

# Метод микросейсмического зондирования- перспективный инструмент в задачах поиска и разведки полезных ископаемых

А.В.Горбатилов  
ИФЗ РАН, г.Москва



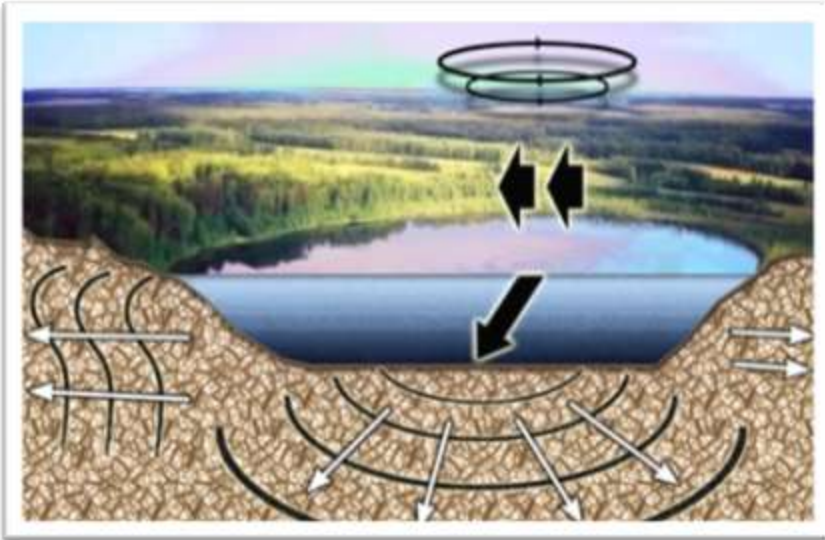
## Базовая идея ММЗ

Аналогом  
микросейсмического  
поля может служить  
случайное поле волн  
на поверхности воды.

Камни не выходят на  
поверхность, но они вносят в  
случайное поле искажения,  
по которым можно судить о  
присутствии и положении  
камней



## Источники микросейсм



- **Источниками микросейсм с периодами 3 – 20 с (и более)** являются крупные атмосферные вихревые образования (циклоны, тайфуны), проходящие над акваториями.



- **Источником микросейсм с периодами 1 – 5 с (0,2 – 1,0 Гц)** является морская прибой.
- **Микросейсмсы с частотой более 1 Гц** преимущественно техногенной природы, в иностранной литературе носят название «микротремор».

# Основы методики проведения ММЗ

1. Измерение статистически устойчивых спектров микросейсмического поля во всех точках сети.
2. Построение карты или профиля распределения пространственных вариаций амплитуд микросейсм для каждой частоты в спектре.
3. Привязка полученных карт или профилей к соответствующей глубине, исходя из соотношения:

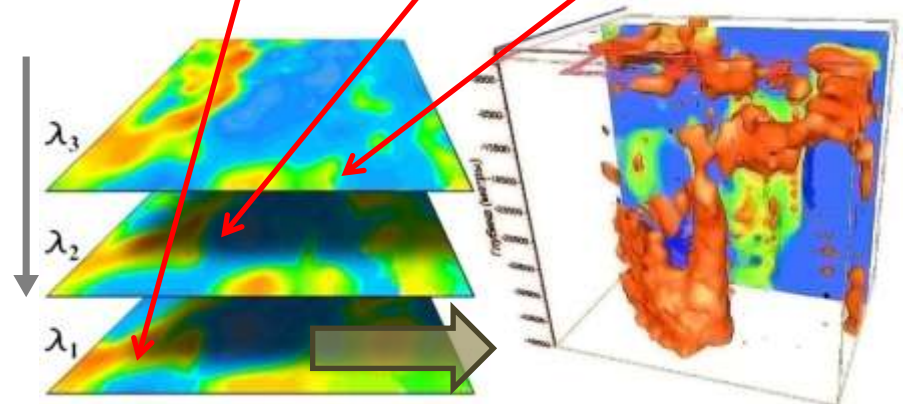
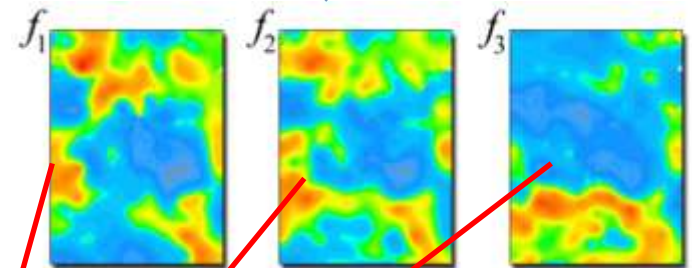
$$H(f) = k \cdot \lambda(f) = k \cdot V_R(f) / f$$

где  $k$  – коэффициент глубинной привязки (около 0.4, определяется по результатам моделирования),

$\lambda$  – длина волны,

$V_R$  – скорость Рэлеевских волн.

При площадной съемке строится объемная сейсмическая модель, при профильном зондировании – разрезы



# Приборная база

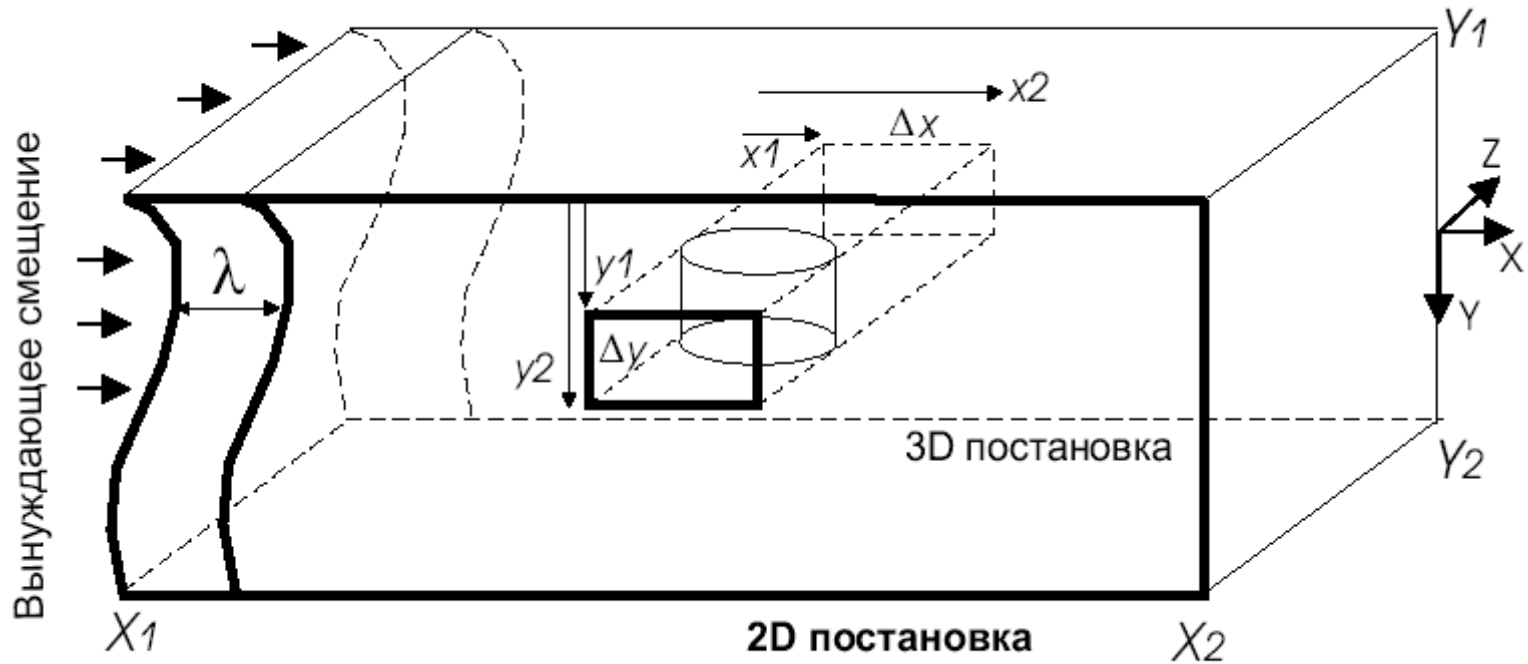
## КОМПЛЕКТ ШИРОКОПОЛОСНЫХ (30сек - 50Гц) ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ С GPS-ПРИЕМНИКАМИ И АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

### GÜRALP CMG-6TD

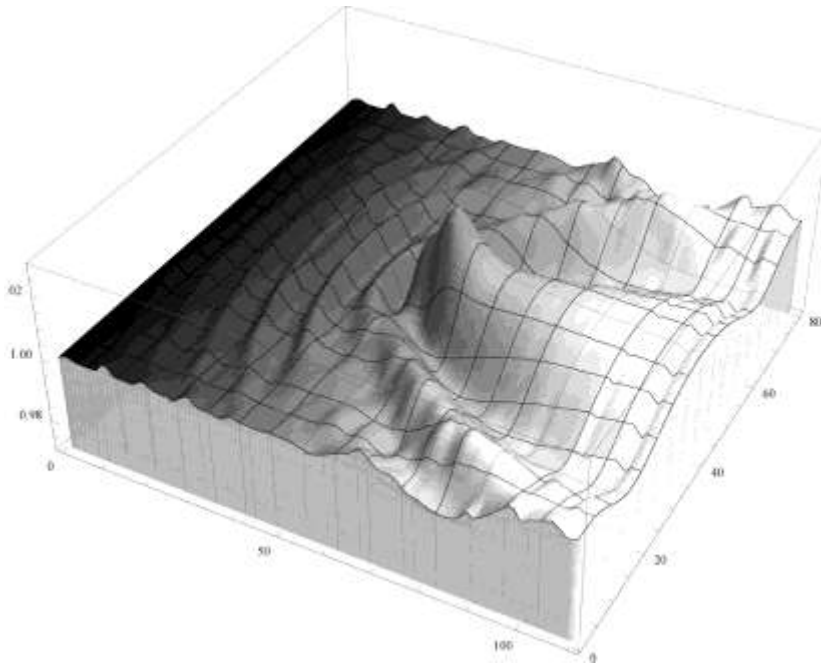
1. Сейсмометр CMG-6TD
2. Коммутационный блок
3. Güralp GPS-приемник со штоком крепления
4. Сигнальный кабель (сейсмометр – коммутационный блок)
5. Кабель GPS-приемника
6. Контрольный кабель
7. Кабель питания
8. 6-контактный разъем типа "mil-spec" для FireWire интерфейса



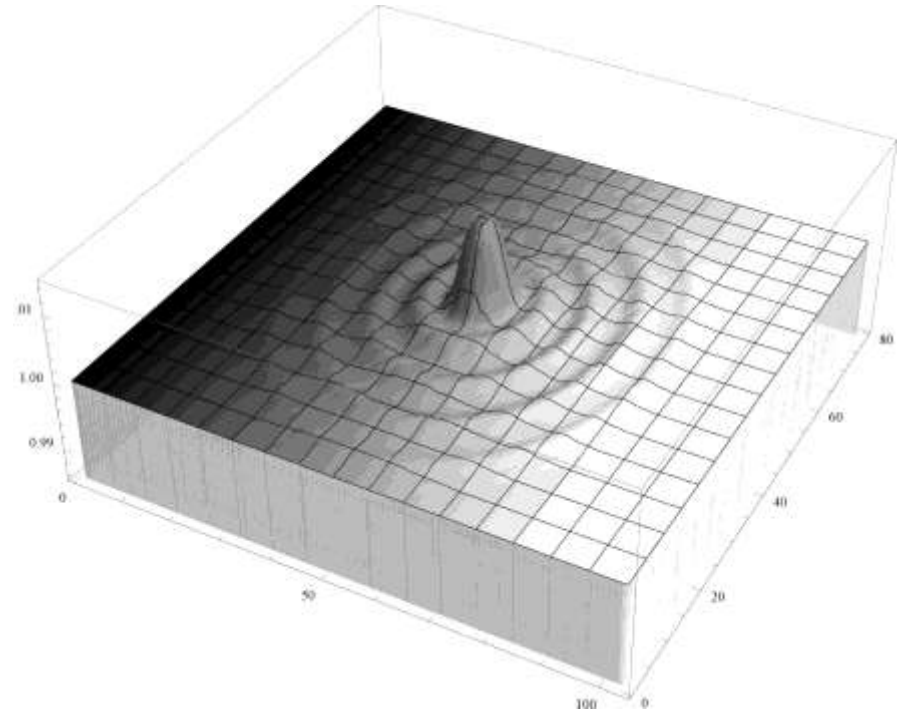
# ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА



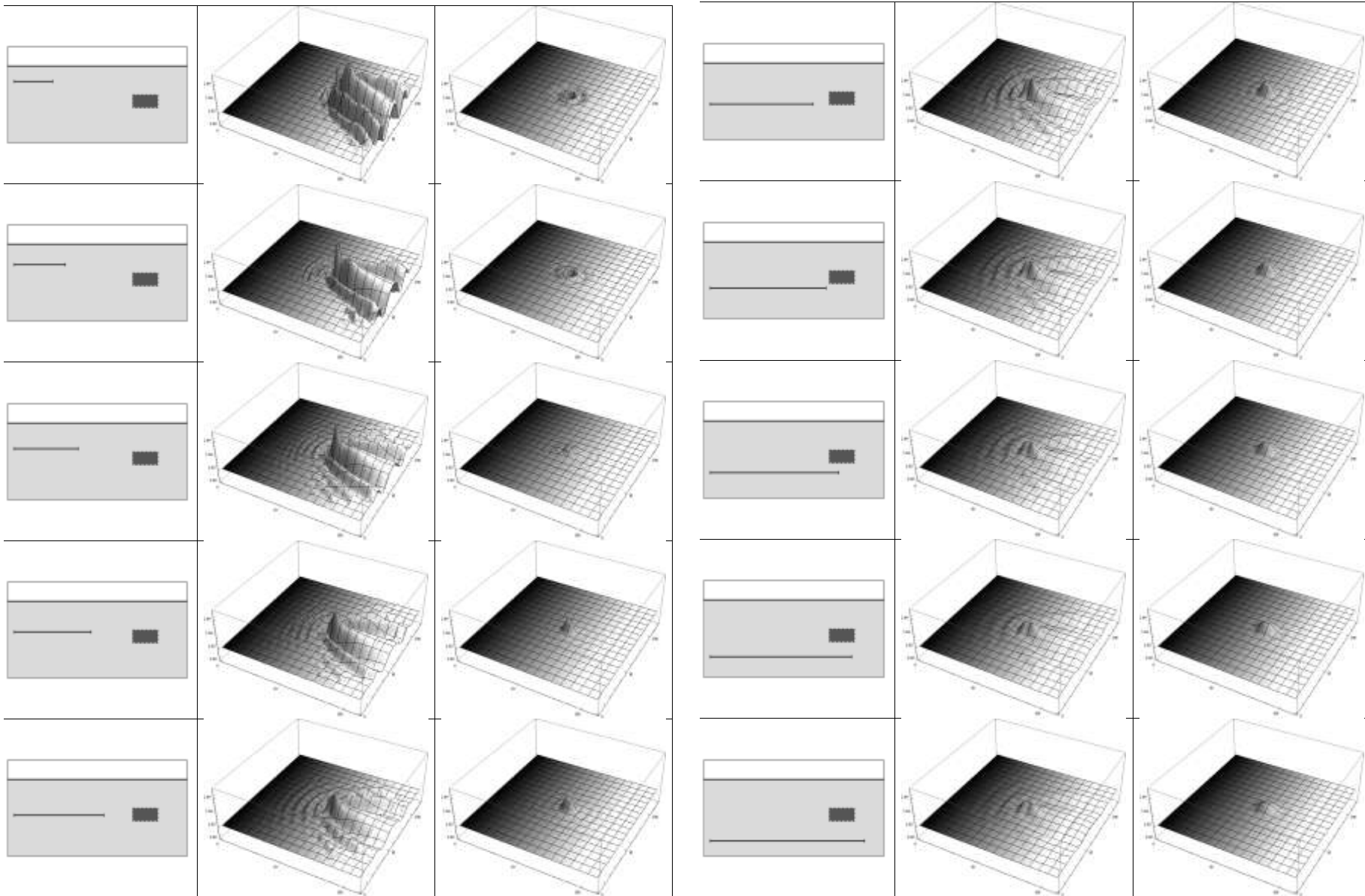
# ЭФФЕКТ СЛУЧАЙНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ



Облучение неоднородности регулярной волной.

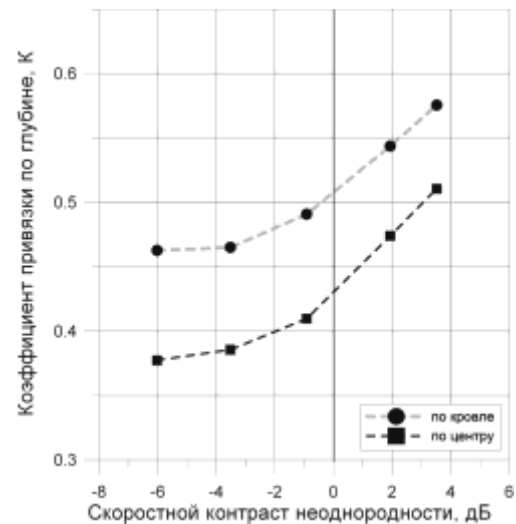
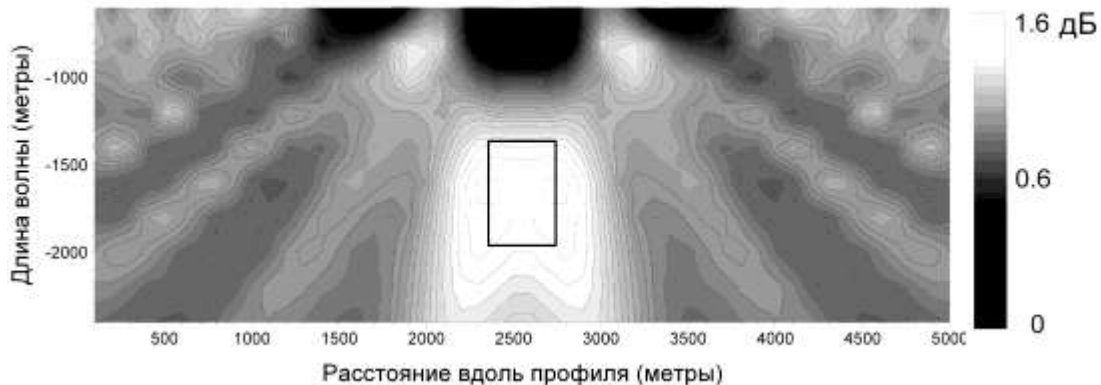


Неоднородность в поле случайных микросейсм

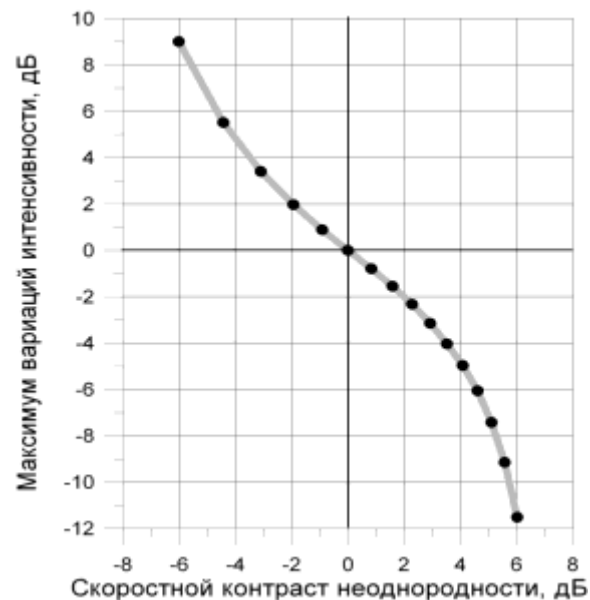




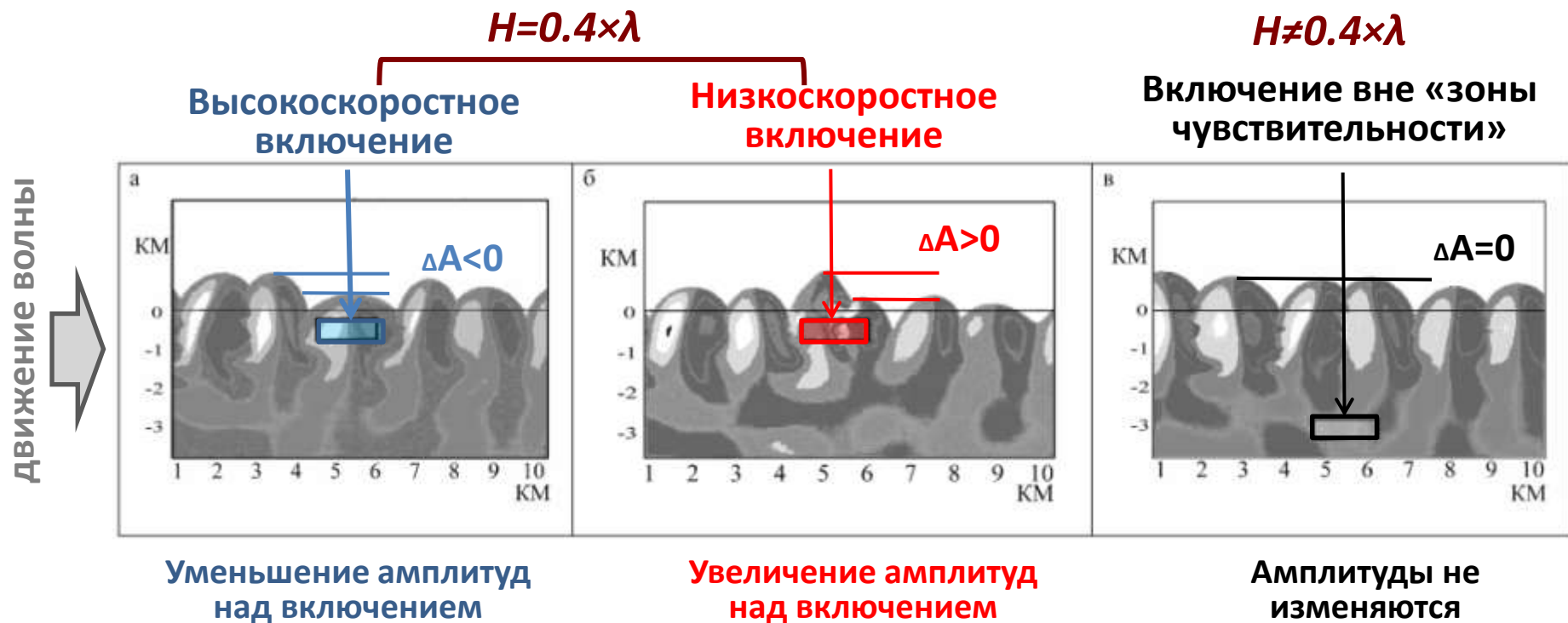
2D- моделирование. Отклонение скорости включения от среды -0.92 дБ



3D- моделирование. Отклонение скорости включения от среды -0.92 дБ

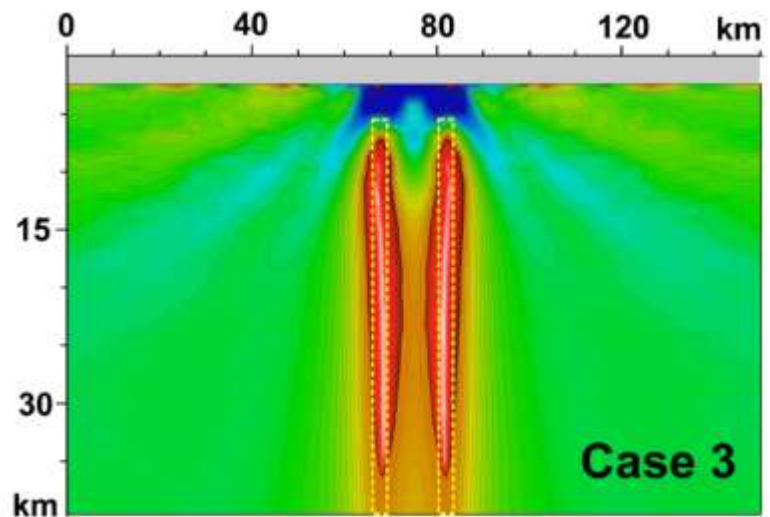
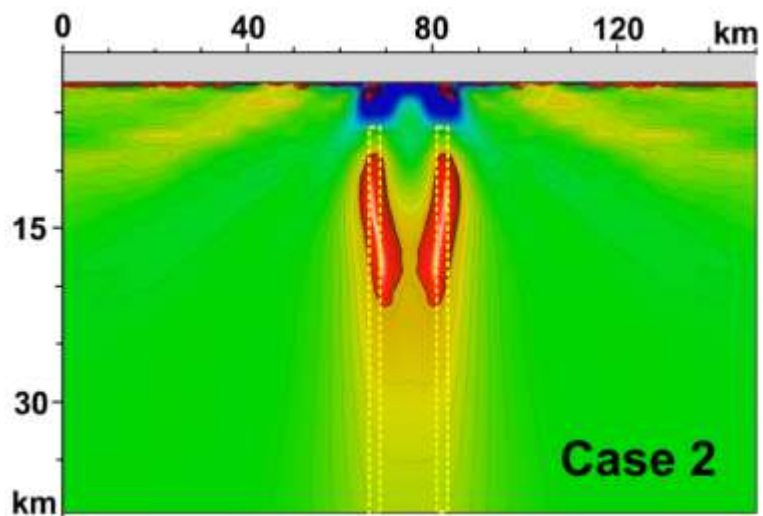
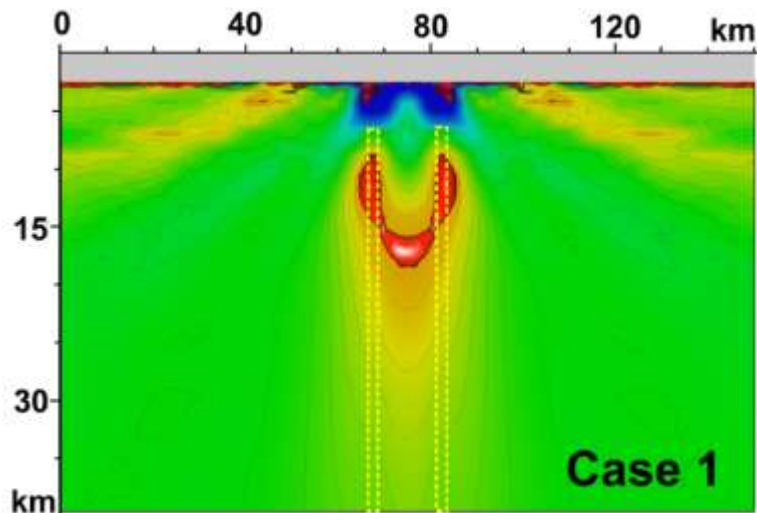
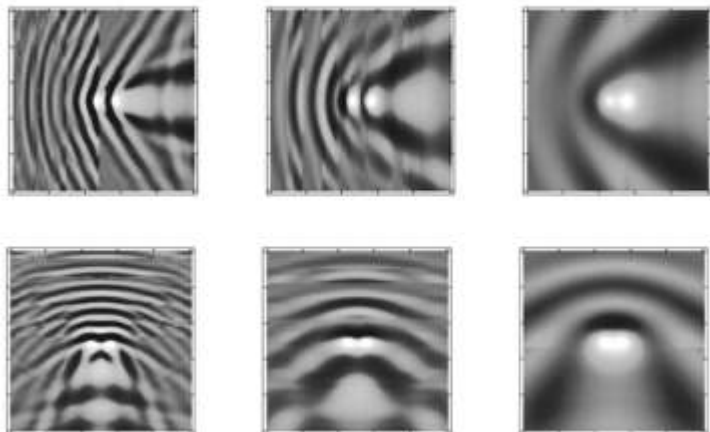


# Взаимодействие микросейсм с сейсмическими неоднородностями (результаты численного моделирования)



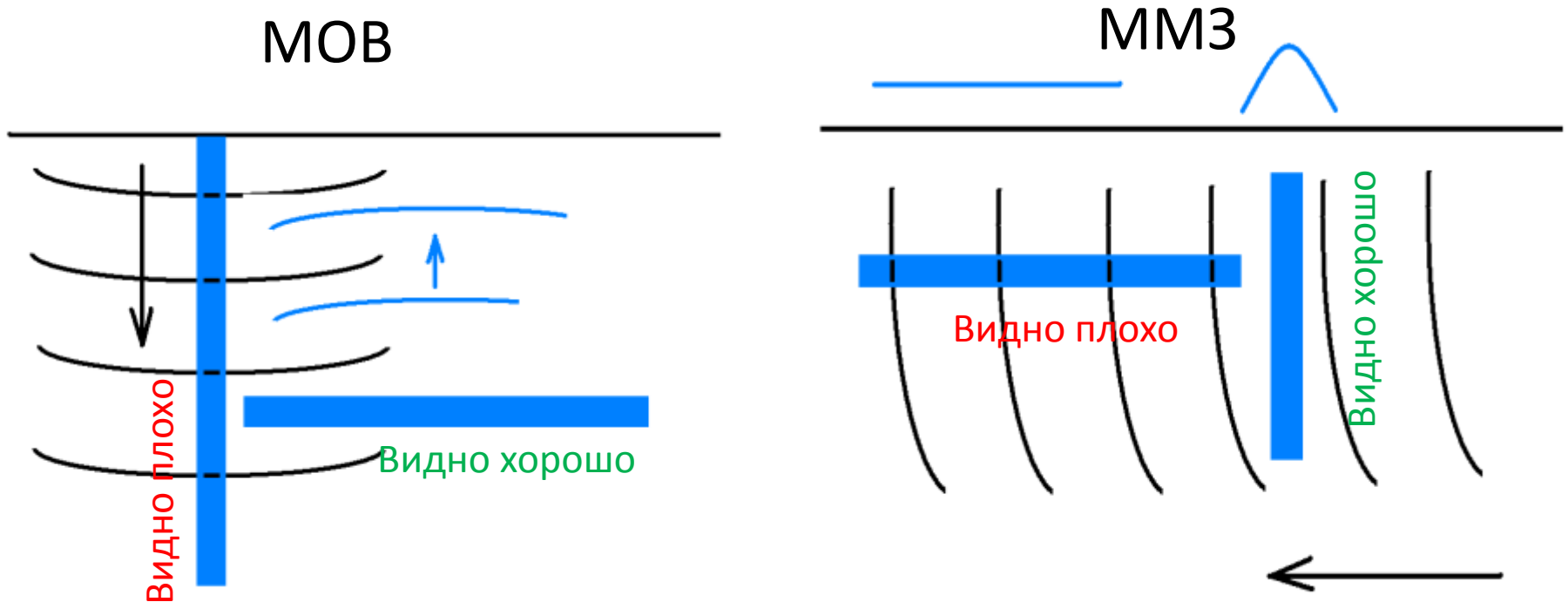
- Взаимодействие микросейсм с неоднородностями **происходит**, если последние расположены на **глубине, равной около 0.4 длины волны**.
- Если неоднородности расположены на **другой глубине ( $\neq 0.4\lambda$ )**, то **взаимодействие с микросейсмками этой частоты не происходит**.

# Исследование влияния коэффициента Пуассона



В случае 1:  $dVS = -20\%$ ,  $dVP = -20\%$ ; в случае 2:  $dVS = -20\%$ ,  $dVP = -35\%$ , в случае 3:  $dVS = -5\%$ ,  $dVP = -22\%$ .  
Коэффициентов Пуассона во включениях: 1:  $\sigma=0.25$  (такой же, как во вмещающей среде); 2:  $\sigma\approx 0$ ; 3:  $\sigma\approx 0$ .

Ввиду особенностей распространения волн, в ММЗ субвертикальные объекты являются более предпочтительными, чем субгоризонтальные.

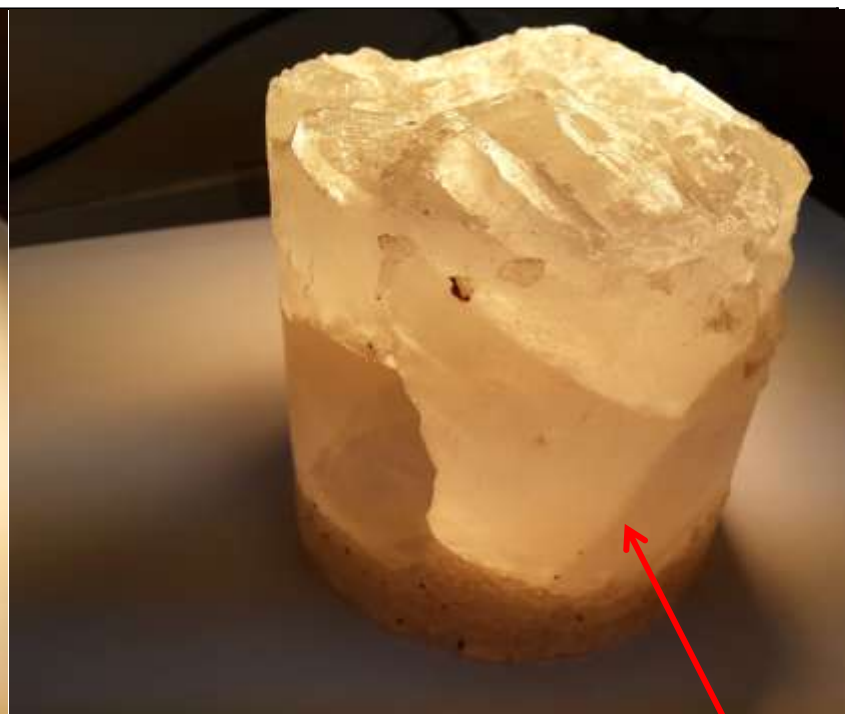


- 1) Не любой геологический объект обязательно будет «виден» с помощью **любого** сейсмического метода.
- 2) ММЗ может успешно выделять структуры, плохо доступные другим сейсмическим методам.

## Керн каменной соли в лучах света под разным углом



Ничего не наблюдается

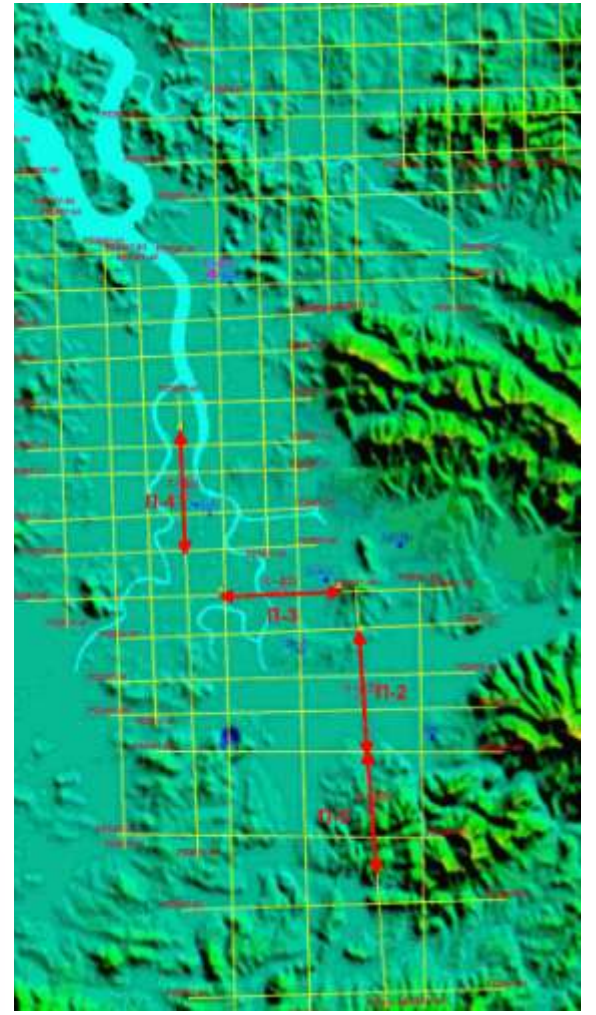
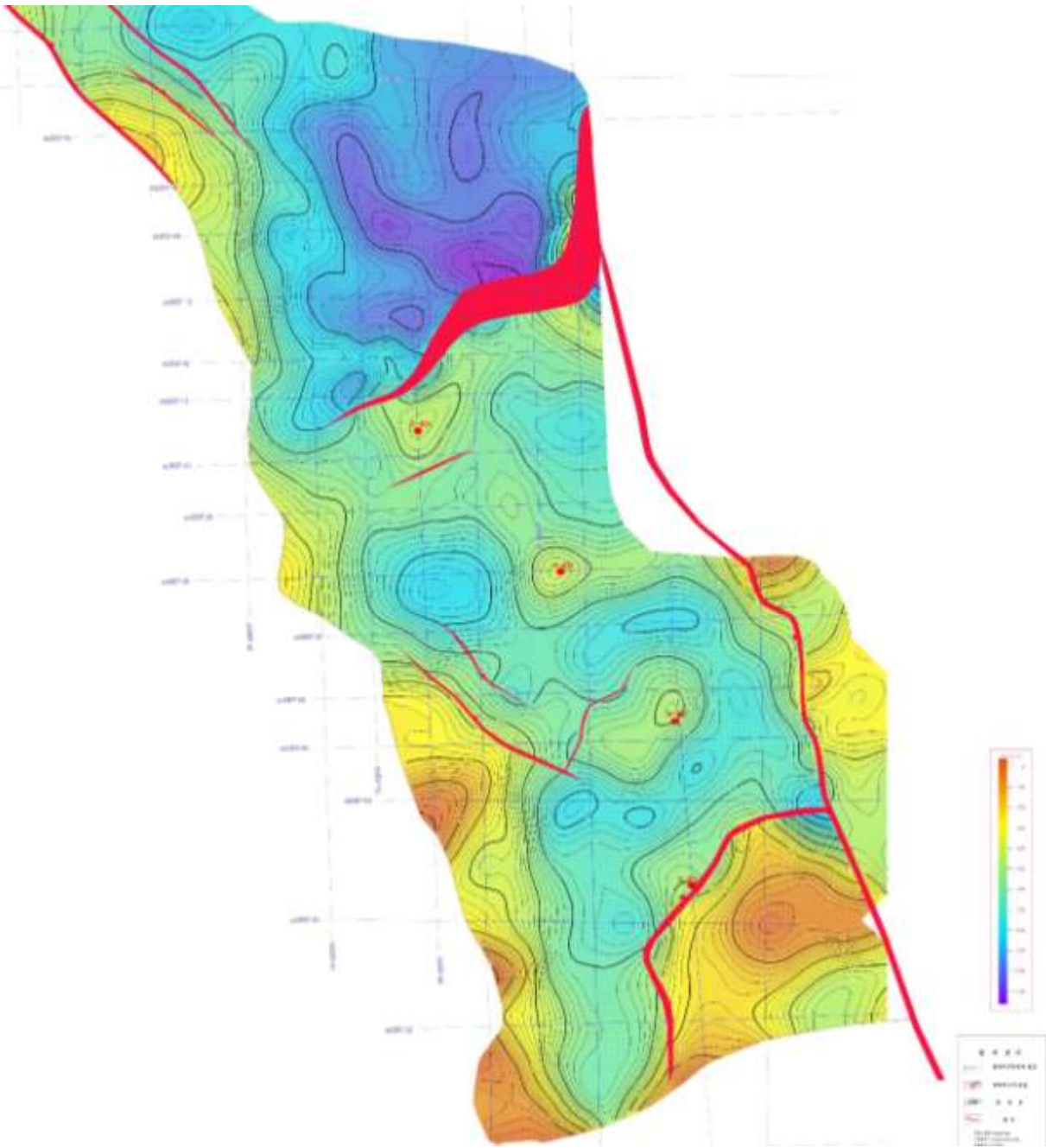


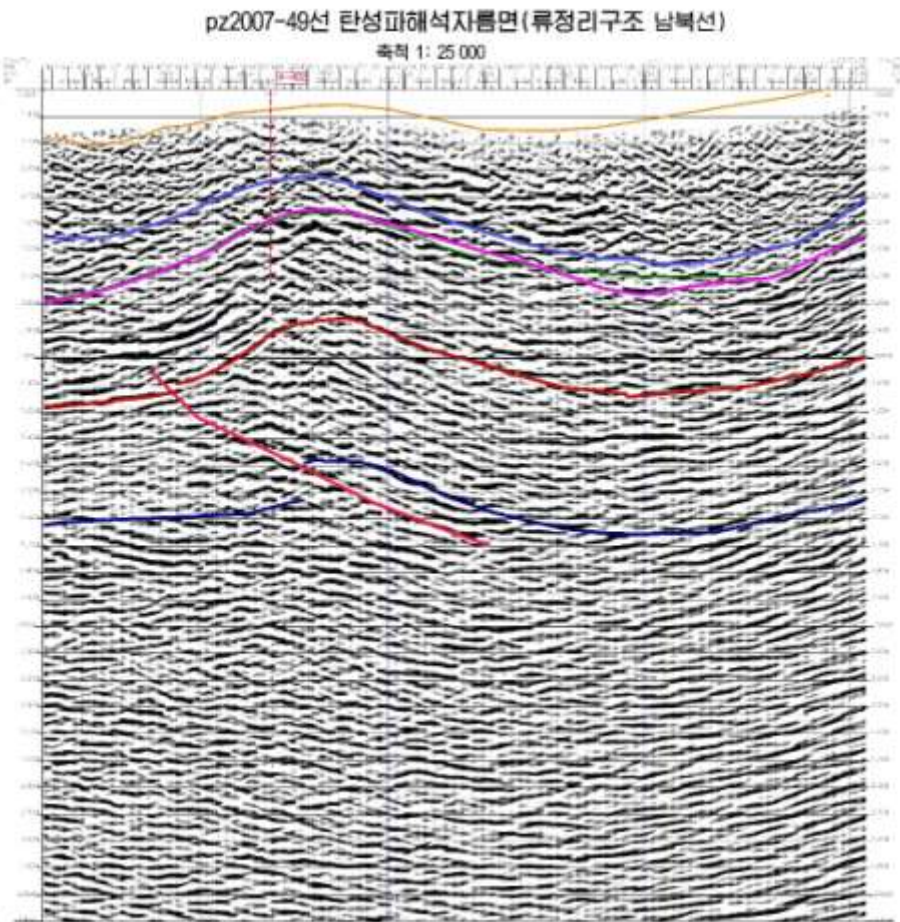
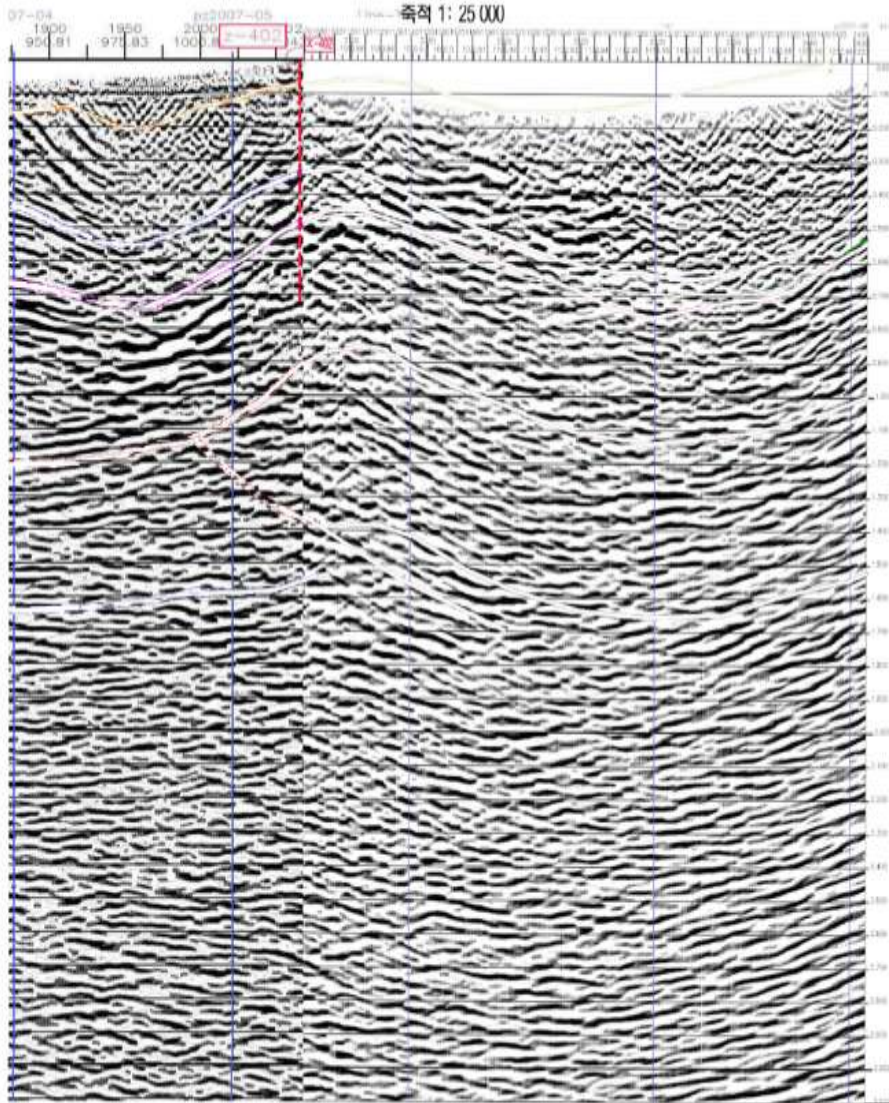
Наблюдается внутренняя поверхность разлома

## ТОЧНОСТЬ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

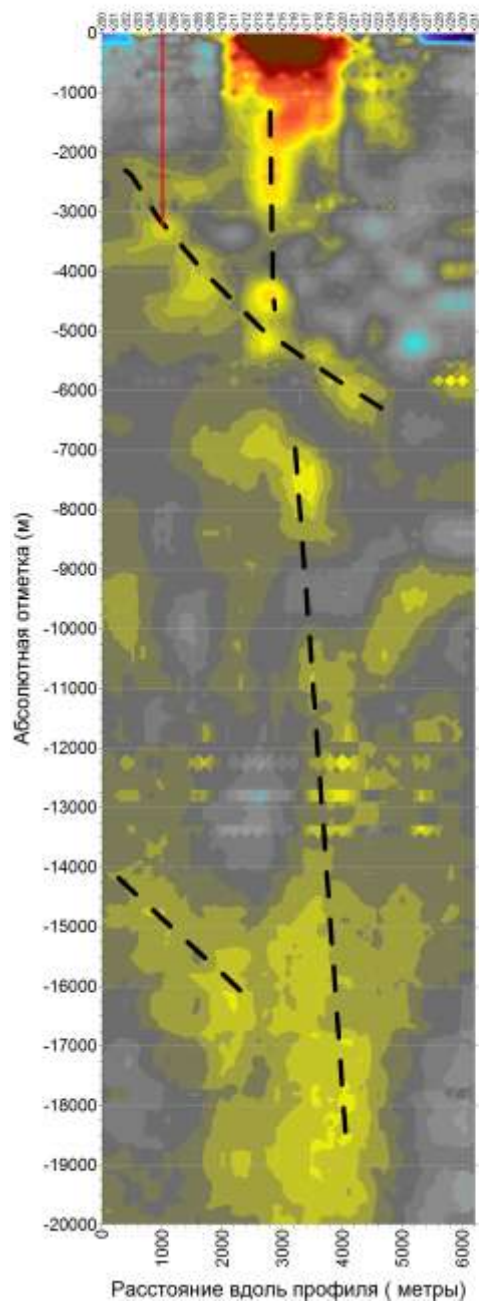
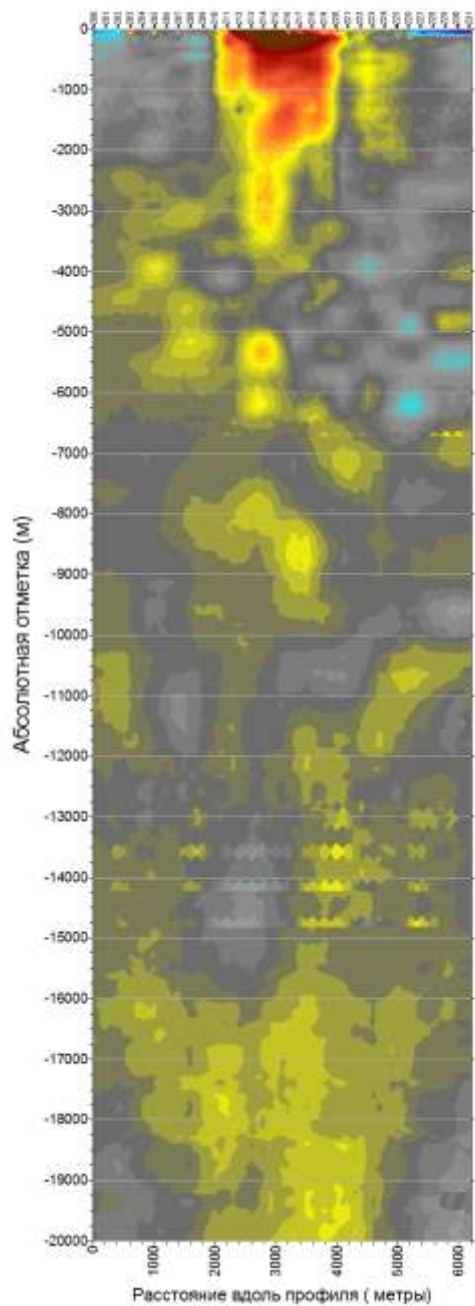
- Из результатов моделирования следует, что малая компактная скоростная неоднородность (с характерными размерами  $\sim 20\%$  от глубины залегания или более) может быть обнаружена ММЗ. В плане ее центр определяется без ошибок при достаточно длительном накоплении сигнала.
- Две отдельные неоднородности на глубине  $H$  создают в ММЗ отдельные изображения, если расстояние между ними  $\sim 0.5H$  или более (коэффициент Пуассона должен быть близким к нормальному ( $\sim 0.25$ )). Если коэффициент Пуассона близок к нулю, наблюдается «сверхразрешение».

**Тем не менее ММЗ способен обеспечить существенную независимую информацию!**

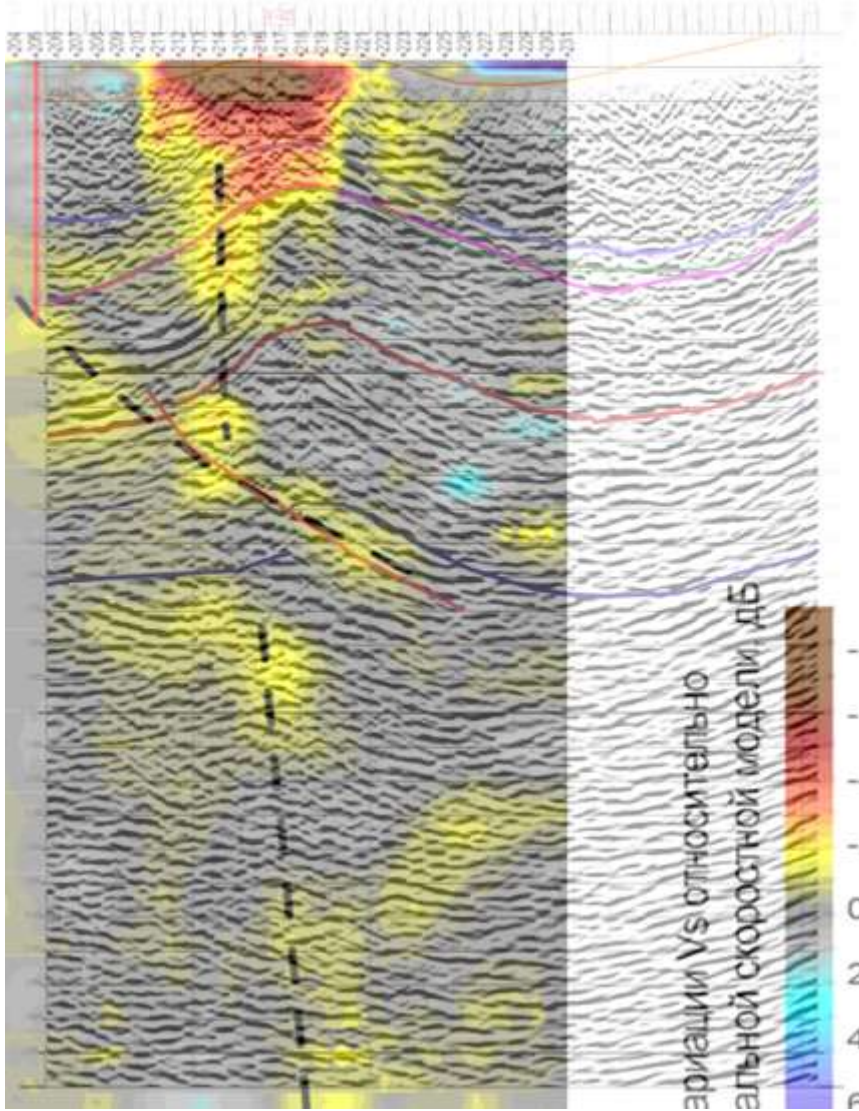








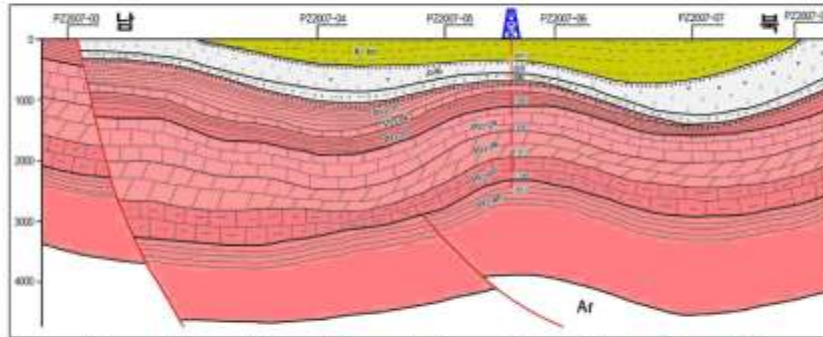
pz2007-49선 탄성파해석지름면(무정리구조 남북선)  
축척 1: 25 000



**Разрешение ММЗ существенно уступает МОВ-ОГТ, однако ММЗ обеспечивает собственную независимую информацию о параметрах разреза.**

# 류정리구조를 지나는 지질자름면도 (PZ2007-49선)

축척 1:25,000



## 구조요소

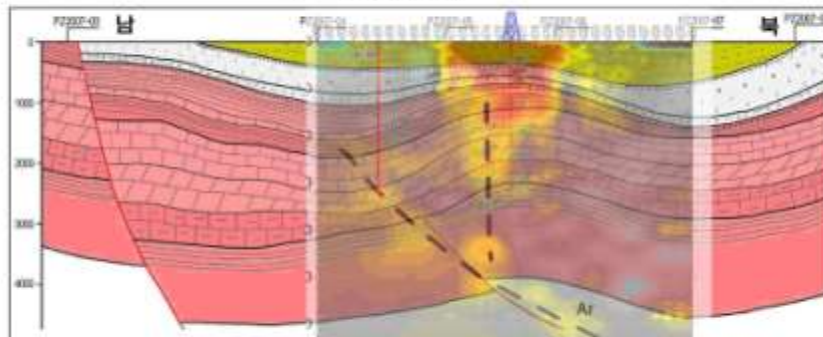
사당유군층상반  
구조정점심도: 1040m  
최저폐합선: 1690m  
폐합높이: 650m  
폐합면적: 15kl

※ 심도는 지표로부터  
계산된 수직심



# 류정리구조를 지나는 지질자름면도 (PZ2007-49선)

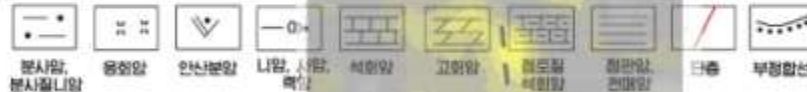
축척 1:25,000



## 구조요소

사당유군층상반  
구조정점심도: 1040m  
최저폐합선: 1690m  
폐합높이: 650m  
폐합면적: 15kl

※ 심도는 지표로부터  
계산된 수직심

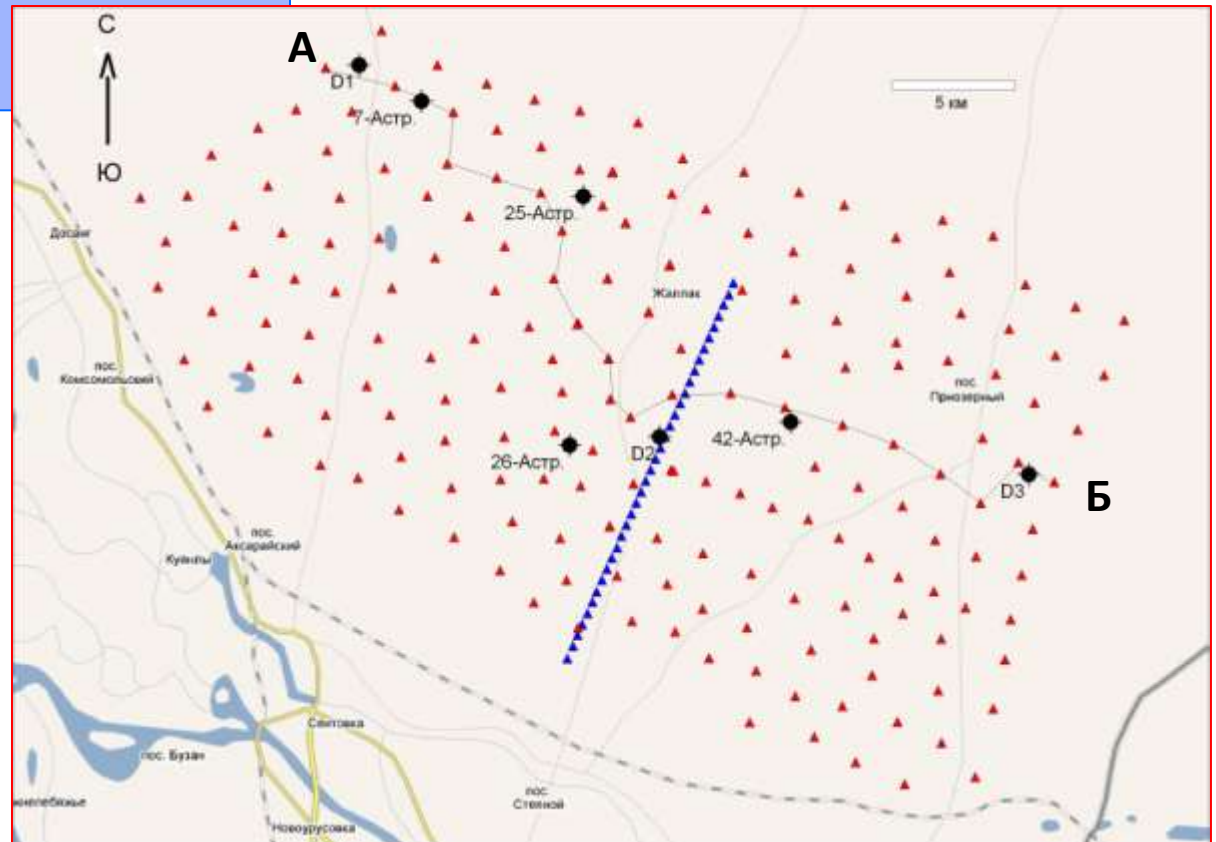
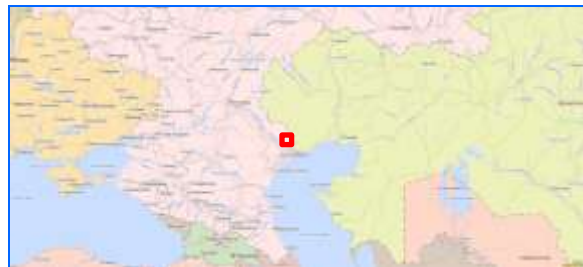


**ЕЩЕ НЕСКОЛЬКО ПРИМЕРОВ  
НЕЗАВИСИМОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ММЗ**

# Астраханское газо-конденсатное месторождение (АГКМ)



## Площадная и профильная съемка ММЗ



пикеты ММЗ по сети



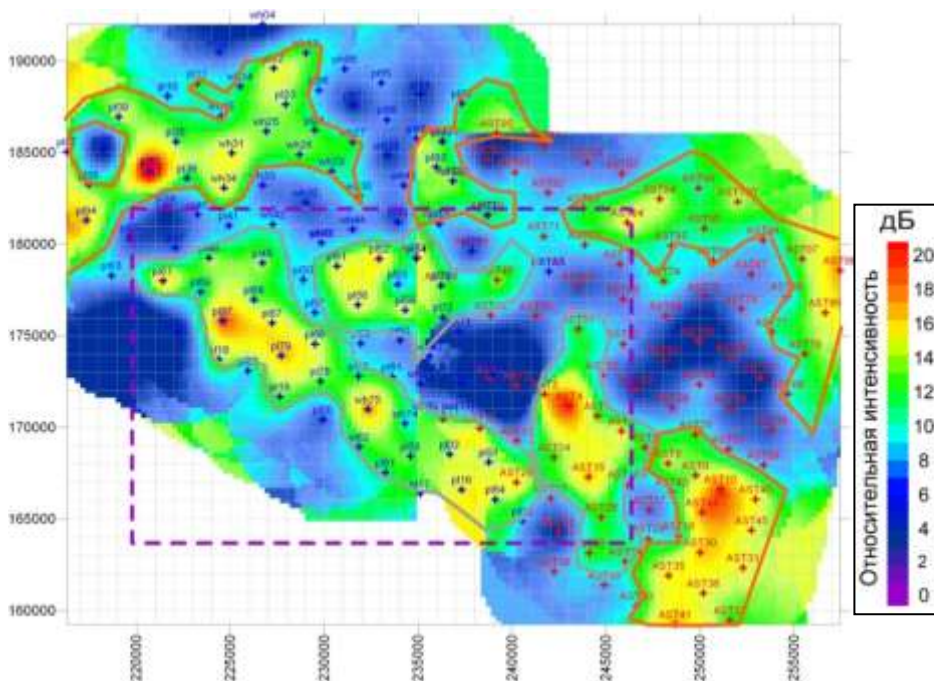
детальный профиль ММЗ



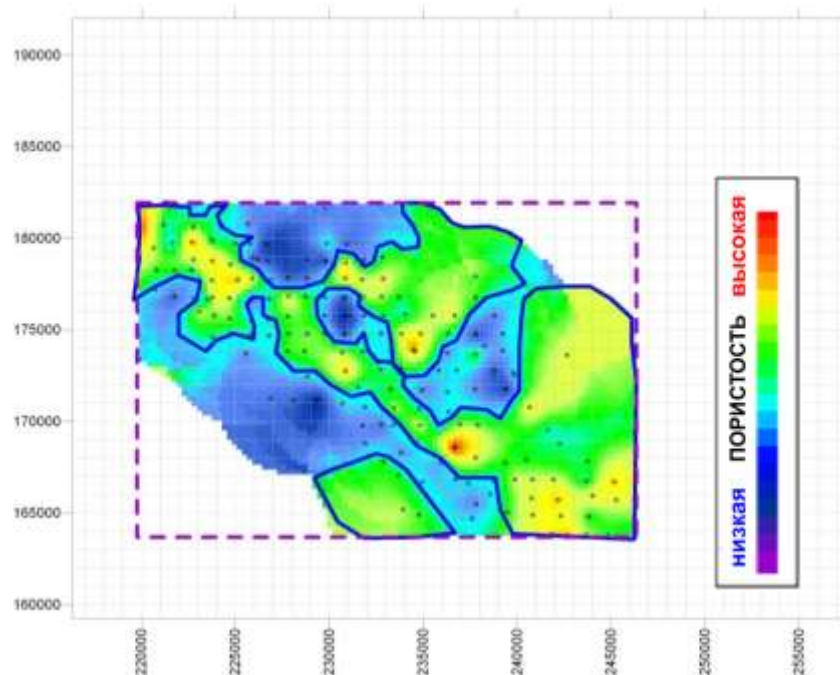
скважины, по которым построен геологический разрез А-Б (см. ниже)

# Сравнение данных по пористости с результатами ММЗ

амплитуды микросейсм для  
глубины 4.03 км

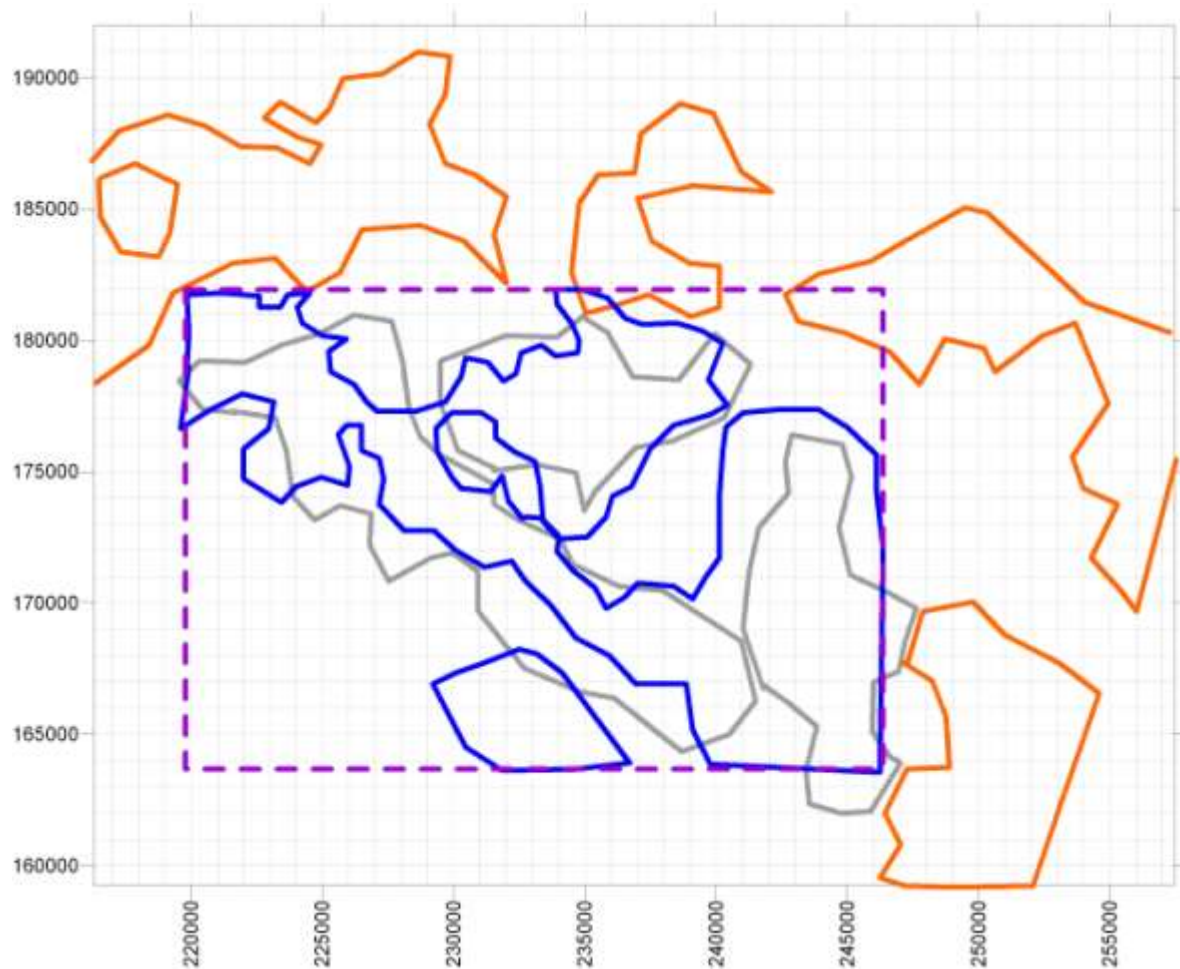


средняя пористость по  
измерениям в скважинах в  
диапазоне глубин 4-4.1 км






Выявлено хорошее пространственное совпадение областей с высокими амплитудами микросейсм (по данным ММЗ) и с высокой пористостью пород (по данным бурения)

## Сравнение зон высокой пористости с данными ММЗ на глубине 4 км



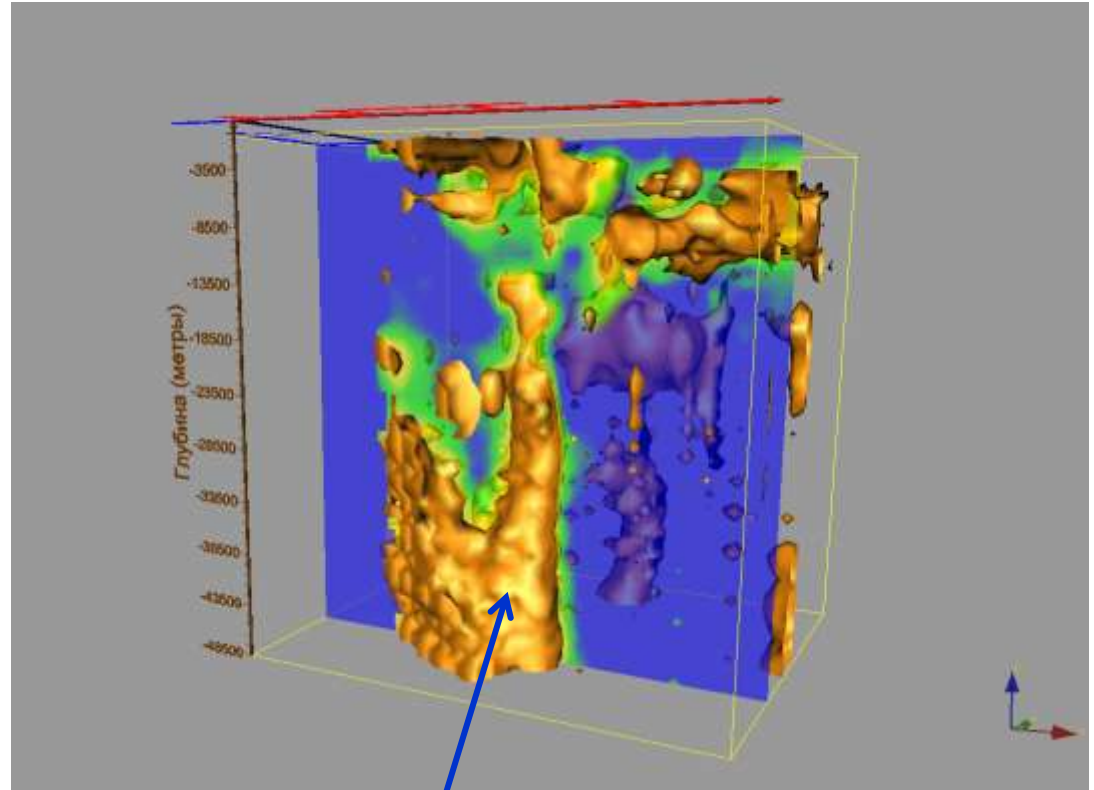
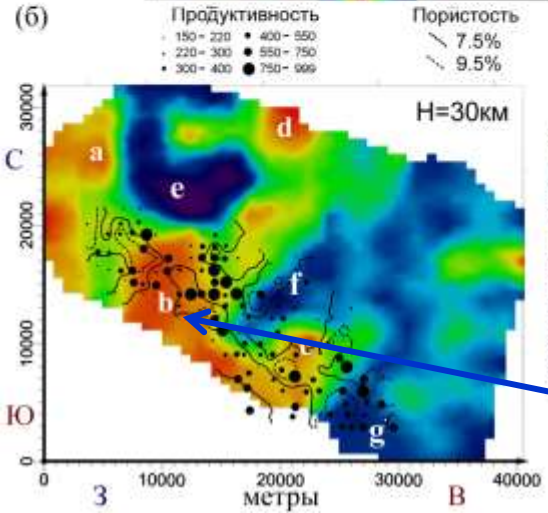
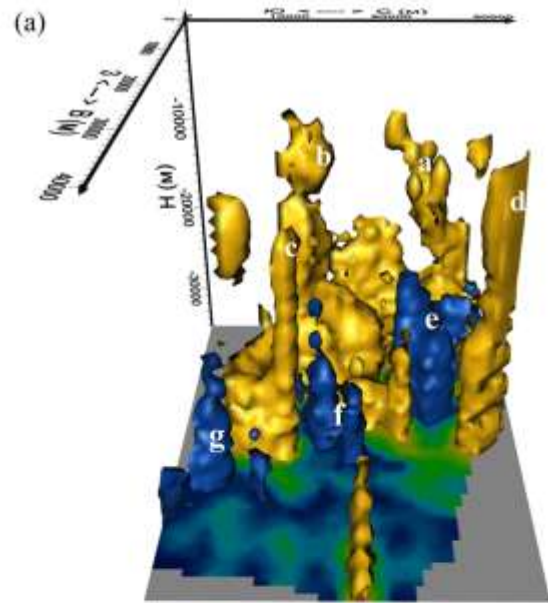
Вероятность попадания в область высокой пористости в зоне обучения при случайном выборе места бурения: **42%**

Вероятность попадания в зону высокой пористости при подборе места бурения с учетом данных микросейсмического зондирования: **74%**

-  область высокой пористости по данным бурения
-  область высоких амплитуд микросейсм в пределах разведанного участка
-  область высоких амплитуд микросейсм за пределами разведанного участка (перспективы)

**При использовании ММЗ вероятность попадания скважин в область высокой пористости возрастает с 42 до 74%**

# Выявление глубинных зон под Астраханским ГКМ



**ГИПОТЕЗА:**

Помимо пористости на продуктивность влияет геометрия флюидных каналов.

Под Астраханским ГКМ выявлена глубинная (>30 км) зона повышенной нарушенности пород (глубинный разлом)

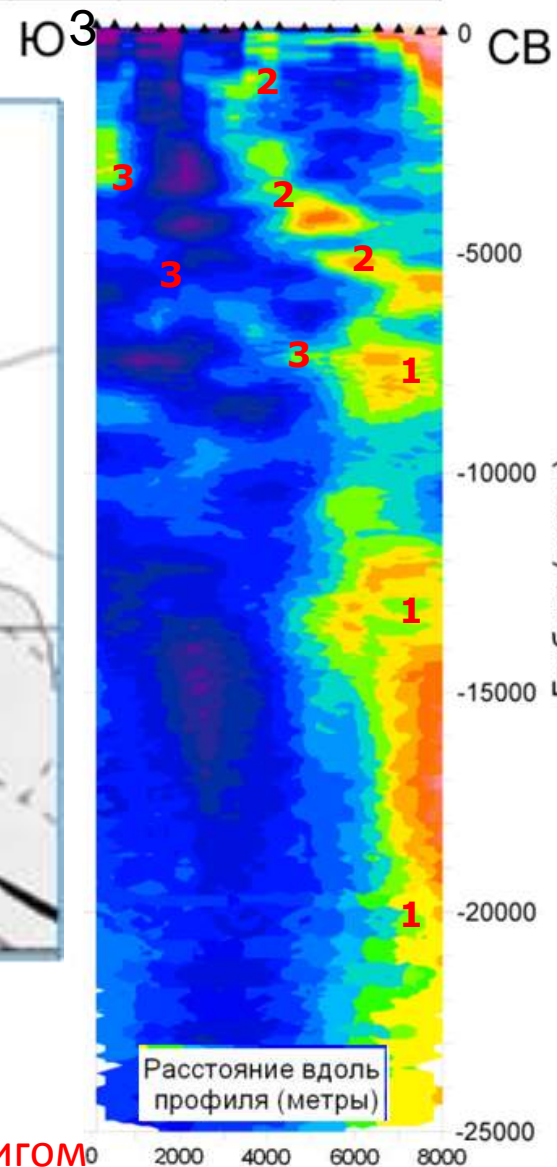
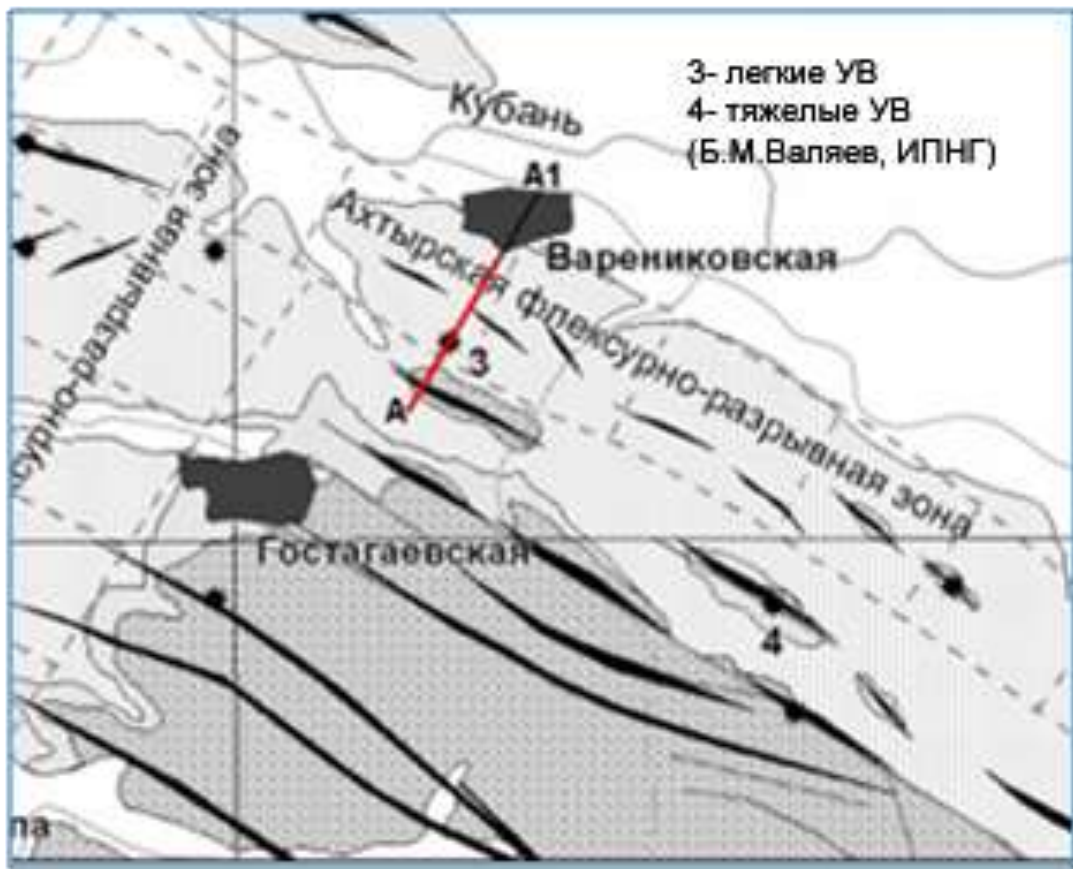


# Карта нефтегазоносности Западного Предкавказья

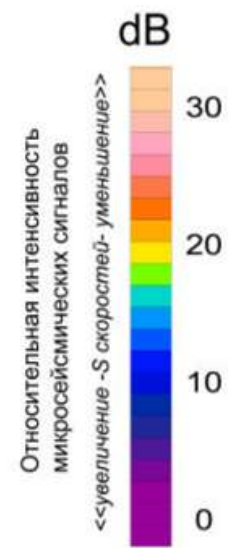


профиль ММЗ

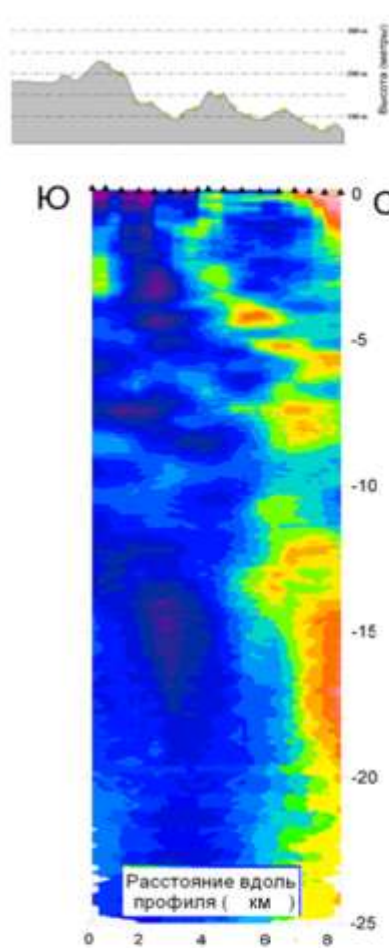
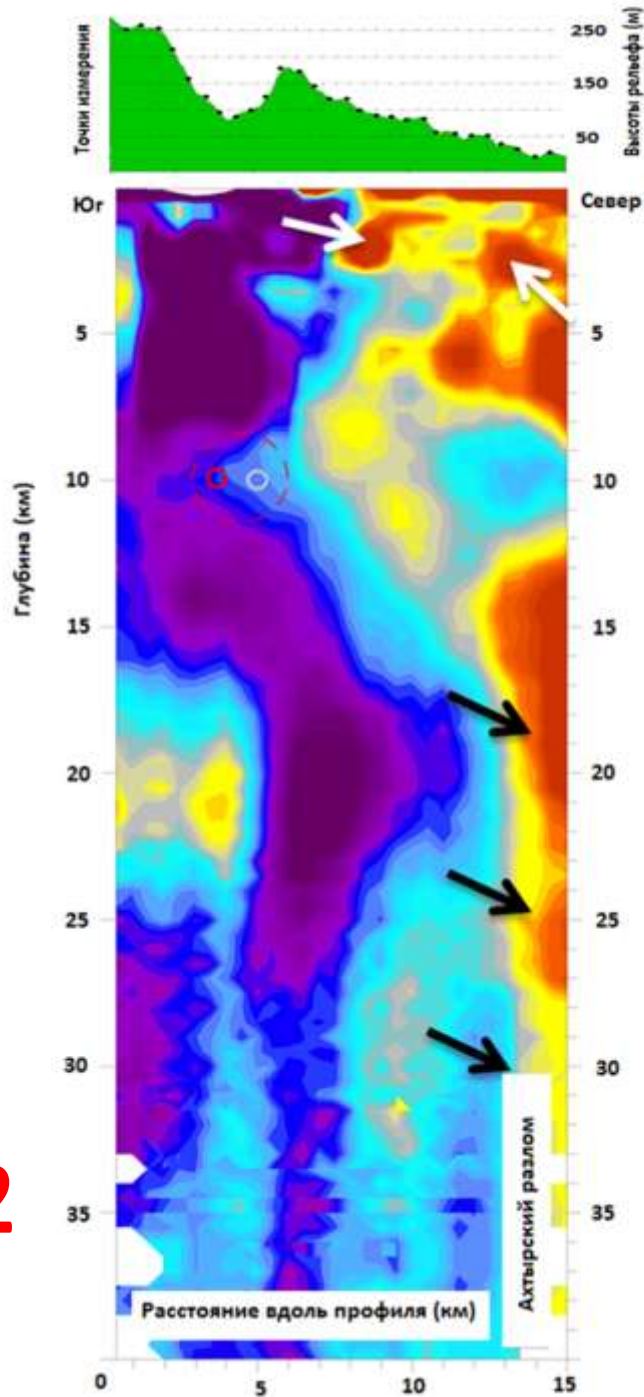




- 1** – зона пониженных скоростей, ассоциируемая с Ахтырским разломом;
- 2** – зона пониженных скоростей, ассоциируемая с питающим разломом вулкана Шуго;
- 3** – зона пониженных скоростей, ассоциируемая с Гладковским разломом

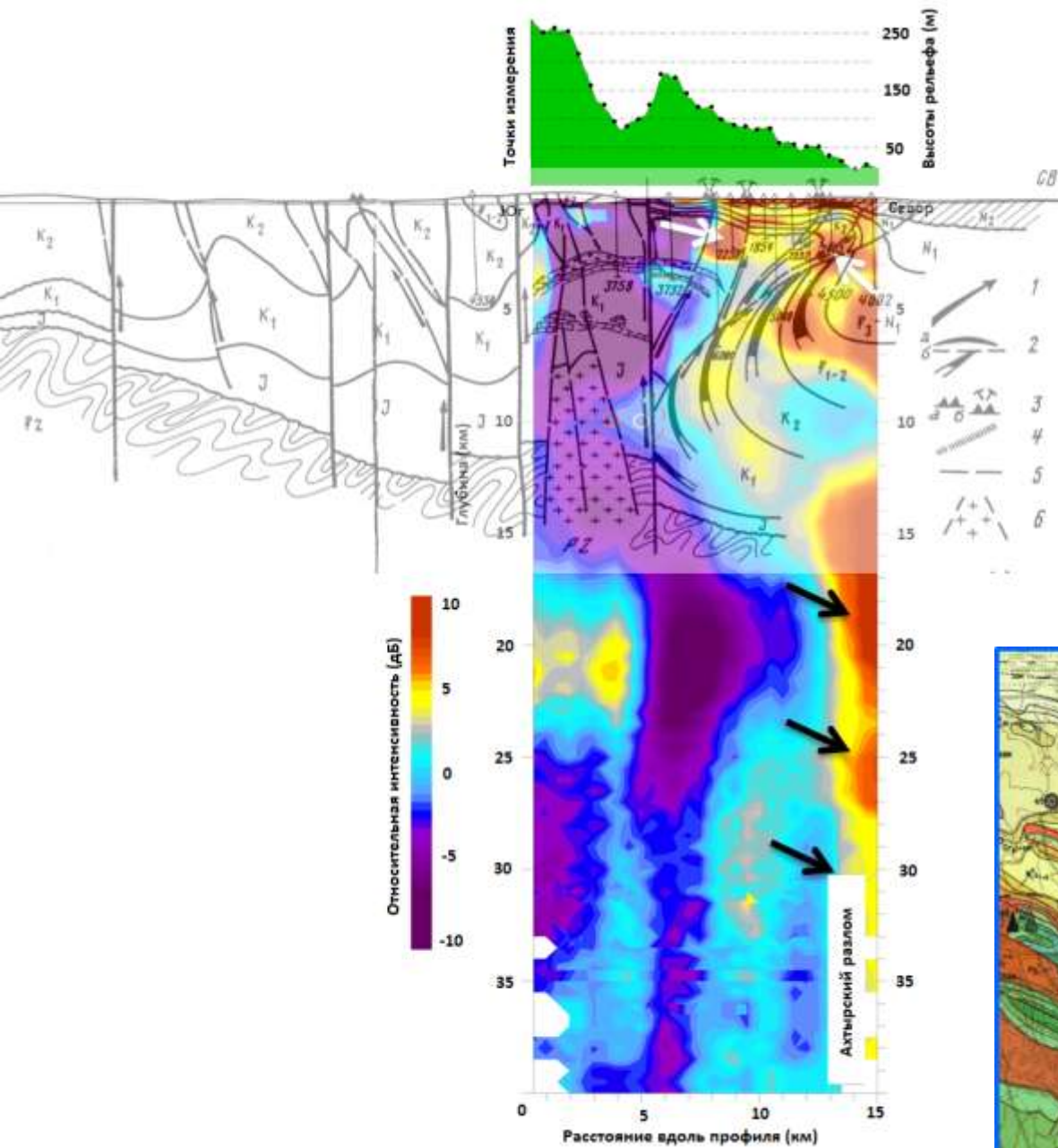


Условия коллизии и надвига с левосторонним сдвигом



- ✓ Микросейсмический **профиль 2** на своем северном участке пересекает нефтяное месторождение.
- ✓ Области продуктивных залежей УВ проявляются в виде зон повышенных амплитуд микросейсмического поля.
- ✓ На разрезе видна структура обуславливающего глубинного разлома.
- ✓ Листрические структуры могут интерпретироваться как флюидные каналы (по аналогии с профилем 1).

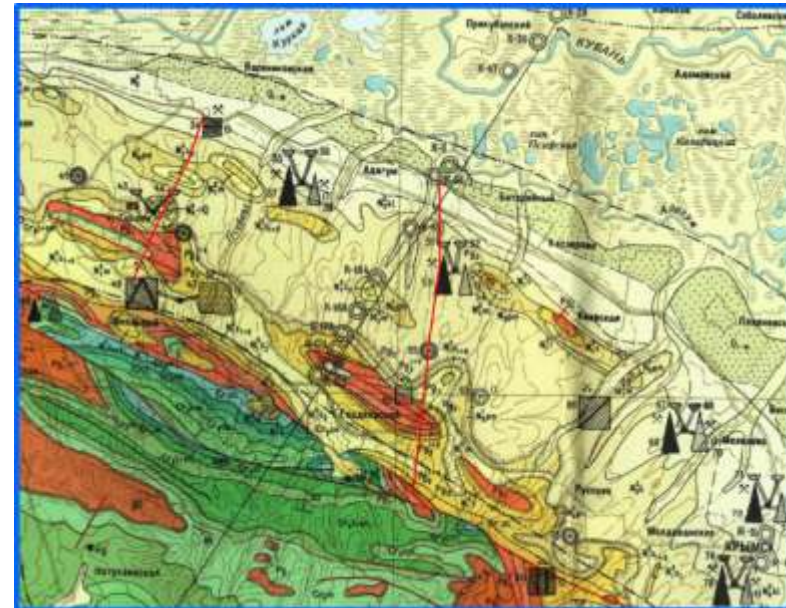




Летавин А.И., Перерва В.М Разрывная тектоника и перспективы нефтегазоносности краевой зоны Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1987

Рис. 6. Геологические разрезы вкрест простирания Северо-Западного Кавказа и его отдельных структурных зон: а — принципиальный геологический разрез (1—1)

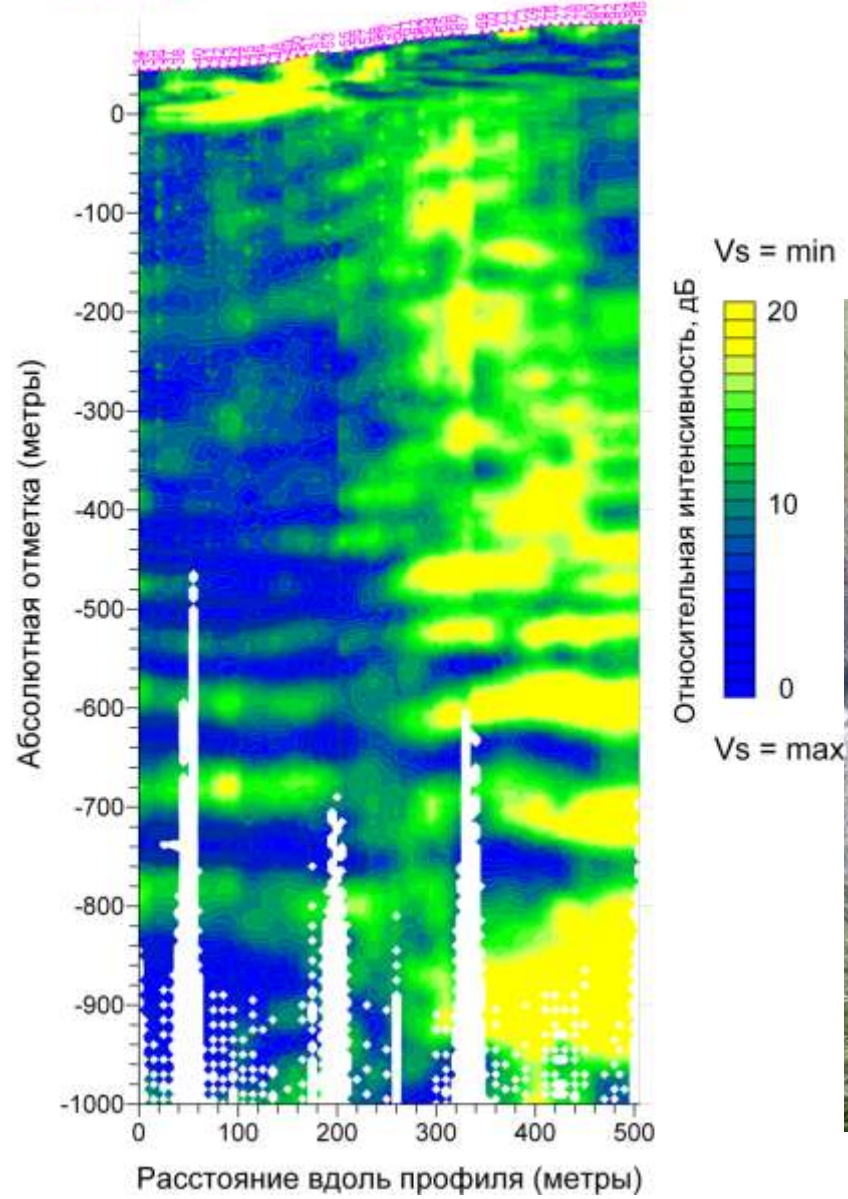
1 — предполагаемое направление миграции пластовых флюидов (в том числе УВ); 2 — газонефтяные залежи: а — установленные, б — предполагаемые; 3 — грязевые вулканы: а — древние, б — современные; 4,5 — разрывные нарушения: 4 — региональные, 5 — локальные; 6 — предполагаемые интрузии



3

Север

Юг



### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗЛОМА

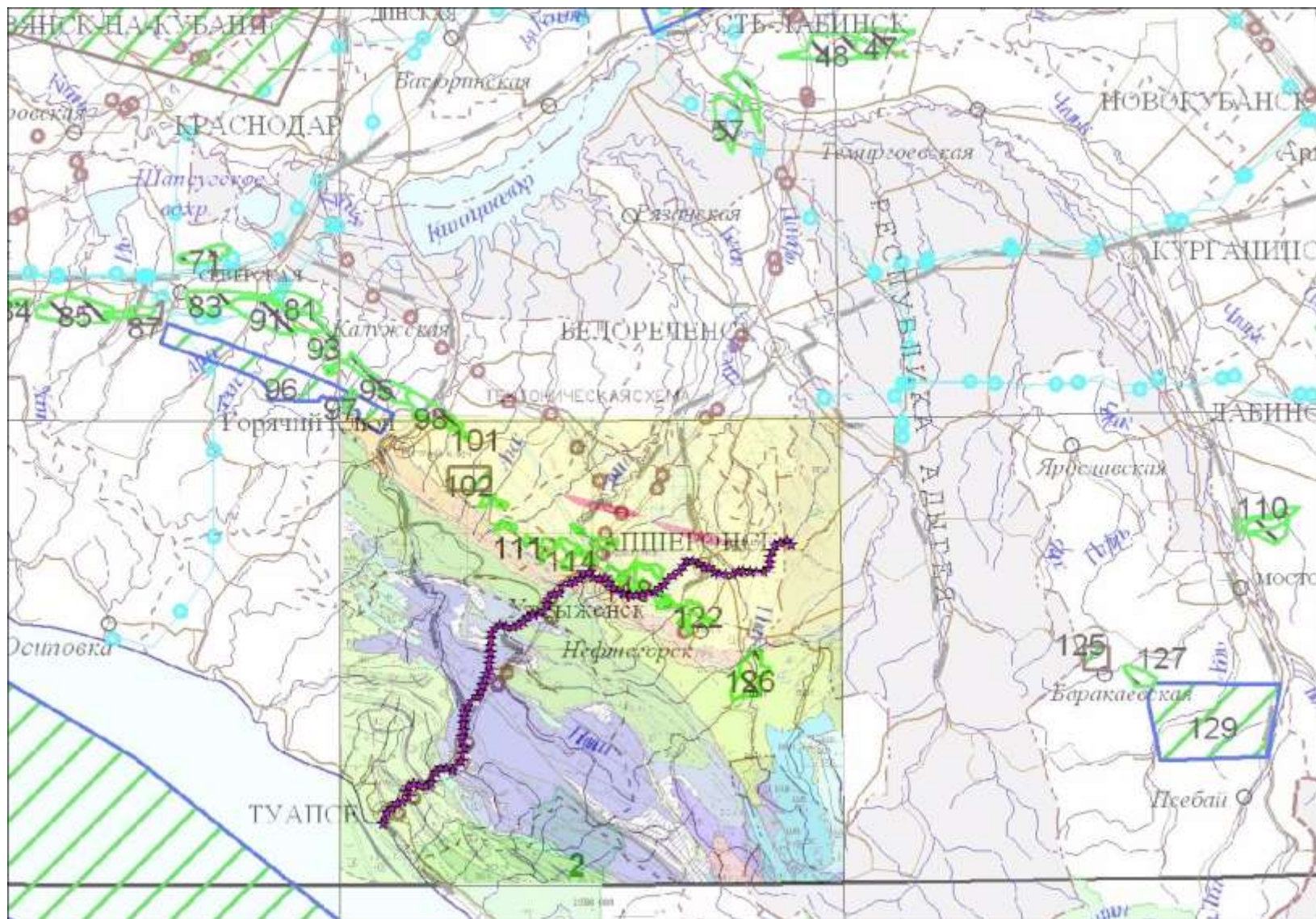


**ММЗ позволяет по-новому взглянуть  
на стратегию разведки и поиска УВ:**

**во-первых, поиск системы  
флюидодинамических каналов и,**

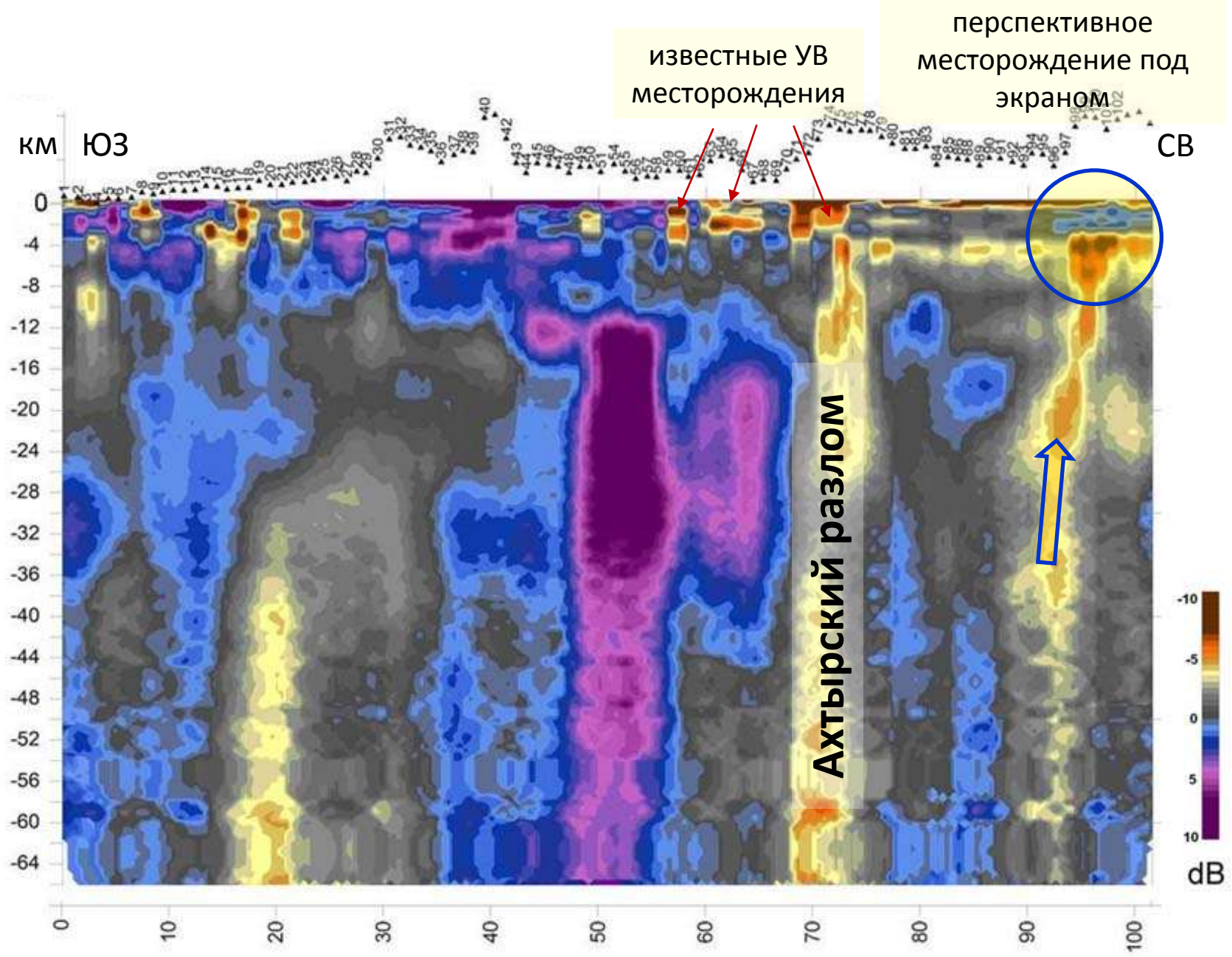
**во-вторых, поиск ловушек,  
ассоциированных с ними.**

# Краснодарский край, 2013

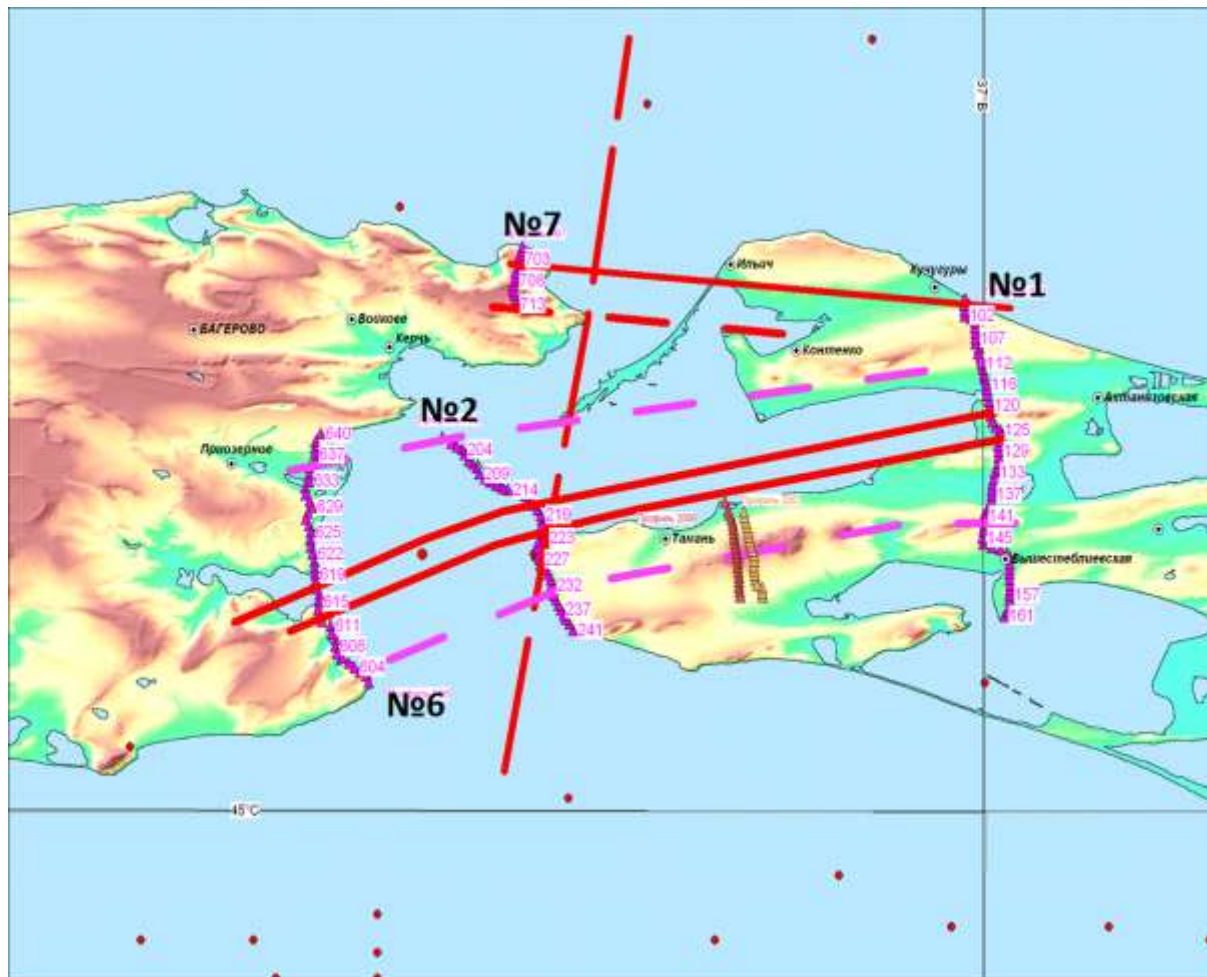




# Сейсмический профиль через Кавказ и Предкавказье

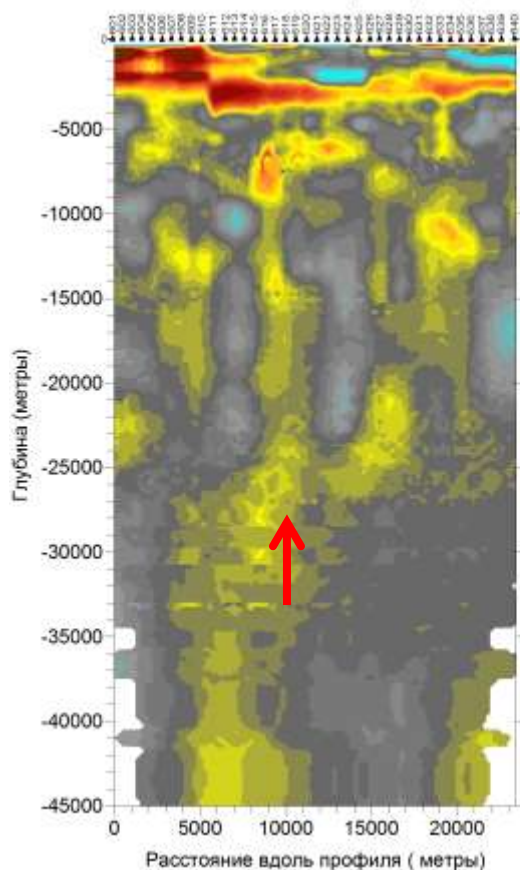


# ЗОНА СОЧЛЕНЕНИЯ КРЫМ-КАВКАЗ

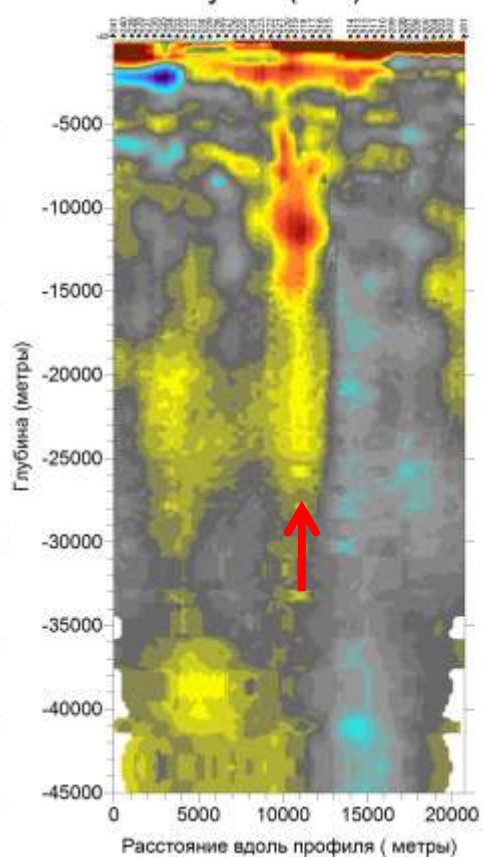


Положение профилей ММЗ в районе проектируемого объекта и карта рельефа.  
Треугольники – пункты расстановки сейсмостанций. Красные кружки– последние слабые землетрясения.  
Сплошные красные линии- выделенные по ММЗ активные разломы в фундаменте. Пунктирные красные линии- предполагаемые разломы в фундаменте и разломы по независимым данным. Пунктирные лиловые линии- выделенные по ММЗ опережающие зоны основного(сдвигового) разлома с цепочками кулис и локальных участков растяжения в осадочной части разреза.

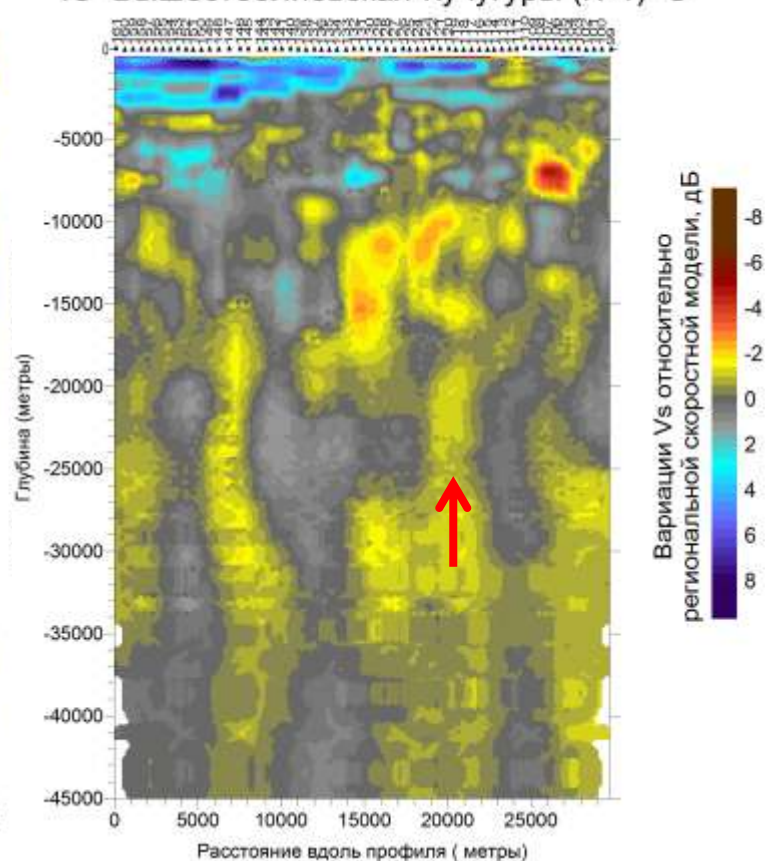
Ю Заветное - Керчь (№6) С



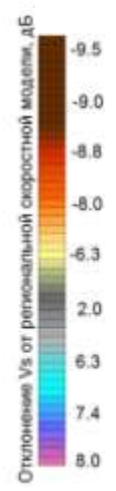
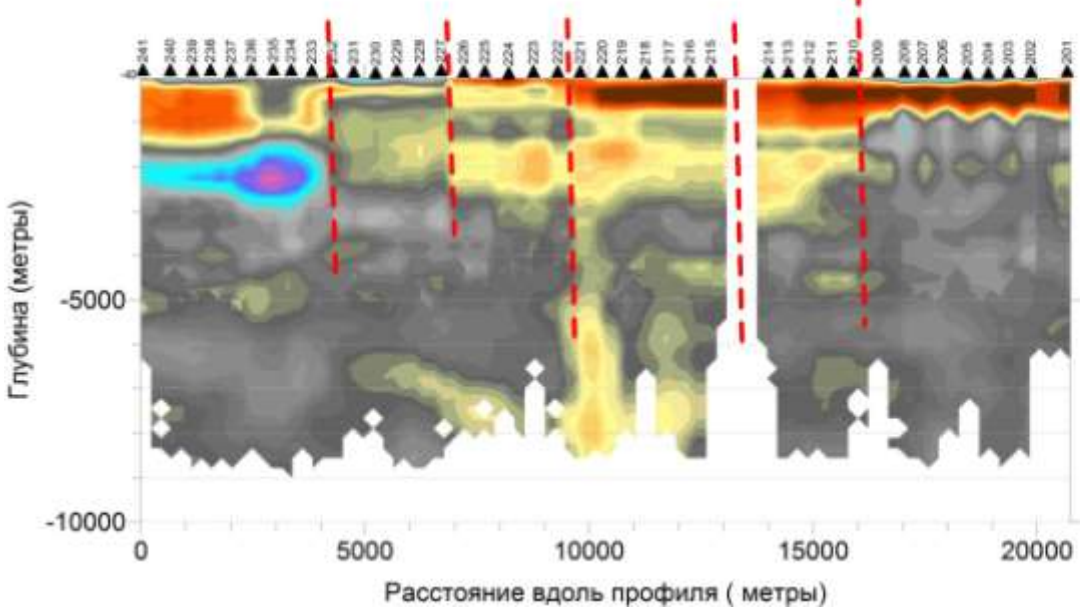
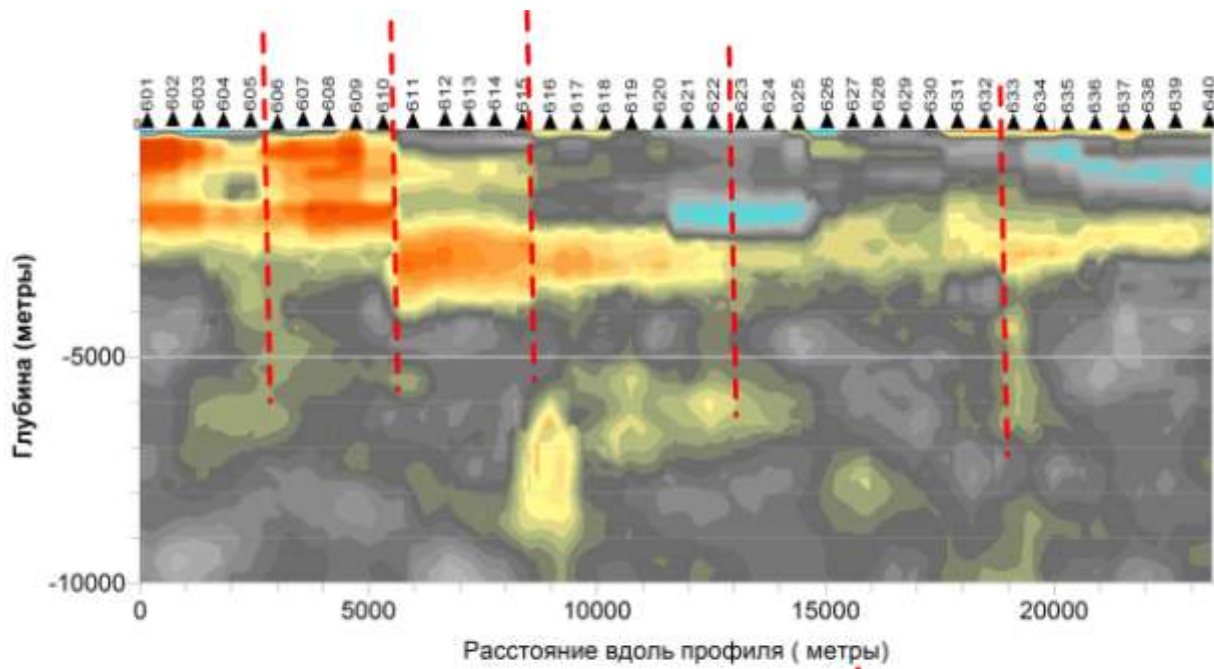
Ю Тузла (№2) С



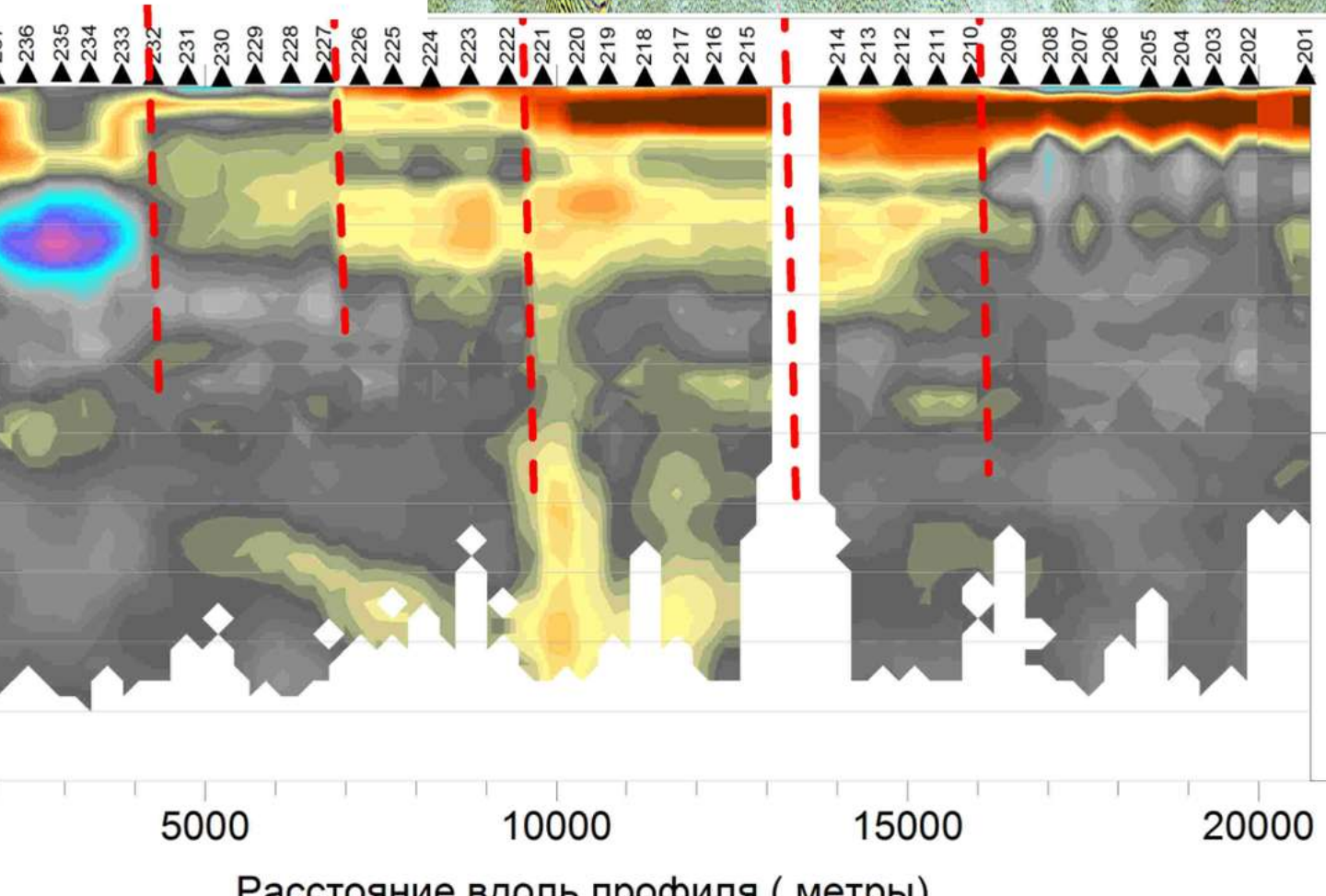
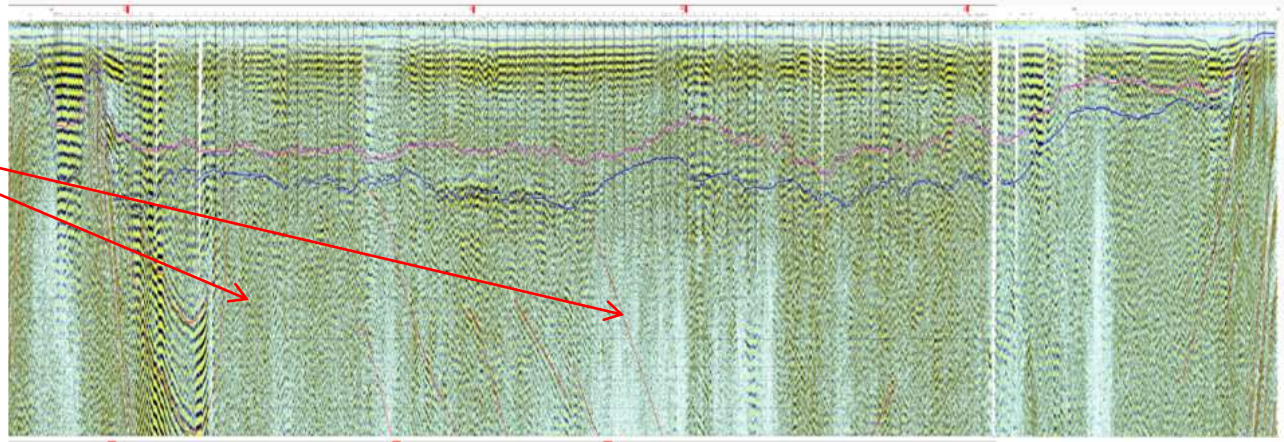
Ю Вышестеблиевская-Кучугуры (№1) С



Вариации  $V_s$  относительно  
региональной скоростной модели, дБ



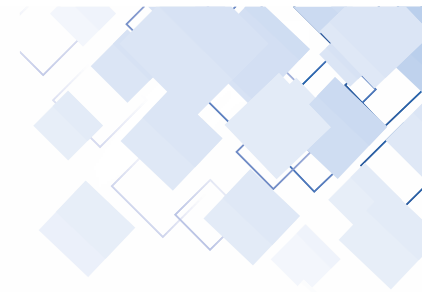
Высокая  
газонасыщенность !



**Метод микросейсмического  
зондирования- перспективный  
инструмент в задачах поиска и  
разведки полезных ископаемых**

**Благодарю за внимание !**





# **ММЗ на МО-У месторождениях Стрельцовского рудного поля**

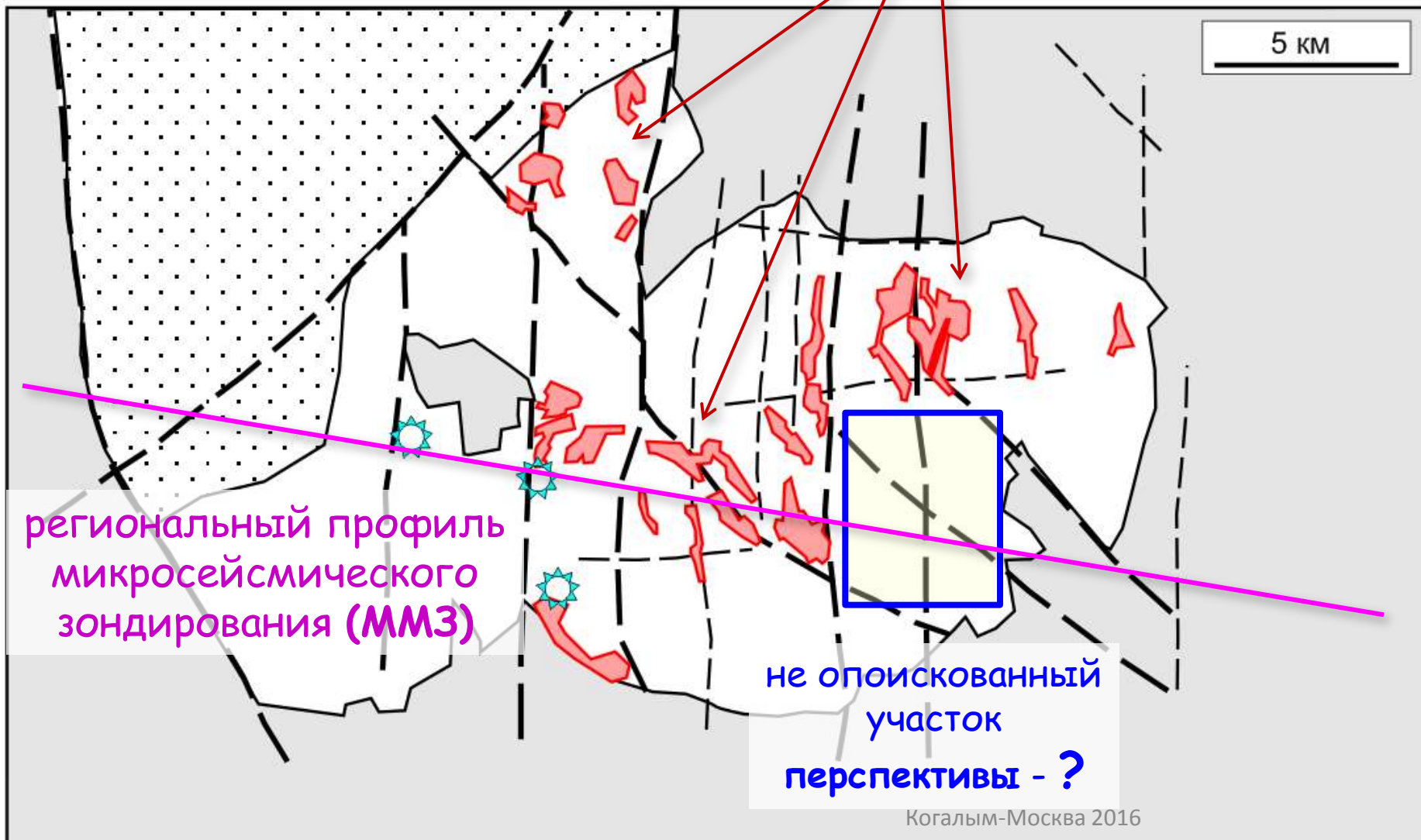




Когалым-Москва 2016

# Стрельцовское урановорудное поле (Восточное Забайкалье)

Месторождения (250 тыс. тонн U)

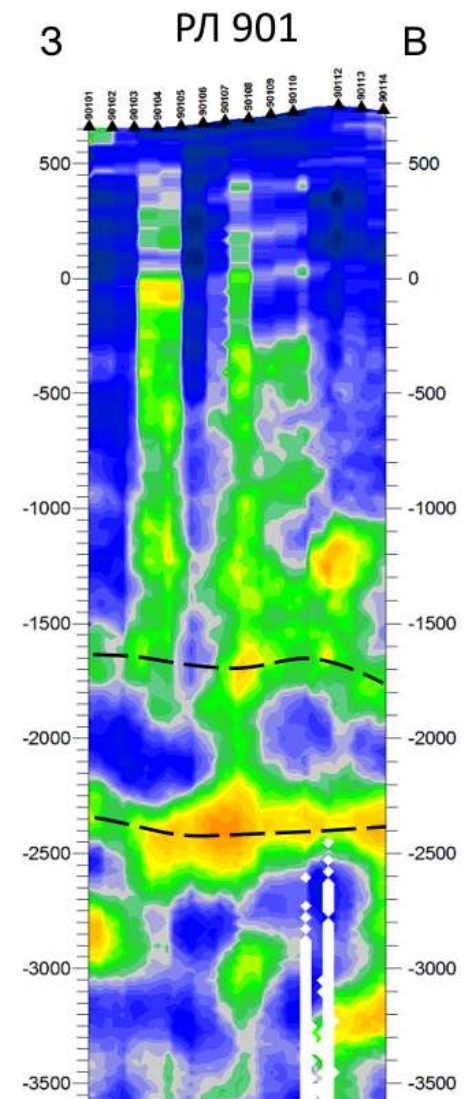
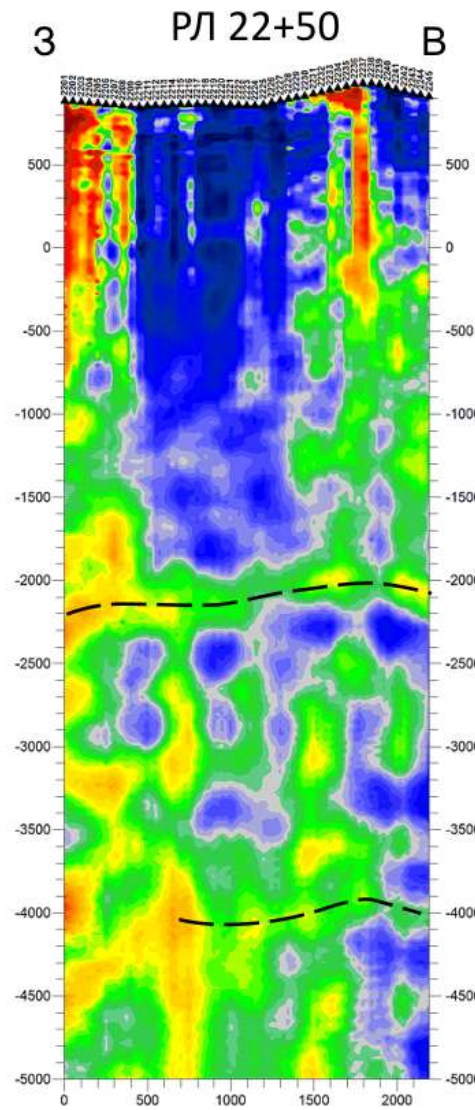
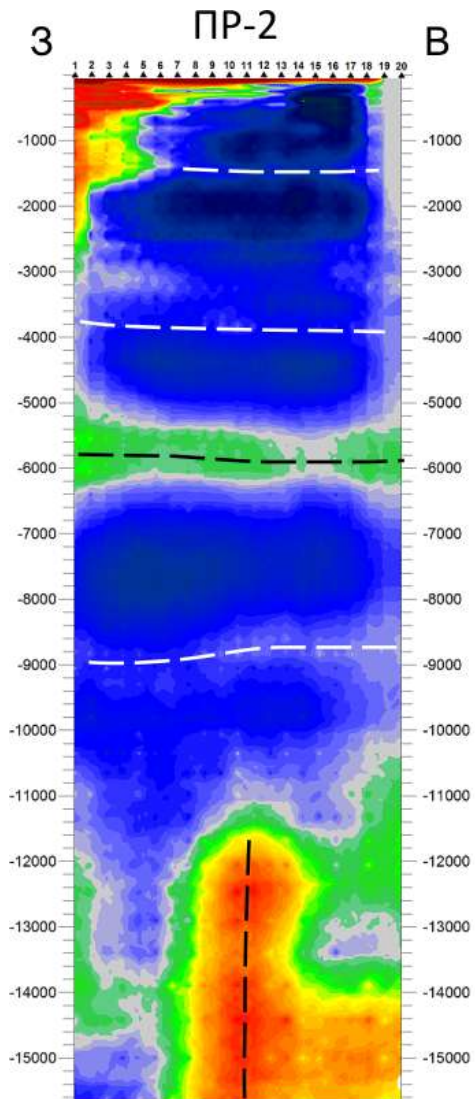


региональный профиль  
микросейсмического  
зондирования (ММЗ)

не опоскованный  
участок  
перспективы - ?



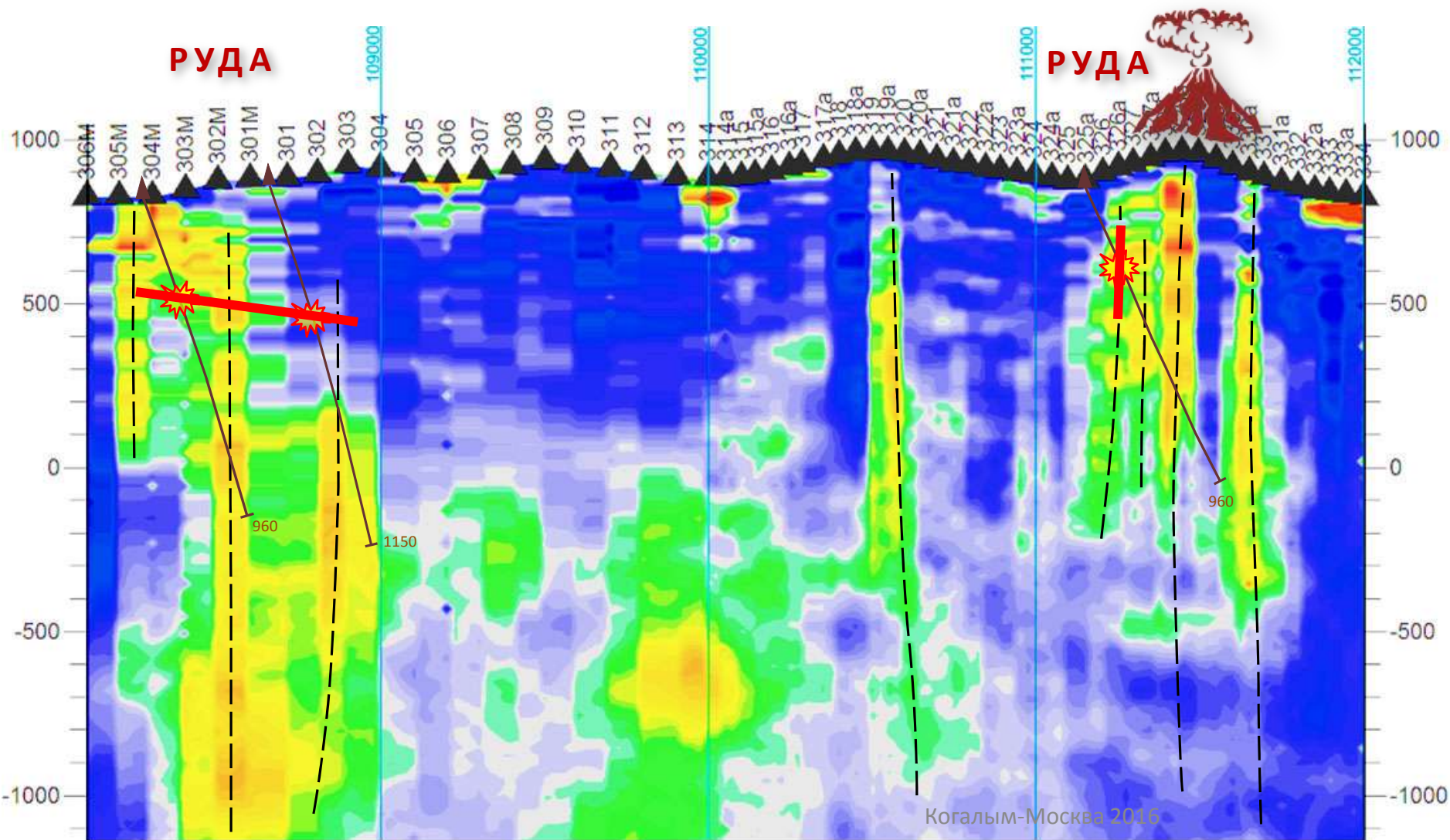
# Полгие и субвертикальные структуры в сейсмических полях

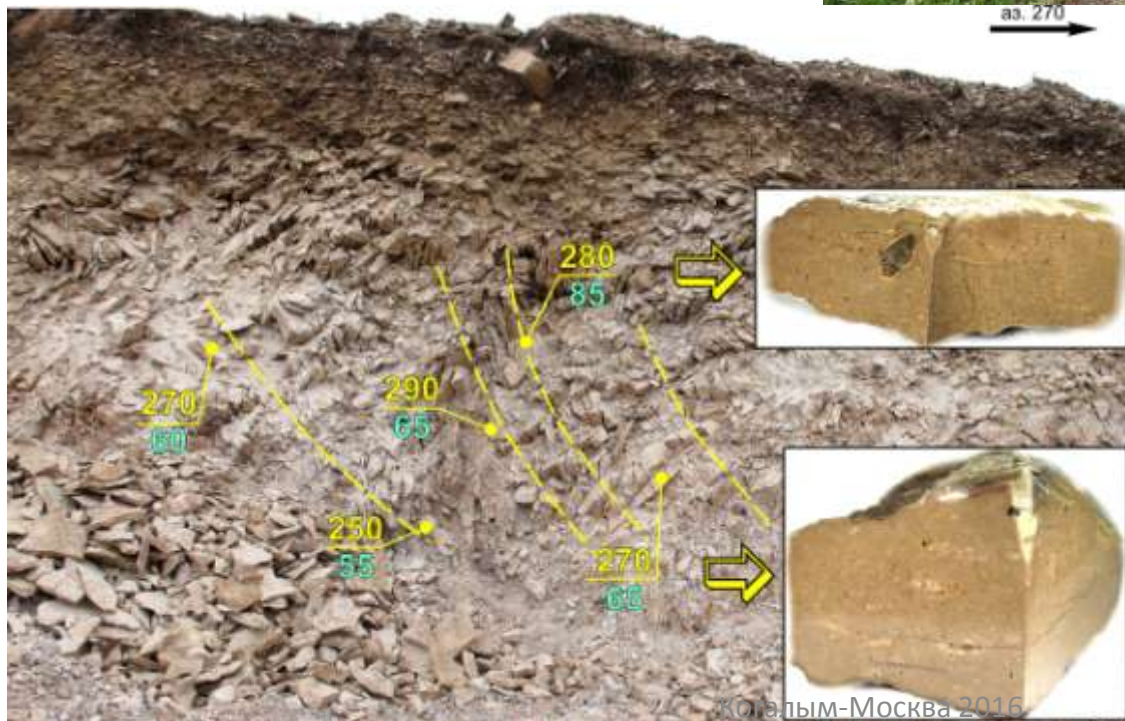


**В сейсмических полях лучше выделяются субвертикальные разломы, однако и пологие структуры земной коры также заметны**

# Детальный микросейсмический разрез (поисковый участок)

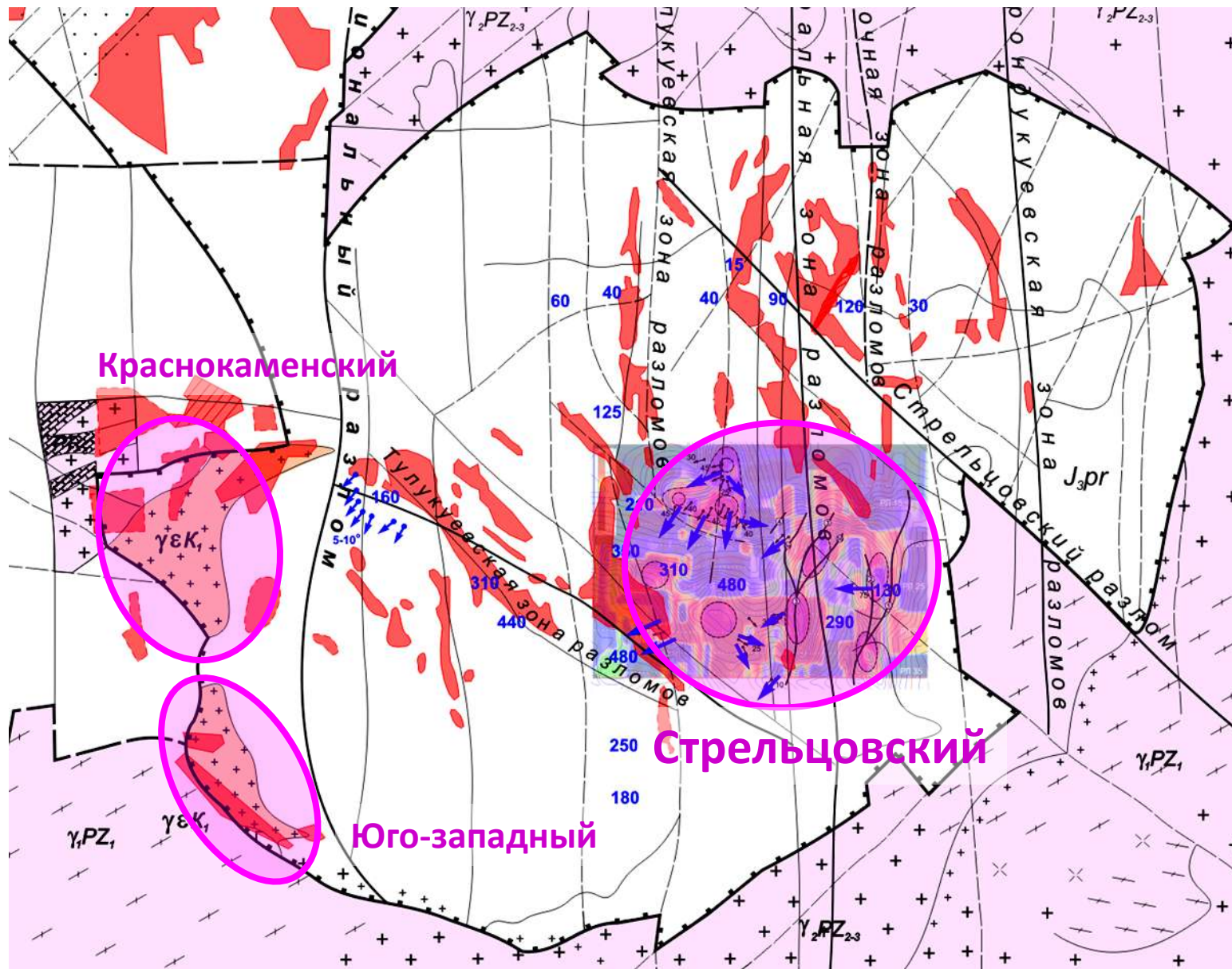
Обнаружен неизвестный ранее вулкан



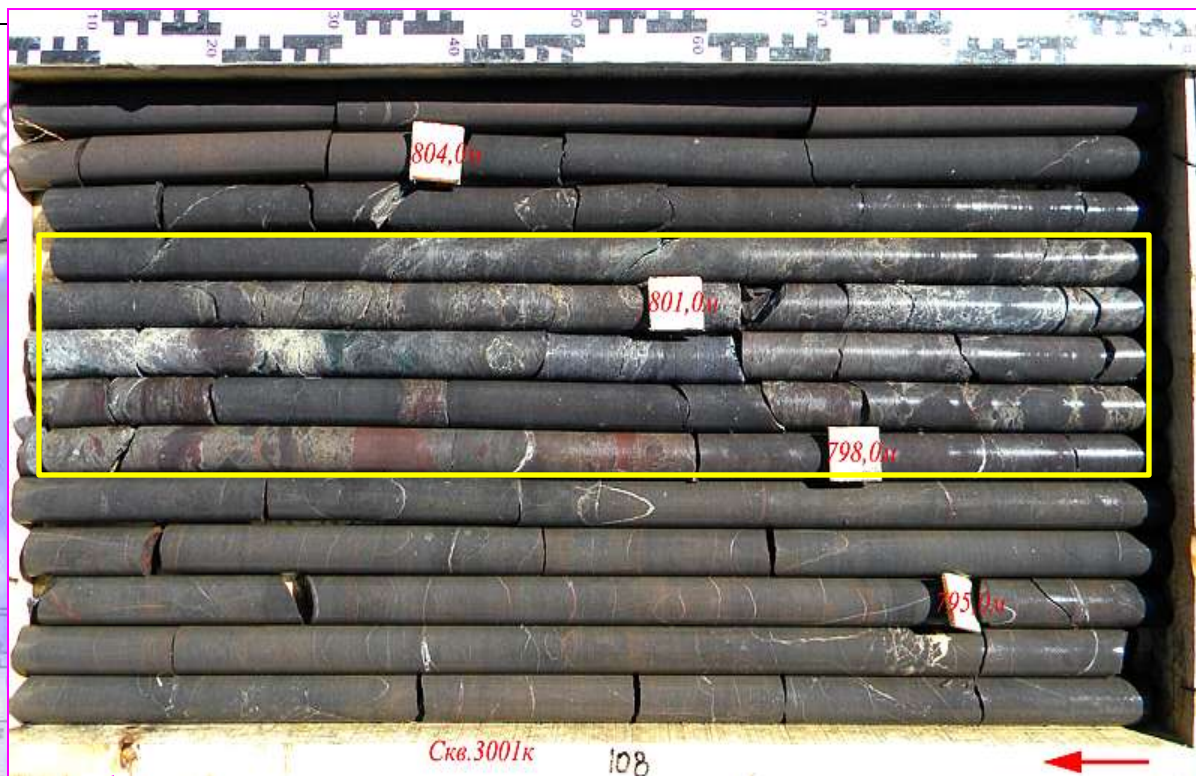
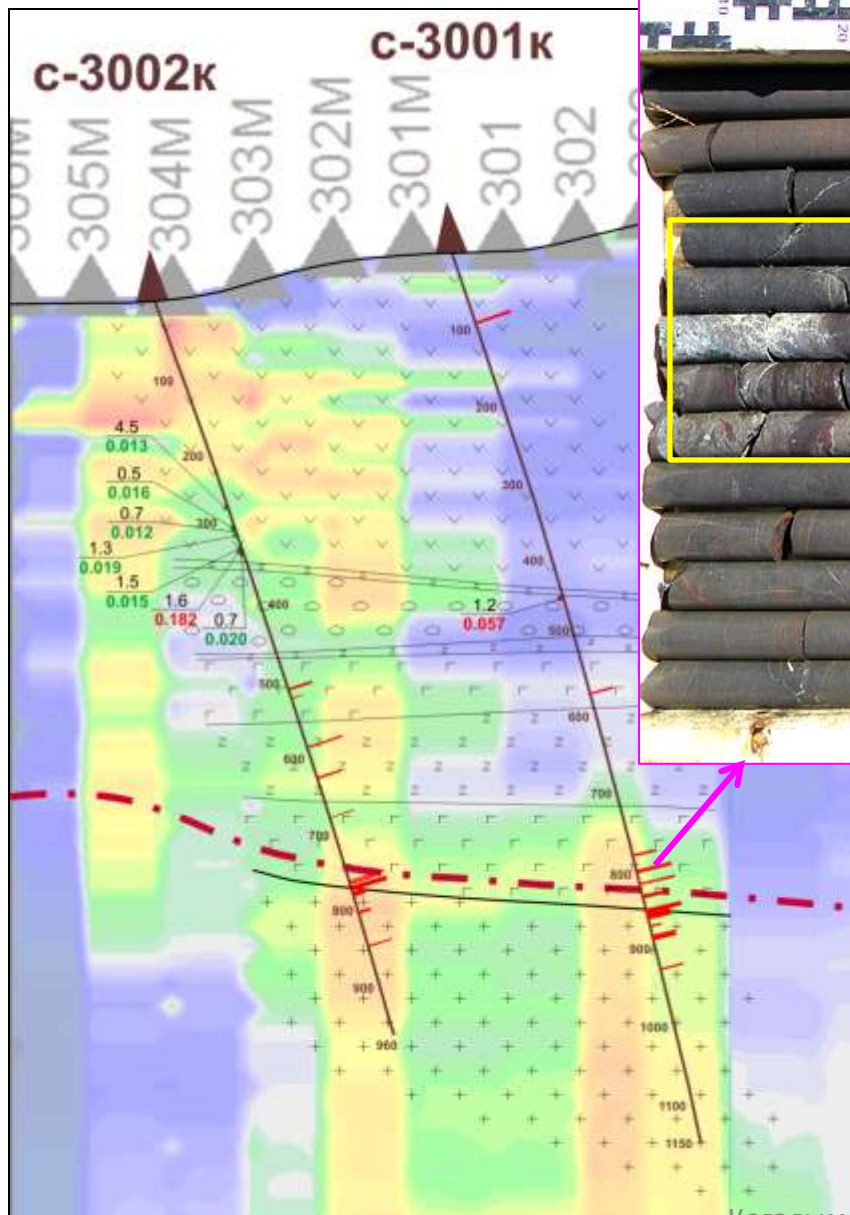


Фотодокументация южной стенки площадки под скважину 3004к. Места отбора ориентированных образцов показаны желтыми точками, результаты определения залегания флюидальности по образцам – цифрами (числитель – азимут падения, знаменатель – угол падения). На врезках приведены фотографии образцов. На верхней фотографии заметен обломок базальта в кластолаве фельзитов.

# Открытие главного вулканического центра по данным ММЗ



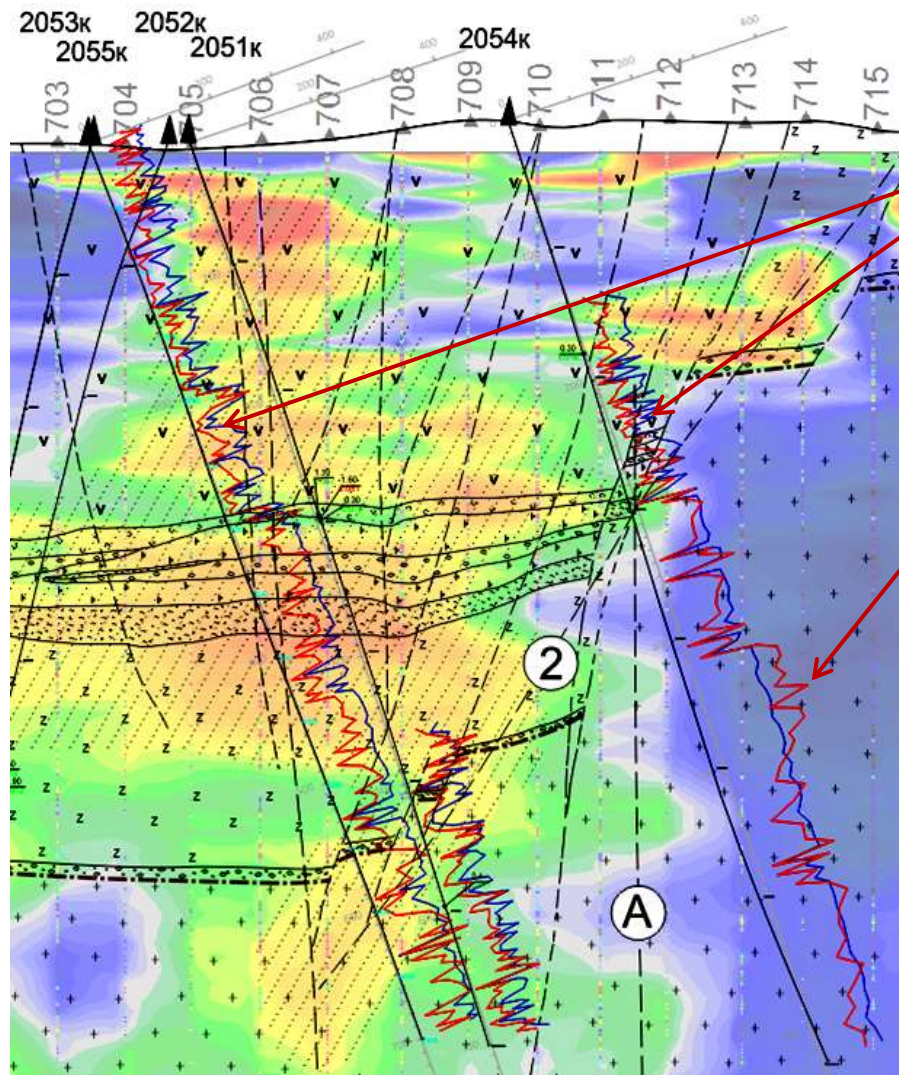
# Геолого-геофизический разрез по 25 профилю



В керне поисково-оценочной скважины на глубине 800 м видна зона разлома и интенсивных гидротермальных изменений (гидрослюдизации, карбонатизации) в базальтах нижнего покрова в участке, где ММЗ была выявлена субвертикальная зона пониженных скоростей (разлом).



## Сопоставление результатов ММЗ с геомеханическими показателями (RQD и др.)



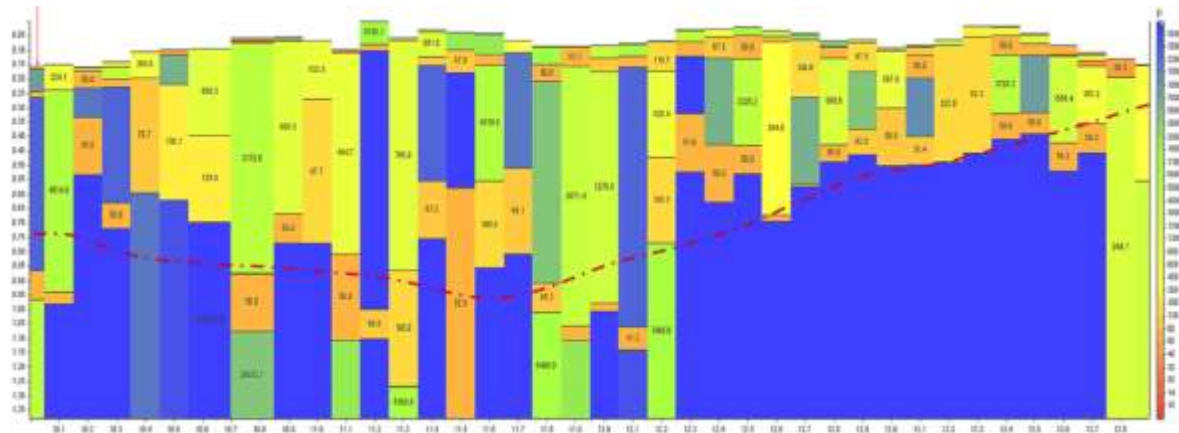
Низкие значения RQD  
(трещиноватые породы) –  
низкие скорости микросейсм  
(высокие амплитуды)

Высокие значения RQD  
(монокристаллические породы) –  
высокие скорости микросейсм  
(низкие амплитуды)

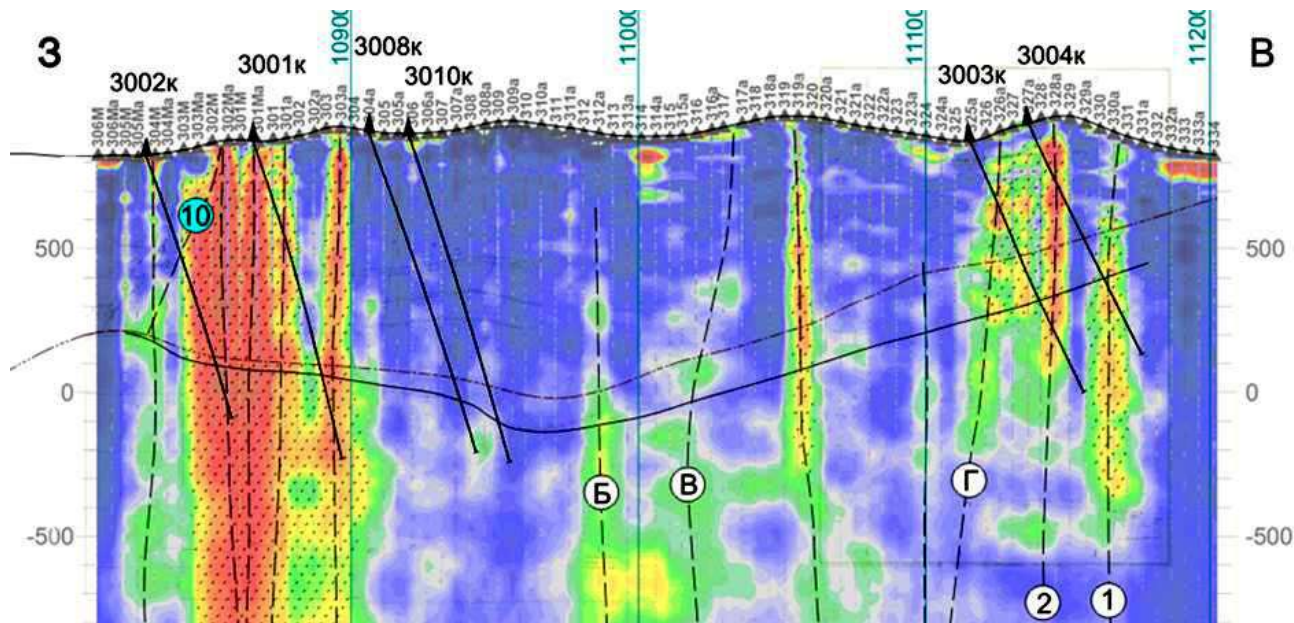
Установлена хорошая корреляция между относительными скоростями микросейсм и степенью нарушенности пород

# Сопоставление данных АМТЗ и ММЗ (центральная часть СРП)

**АМТЗ**  
геоэлектрический  
разрез

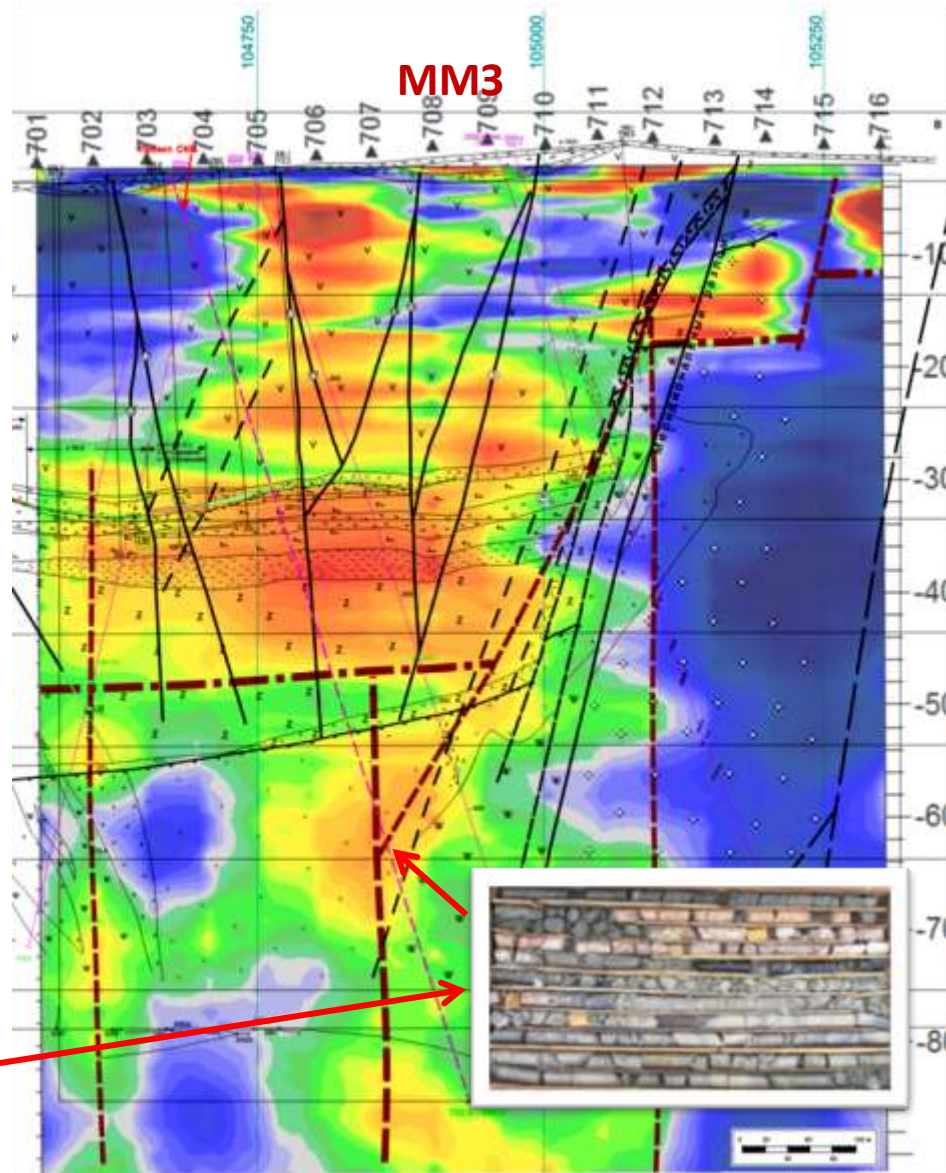
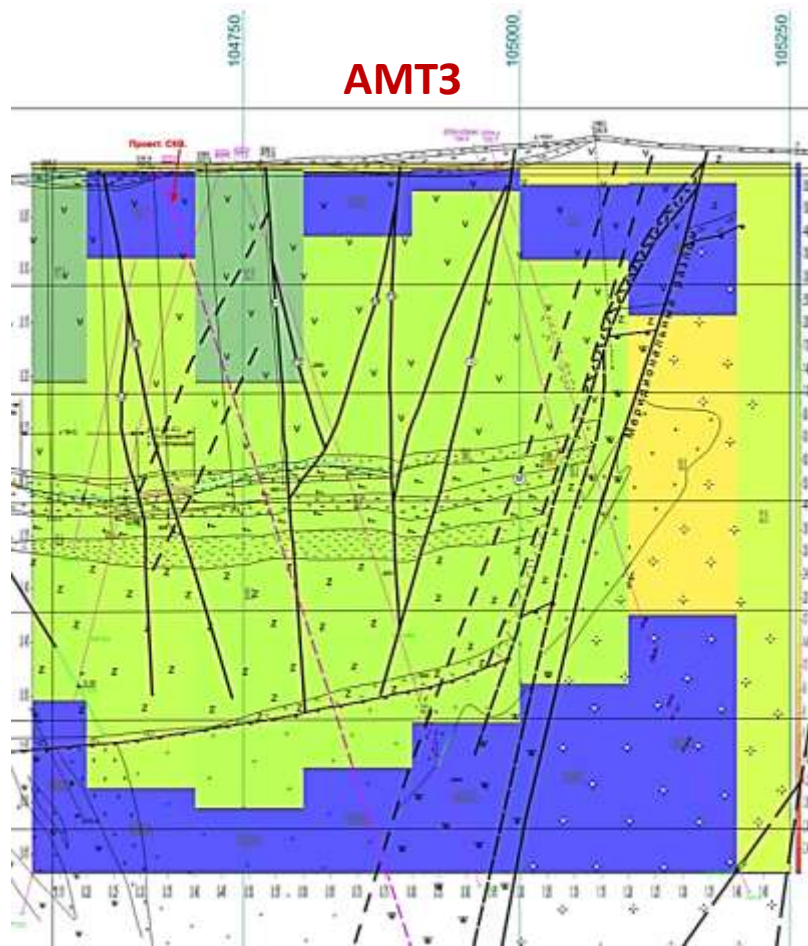


**ММЗ**  
сейсмический  
разрез



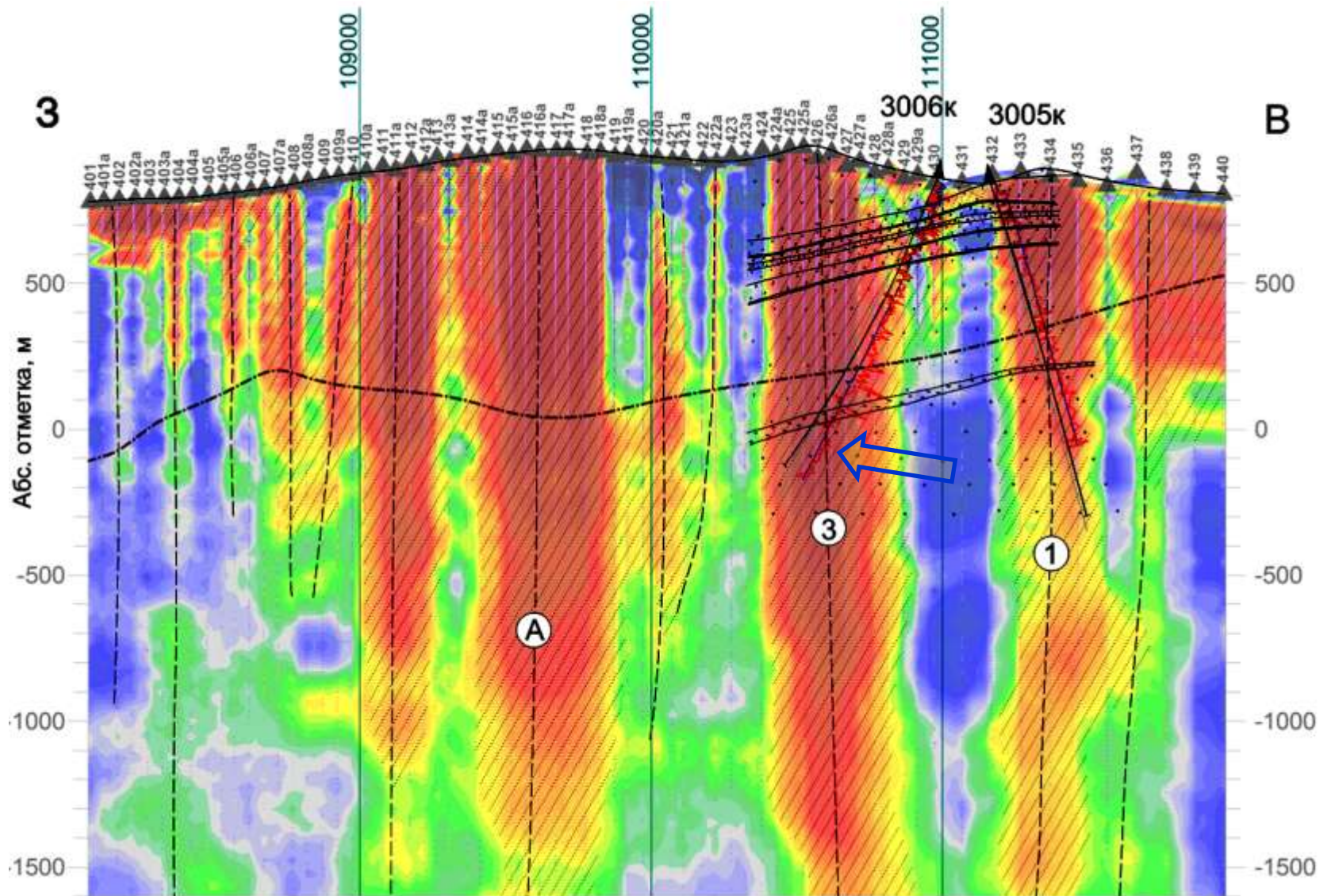
Все скважины, заданные в области повышенных амплитуд микросейсм, **вскрыли разломы.**

# Сравнение результатов ММЗ и АМТЗ (северная часть СРП)



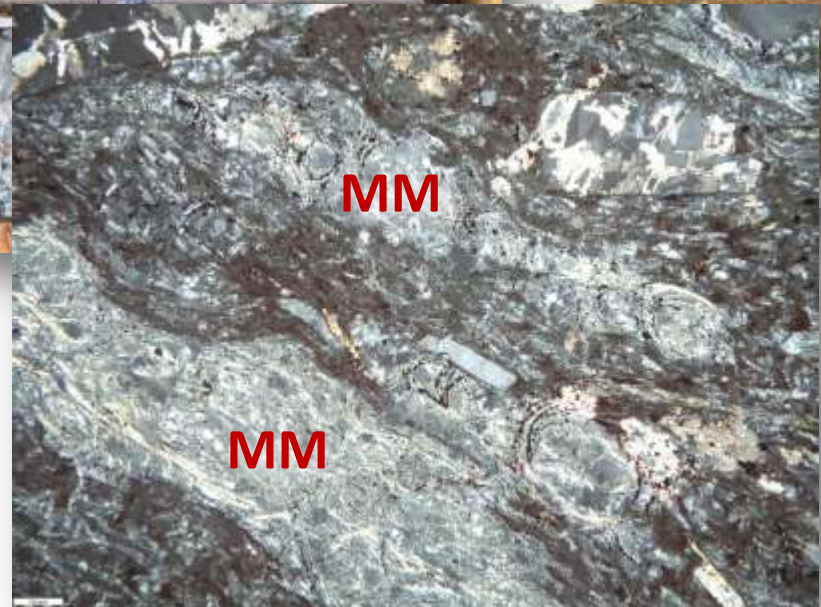
Скважина, заданная в область  
повышенных амплитуд микросейсм  
по данным ММЗ, вскрыла серию  
пегматитовых жил в зоне разлома

# Влияние структурной рыхлости минералов на скорости микросейсм

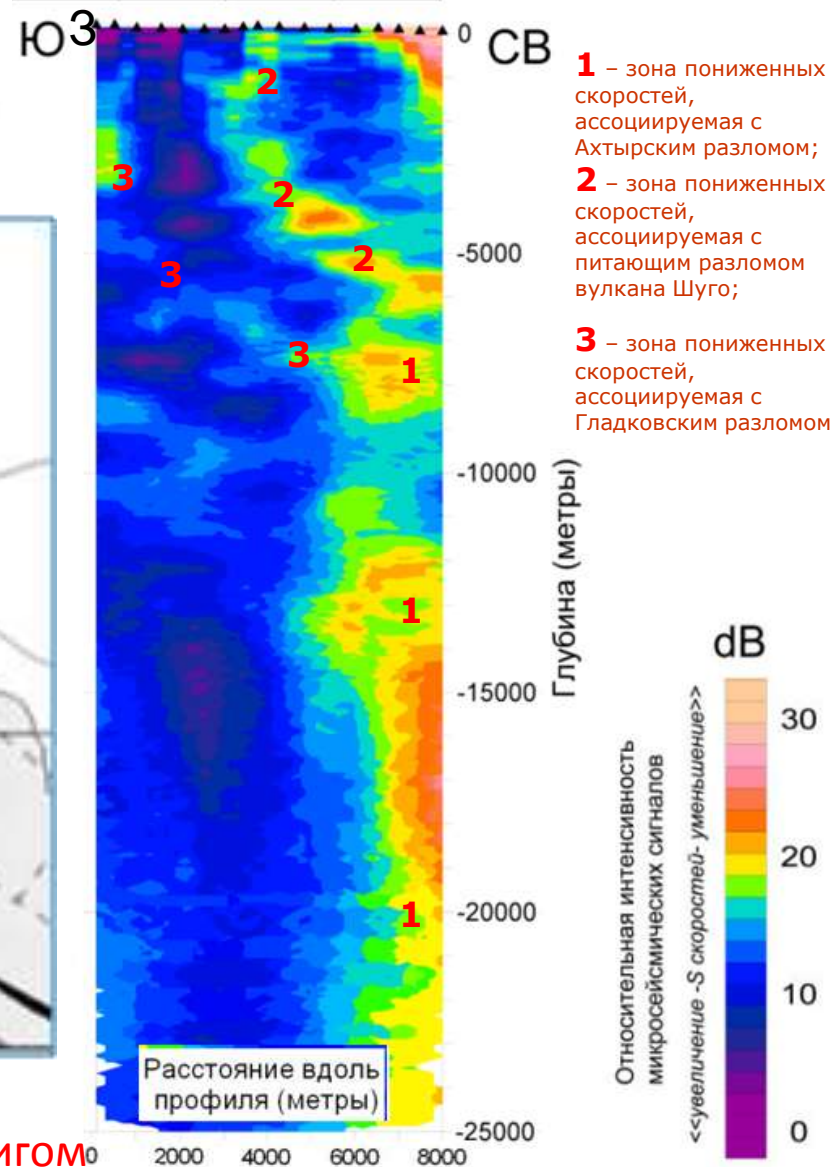
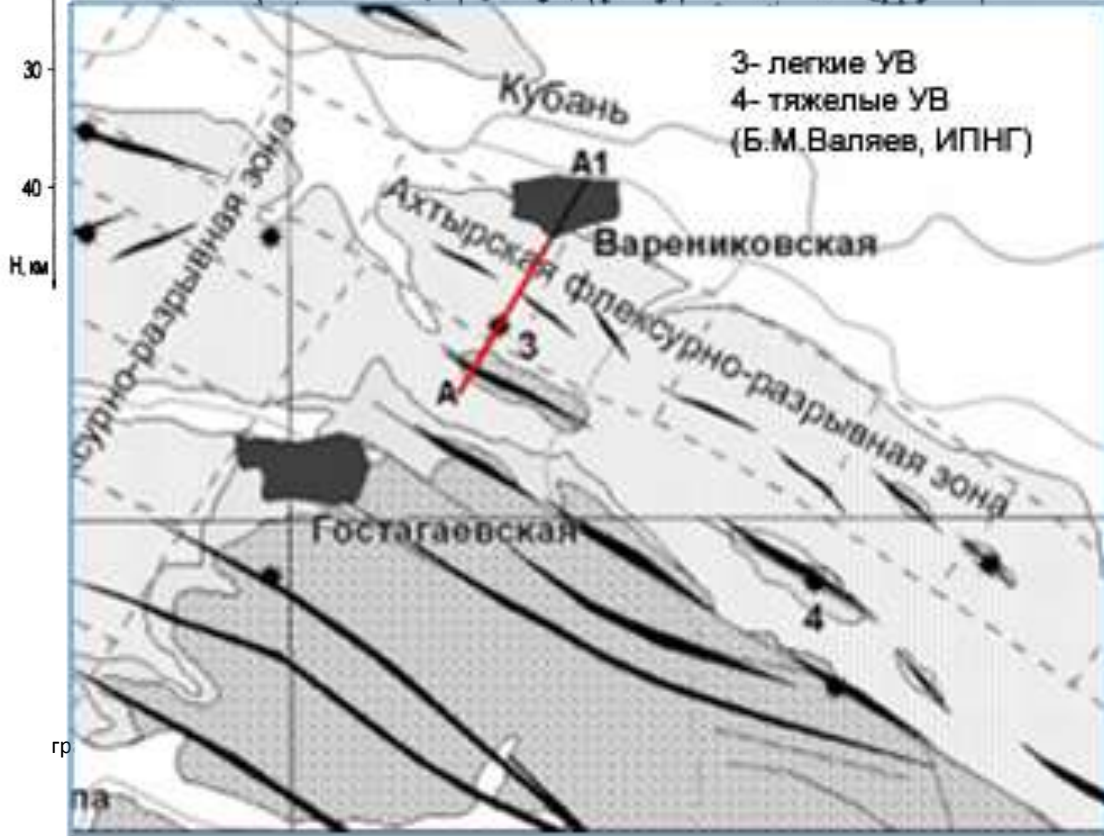
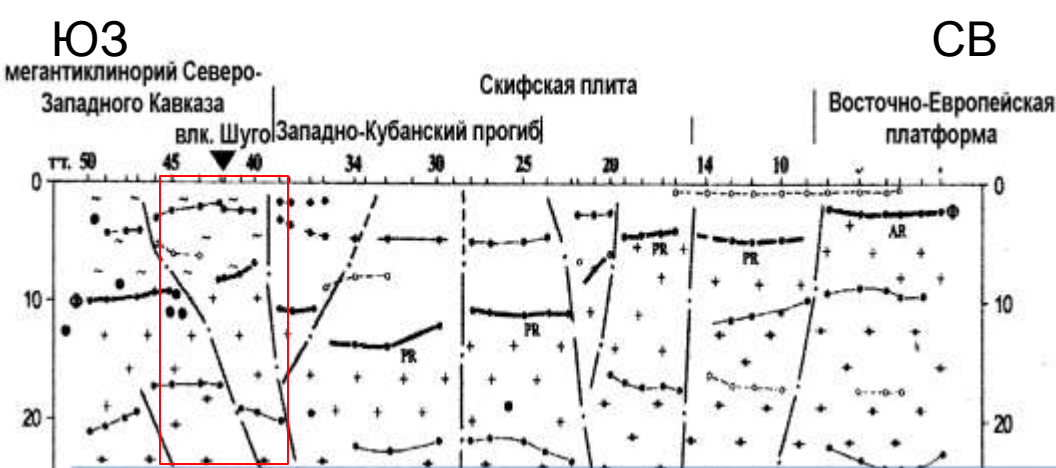


Породы в области с низкими скоростями микросейсм характеризуются относительно высокой монолитностью (высокие значения RQD). Парадокс?

## Глинистые изменения в породах

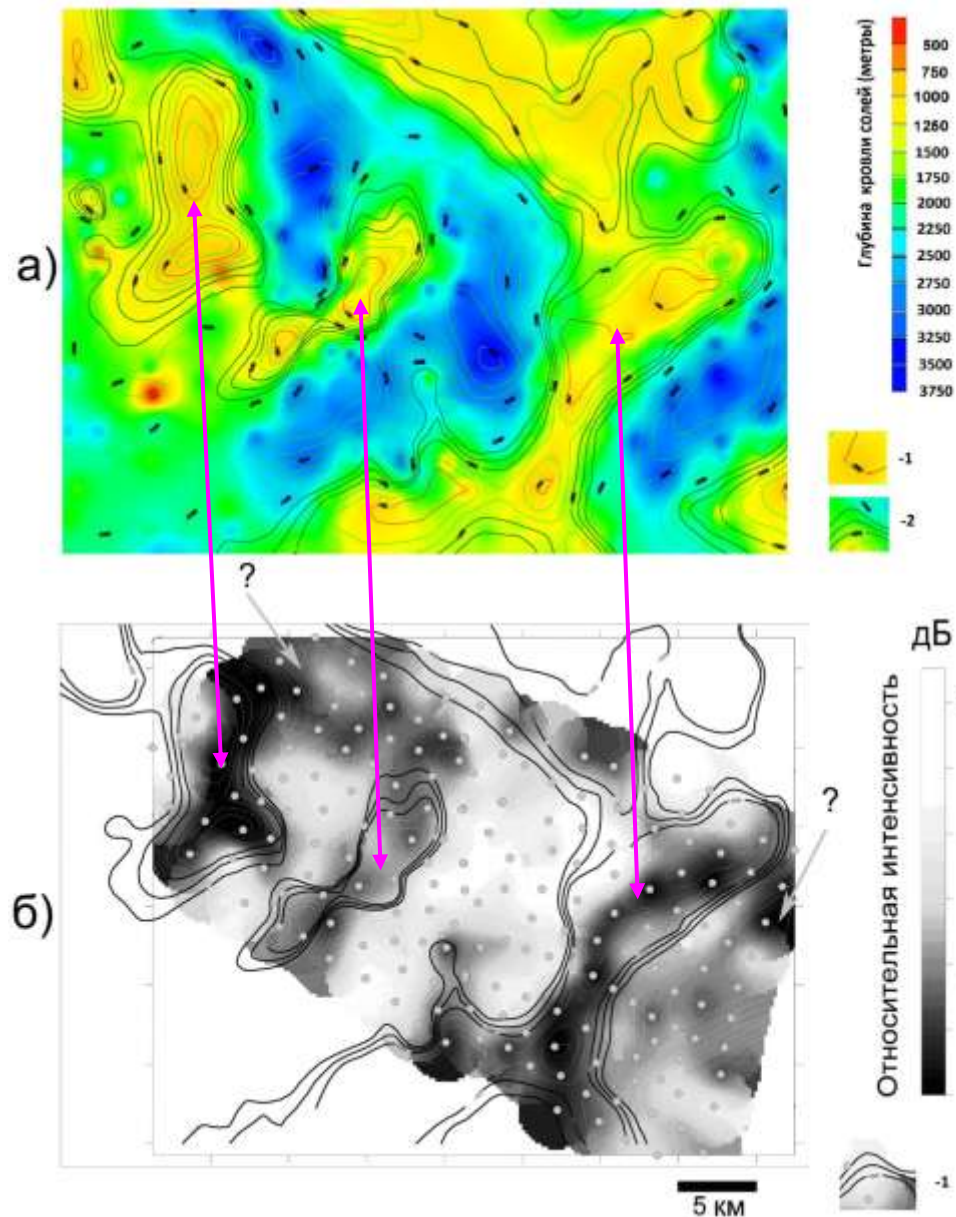


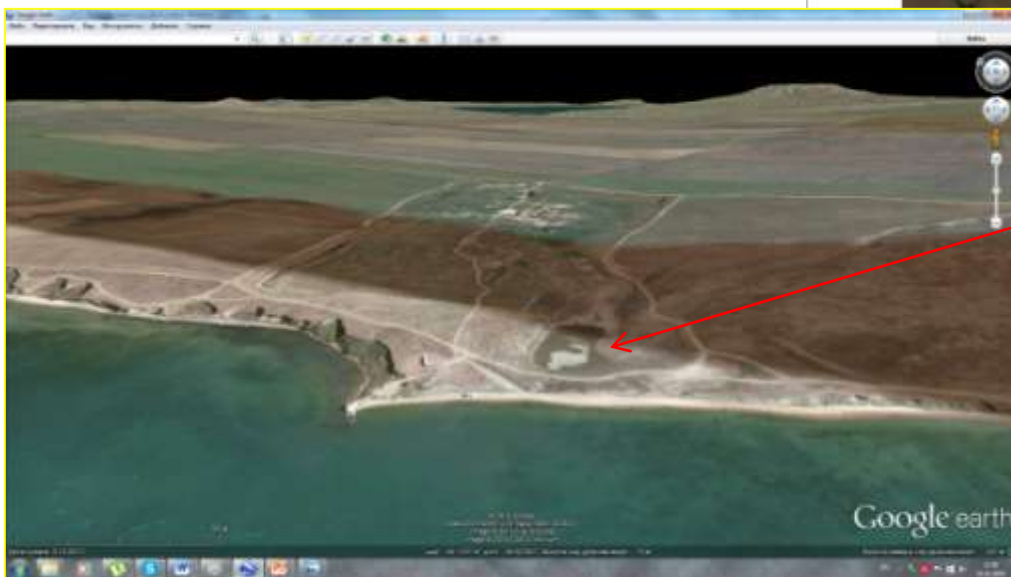
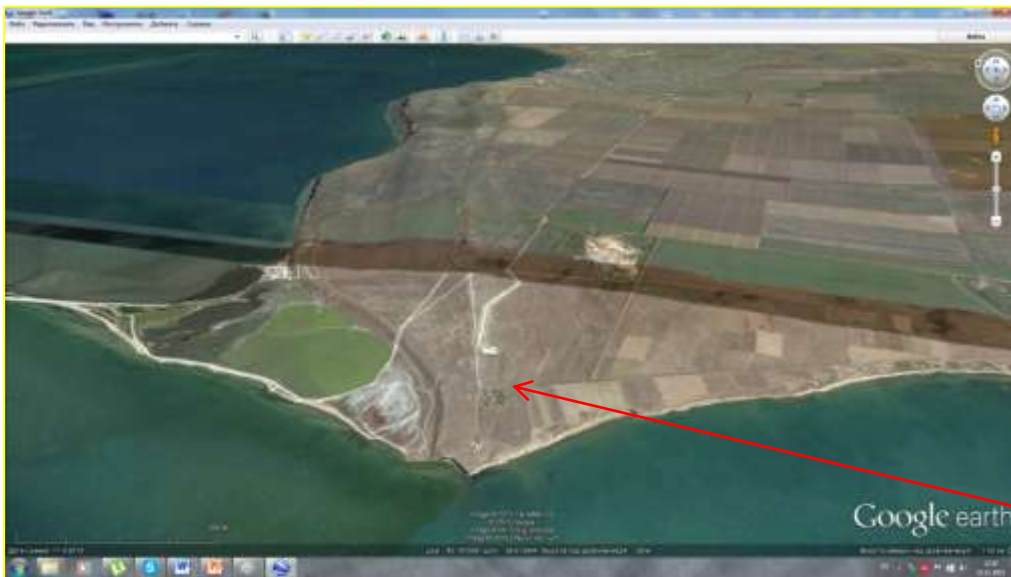
В этих участках выявлено интенсивное развитие глинистых разбухающих минералов (монтмориллонита), определяющих высокую структурную рыхлость относительно монолитных пород. Структурная рыхлость – третий фактор после пористости и трещиноватости, влияющий на понижение скорости микросейсм



Условия коллизии и надвига с левосторонним сдвигом

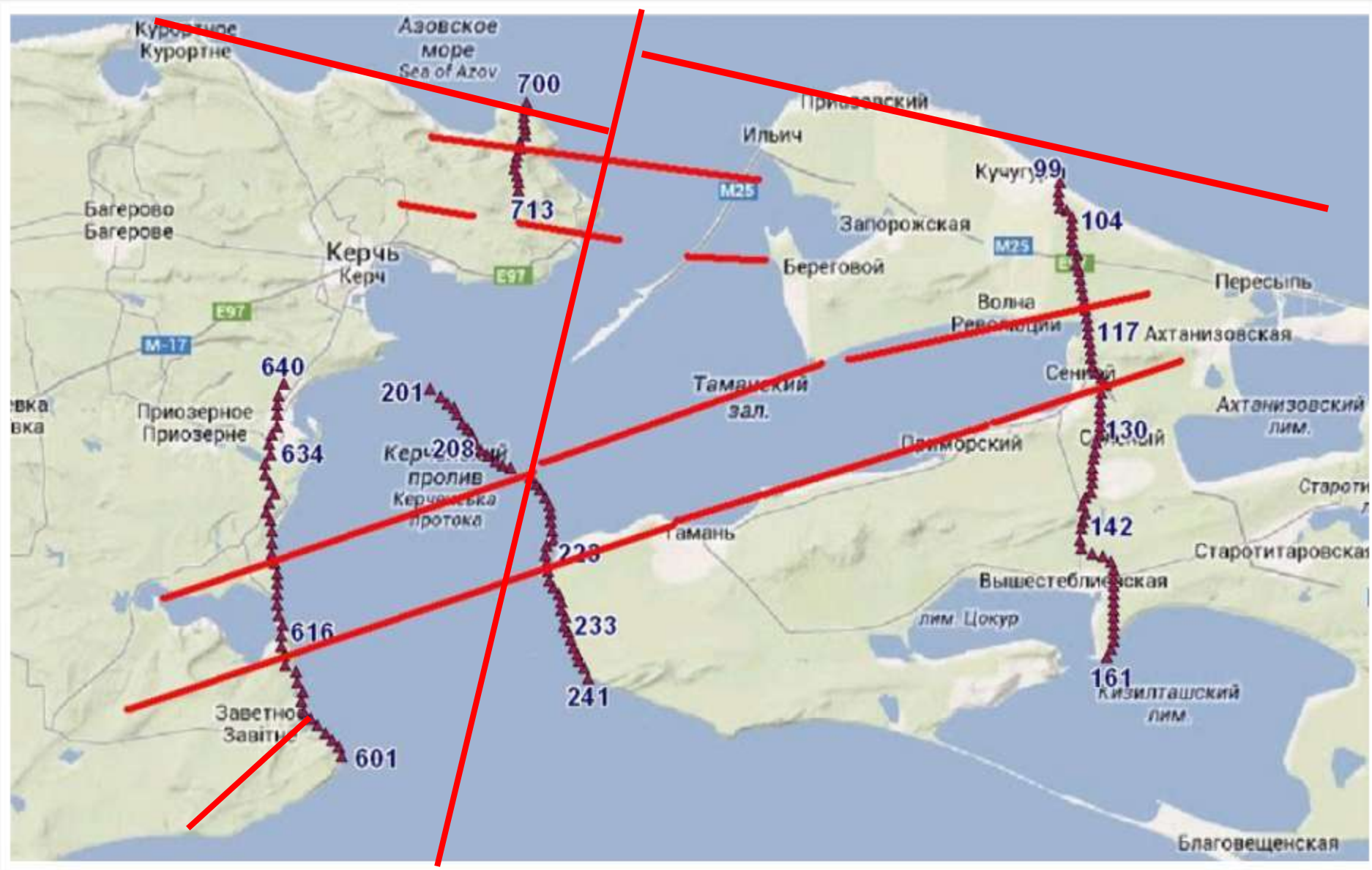
# Сравнение результатов ММЗ и результатов бурения на примере системы соляных куполов



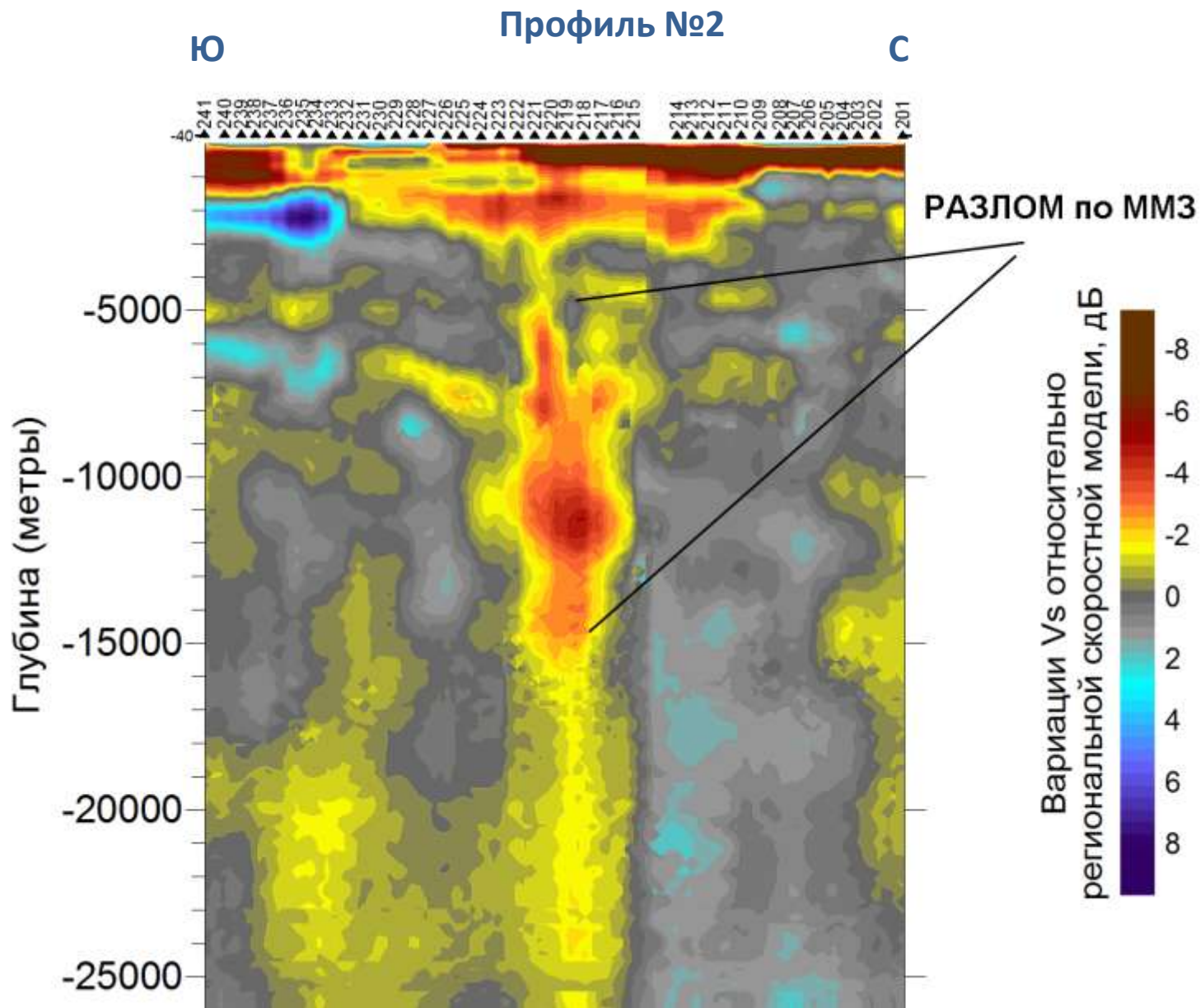




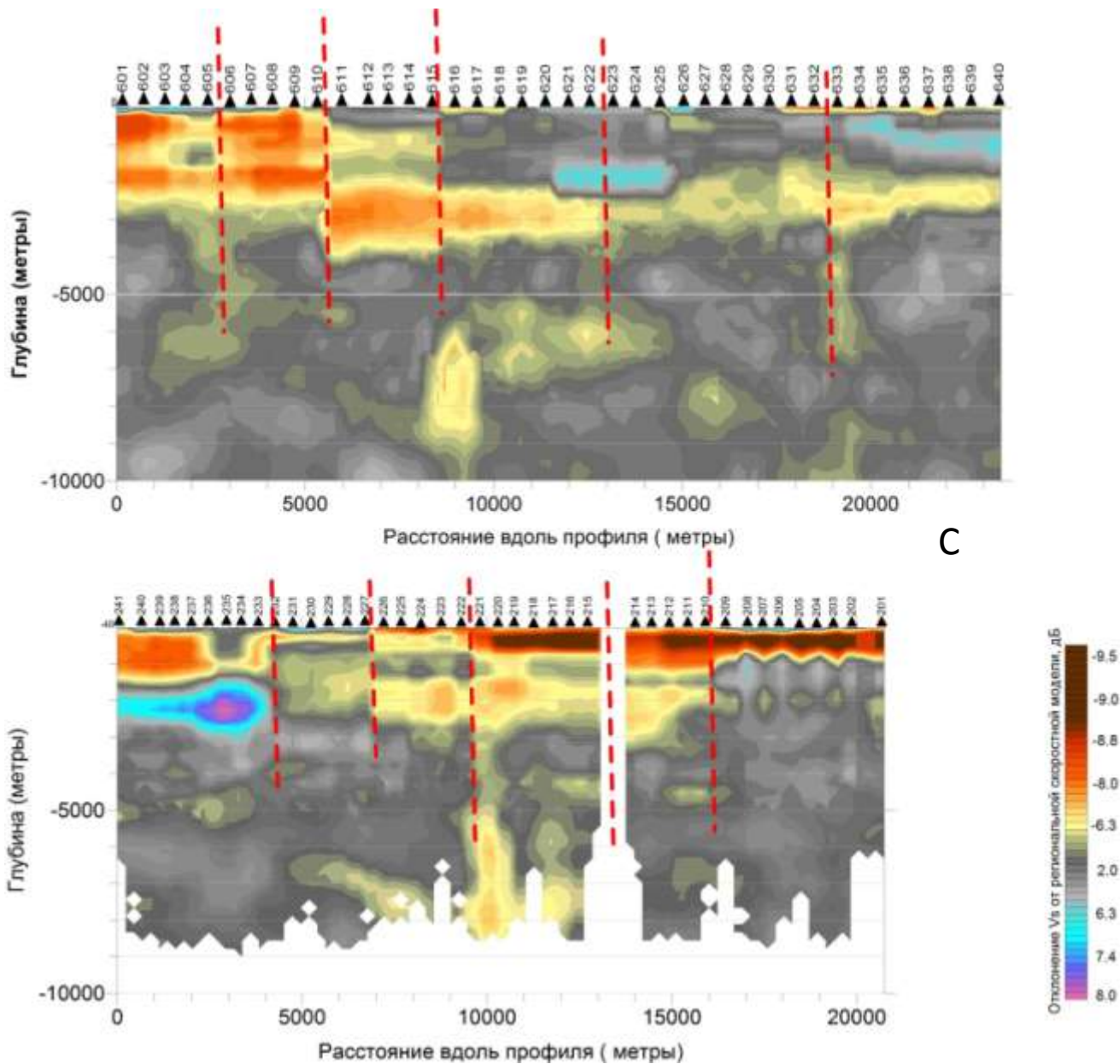
# Положение профилей ММЗ и выявленные глубинные разломы на Тузлинском створе



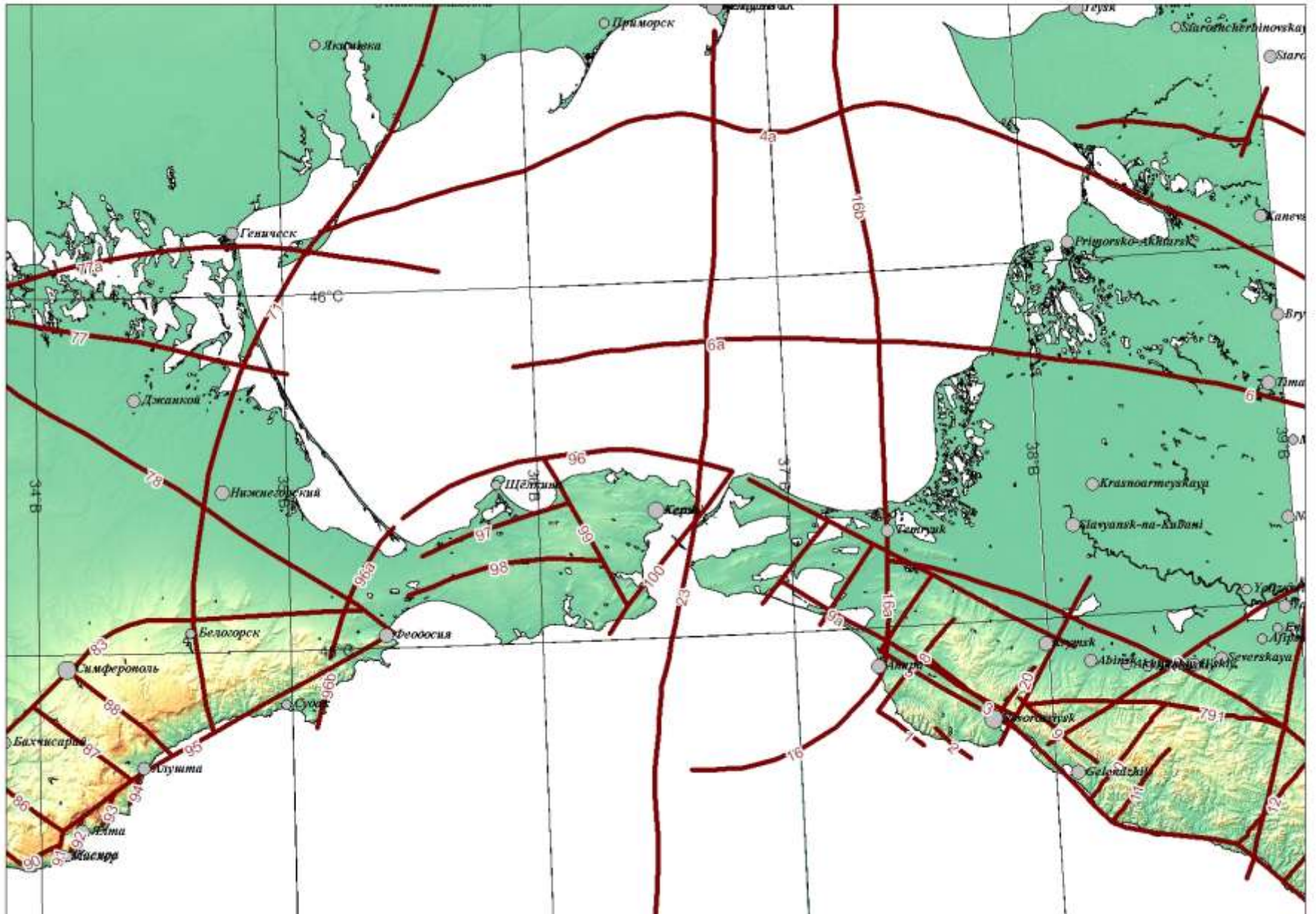
# Глубинный разлом под проектируемым мостом



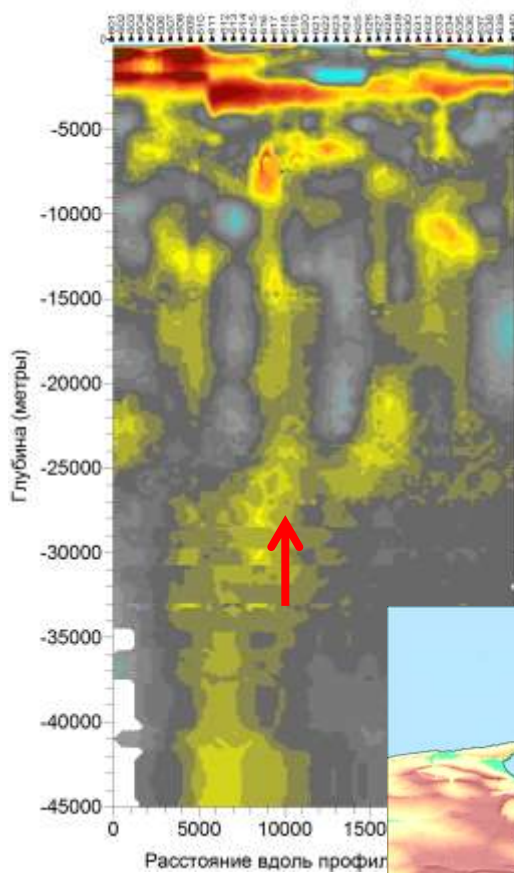
# Разломы в других профилях



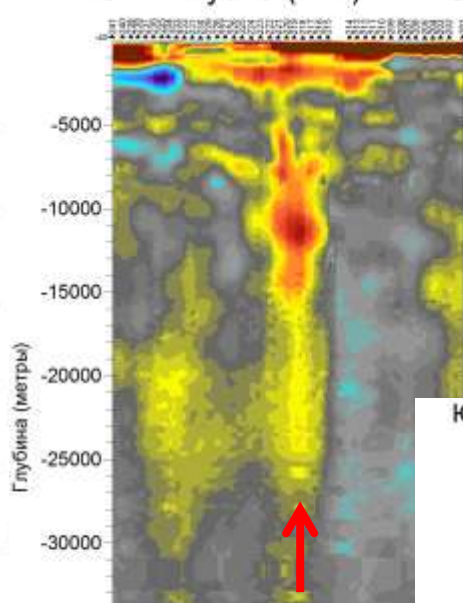
## Активные разломы по В.Г. Трифонову



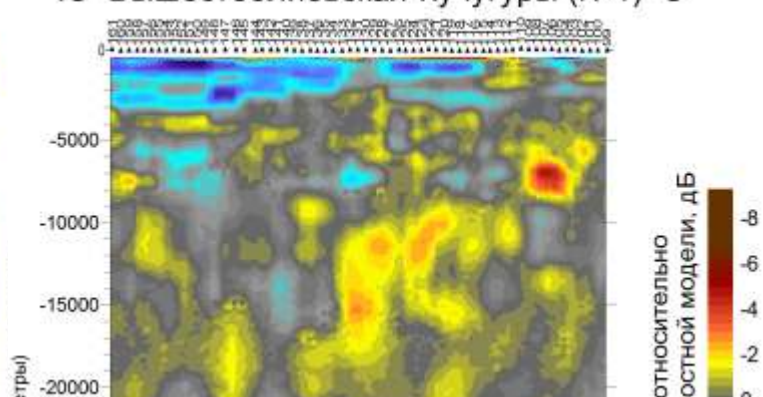
Ю Заветное - Керчь (№6) С



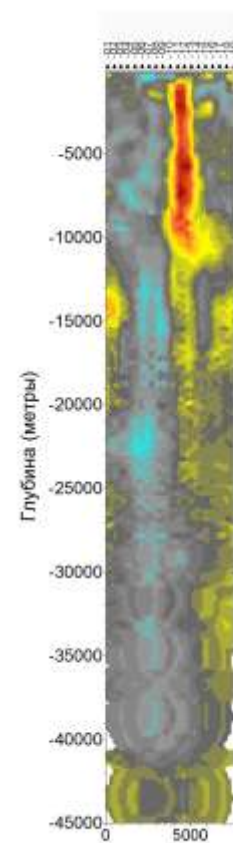
Ю Тузла (№2) С



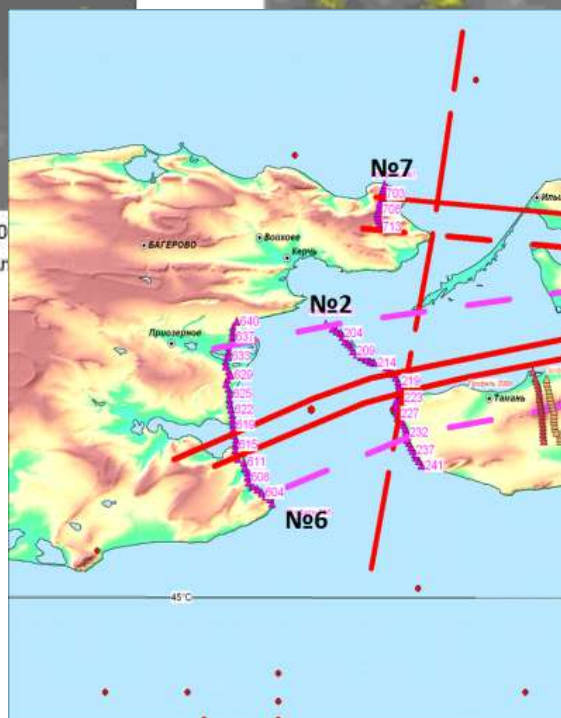
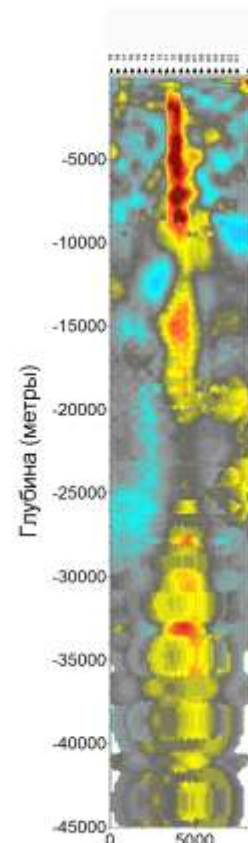
Ю Вышестеблиевская-Кучугуры (№1) С



Ю Карabetова гора (2007) С

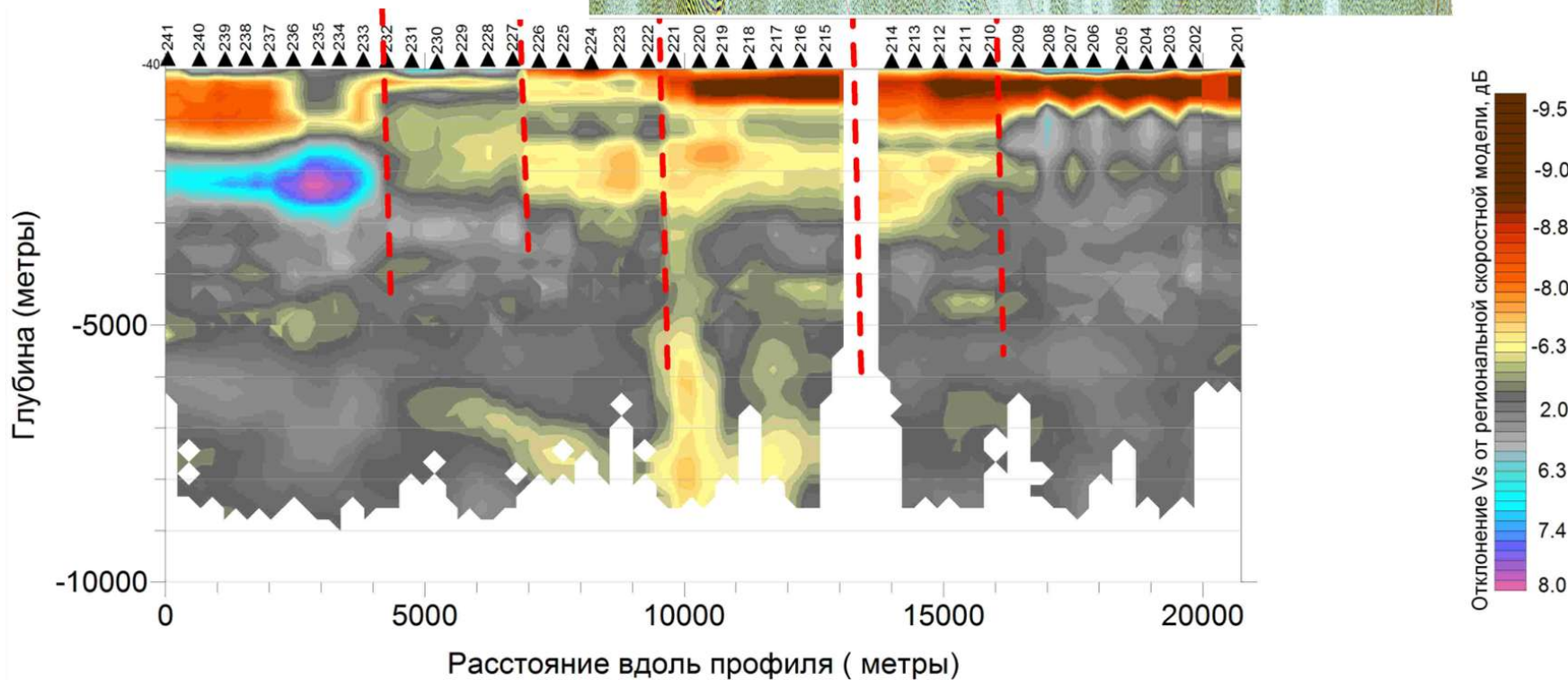
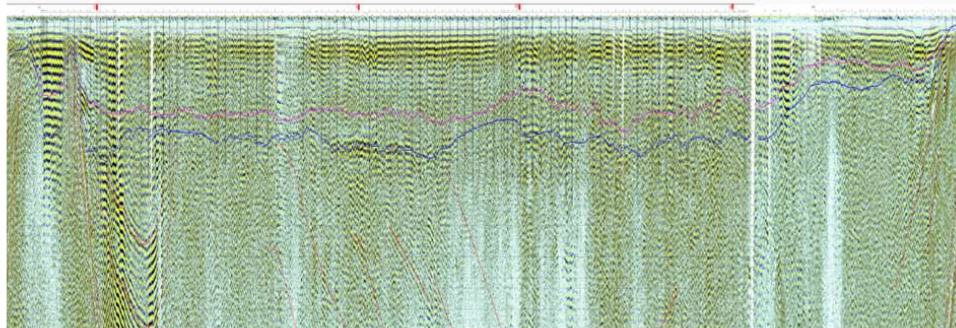


Ю Карabetова гора (2008) С

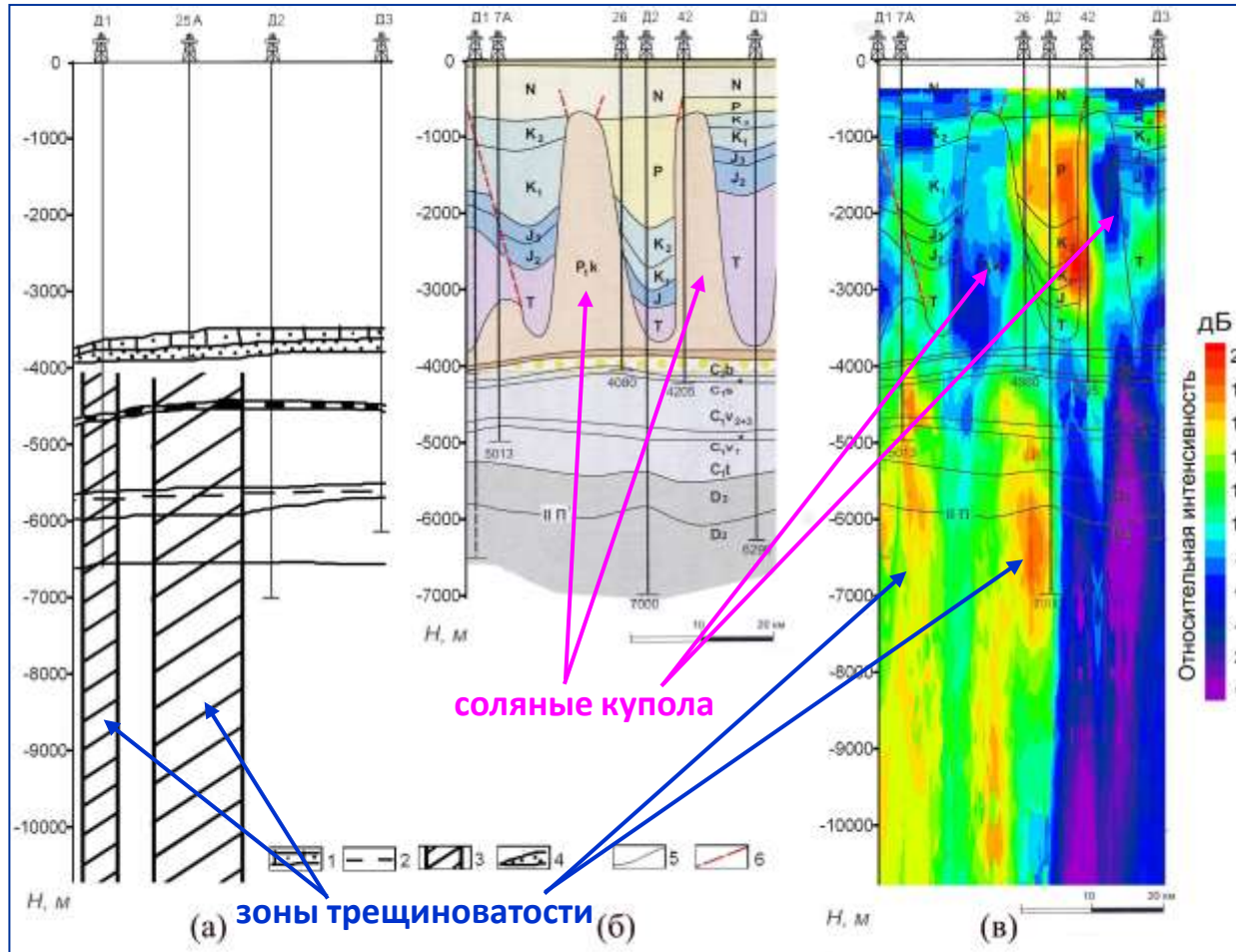


Расстояние вдоль профиля ( метры)

# Сравнение ММЗ и МОВ в совпадающем створе



# Сопоставление результатов ММЗ с данными промышленной сейсморазведки и геологическим разрезом АГКМ



- (а) Геолого-геофизический разрез земной коры Астраханского свода (Бродский, Пыхалов, 2006); 1- кремнисто-глинистые отложения; 2-глинистые отложения; 3-зоны аномально повышенной трещиноватости; 4-залежь Астраханского месторождения.
- (б) Геологический разрез по линии скважин Д1-Д3 (Волож и др., 2008); 5-границы стратиграфических единиц и отражающих горизонтов; 6-предполагаемое тектоническое нарушение.
- (в) Микросейсмический разрез.

традиционная сейсморазведка

геологический разрез по линии А-Б

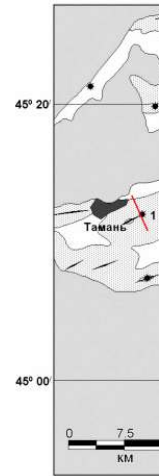
ММЗ по линии А-Б

Данные ММЗ подтверждают тектонические зоны, выявленные сейсморазведкой, и хорошо согласуются с положением соляных куполов в терригенной толще

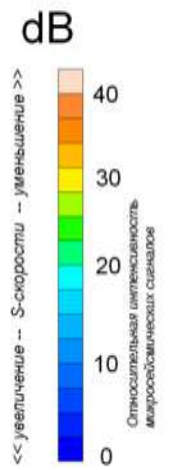
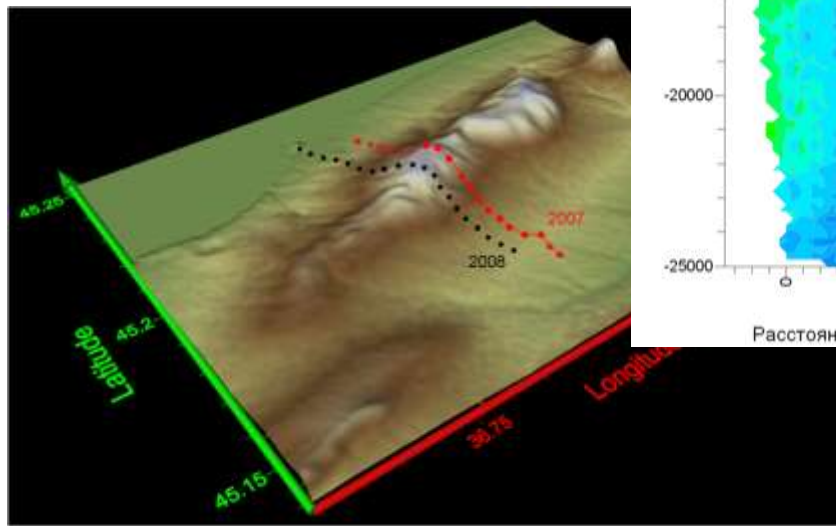
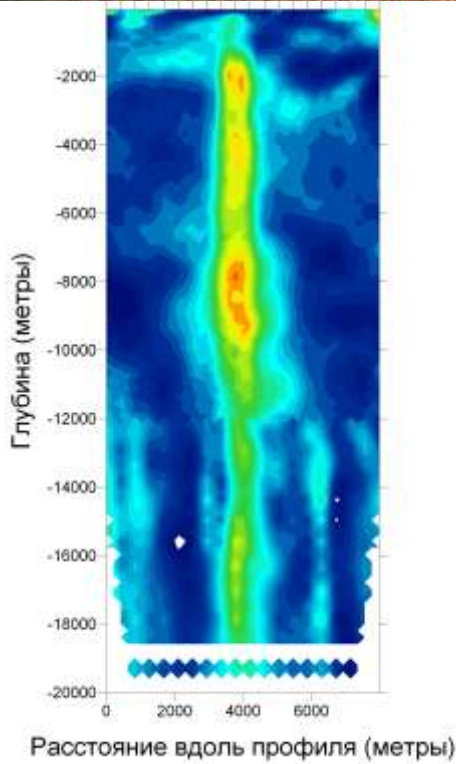
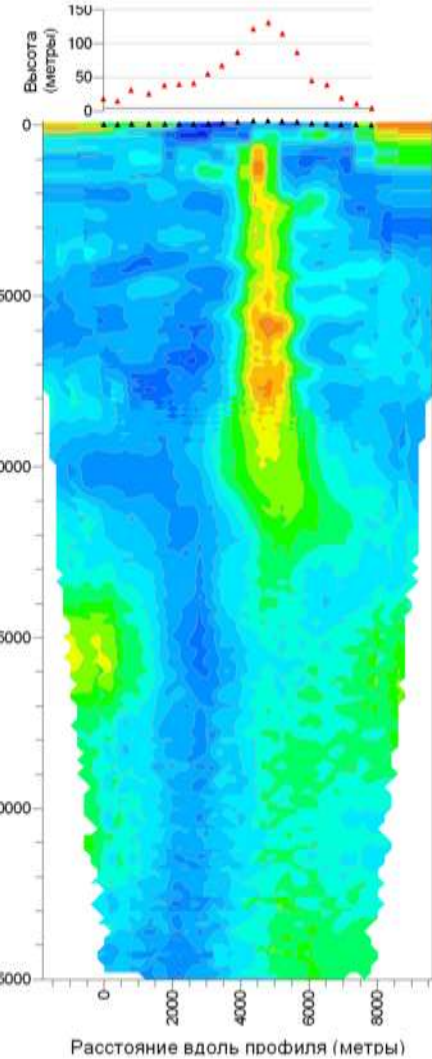




# Грязевой вулкан «Гора Карabetова»



Профиль высот измерительных пунктов



Условия чистого сдвига (левосторонний сдвиг)

**Благодарим  
за внимание!**