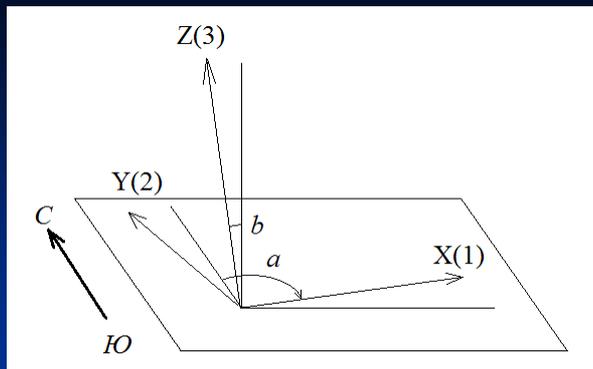


Схема положения осей анизотропии

$a$  – азимут горизонтальной оси  $X(1)$

$b$  – угол отклонения оси  $Z(3)$  от вертикали

Параметры анизотропии  
вычисленные для интервала  
3000-3100м.

Положение осей:

$$a_{X(1)} = 72^{\circ}, \quad b_{Z(3)} = 7^{\circ}$$

$\epsilon_{31}$	-0.114	$\delta_{31}$	-0.114	$\gamma_{32}$	-0.236
$\epsilon_{32}$	-0.081	$\delta_{32}$	-0.081	$\gamma_{32}$	-0.176
$\epsilon_{12}$	0.043	$\delta_{12}$	0.043	$\gamma_{12}$	0.113

Параметры анизотропия при описании  
всей толщи (0-3100м) эффективной  
однородной анизотропной моделью.

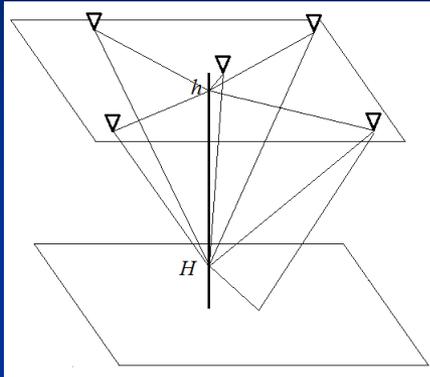
Положение осей:

$$a_{X(1)} = 90^{\circ}, \quad b_{Z(3)} = 7^{\circ}$$

$\epsilon_{31}$	1.386	$\delta_{31}$	1.386
$\epsilon_{32}$	1.190	$\delta_{32}$	1.190
$\epsilon_{12}$	-0.052	$\delta_{12}$	-0.052

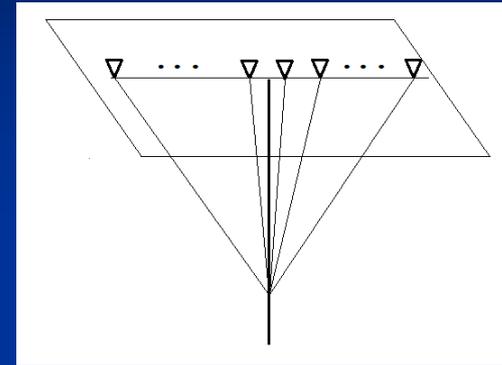
## Особенности расчета параметров анизотропии при скважинных наблюдениях НВСП и МОГ(СОГ, Walkaway)

Схема НВСП



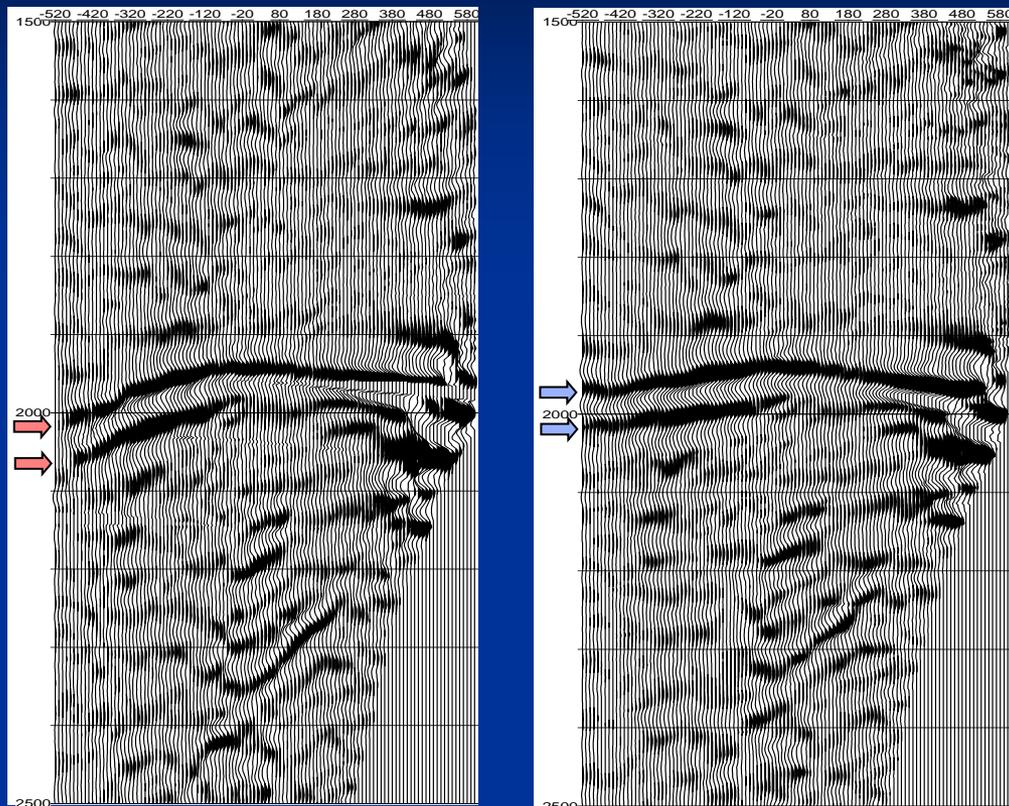
1. Наблюдения проводят из нескольких ПВ по всему стволу скважины.
2. Измеряют времена вступлений регулярных волн, направление их подхода и поляризацию.
3. Вычисляют положение осей и параметры анизотропии на основе особенностей подхода волн разных типов.

