

Модели реальных сред в технологиях вертикального сейсмического профилирования



Г.А. Шехтман¹ , И.О. Баюк²



¹ ООО «Геофизические системы данных»

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

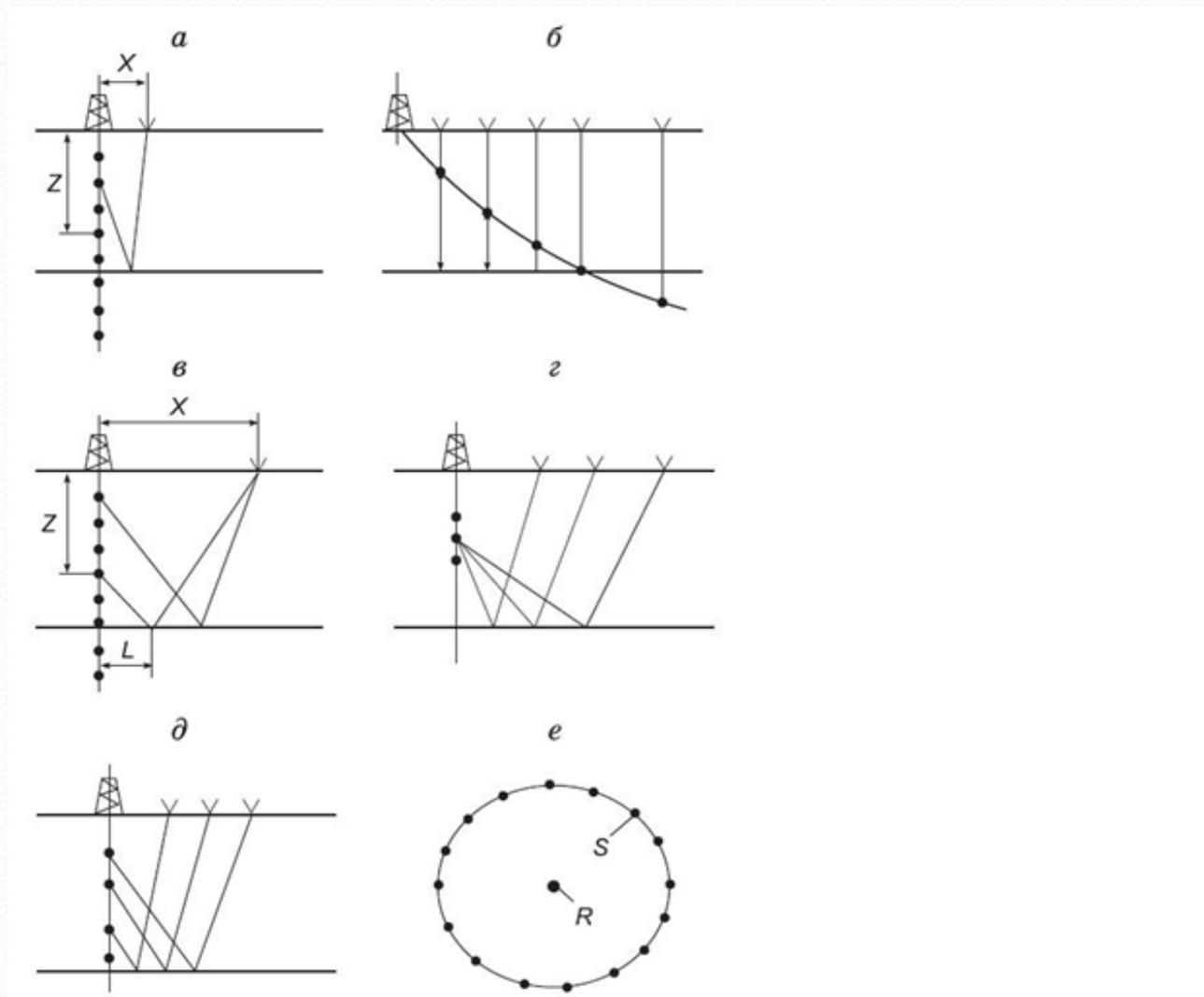
План презентации

- Модели сред при решении задач метода ВСП, направленных на повышение эффективности наземной сейсморазведки (выбор условий возбуждения, изучение условий выделения полезных волн, стратиграфическая привязка отражений, определение сейсмических скоростей, неупругого поглощения и др.)
- Модели сред при изучении околоскважинного пространства (геометрия системы наблюдений, геометрия сейсмических границ, выбор оптимальной модификации метода)
- Модели сред при решении технологических задач (прогноз разреза ниже забоя скважины, определение простирания трещин и др.)

План презентации

- Модели сред при решении задач метода ВСП, направленных на повышение эффективности наземной сейсморазведки (выбор условий возбуждения, изучение условий выделения полезных волн, стратиграфическая привязка отражений, определение сейсмических скоростей, неупругого поглощения и др.)
- Модели сред при изучении околоскважинного пространства (геометрия системы наблюдений, геометрия сейсмических границ, выбор оптимальной модификации метода)
- Модели сред при решении технологических задач (прогноз разреза ниже забоя скважины, определение простирания трещин и др.)

МОДИФИКАЦІЇ МЕТОДА ВСП





Выбор условий возбуждения колебаний

Волна-спутник, отраженная от акустически наиболее резкой границы, в наибольшей степени влияет на форму суммарного сигнала и его спектр. Сильное влияние самой верхней части разреза и глубины источника на прямую волну можно использовать для управления спектральным составом возбуждаемых колебаний.

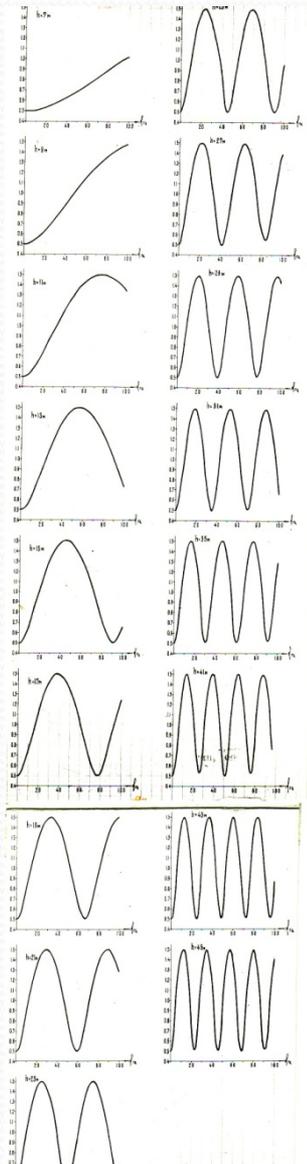
В случае простого строения ЗМС частотная характеристика $H(f)$ интерференционной системы (прямая волна плюс спутник) имеет вид :

$$|H(f)| = \sqrt{1 + K^2 - 2K \cos(2\pi f\tau)}$$

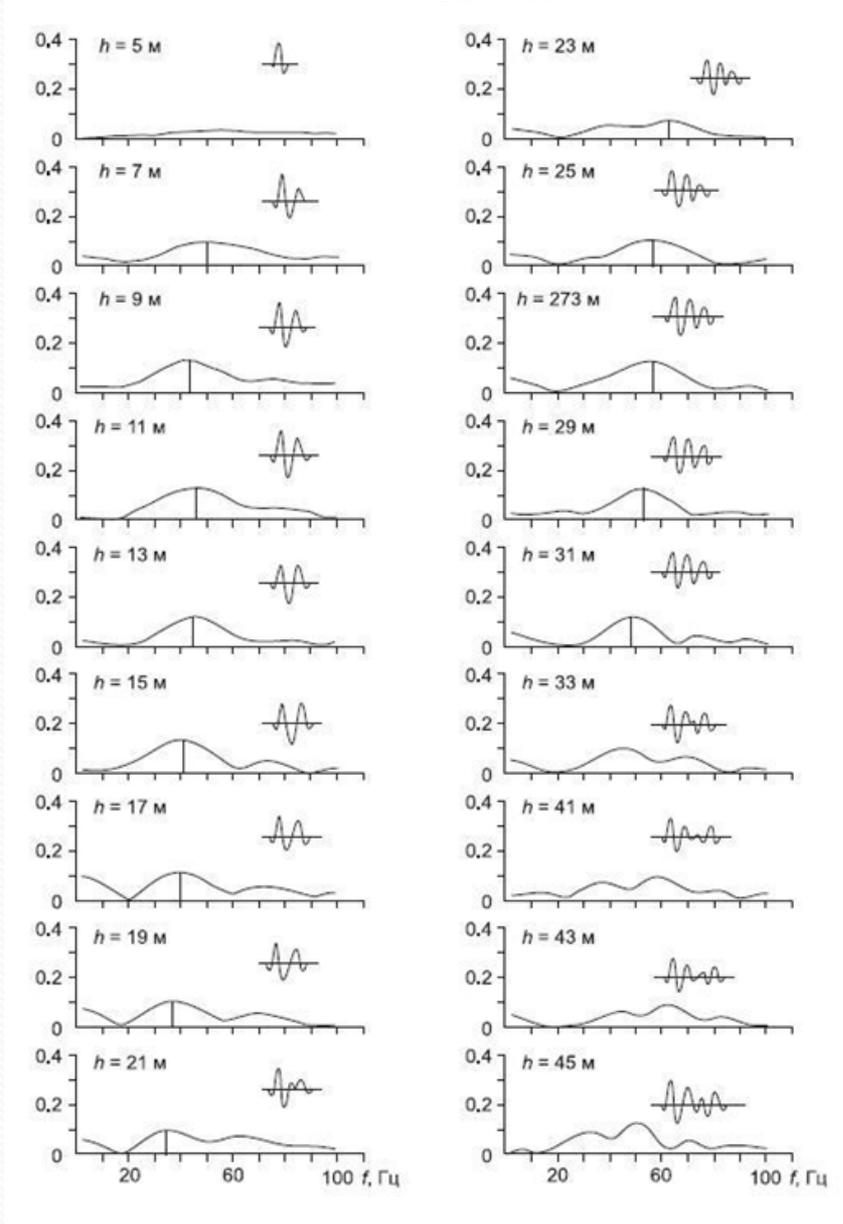
где $\tau = 2h/V$; h – глубина источника под акустически наиболее резкой границей; V – скорость в среде, в которой расположен источник колебаний; K – коэффициент отражения.

Первый максимум $H(f)$ соответствует $f_{max} = V/4h$. Для частот $f < f_{max}$ частотная характеристика $H(f)$ напоминает фильтр высоких частот, воздействие которого на спектр импульса прямой волны приводит к обогащению его высокими частотами.

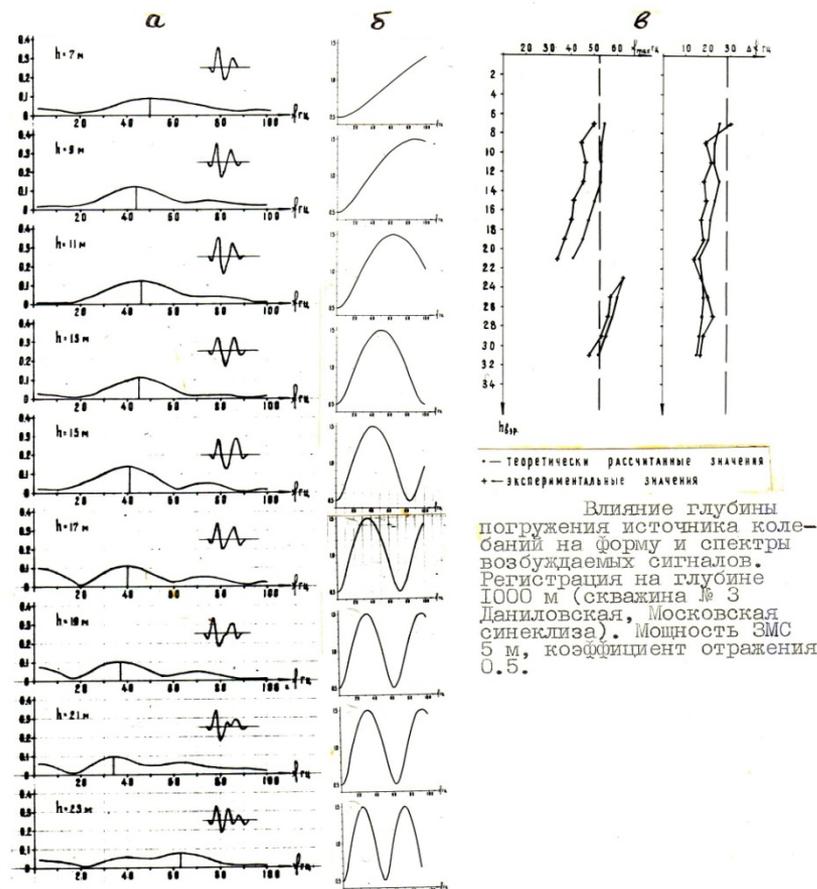
Частотные характеристики суммирования прямой волны с волной-спутником для разной глубины источника



Амплитудные спектры импульсов (прямая волна + спутник) при разной глубине взрыва



Форма, спектры и частотные характеристики для суммирования прямой волны и ВОЛНЫ-СПУТНИКА



— теоретически рассчитанные значения
 + — экспериментальные значения

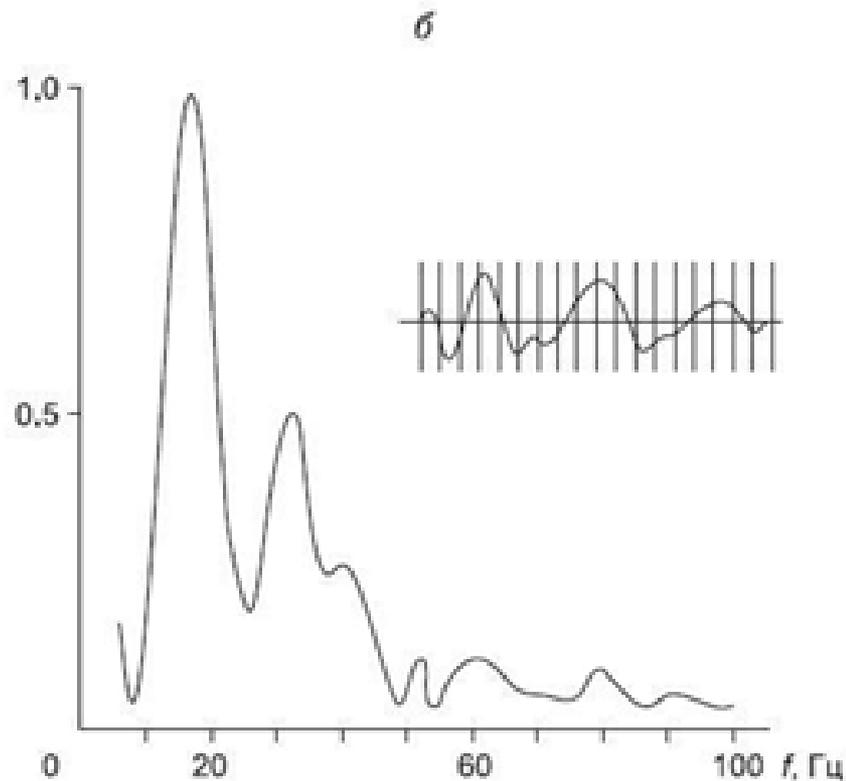
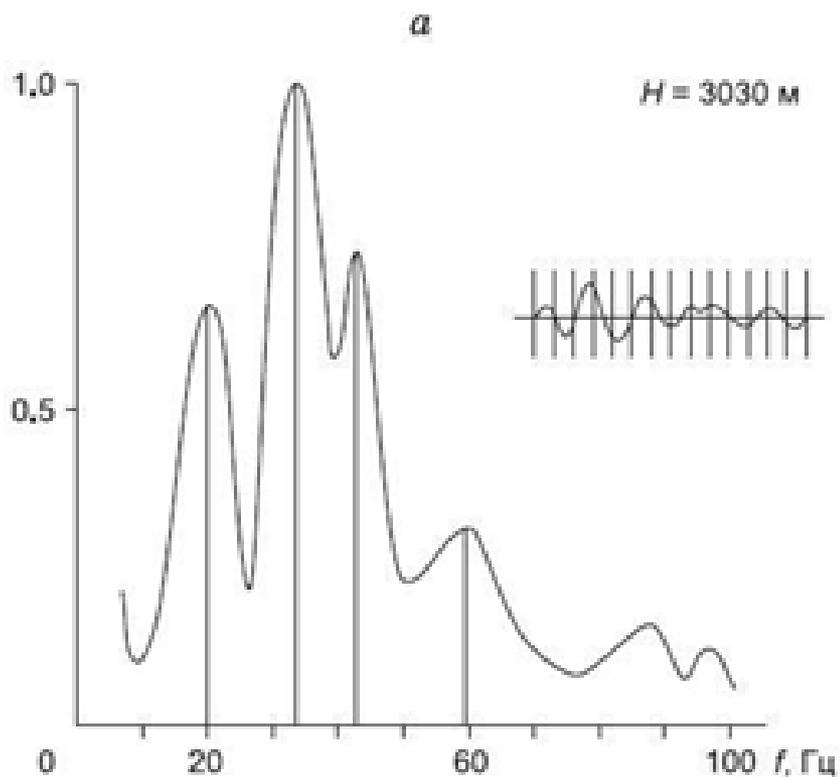
Влияние глубины погружения источника колебаний на форму и спектры возмущаемых сигналов. Регистрация на глубине 1000 м (скважина № 3 Даниловская, Московская синеклиза). Мощность ЗМС 5 м, коэффициент отражения 0.5.

а — форма и спектры суммарного импульса при различной глубине взрыва (заряд 0.4кг);

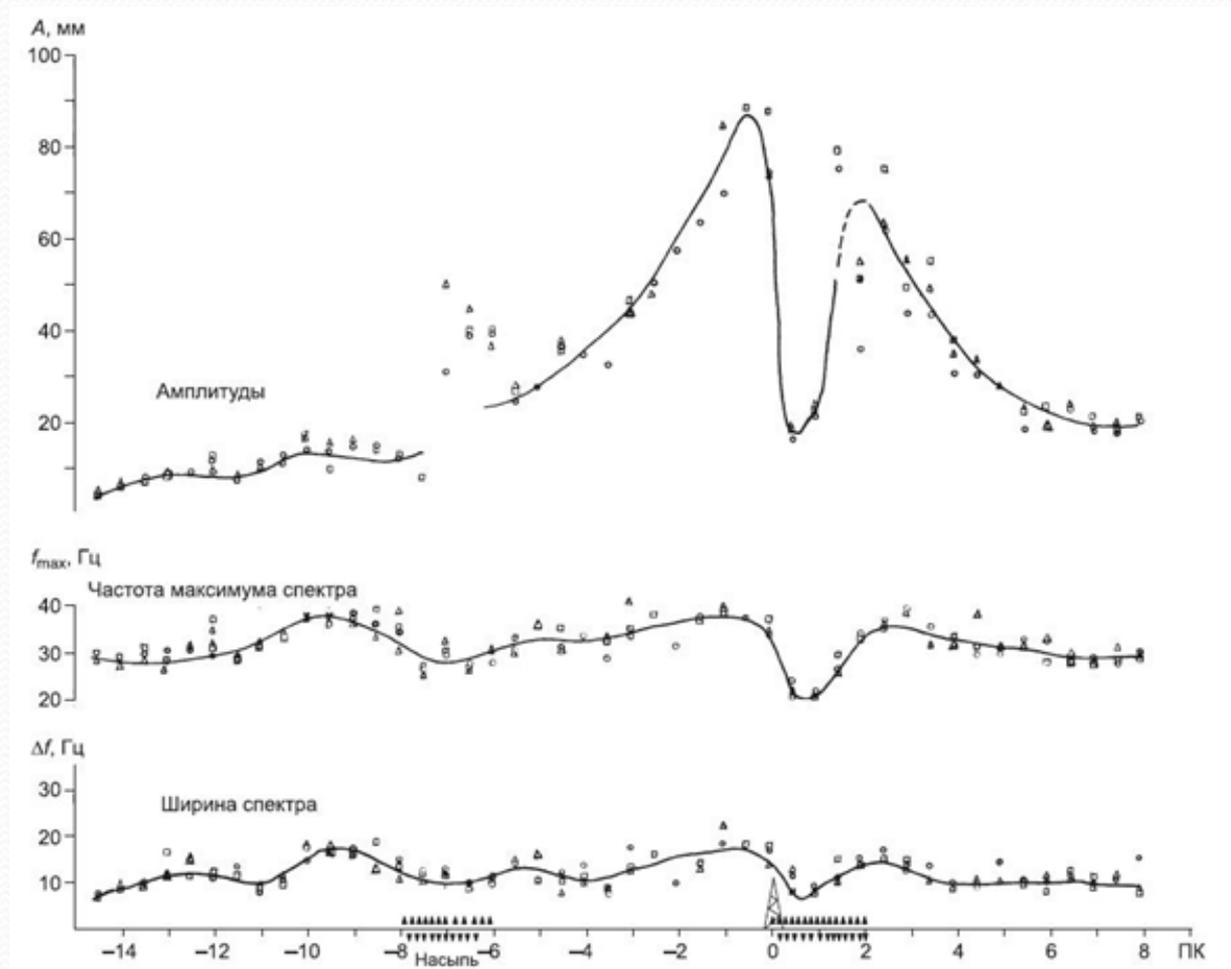
б — частотные характеристики суммирования прямой волны и волны-спутника при различной глубине взрыва;

в — параметры спектра суммарного импульса при различной глубине взрыва.

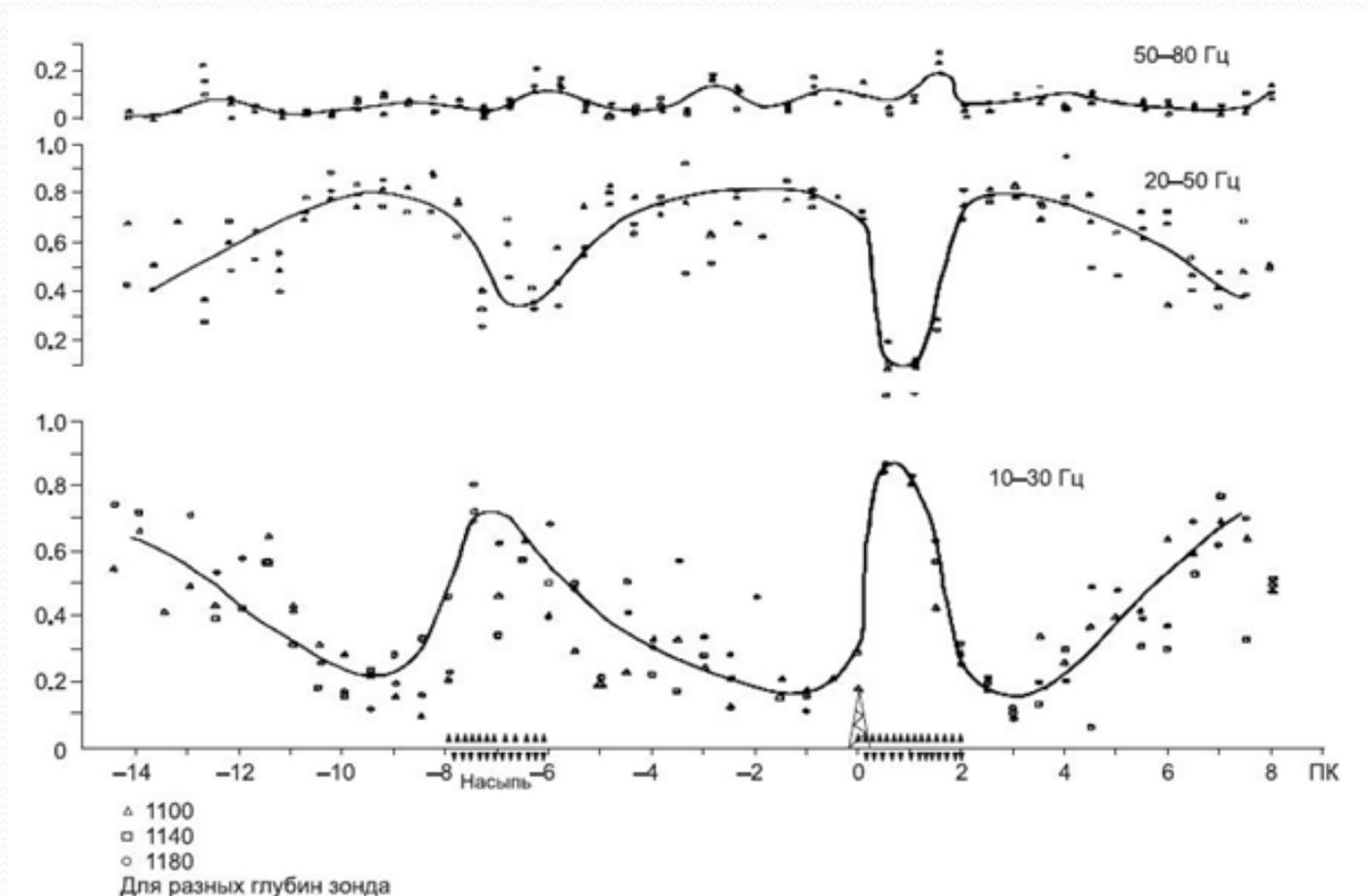
Форма и спектры импульсов, возбуждаемых при взрывах в мелких скважинах. Вынос ПВ 200 м, глубина приема 3030 м, взрывы зарядов тротила весом 0.4 кг на глубине 16 м (Белоруссия); а – при взрывах из вновь пробуренной скважины, б – после многократных взрывов в одной и той же скважине.



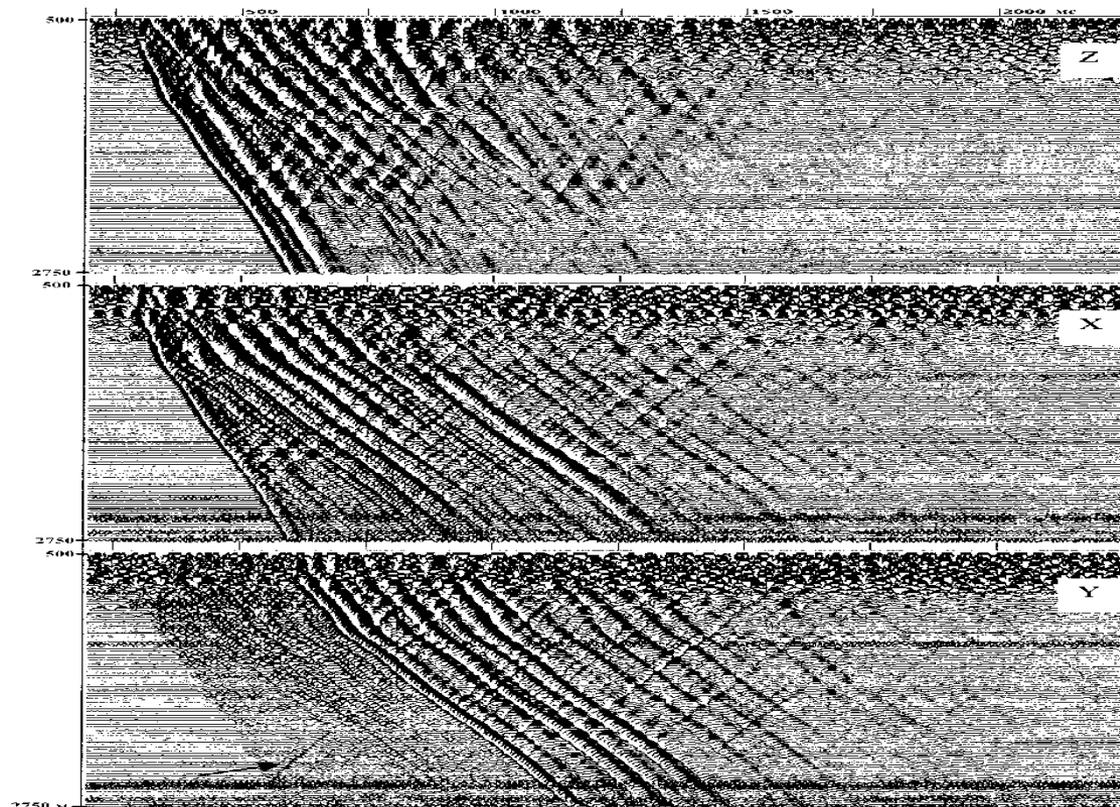
Амплитуды (сверху) и параметры спектра импульса прямой волны с различных ПВ. Источник – ГСК-10, глубина приема 1100-1200 м (Белоруссия). Справа от скважины показана насыпная дорога через болото. Болотистый участок характеризуется аномальным уменьшением амплитуды и частоты максимума спектра.



Относительная интенсивность (снизу вверх) низко-, средне- и высокочастотных частей спектра импульсов прямой волны с различных ПВ. Источник – ГСК-10, глубина приёма 1100-1200 м (Белоруссия).



Волновые поля, полученные при ВСП от ненаправленного источника. Уверенное прослеживание SH -волн на u -компоненте предположительно вызвано проявлением гиротропии.

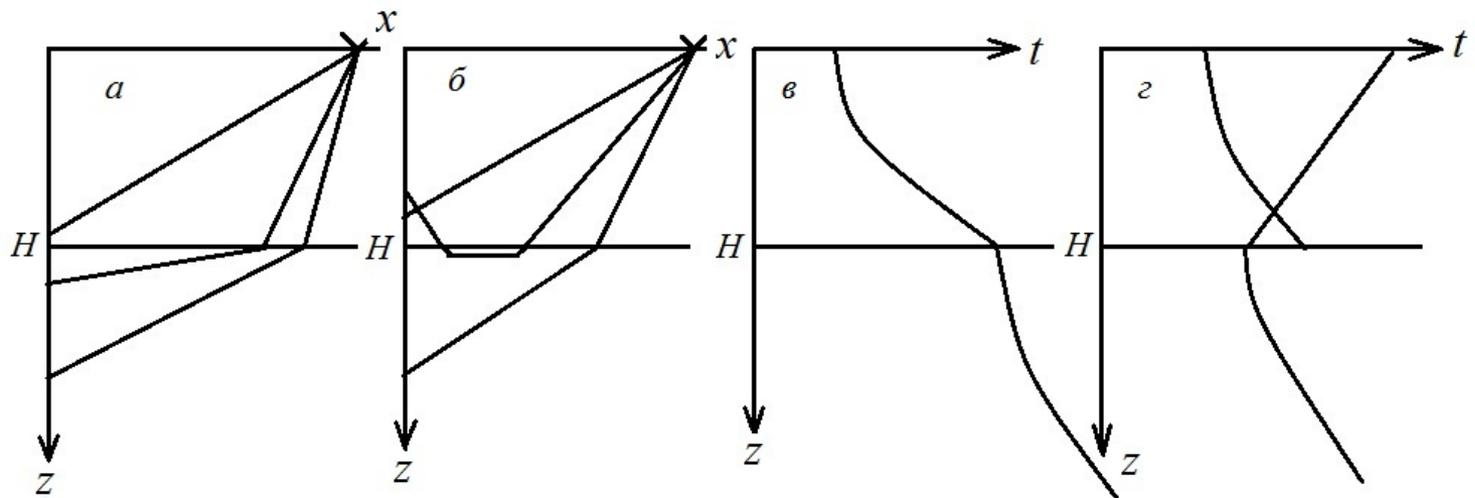




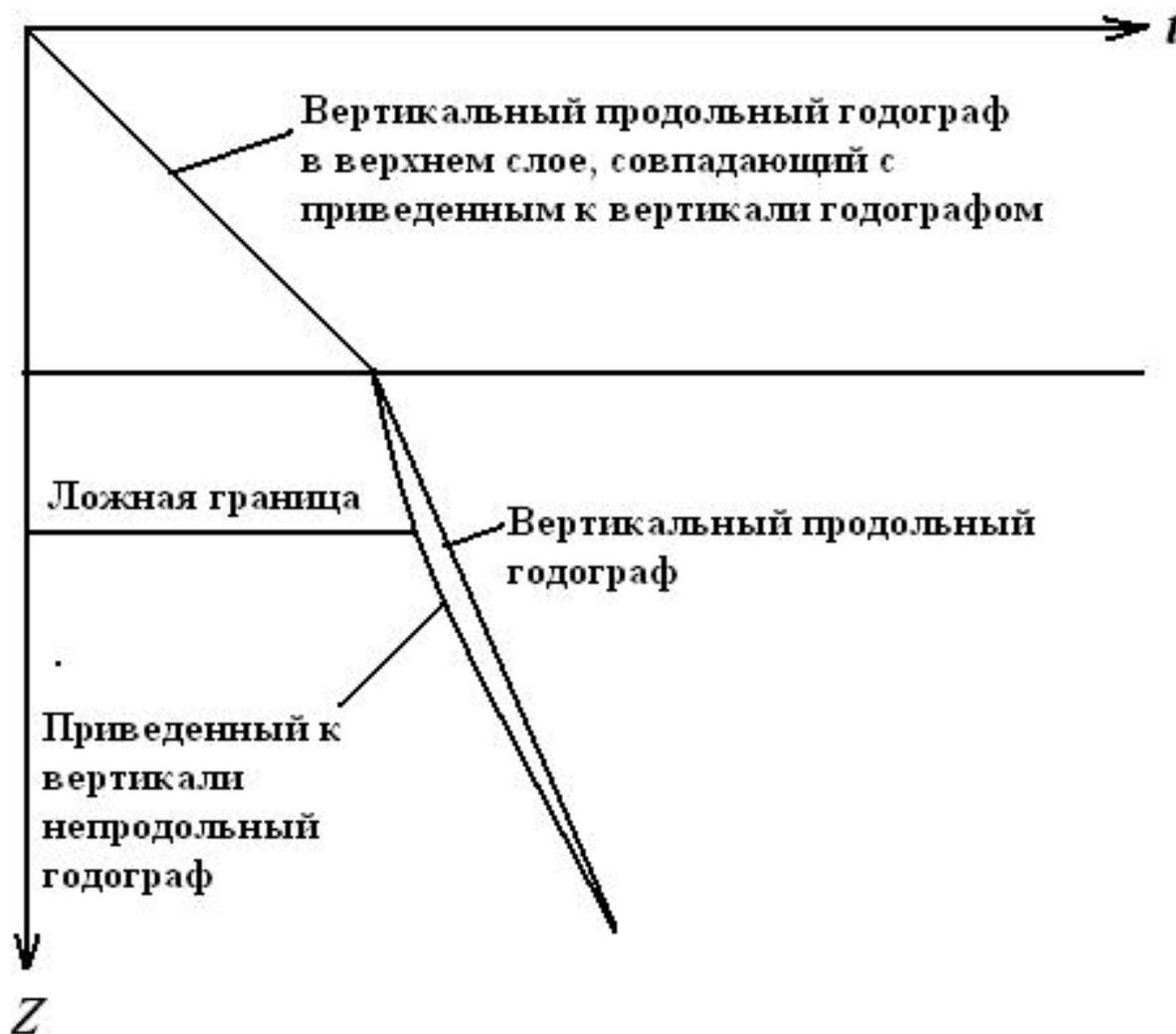
МОДЕЛИ СРЕД ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ

ЛУЧЕВЫЕ СХЕМЫ И ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГОДОГРАФЫ ДЛЯ ДВУСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ

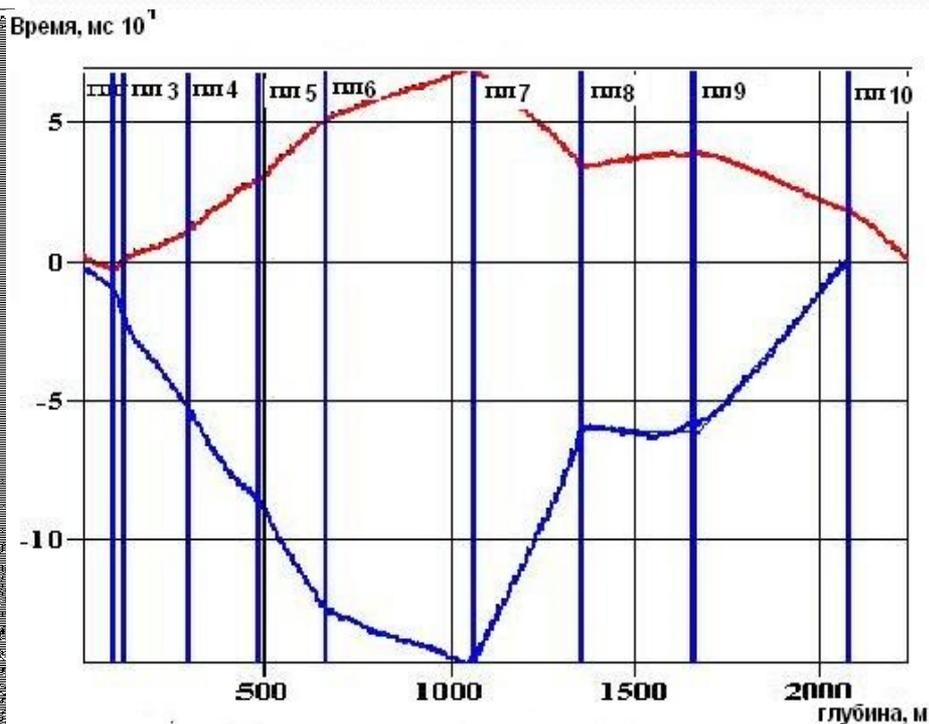
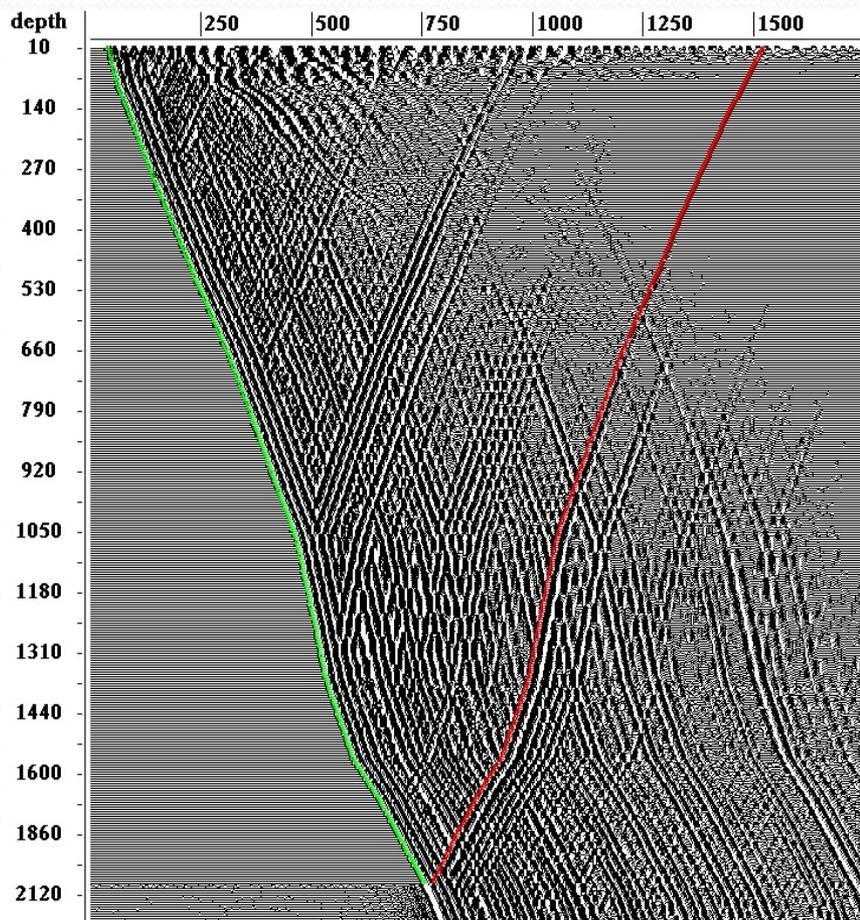
a и b – лучевые схемы проходящей волны для докритического и закритического выноса, соответственно; v и z – вертикальные годографы проходящей волны для докритического и закритического выноса, соответственно



Качественная иллюстрация эффекта формирования ложной границы, образующейся под кровлей высокоскоростного слоя при приведении к вертикали непродольного вертикального годографа.

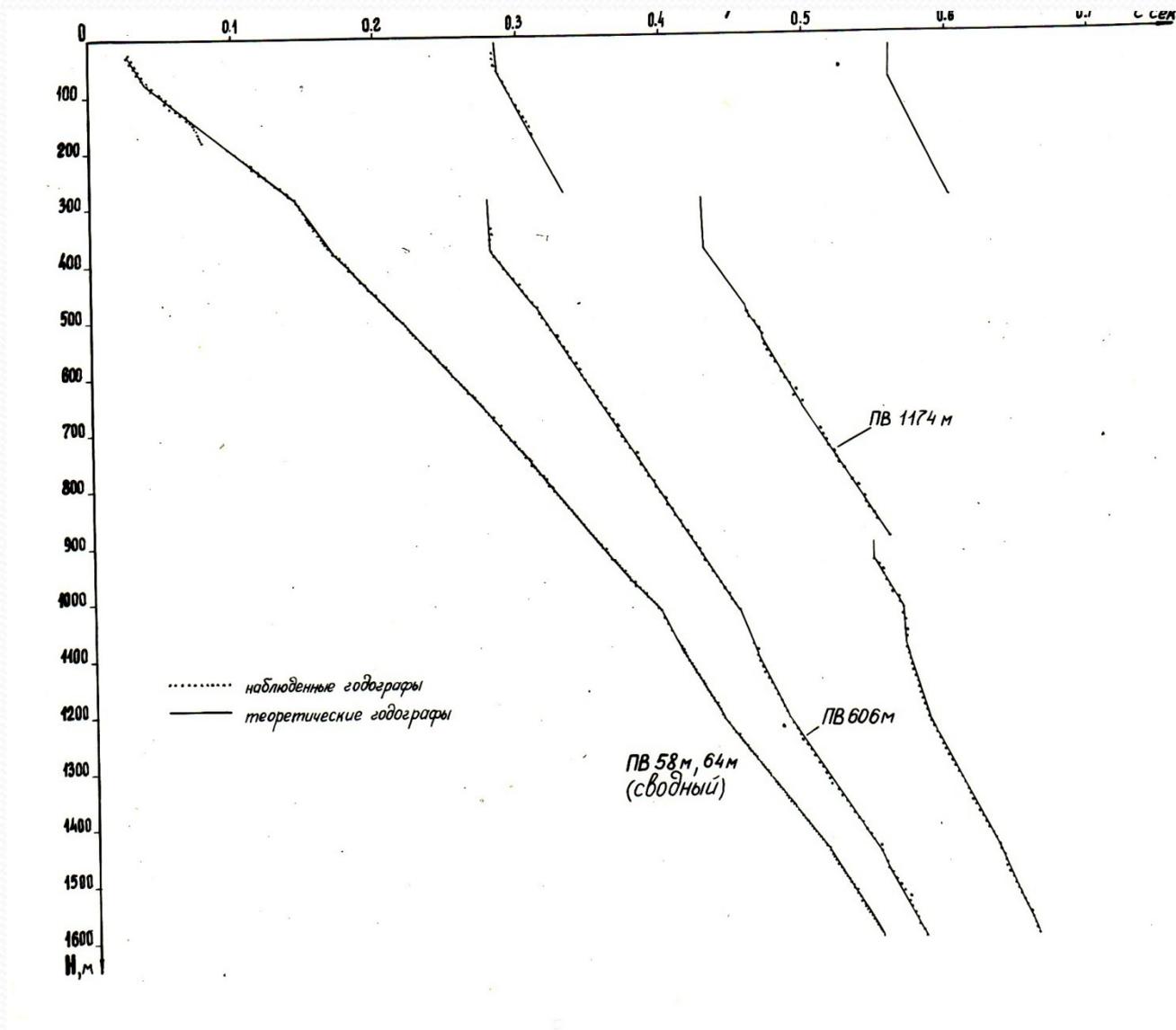


Использование редуцированных вертикальных годографов – путь к повышению точности при выделении пластов

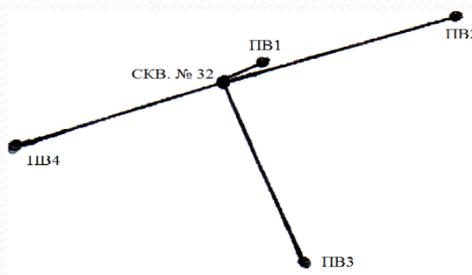


- редуцированный годограф проходящей P-волны
- редуцированный разностный годограф проходящей и отражённой P-волны

Сопоставление наблюдаемых и теоретических годографов, полученных в результате решения обратной кинематической задачи. Прибалтика.

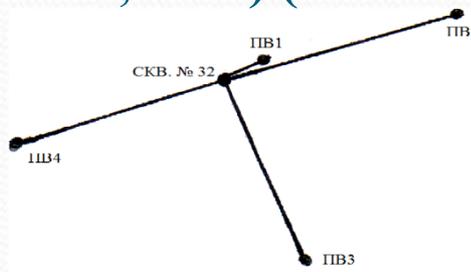


Пример абсурдного результата при определении скоростей по одиночным вертикальным непродольным годографам без учета геометрии границ (Казахстан) [Шехтман, 2011]



Номер пласта	Глубина подошвы, м	Пластовые скорости, м/с			
		ПВ1	ПВ2	ПВ3	ПВ4
3	900	2360±12	2340±8	2350±13	2320±8
4	1700	3120±20	3100±22	3070±22	4700±35
5	2200	3900±46	3510±44	3730±46	7800±160
6	Ниже забоя	4510±18	4276±17	4400±23	5210±70

Результаты определения пластовых скоростей и геометрии границ путем кинематической инверсии вертикальных годографов с различных ПВ (верхняя таблица – ПВ1, ПВ2 и ПВ3, нижняя таблица – ПВ1, ПВ3, ПВ4) (Казахстан)

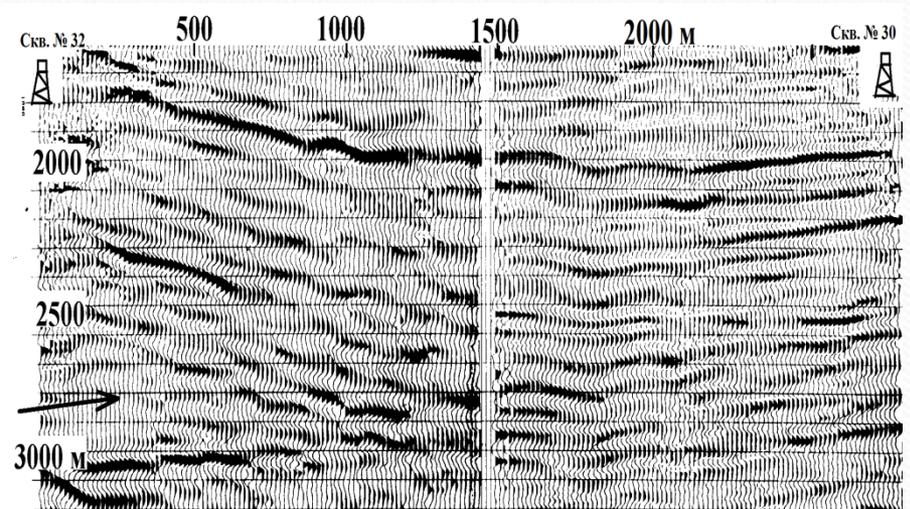
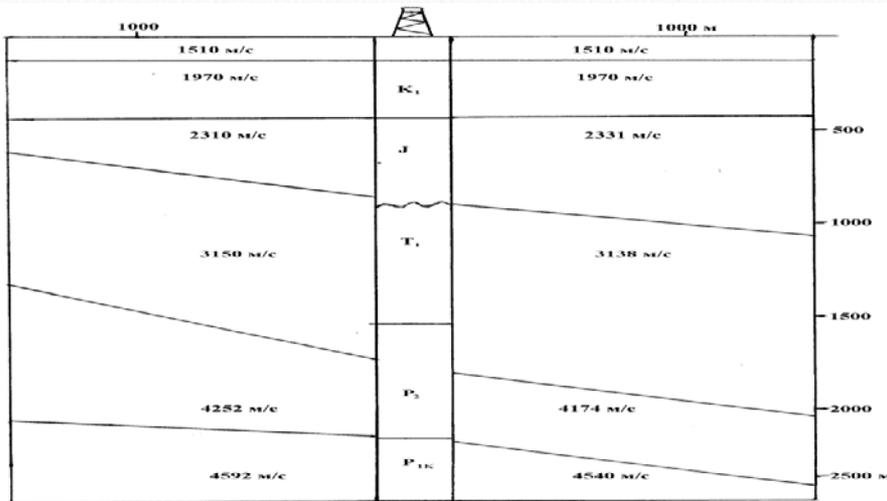


Номер пласта	Глубина подошвы, м	Угол падения, град	Азимут падения, град	Пластовая скорость, м/с
3	886±7	10±1	112±4	2331±9
4	1634±11	16±1	94±7	3138±22
5	2124±17	13±1	98±6	4174±38
6	-	-	-	4540±16

Номер пласта	Глубина подошвы, м	Угол падения, град	Азимут падения, град	Пластовая скорость, м/с
3	865±9	16±1	108±8	2310±6
4	1528±18	26±3	95±10	3150±23
5	2172±22	5±1	95±8	4252±63
6	-	-	-	4592±45

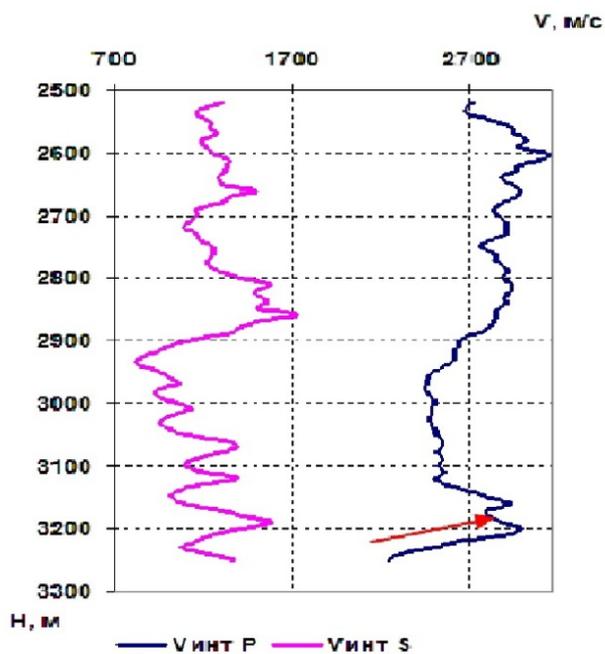
Глубинный разрез, полученный путем кинематической инверсии данных
НВСП с различных ПВ (слева) и миграции записей ВСП-ПИ (справа)
(Казахстан)

*(определение пространственного положения границ одновременно с
пластовыми скоростями при решении обратной задачи позволило
получить более достоверные результаты)*

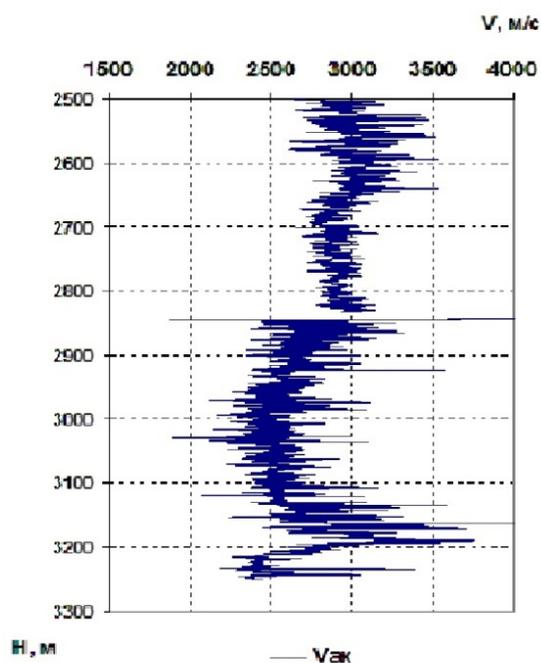


Определение интервальных скоростей – путь к формированию тонкослоистой модели (Краснодарский край)

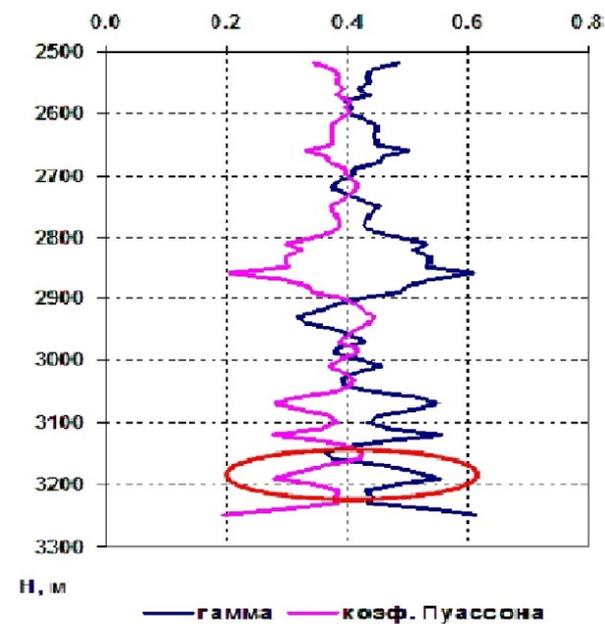
Интервальные скорости P и S волн



Скорость V_p по АК



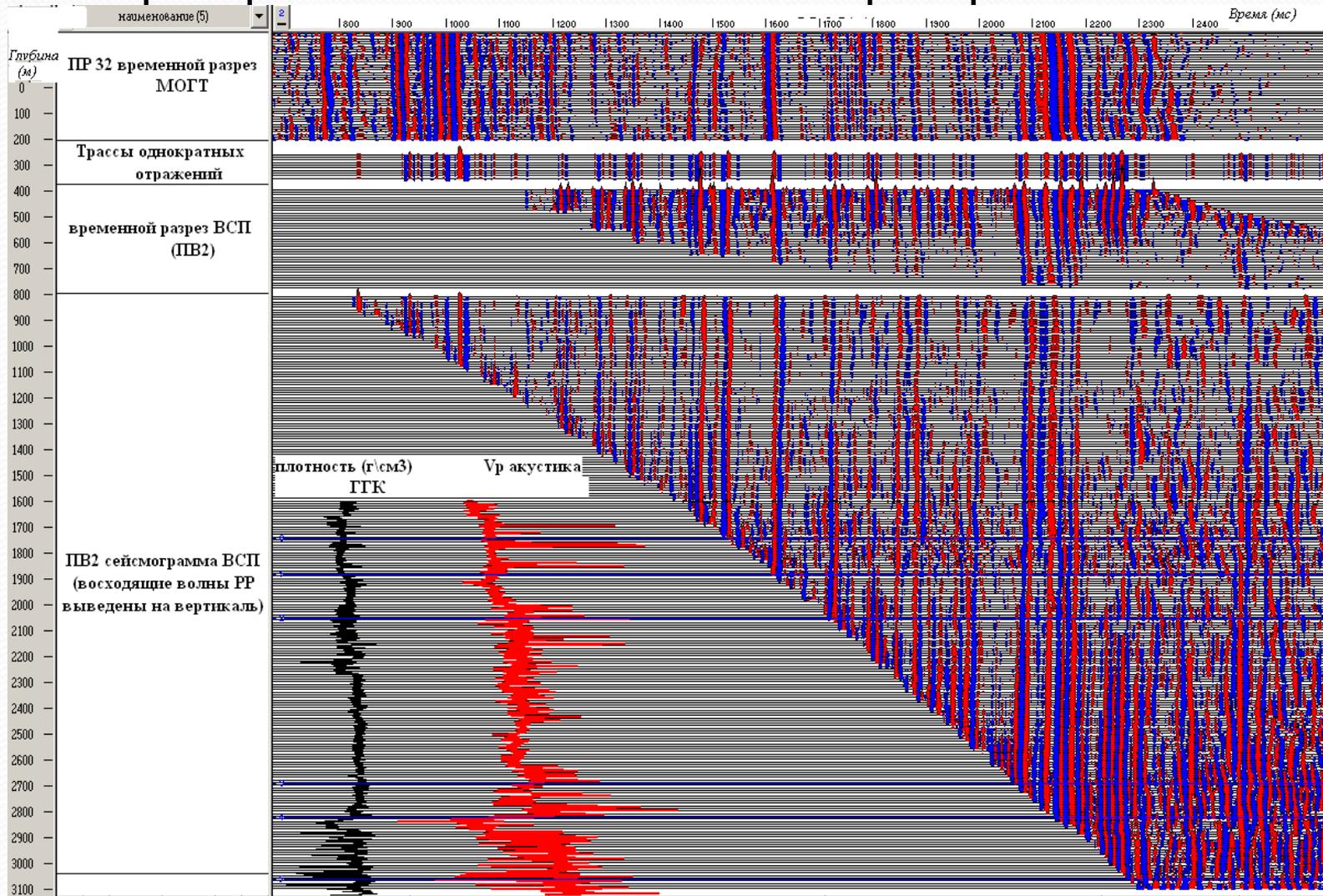
Графики V_s/V_p и коэф. Пуассона



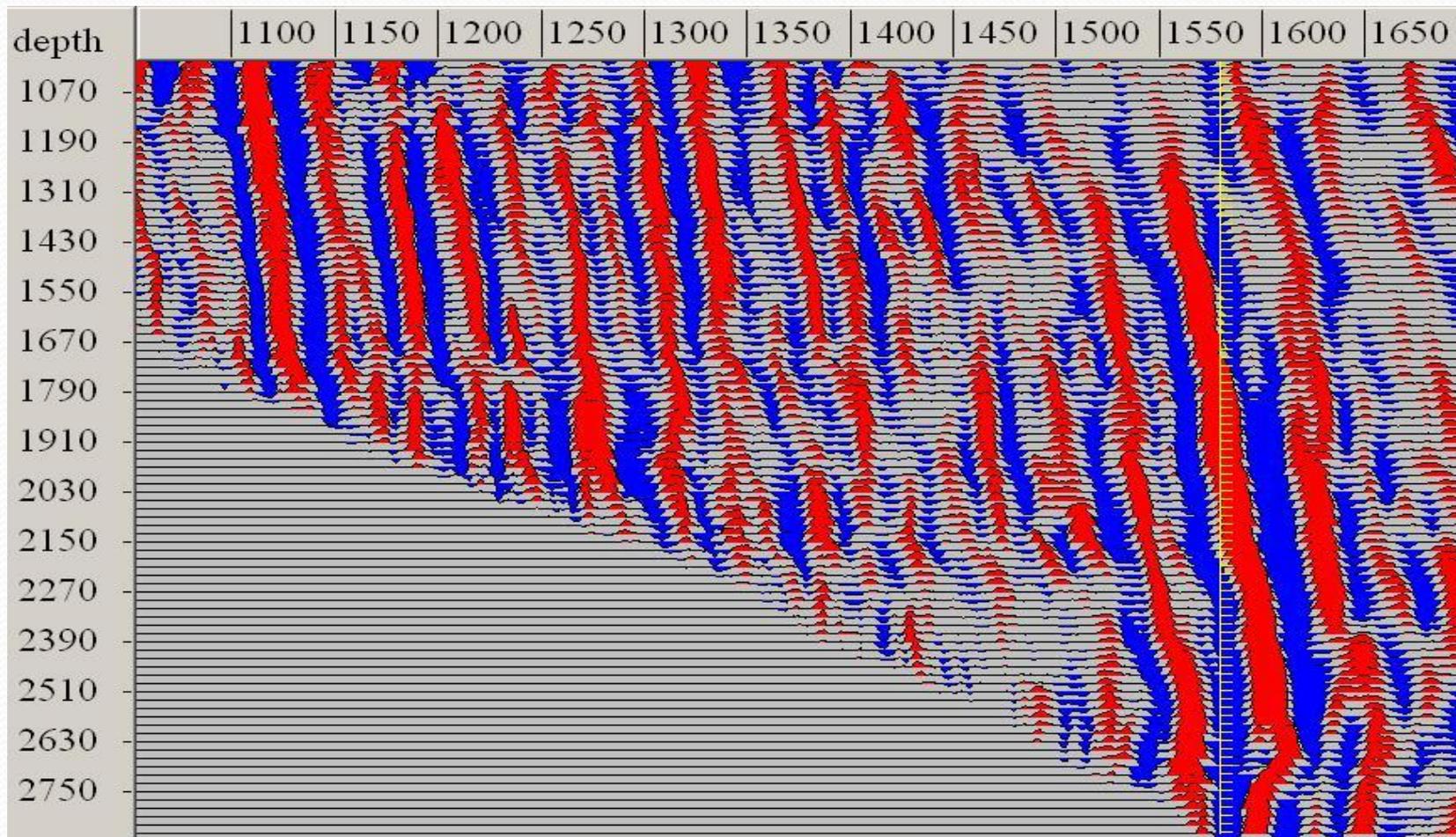


**СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ПРИВЯЗКА ОТРАЖЕНИЙ В
ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТЫХ И СЛОЖНО ПОСТРОЕННЫХ СРЕДАХ**

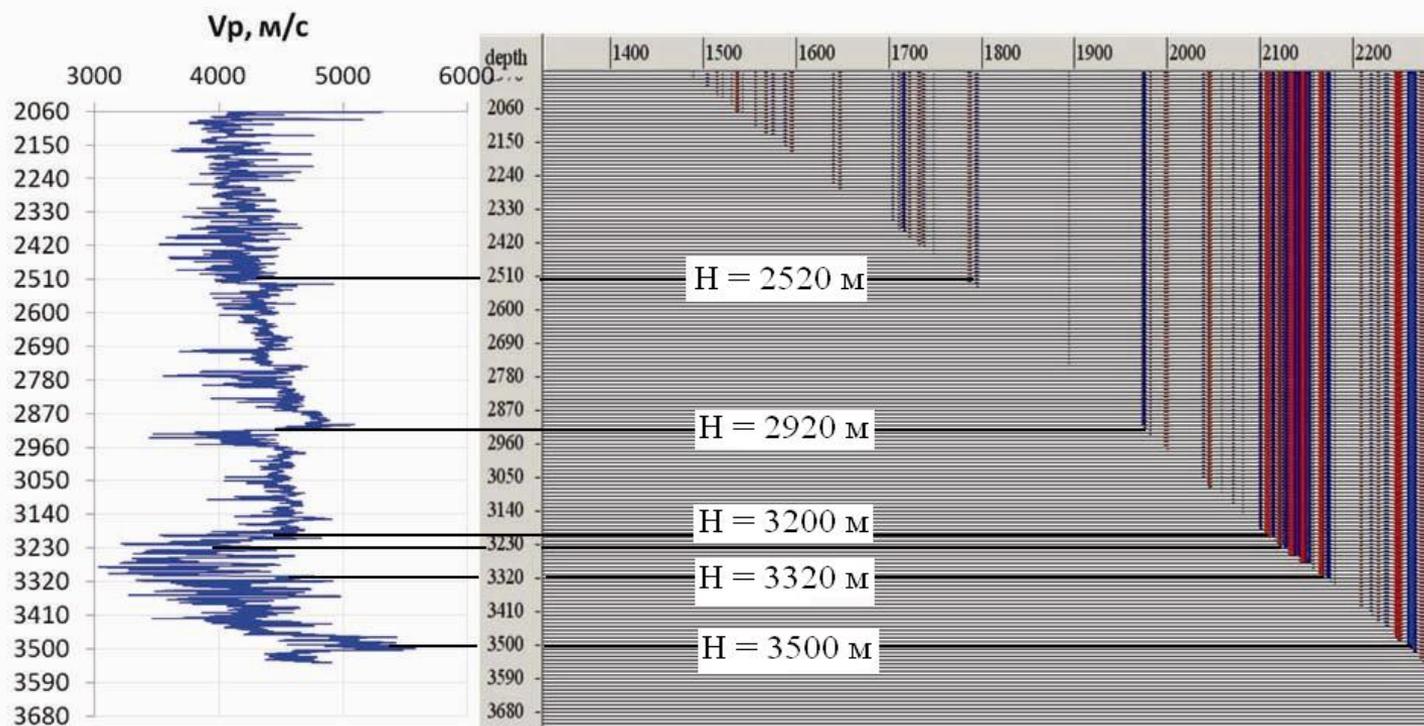
Увязка реперов ГИС с сейсмическими реперами ВСП и МОГТ



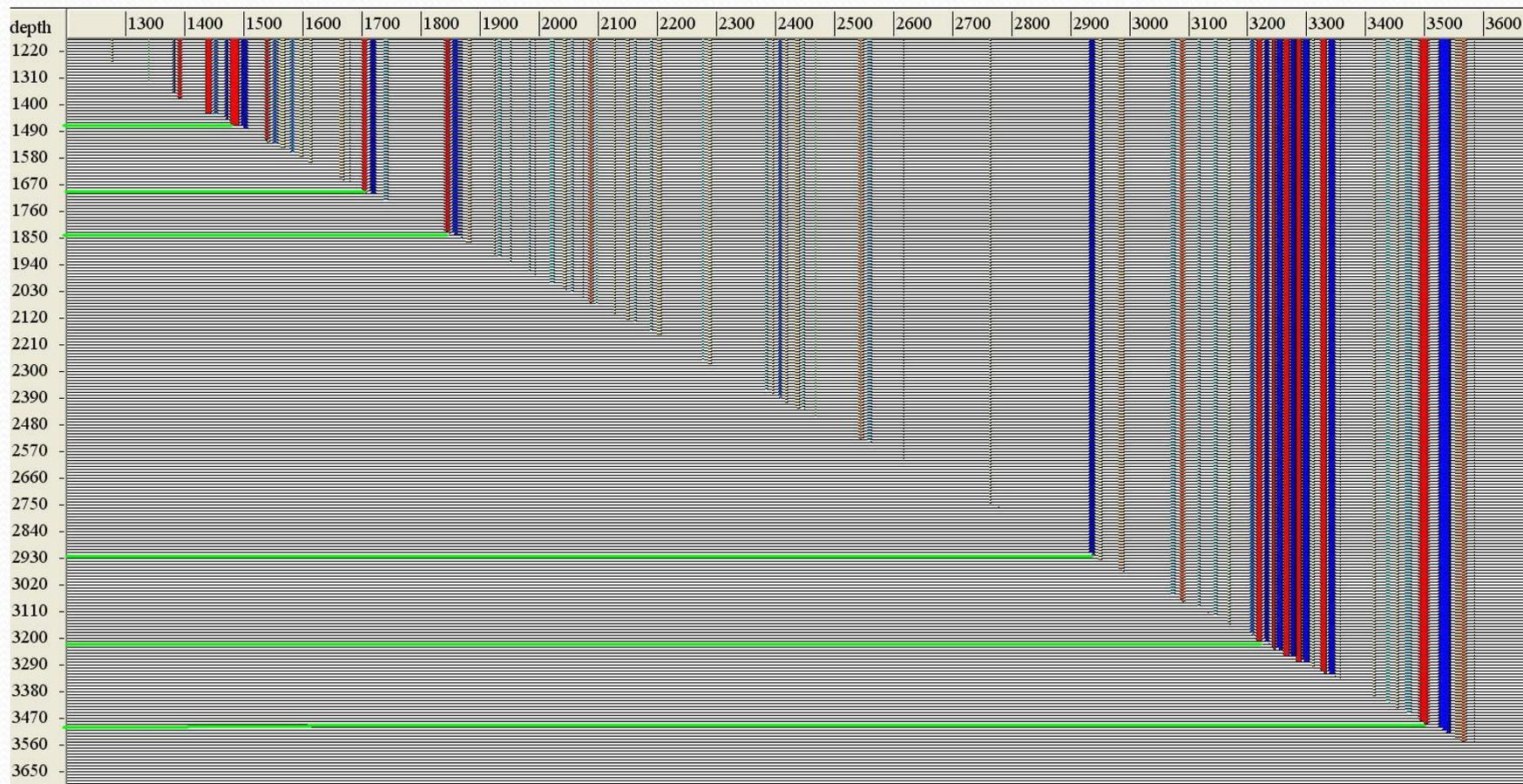
Глубинная привязка отражений в условиях наклонных границ



Увязка реперов ГИС с сейсмическими реперами ВСП и МОГТ



Монтаж трасс однократных отражений в виде сейсмограммы ВСП с глубинными масштабами по двум осям

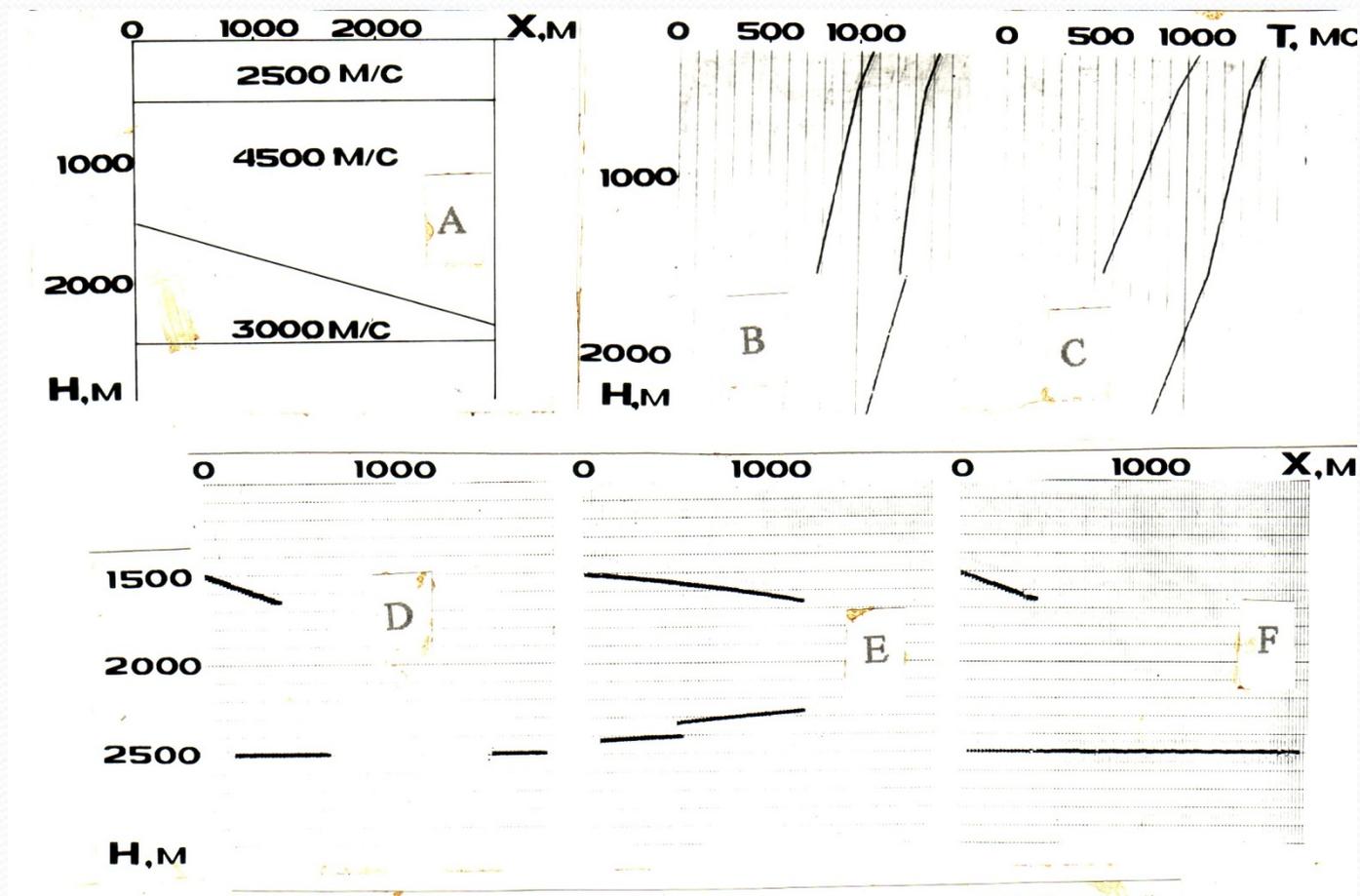


План презентации

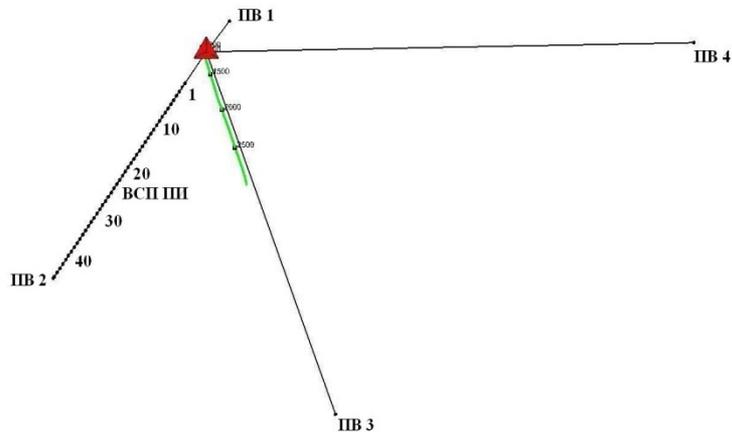
- Модели сред при решении задач метода ВСП, направленных на повышение эффективности наземной сейсморазведки (выбор условий возбуждения, изучение условий выделения полезных волн, стратиграфическая привязка отражений, определение сейсмических скоростей, неупругого поглощения и др.)
- Модели сред при изучении околоскважинного пространства (геометрия системы наблюдений, геометрия сейсмических границ, выбор оптимальной модификации метода)
- Модели сред при решении технологических задач (прогноз разреза ниже забоя скважины, определение простирания трещин и др.)

Влияние учета преломления лучей при лучевой миграции:

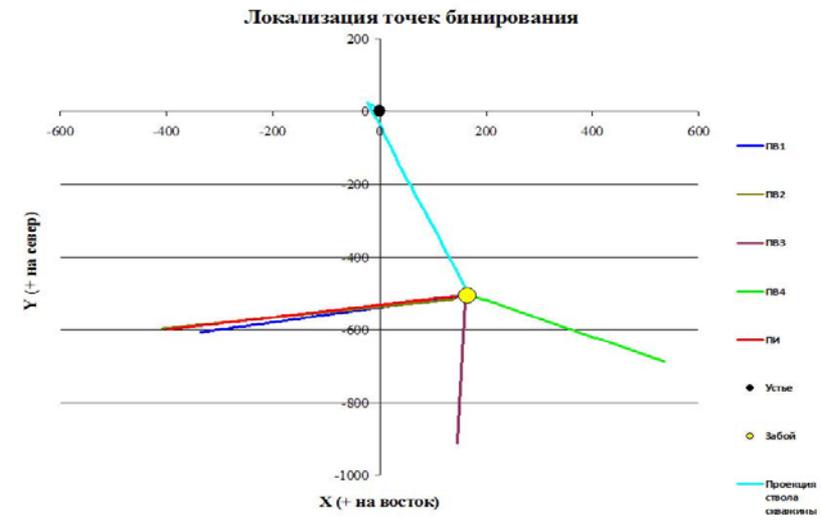
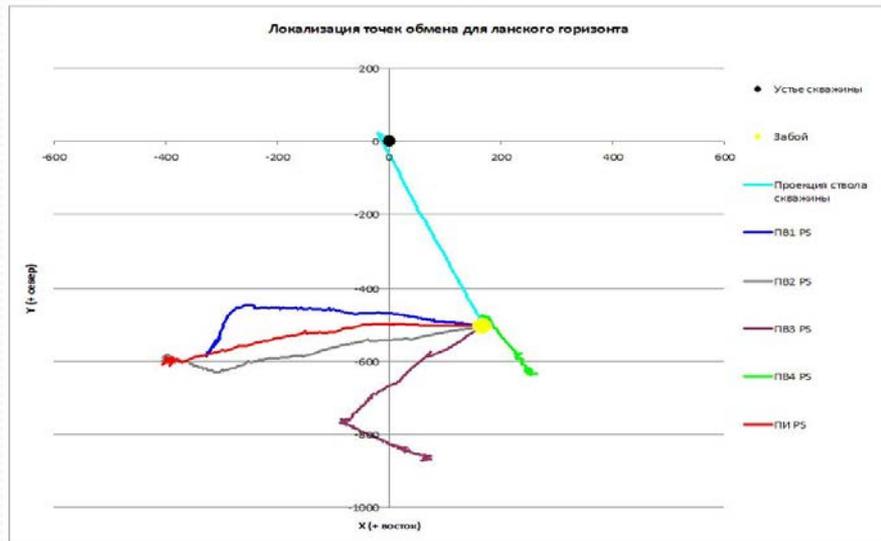
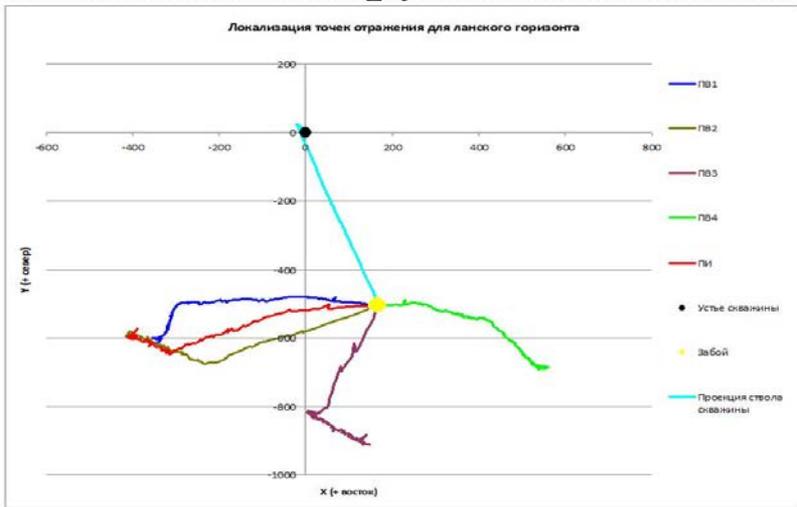
А – модель; В и С – вертикальные годографы отраженных волн при НВСП и ВСП-ПИ, соответственно; D, E, F – глубинные разрезы для НВСП (D) с использованием точной модели, E – то же в предположении горизонтально-слоистой модели, F – глубинный разрез ВСП-ПИ



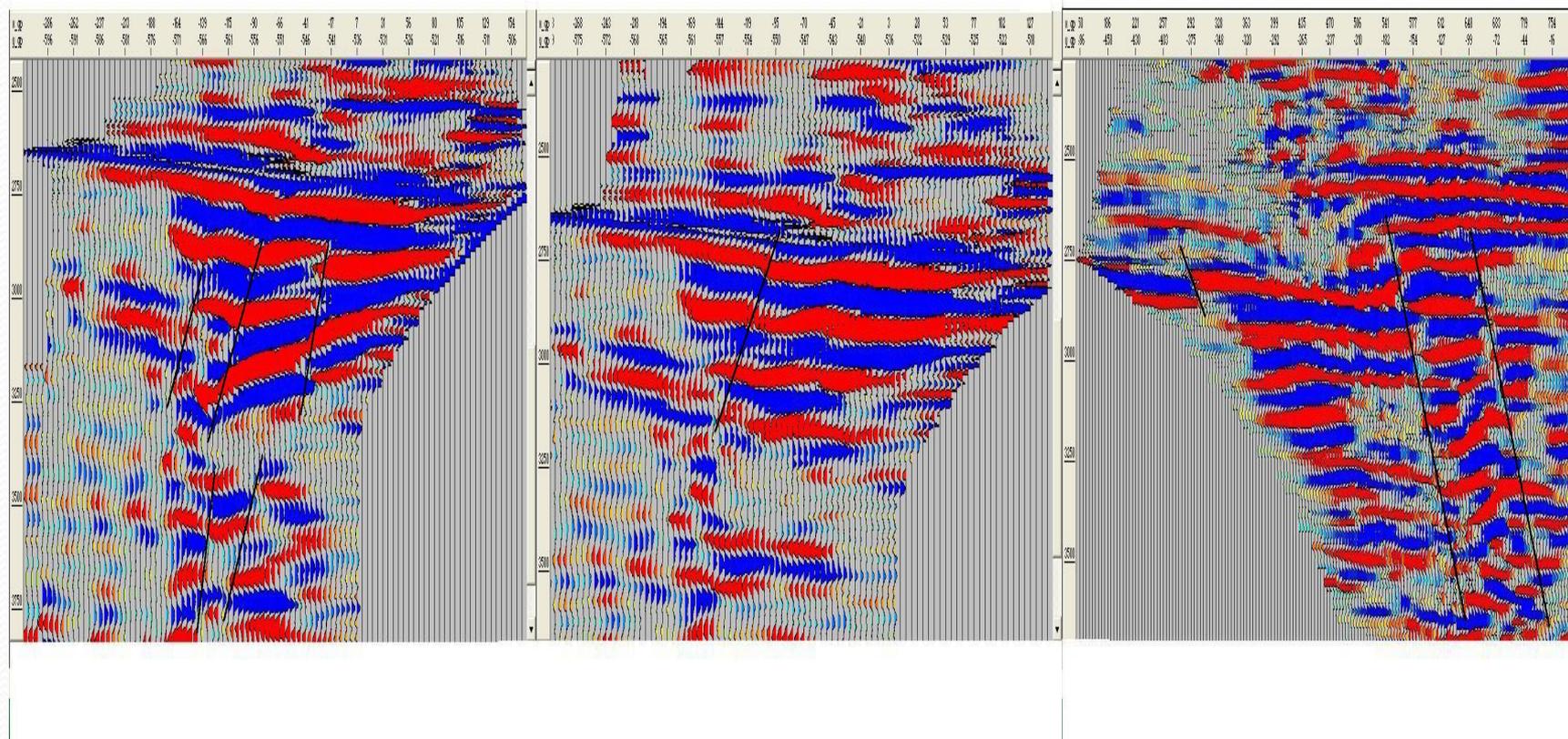
Влияние искривления скважины и наклона границ на положение точек отражения. Белоруссия.



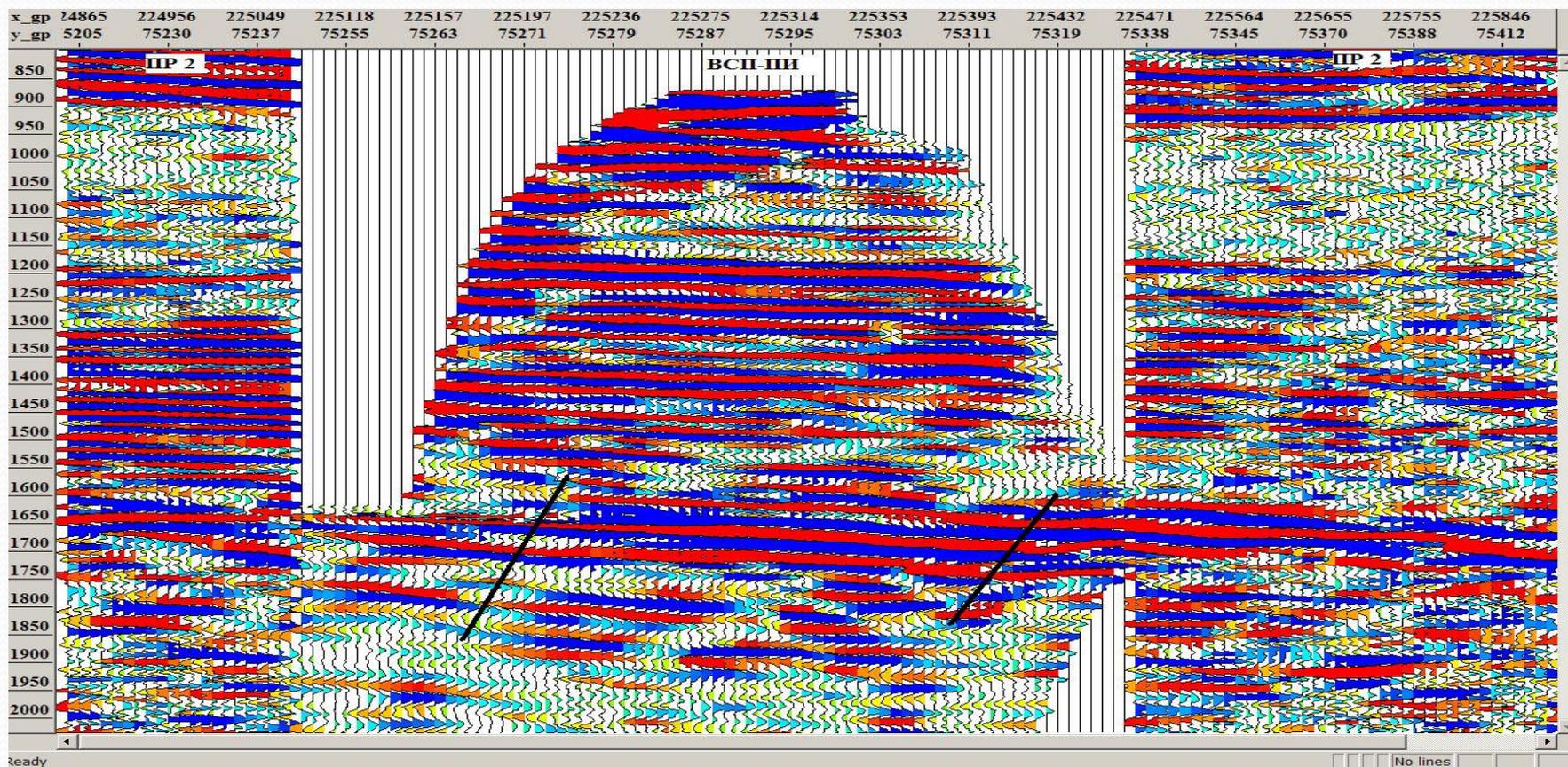
Азимут: 0



Глубинные разрезы НВСП с разных ПВ, полученные с учетом искривления скважины и наклона границ. Белоруссия.

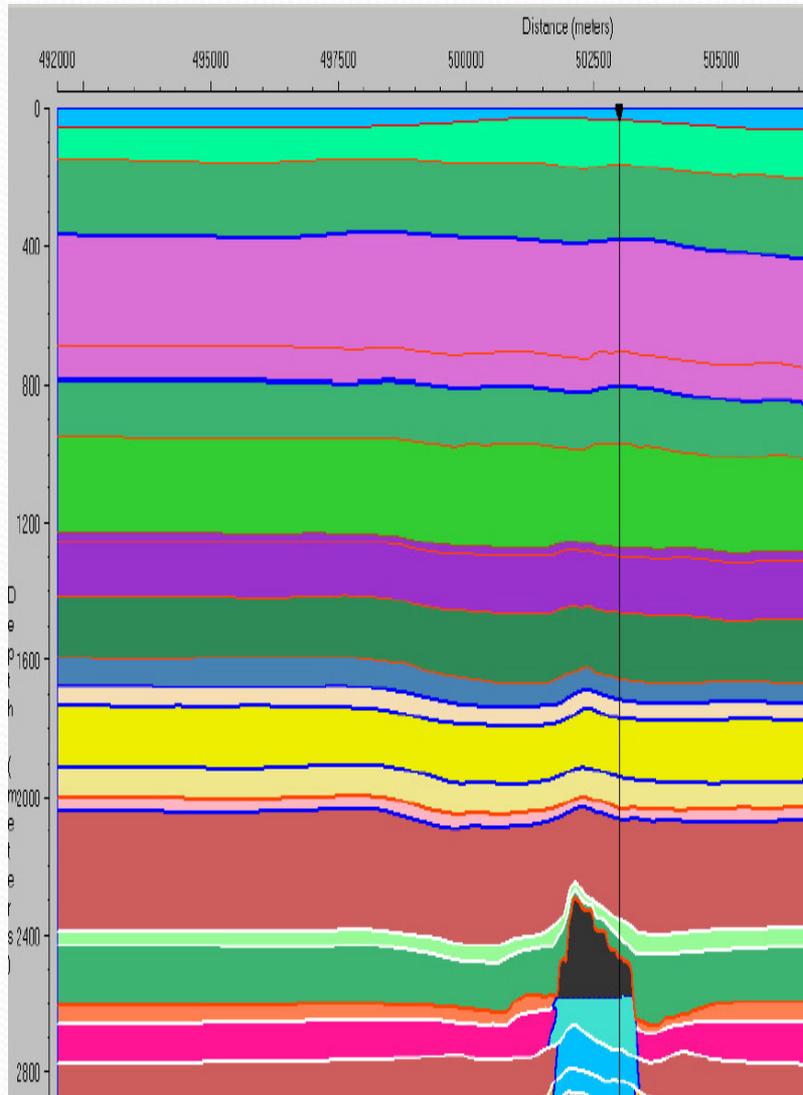


Пример увязки разрезов ВСП-ППИ и наземной сейсморазведки. Белоруссия.



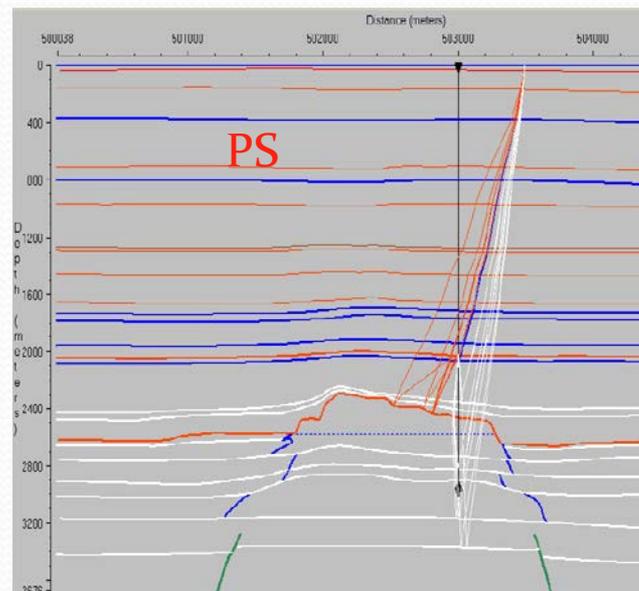
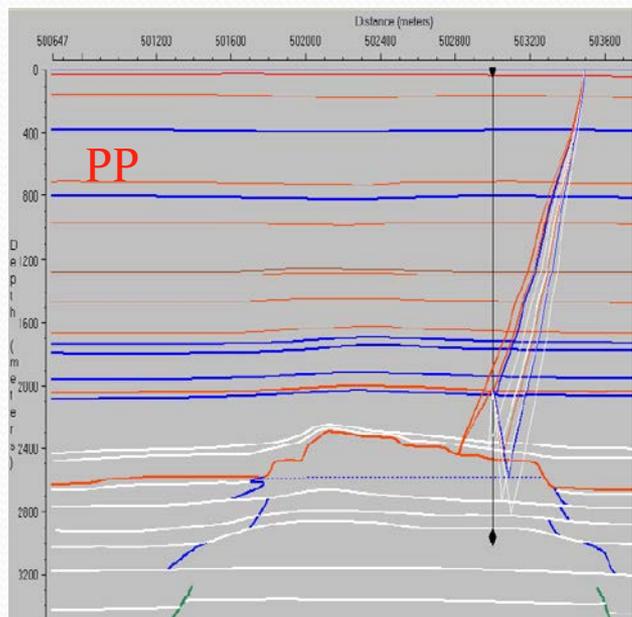
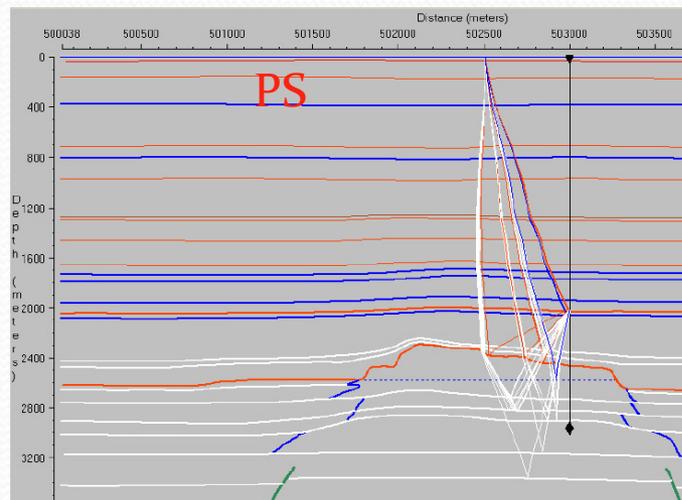
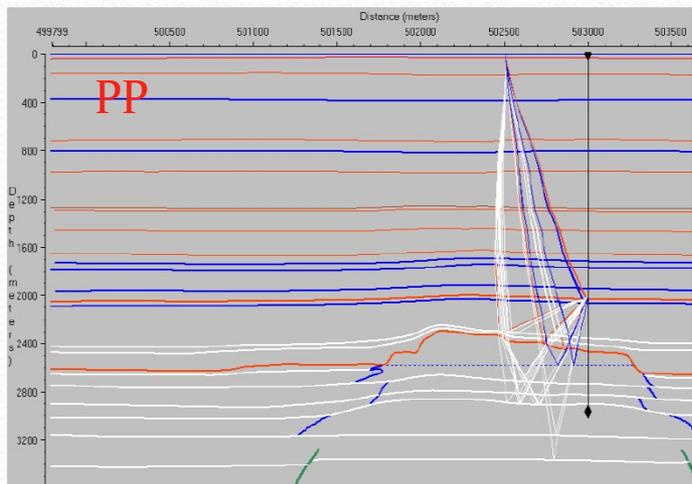
МОДЕЛЬ РИФА И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

(Шехтман, Череповский, 2008)

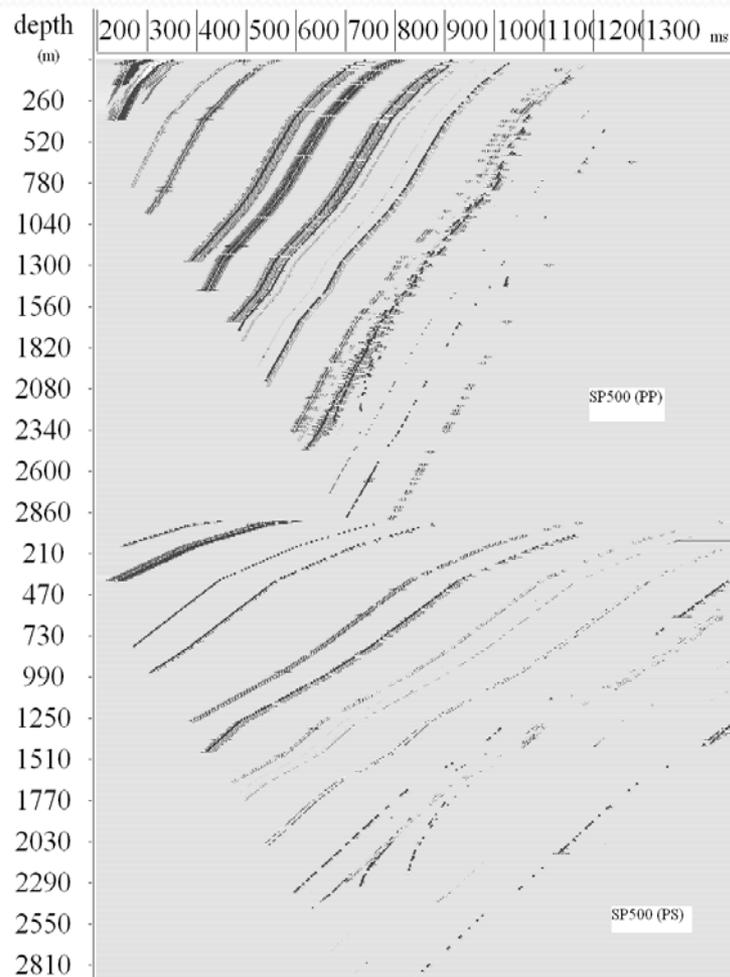
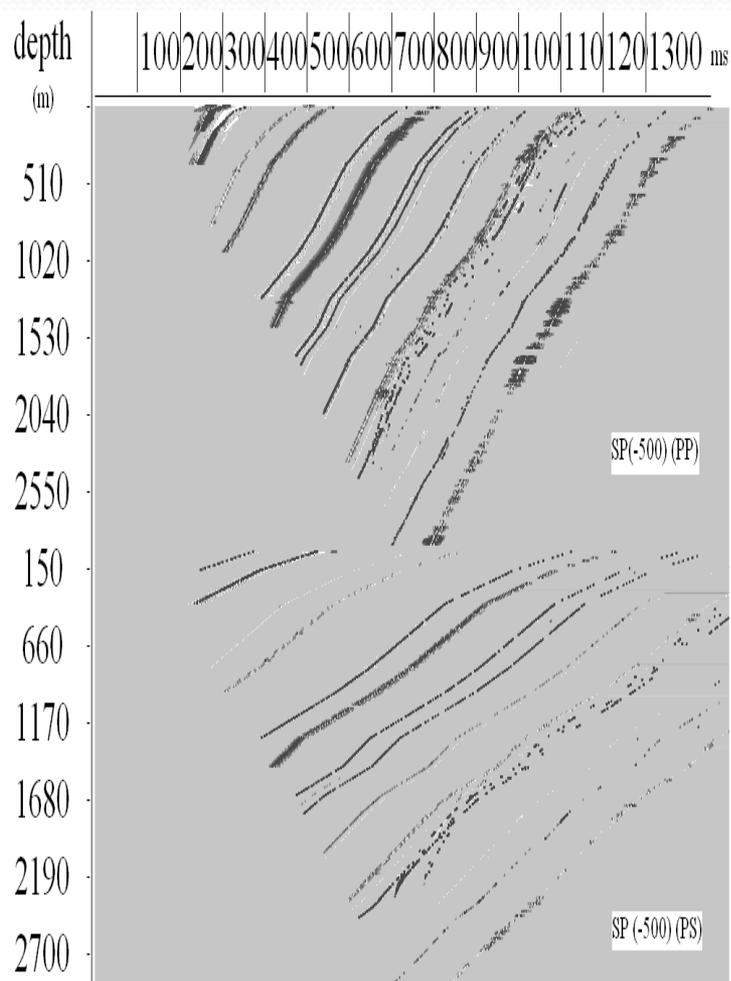


- 1. Изучить волновое поле внутри среды на продольных и обменных отраженных волнах в присутствии погребенного рифа.
- 2. Сравнить волновые поля для модификаций непродольного ВСП (НВСП) и ВСП с подвижным источником колебаний (ВСП-ПИ).
- 3. Сравнить результаты миграции записей, полученных различными модификациями метода ВСП на продольных и обменных отраженных волнах.

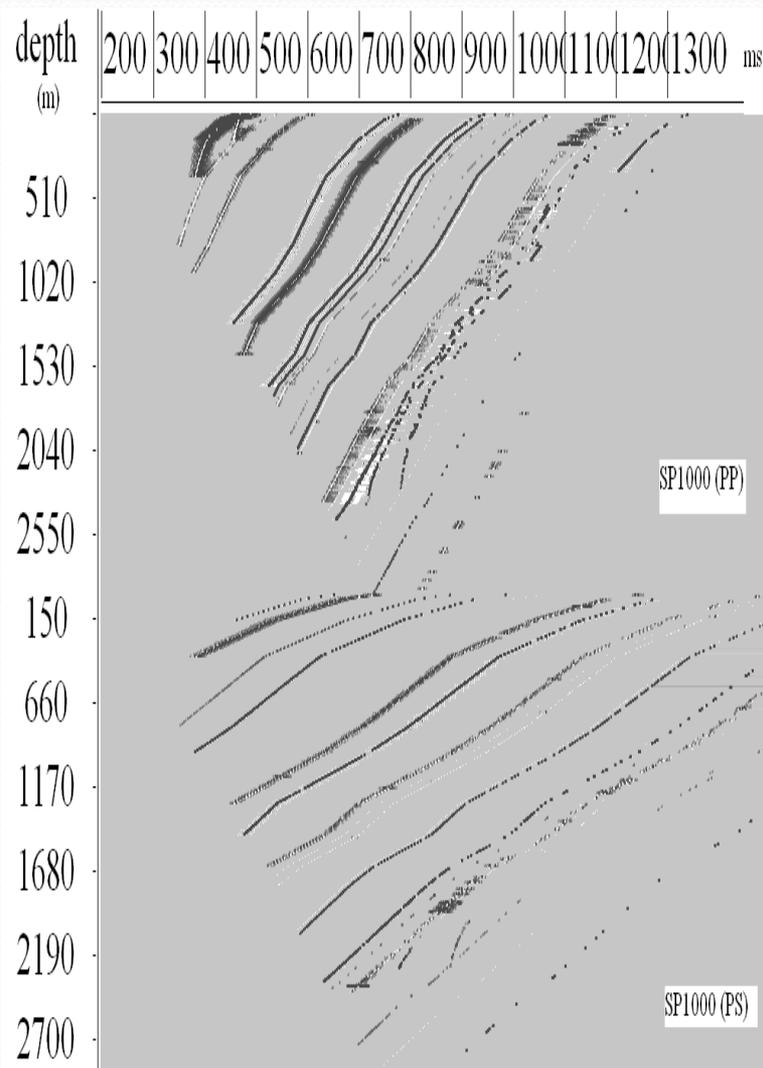
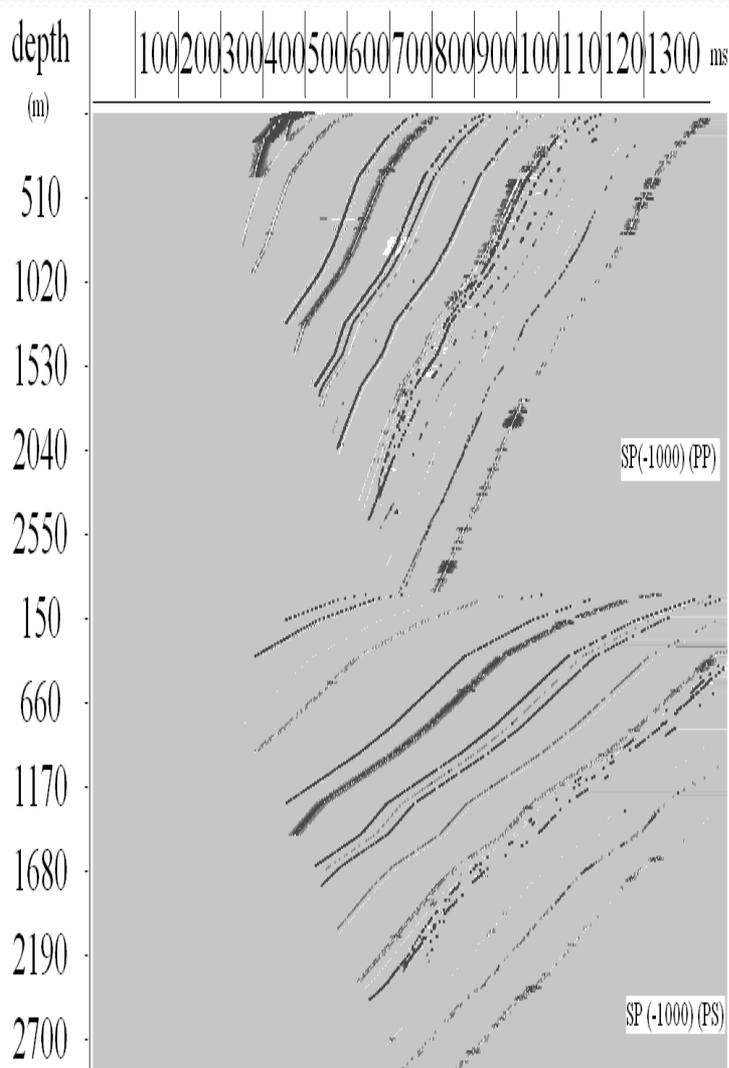
ЛУЧЕВЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН (вынос ПВ 500 м по обе стороны от скважины)



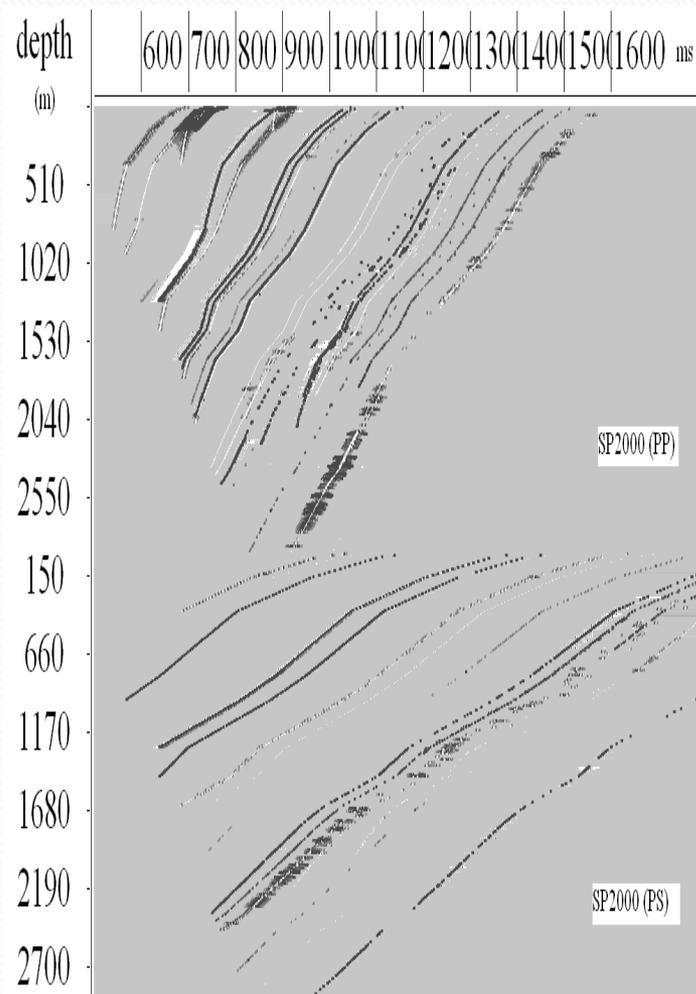
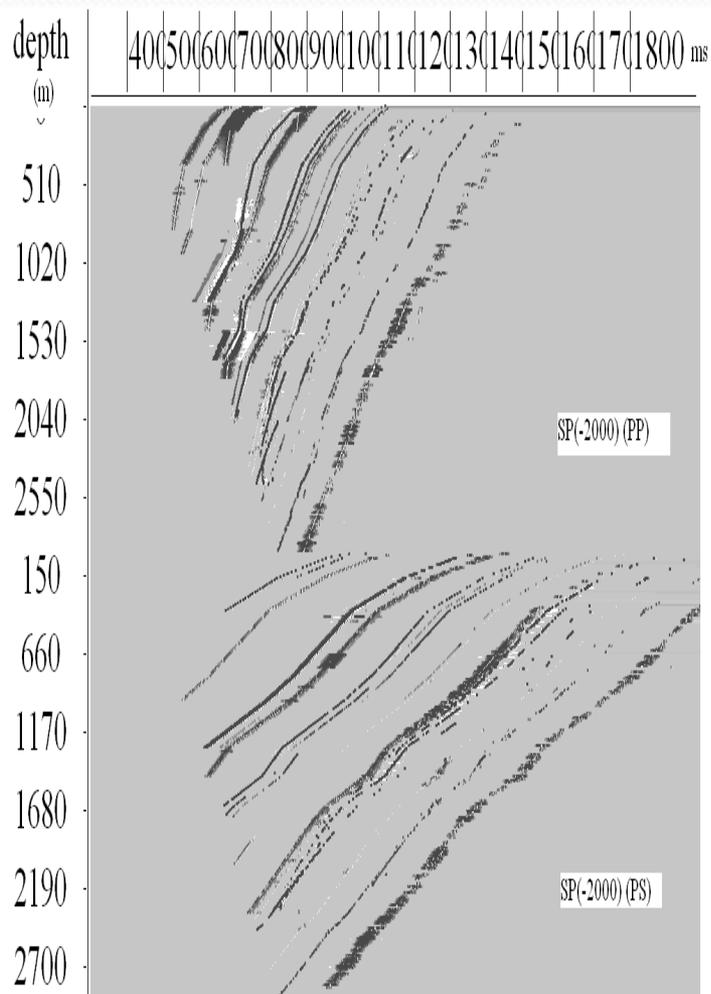
ЛУЧЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (НВСП, вынос ПВ = 500 м по обе стороны от скважины)



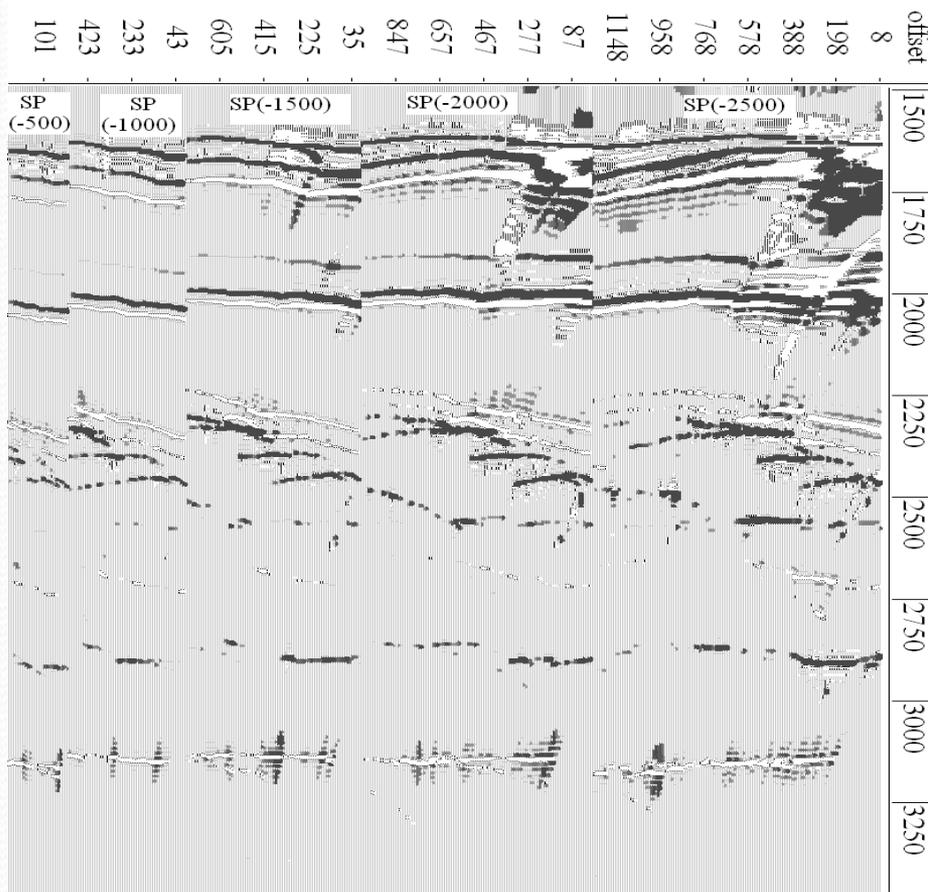
ЛУЧЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (НВСП, вынос ПВ = 1000 м по обе стороны от скважины)



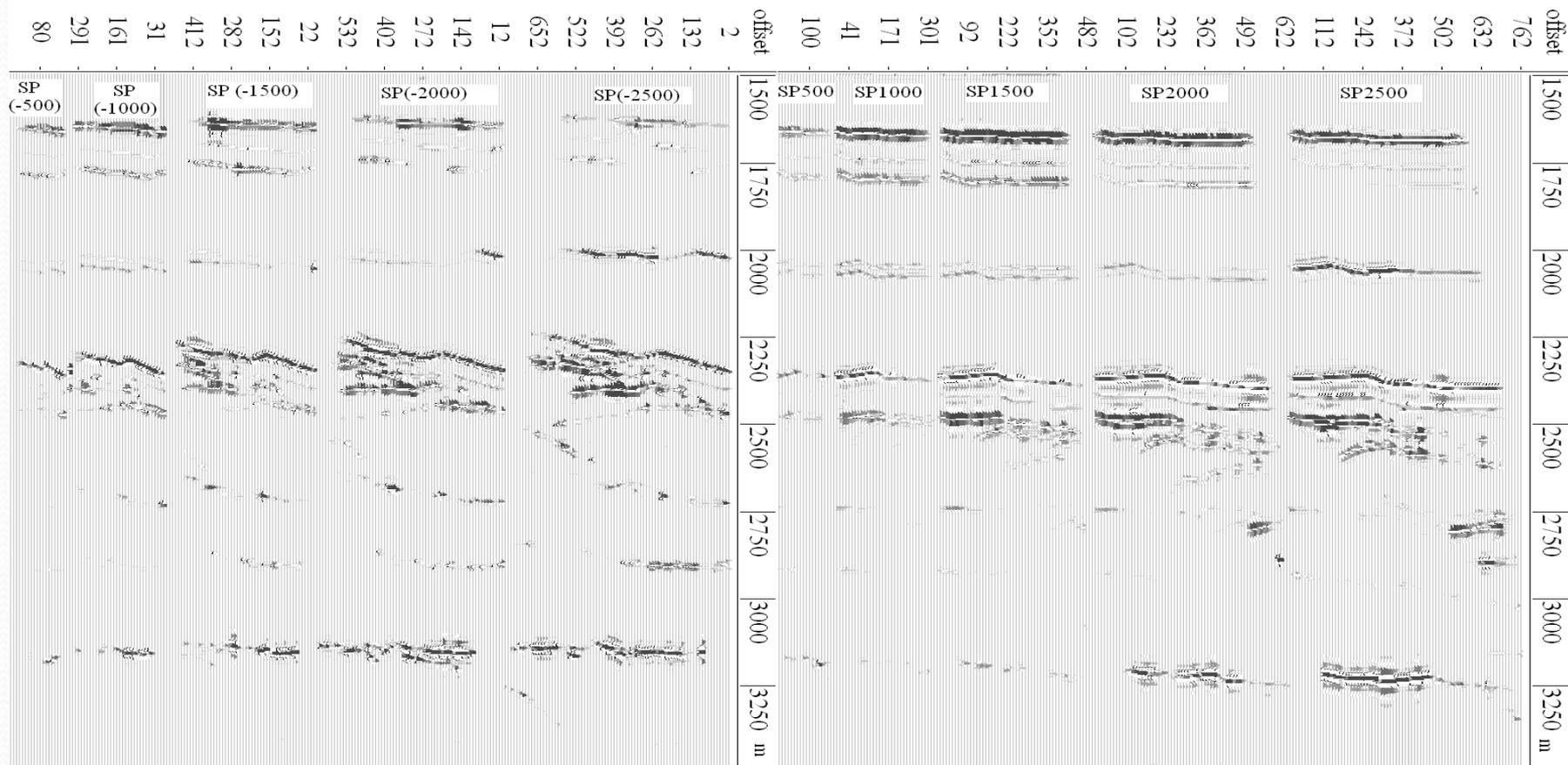
ЛУЧЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (НВСП, вынос ПВ = 2000 м по обе стороны от скважины)



ГЛУБИННЫЕ РАЗРЕЗЫ НВСП (отраженные волны типа PP)



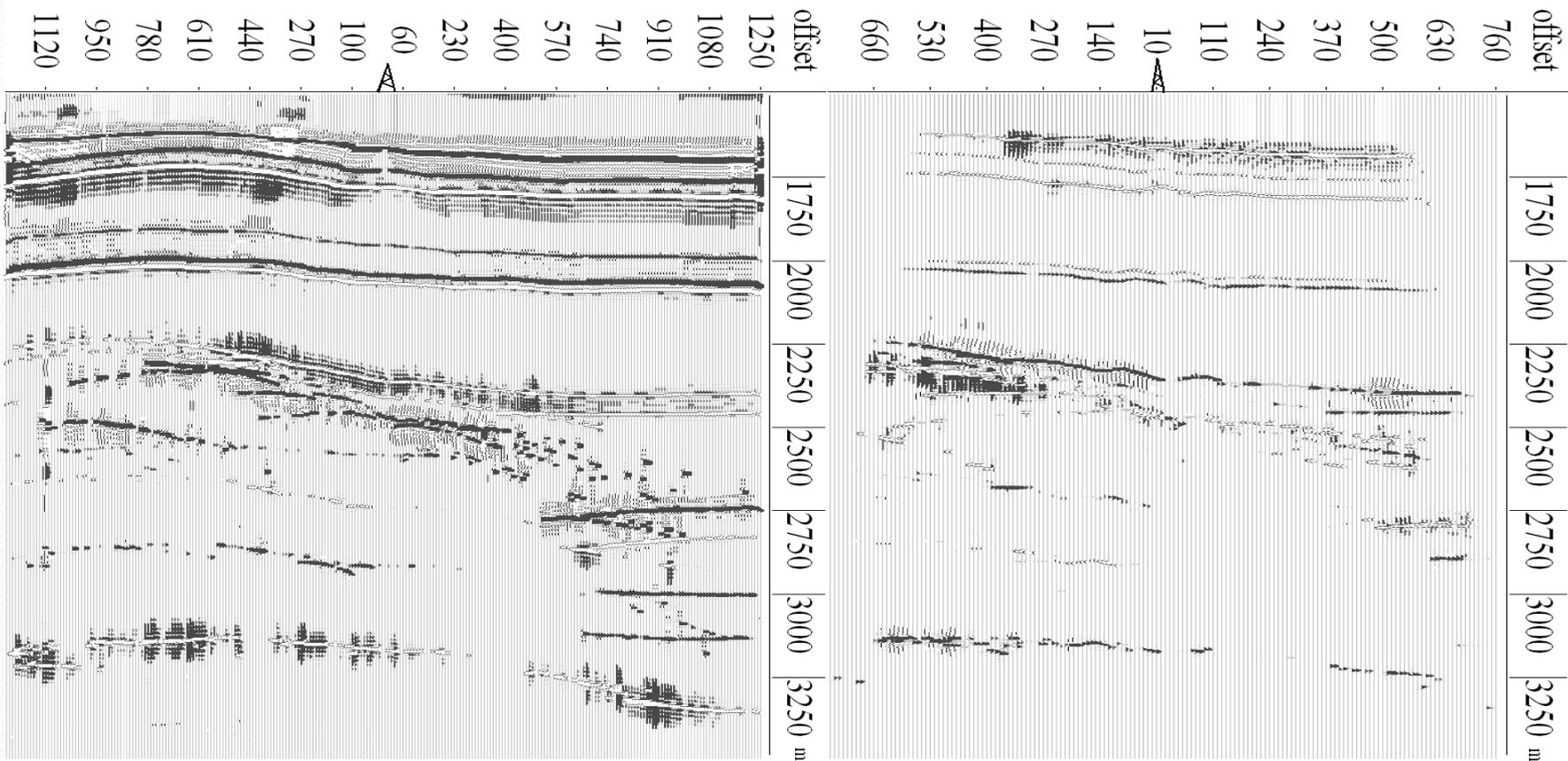
ГЛУБИННЫЕ РАЗРЕЗЫ НВСП (отраженные волны типа PS)



Offset VSP (PS). Depth sections for different offsets.

Offset VSP (PS). Depth cross-sections for different offsets.

ГЛУБИННЫЕ РАЗРЕЗЫ ВСП-ПИ



Moving Source VSP (depth cross-section, PP)

PP

Moving Source VSP (depth section, PS)

PS

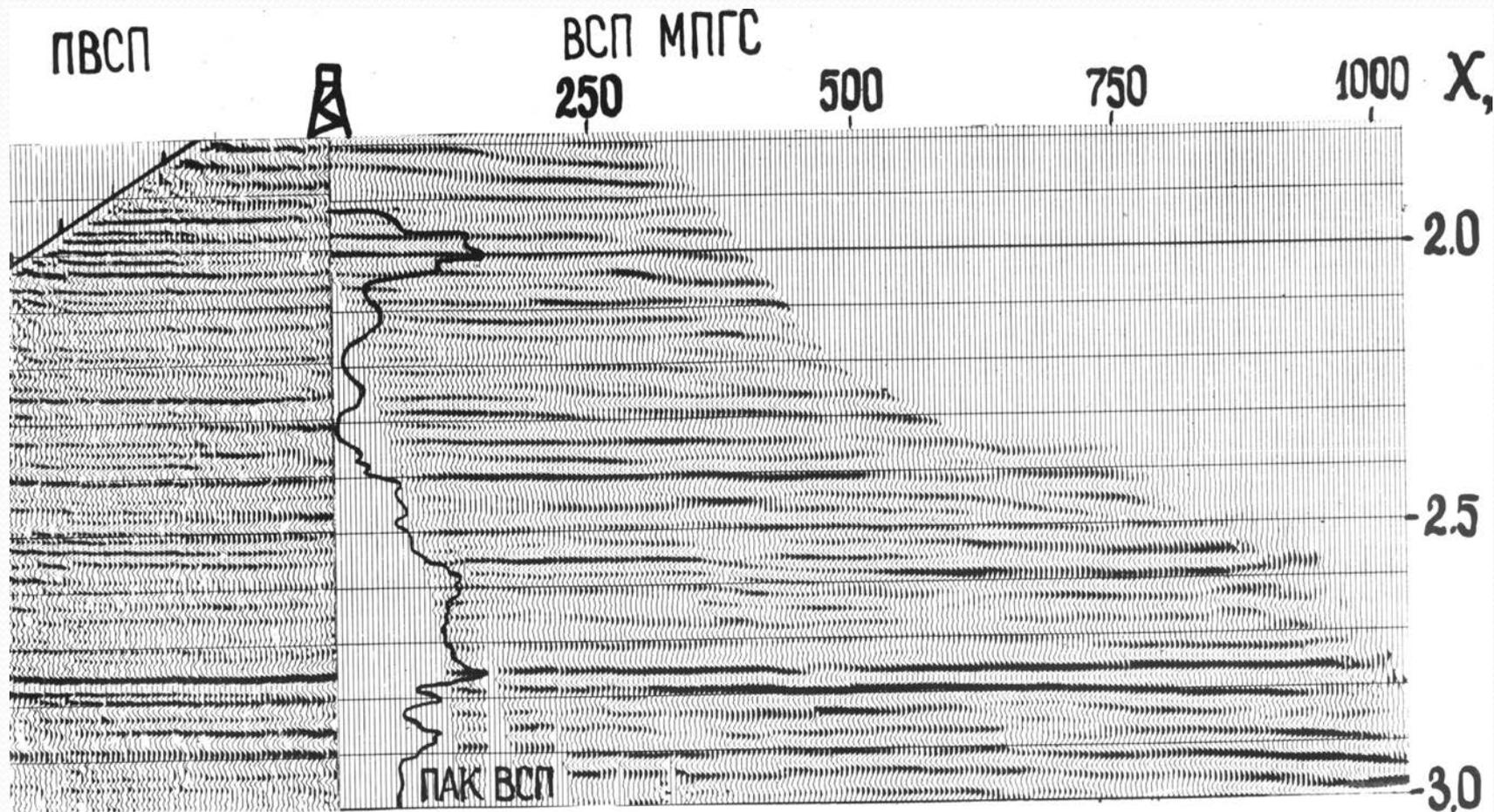
ВЫВОДЫ ПОСЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РИФА:

- 1. Присутствие рифа в волновом поле внутри среды проявляется в виде отражений с аномально высокими значениями кажущихся скоростей и соизмеримой между собой интенсивностью горизонтальной и вертикальной компонент.
- 2. Разрезы ВСП-ПИ, полученные по разные стороны от рифа, уверенно стыкуются между собой.
- 3. Форма поверхности рифа и глубже расположенных границ на разрезах, полученных путем миграции, более уверенно отображается при ВСП-ПИ по сравнению с НВСП.

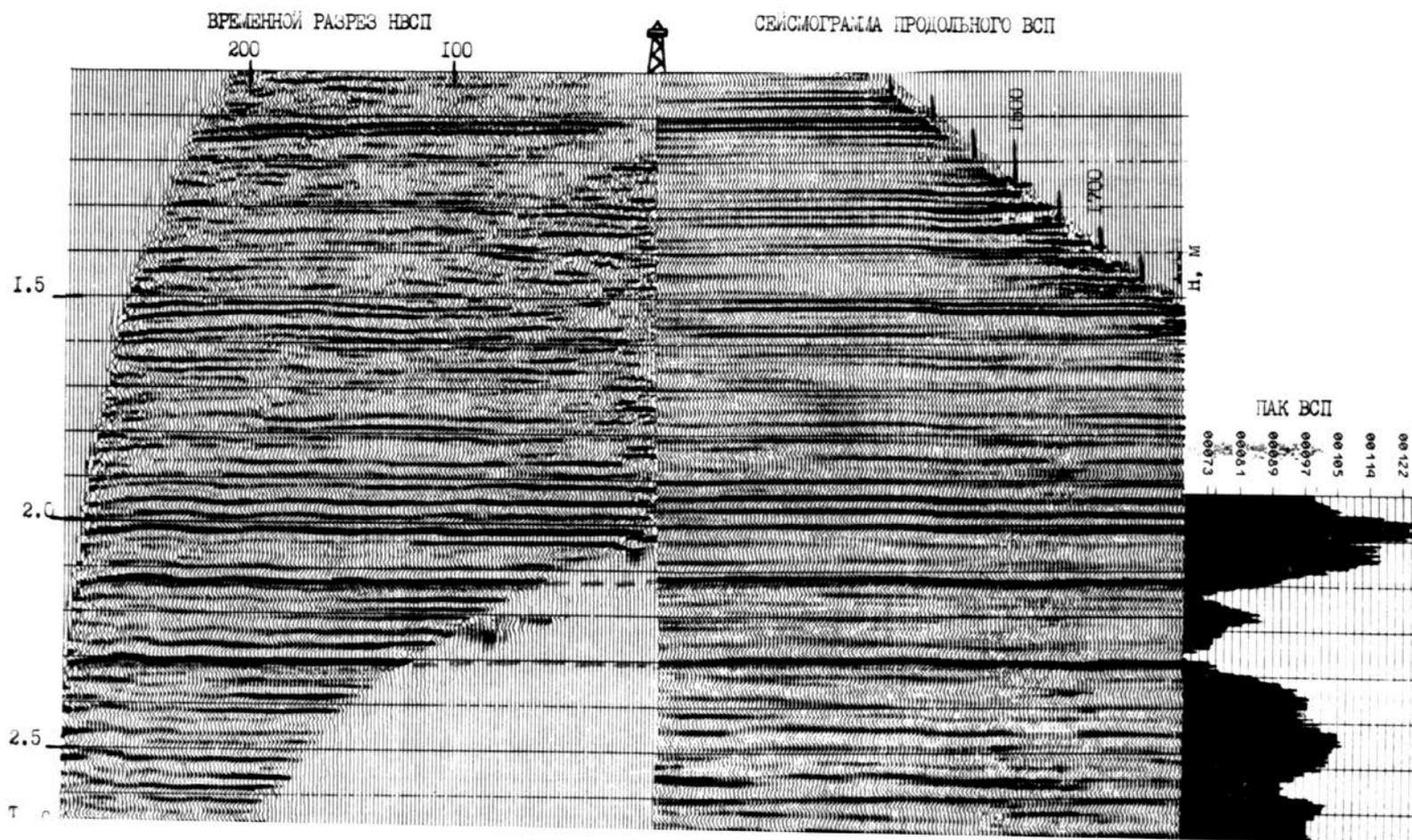
План презентации

- Модели сред при решении задач метода ВСП, направленных на повышение эффективности наземной сейсморазведки (выбор условий возбуждения, изучение условий выделения полезных волн, стратиграфическая привязка отражений, определение сейсмических скоростей, неупругого поглощения и др.)
- Модели сред при изучении околоскважинного пространства (геометрия системы наблюдений, геометрия сейсмических границ, выбор оптимальной модификации метода)
- Модели сред при решении технологических задач (прогноз разреза ниже забоя скважины, определение простирания трещин и др.)

Прогноз структуры околоскважинного пространства и акустических импедансов ниже забоя скважины. Восточная Туркмения (участок Чаача).



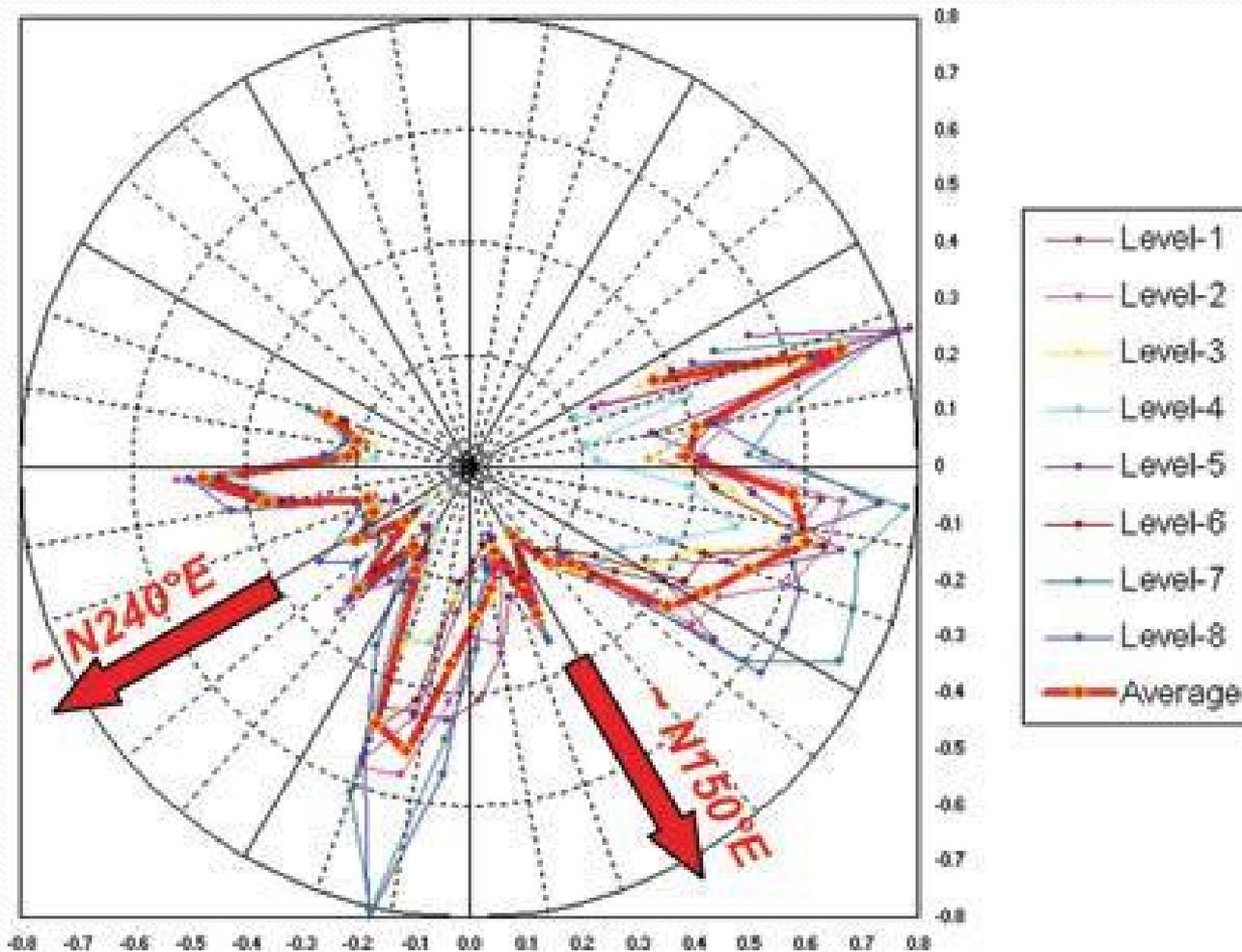
Прогноз рапоопасных зон (РАЗ), связанных с трещиноватыми ангидритами. РАЗ отличаются аномально низкими значениями акустического импеданса относительно вмещающих пород Восточная Туркмения (участок Сейраб).





ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТИРАНИЯ ТРЕЩИН В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЕЙ НТИ

РОЗА ОТНОШЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ И РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ ПРИ УРОВНЕВОМ ВСП. ПРИВЕДЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ КАЖДОГО ИЗ УРОВНЕЙ И ПРИ ОСРЕДНЕНИИ, ВИДНЫ ДВА МИНИМУМА ОТНОШЕНИЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ АЗИМУТОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ НАПРАВЛЕНИЮ ПРОСТИРАНИЯ ТРЕЩИН И ОРТОГОНАЛЬНОМУ К НЕМУ НАПРАВЛЕНИЮ [MAULTZSCH S. *et al*, 2009]



Использование коэффициентов отражения обменных волн для определения направления простираия трещин

Какой коэффициент больше - «вдоль трещин» или «поперек трещин»?

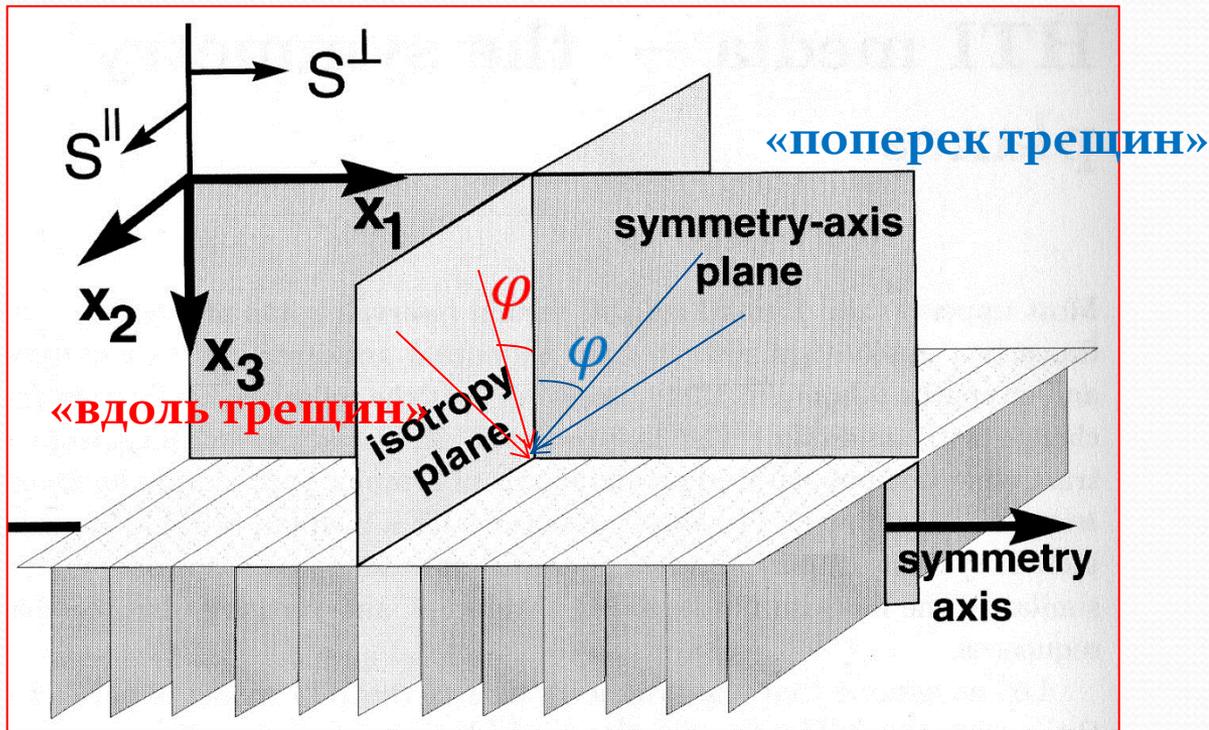


Рисунок модифицирован из (Rüger, 2001)

Hardage (2011)
(метод Хадсона)
 $PS(\text{вдоль}) > PS(\text{поперек})$

ЮТЗ (Глубоковских, 2011)
(метод линейного
проскальзывания)
 $PS(\text{вдоль}) < PS(\text{поперек})$

Коэффициенты

отражения обменных

ВОЛН

Обозначения

Общий случай – две среды НТИ

α, β
 скорости V_p и V_s (для
 нижнего слоя – максимальные
 значения в плоскости трещин)

Индексы 1 и 2
 обозначают слои с
 разными свойствами

i_1 – угол падения Р-волны
 j_1 – угол отражения S-волны

Параметры Томсена с индексом V
 относятся к среде НТИ,
 без индекса – к VTI (повернутой НТИ)

Величины с чертой – средние
 значения,
 Δ – разность между
 свойствами второго и первого
 слоев

вдоль трещин

$$\dot{P}\dot{S}^{\parallel} = -1/2 \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \frac{\sin i_1}{\cos j_1} - \frac{\beta}{\bar{\alpha}} \left(\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} + 2 \frac{\Delta\beta}{\bar{\beta}} \right) \sin i_1 \cos i_1 + \left(\frac{\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \left(2 \frac{\Delta\beta}{\bar{\beta}} + \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \right) \frac{\sin^3 i_1}{\cos j_1}$$

$$\dot{P}\dot{S}^{\perp} = -1/2 \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \frac{\sin i_1}{\cos j_1}$$

«поперек» трещин (в
 плоскости, перпендикулярной
 плоскости трещин)

$$- \frac{\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \left\{ \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} + 2 \left(\frac{\Delta\beta}{\bar{\beta}} + \gamma_1 - \gamma_2 \right) \right\} \sin i_1 \cos i_1$$

$$+ \left(\frac{\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \left\{ 2 \left(\frac{\Delta\beta}{\bar{\beta}} + \gamma_1 - \gamma_2 \right) + \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \right\} \frac{\sin^3 i_1}{\cos j_1}$$

(Rüger, 2001)

$$+ \left[\left(\frac{\bar{\alpha}^2}{2(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) \cos j_1} - \frac{\bar{\alpha}\bar{\beta} \cos i_1}{2(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2)} \right) (\delta_2^{(V)} - \delta_1^{(V)}) \right] \sin i_1$$

$$+ \left[\frac{\bar{\beta}\bar{\alpha} \cos i_1}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2)} (\delta_2^{(V)} - \delta_1^{(V)} + \epsilon_1^{(V)} - \epsilon_2^{(V)}) \right] \sin^3 i_1$$

$$- \left[\frac{\bar{\alpha}^2}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) \cos j_1} (\delta_2^{(V)} - \delta_1^{(V)} + \epsilon_1^{(V)} - \epsilon_2^{(V)}) \right] \sin^3 i_1$$

$$+ \left[\frac{\bar{\beta}^2}{2(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) \cos j_1} (\delta_1^{(V)} - \delta_2^{(V)}) \right] \sin^3 i_1$$

$$+ \left[\frac{\bar{\beta}^2}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) \cos j_1} (\delta_2^{(V)} - \delta_1^{(V)} + \epsilon_1^{(V)} - \epsilon_2^{(V)}) \right] \sin^5 i_1$$

Разность коэффициентов отражения «вдоль и поперек» трещин для случая верхнего изотропного слоя

$$PS(\text{вдоль}) - PS(\text{поперек}) = -\frac{2\bar{\beta}\gamma\sin(il)\cos(il)}{\bar{\alpha}} + \frac{\bar{\beta}^2\gamma\sin(il)^2}{\bar{\alpha}^2 B}$$

Обозначения

α, β

скорости V_p и V_s (для нижнего слоя – максимальные значения в плоскости трещин)

i_l – угол падения P-волны

Параметры Томсена с индексом V относятся к среде НТИ, без индекса – к VTI (повернутой НТИ)

Величины с чертой – средние значения,
 Δ – разность между свойствами второго и первого слоев

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{1}{2} \frac{\bar{\alpha}^2}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) B \sin(il)} - \frac{\bar{\alpha} \bar{\beta} \cos(il)}{2 \bar{\alpha}^2 - 2 \bar{\beta}^2} \right) \delta \sin(il) \\ & - \left(\frac{\bar{\alpha} \bar{\beta} \cos(il) (\delta - \varepsilon)^{(V)}}{\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2} + \frac{\bar{\alpha}^2 (\delta - \varepsilon)^{(V)}}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) B \sin(il)} \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \frac{\bar{\beta}^2 \delta}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) B \sin(il)} \right) \sin(il)^3 - \frac{\bar{\beta}^2 (\delta - \varepsilon)^{(V)} \sin(il)^4}{(\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2) B} \end{aligned}$$

$$B = \sqrt{1 - \frac{\left(\bar{\beta} - \frac{1}{2} \Delta\beta\right)^2}{\left(\bar{\alpha} - \frac{1}{2} \Delta\alpha\right)^2}}$$

Модель Хардейжа (тип 1) – зависимость коэффициентов от методов ТЭС

$V_p = 4.00$ км/с, $V_s = 2.20$ км/с, $Rho = 2.40$ г/см³

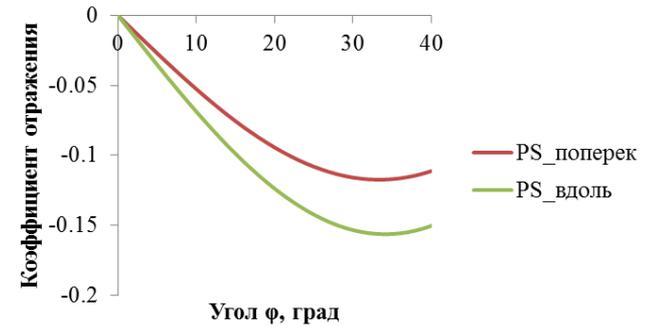
«Мягкая» среда

$V_p = 5.39$ км/с, $V_s = 2.97$ км/с, $Rho = 2.59$ г/см³

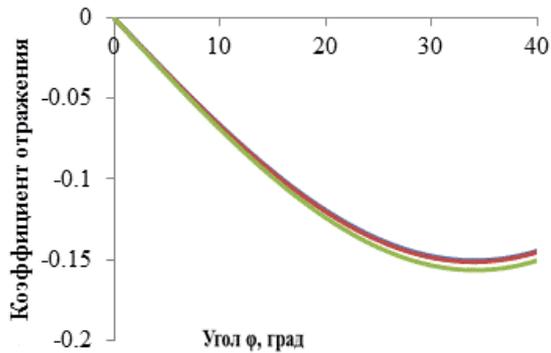
«Жесткая» среда

Плотность трещин = 0.1, АО трещин = 10^{-4}

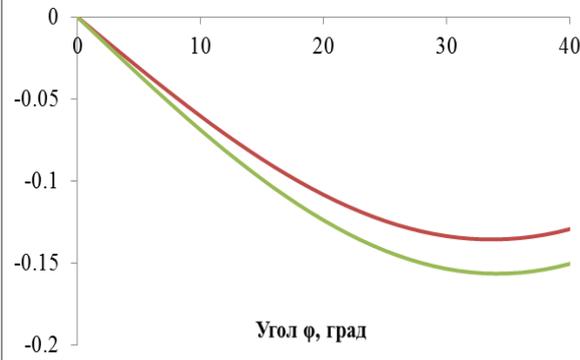
Метод Хадсона
Линейное проскальзывание ($DT=0.22$,
 $DN=0$)



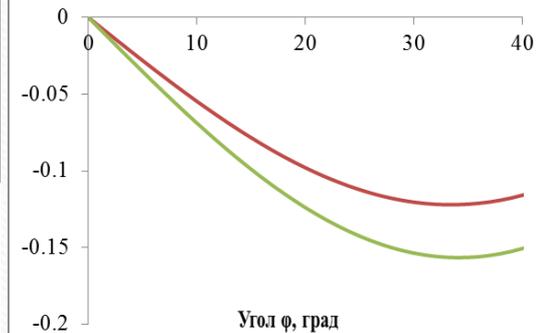
Эшелби-1



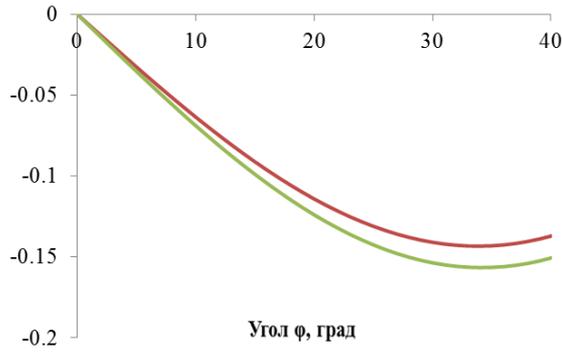
Эшелби-2



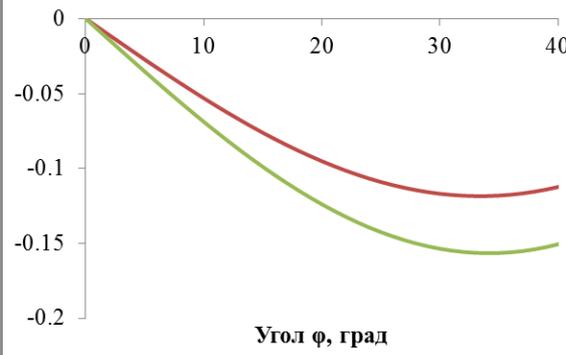
Верхняя граница Хашина-Штрикмана и ОСП ($fr=0$)



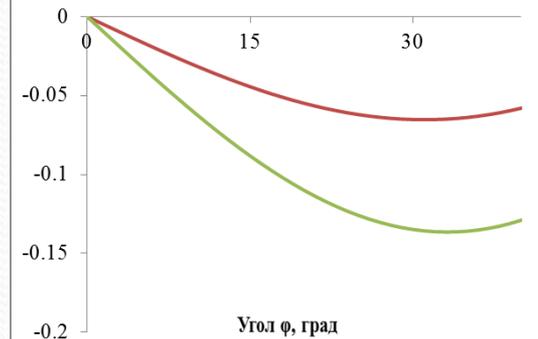
Метод Нишизавы



Метод самосогласования

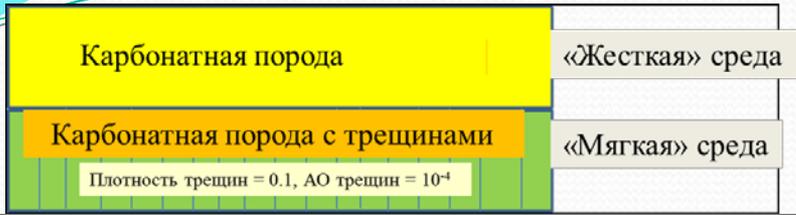


ОСП ($fr=0.5$)

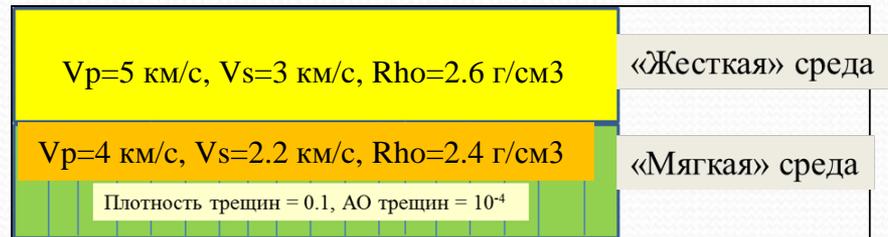
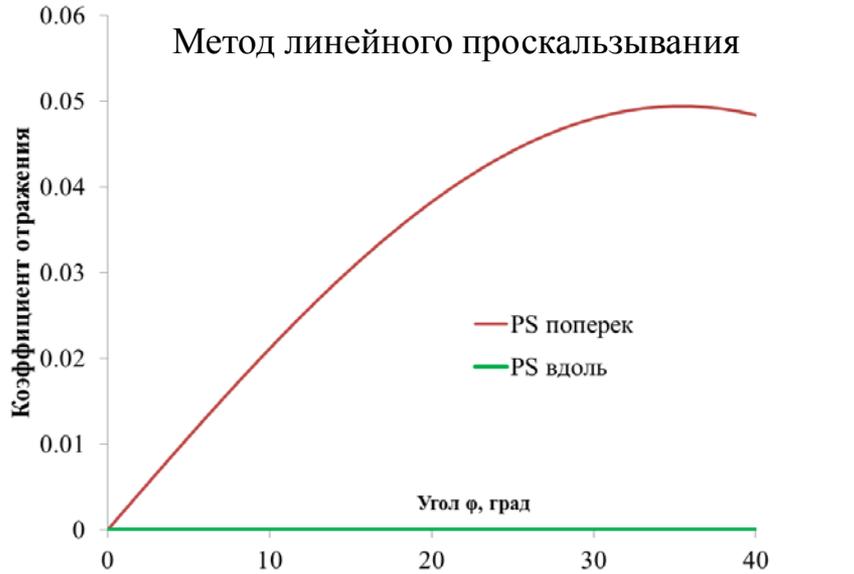


$PS(вдоль) > PS(поперек)$

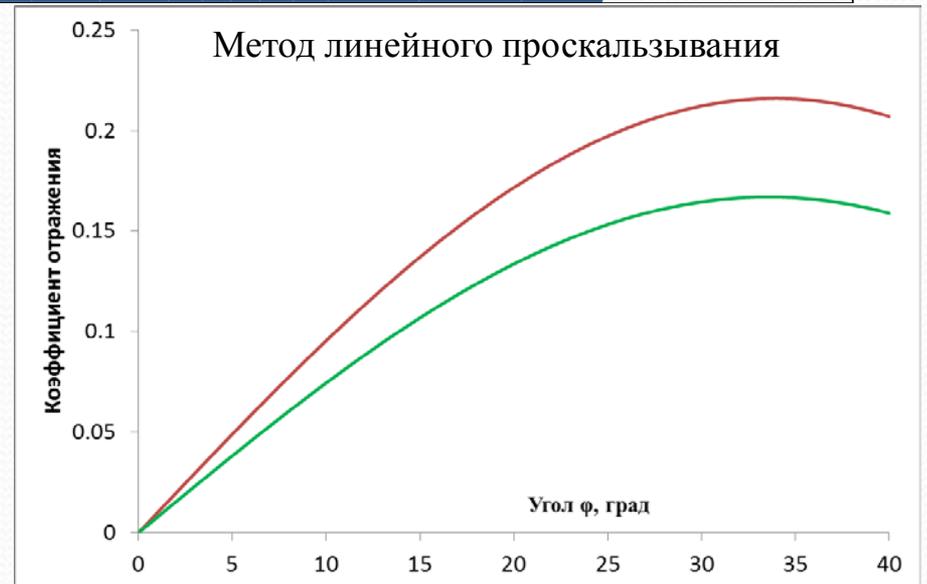
Модели типа 2



Метод линейного проскальзывания



Метод линейного проскальзывания



$PS(\text{вдоль}) < PS(\text{поперек})$

ВЫВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТИРАНИЯ ТРЕЩИН ПО АМПЛИТУДАМ ОБМЕННЫХ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН:

- При падении продольных волн на границу раздела изотропной среды со средой НТІ коэффициент отражения «вдоль трещин» зависит только от контраста упругих свойств слоев вдоль вертикального направления и от контраста плотности слоев. Если свойства вмещающей матрицы второго слоя отличаются от свойств верхнего слоя, то появление трещин в нижнем слое практически не отразится на величине этого коэффициента.
- Коэффициент отражения «поперек трещин» имеет более сложный вид и включает в себя коэффициент «вдоль трещин» в качестве слагаемого. При этом остальные члены коэффициента «поперек трещин» зависят, в том числе, и от параметров анизотропии Томсена.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОСТИРАНИЯ ТРЕЩИН ПО АМПЛИТУДАМ ОБМЕННЫХ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН (*ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ*):

В случае, когда верхний слой более податливый по сравнению с вмещающей матрицей нижнего слоя, то появление трещин в нижнем слое практически не изменяет величину скорости в вертикальном направлении – «вдоль» трещин. Однако нижний слой становится более податливым в направлении «поперек» трещин и менее контрастным по отношению к свойствам верхнего слоя. Это может привести к уменьшению коэффициента отражения обменной волны «поперек трещин». В результате коэффициент «поперек» трещин может стать по модулю меньше коэффициента «вдоль трещин». Если же верхний слой имеет такие же упругие модули, что и нижний слой или же является более жестким по отношению к нижнему слою (случай карбонатных пород), то появление трещин в нижнем слое увеличивает контраст между свойствами нижнего слоя «поперек трещин» и верхнего слоя. В этом случае коэффициент «поперек» трещин может стать по модулю больше коэффициента «вдоль трещин».



Спасибо за внимание!