Схема МОГ(СОГ, Walkaway)



1. Наблюдения проводят при положении скважинного зонда на одной глубине из ПВ расположенных вдоль профиля.
2. Измеряют времена вступлений прямой волны.
3. Вычисляют параметры Томсена для эффективной VTI среды по годографу вступлений.

## Особенности использования параметров анизотропии при получении глубинных разрезов НВСП

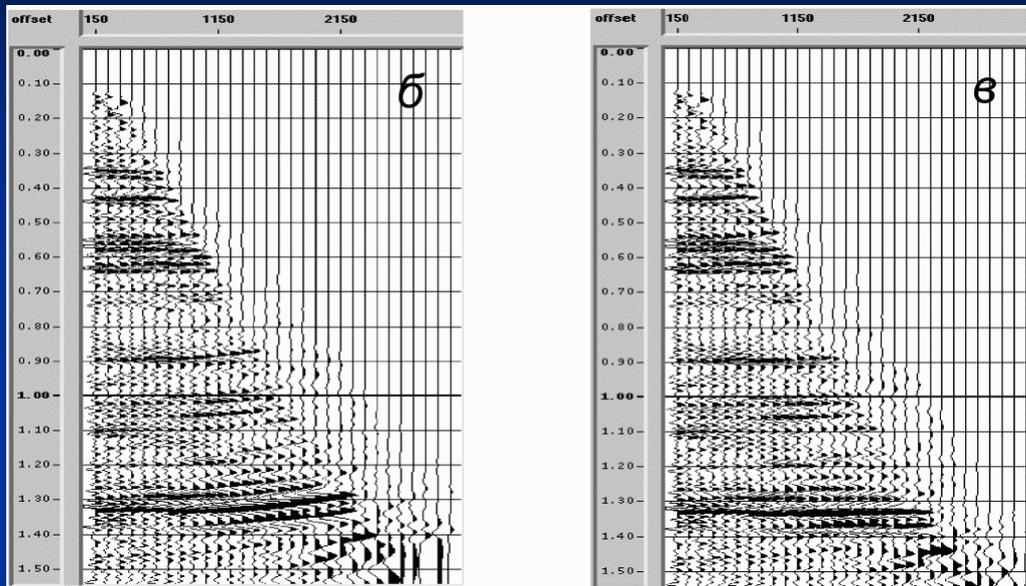


Глубинные разрезы НВСП  
Слева - миграция без учета анизотропии.

Справа - миграция с учетом анизотропии.

Внизу – фрагмент сеточной модели среды (программа *Meikon2D*) учитывающей анизотропию скоростей. Эллипсоидами показана зависимость скорости от направления в узлах сетки.

## Особенности вычисления параметров анизотропии используемых при вводе кинематической поправки при обработке данных МОГТ



б – изотропная NMO коррекция: оси синфазности переспрямлены, в – анизотропная коррекция: оси синфазности горизонтальны.

Пример из книги:  
Ю.Н. Воскресенский. «Построение сейсмических изображений».  
Москва, 2006.

1. По наблюдениям в скважине могут быть вычислены как пластовые, так и интегральные параметры анизотропии.
2. При вычислении параметров анизотропии для их использования при обработке данных МОГТ необходимо выяснить по какой формуле (алгоритму) вводятся эти параметры. Поскольку варианты могут быть разные (Кузнецов В.М., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. Тверь, ООО «Издательство ГЕРС», 2006.).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ.