

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

А.В.Горбатилов
ИФЗ РАН, г.Москва



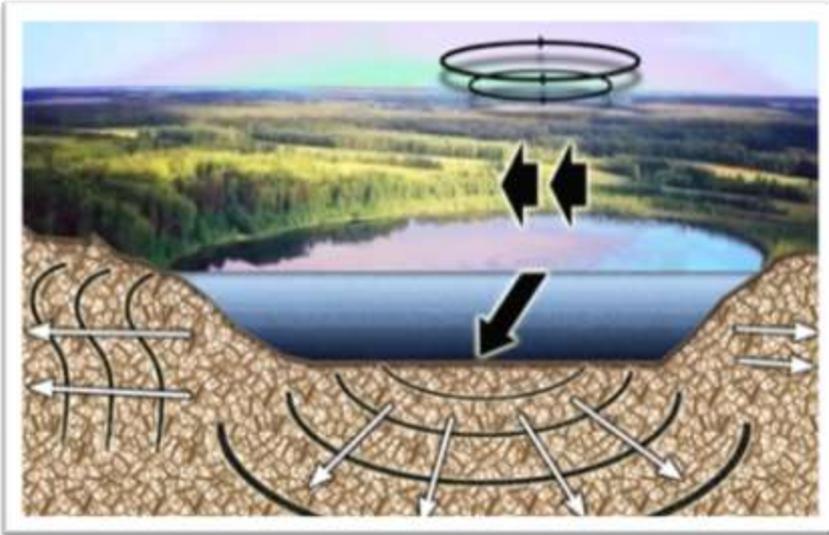
Базовая идея ММЗ

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:

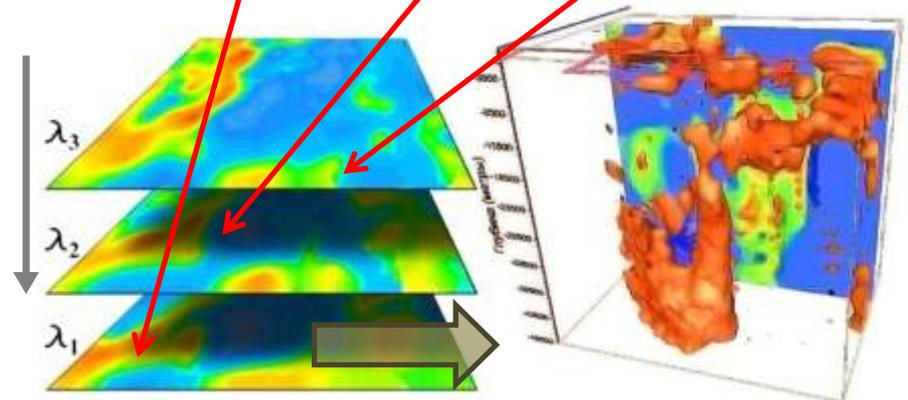
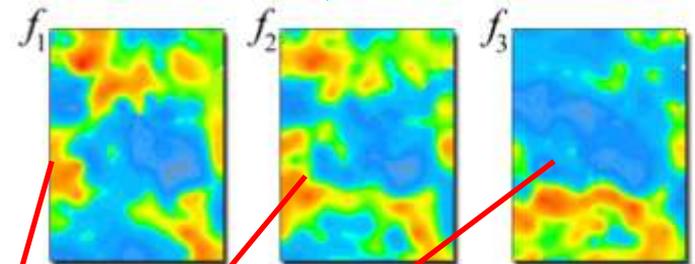
$$H(f) = k \cdot \lambda(f) = k \cdot V_R(f) / f$$

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

λ – длина волны,

V_R – скорость Рэлеевских волн.

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



Приборная база

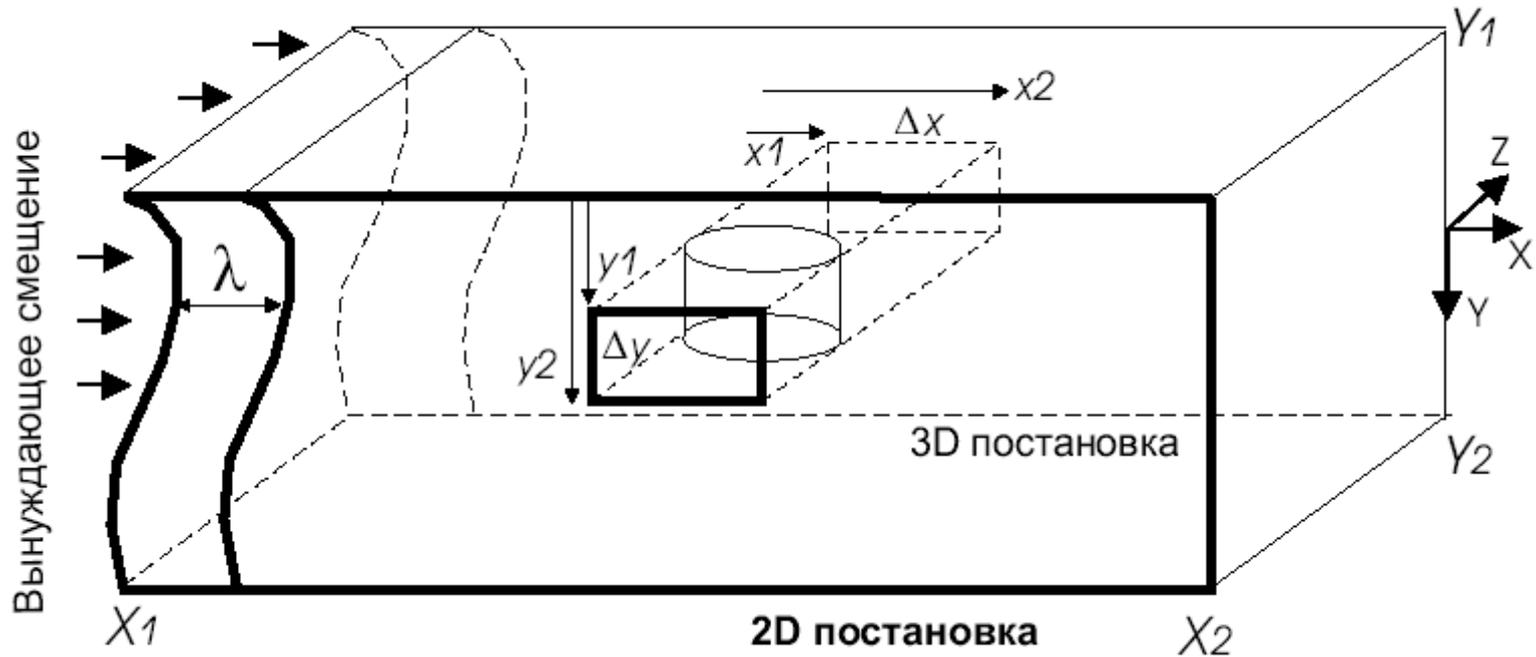
КОМПЛЕКТ ШИРОКОПОЛОСНЫХ (30сек - 50Гц) ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ С GPS-ПРИЕМНИКАМИ И АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

GÜRALP CMG-6TD

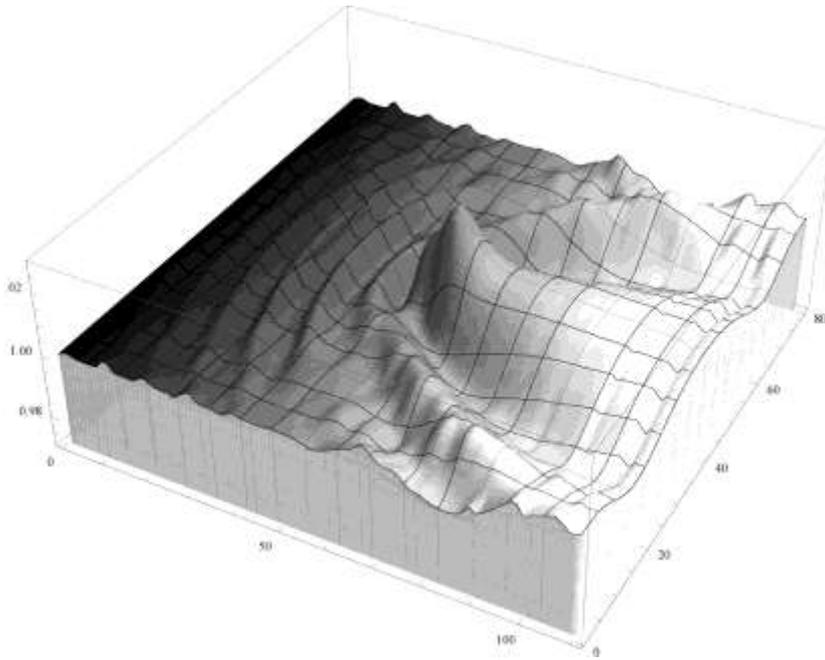
1. Сейсмометр CMG-6TD
2. Коммутационный блок
3. Güralp GPS-приемник со штоком крепления
4. Сигнальный кабель (сейсмометр – коммутационный блок)
5. Кабель GPS-приемника
6. Контрольный кабель
7. Кабель питания
8. 6-контактный разъем типа "mil-spec" для FireWire интерфейса



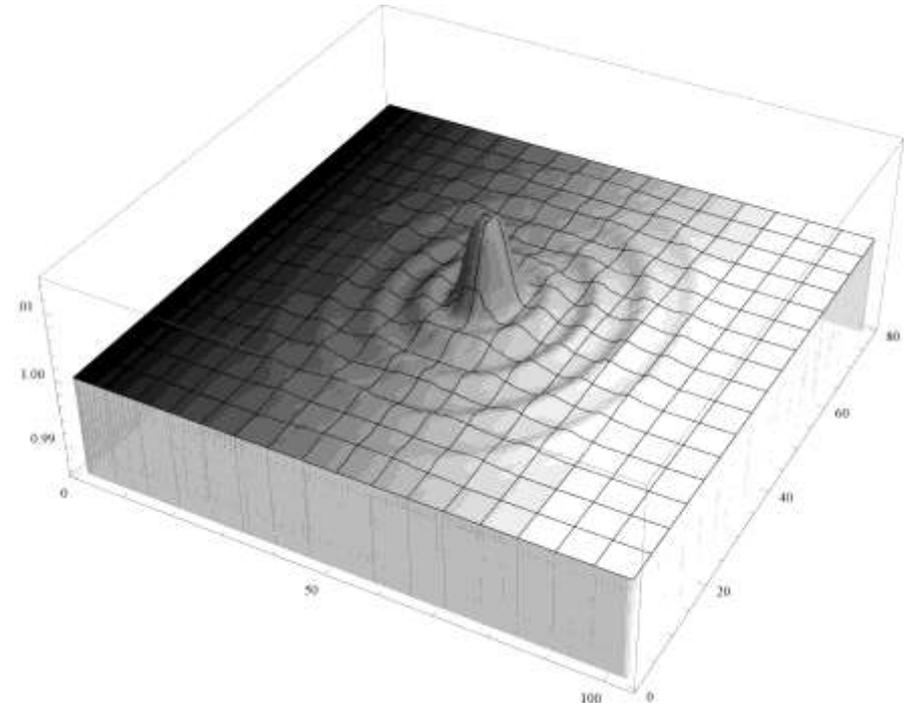
ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА



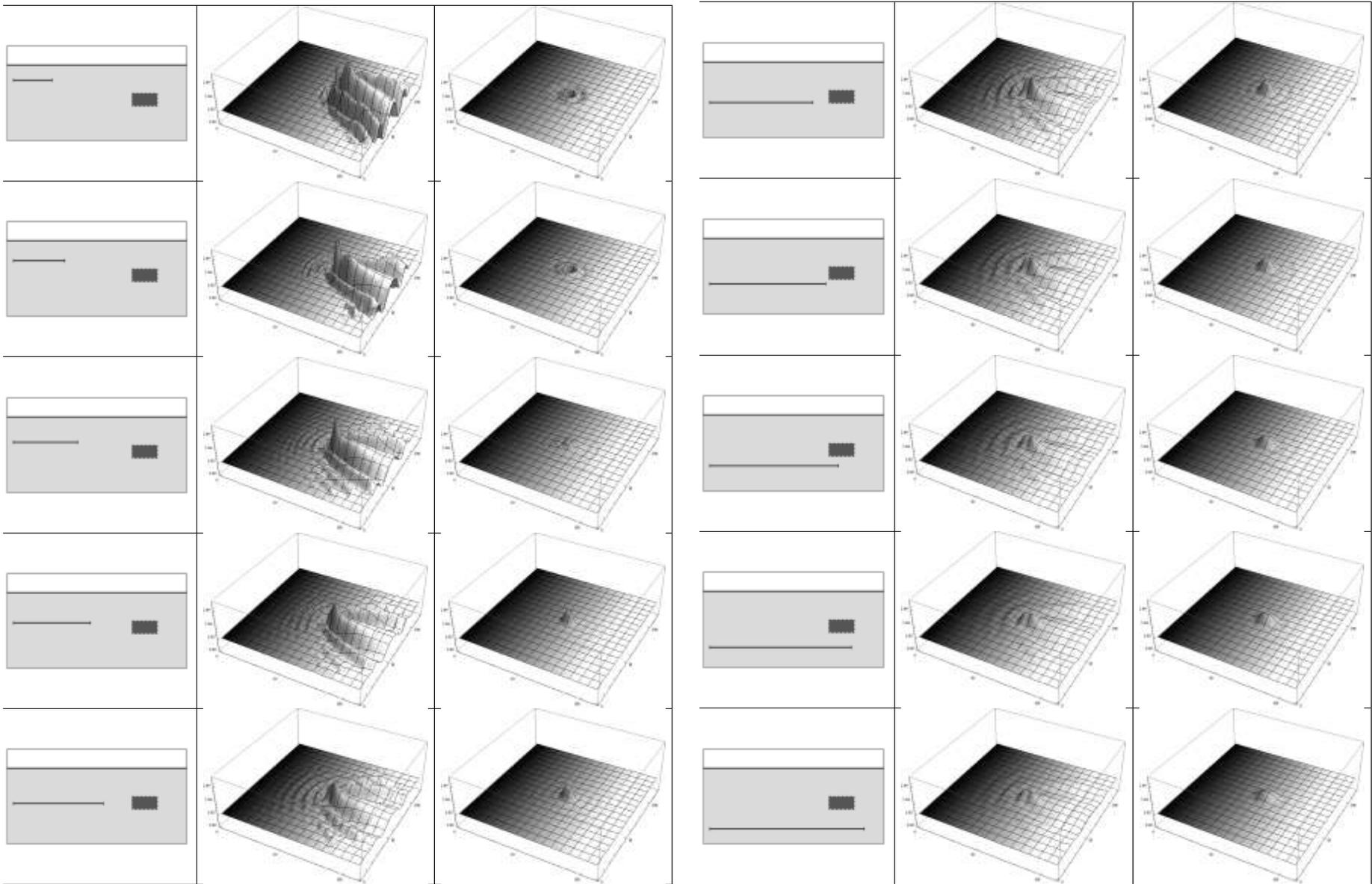
ЭФФЕКТ СЛУЧАЙНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ



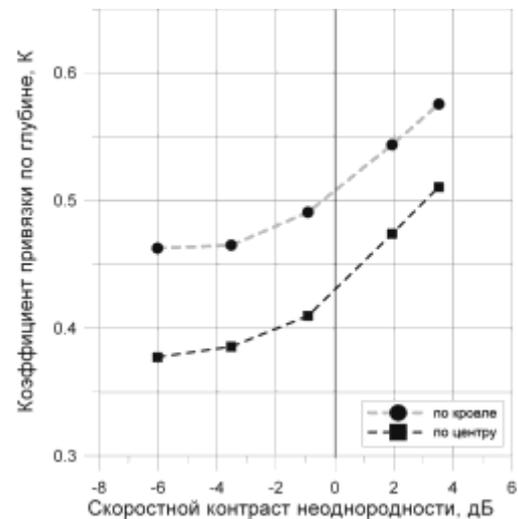
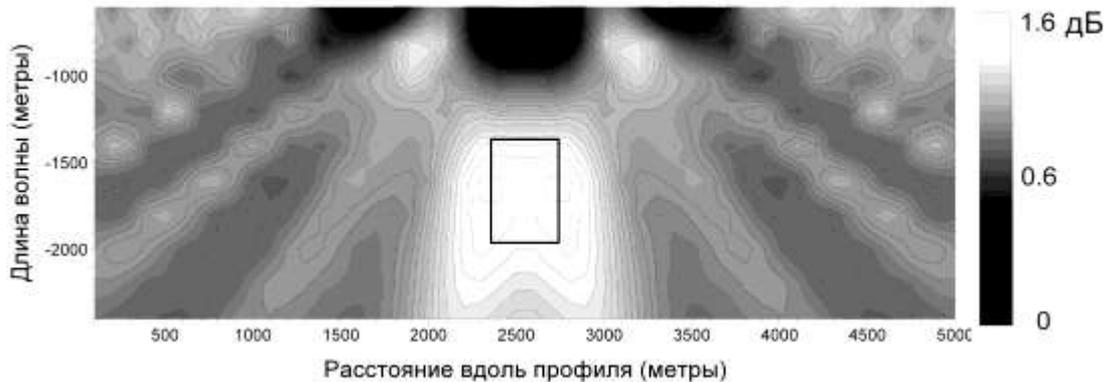
Облучение неоднородности регулярной волной.



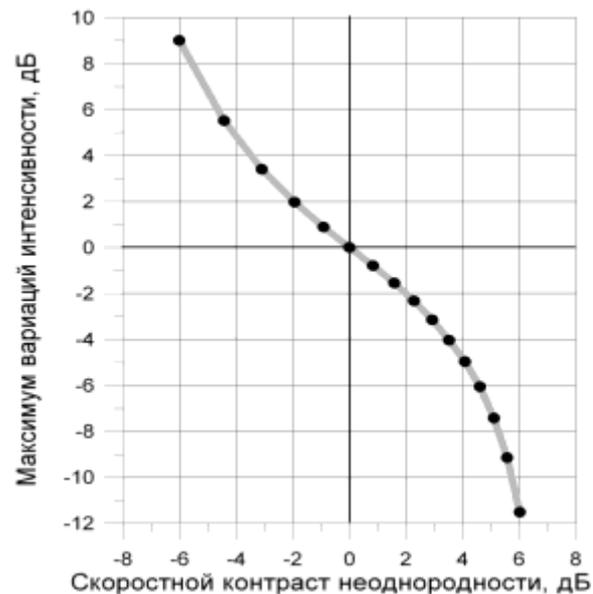
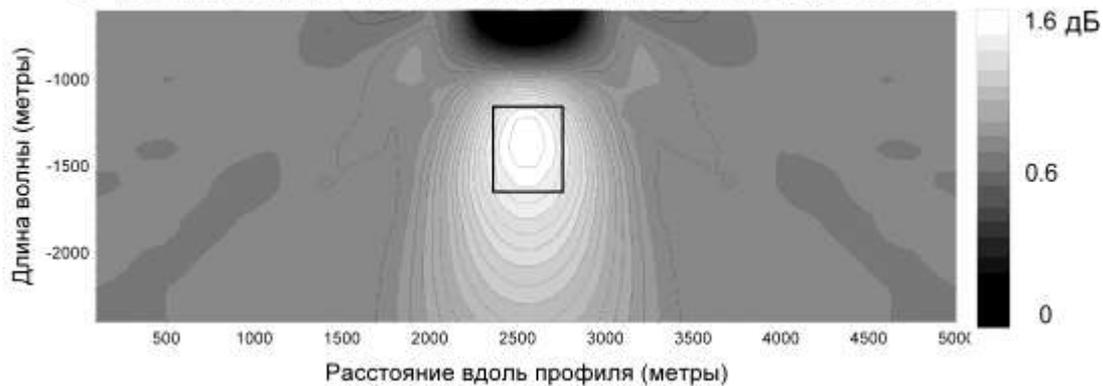
Неоднородность в поле случайных микросейсм



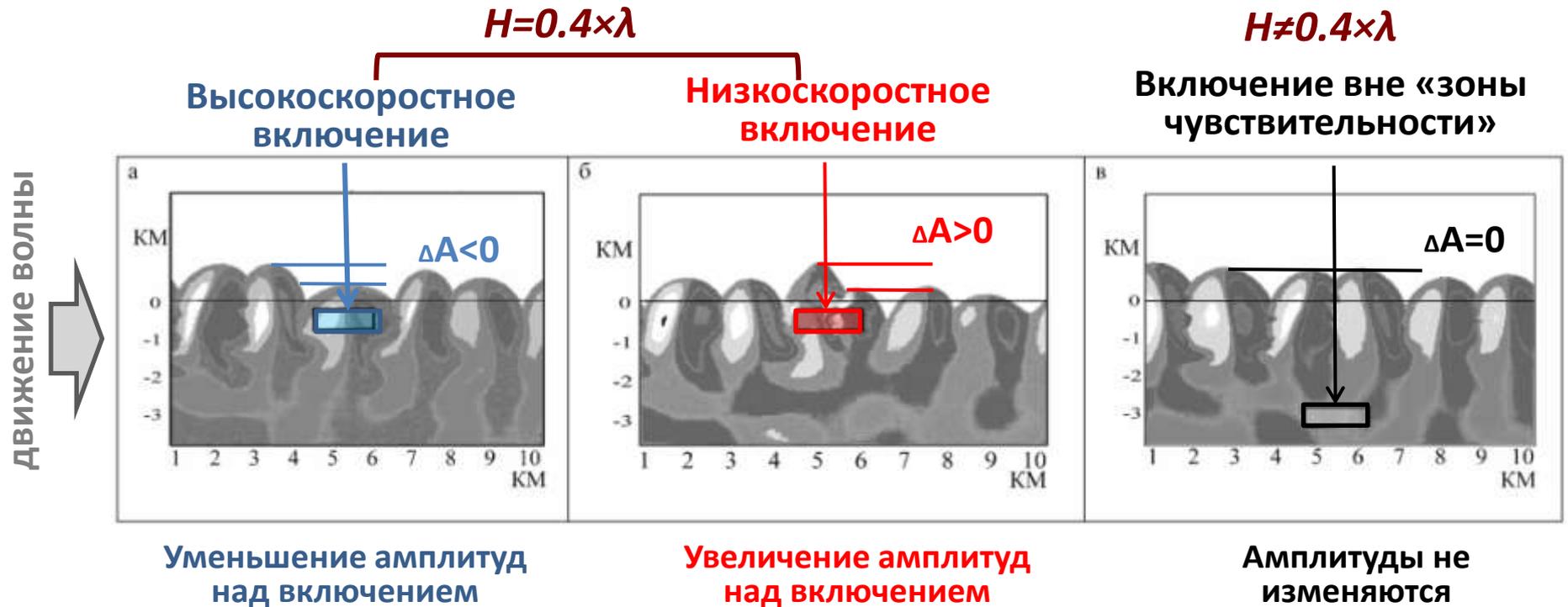
2D- моделирование. Отклонение скорости включения от среды -0.92 дБ



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

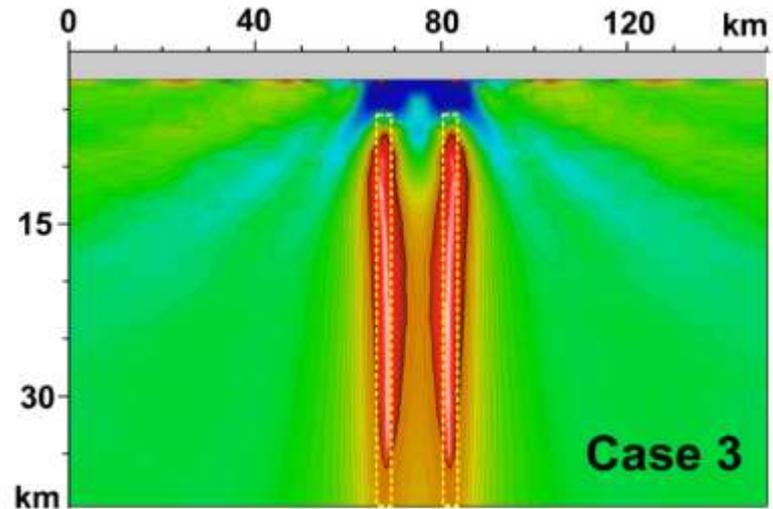
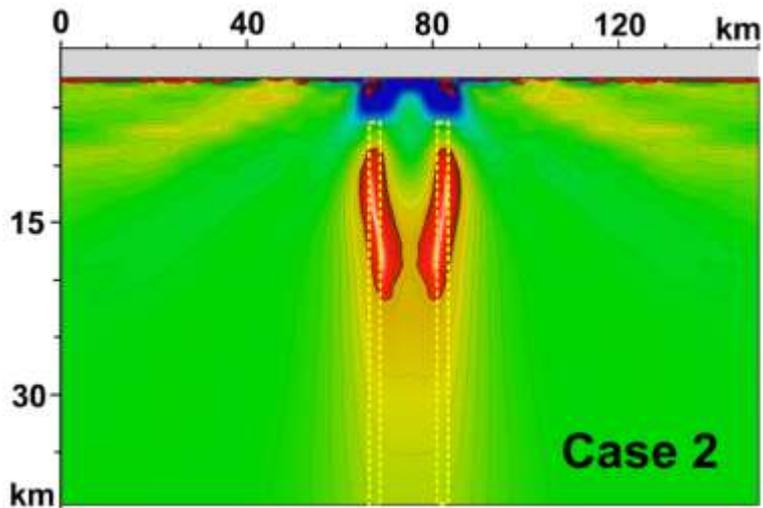
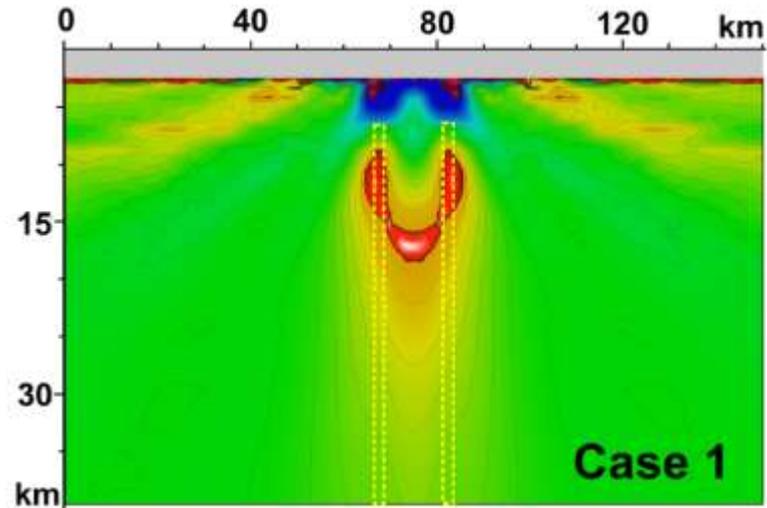
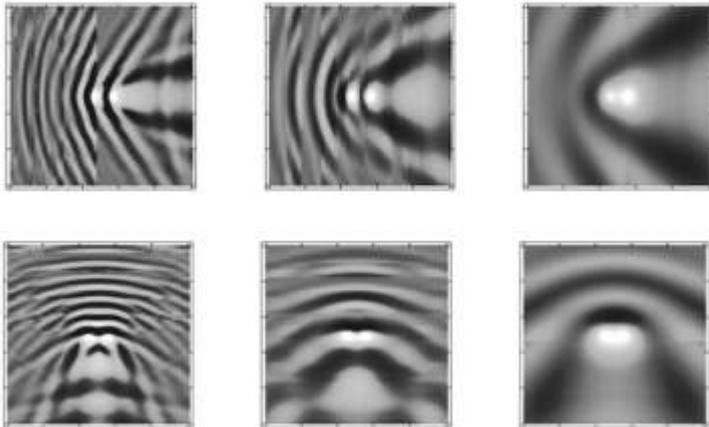


Взаимодействие микросейсм с сейсмическими неоднородностями (результаты численного моделирования)



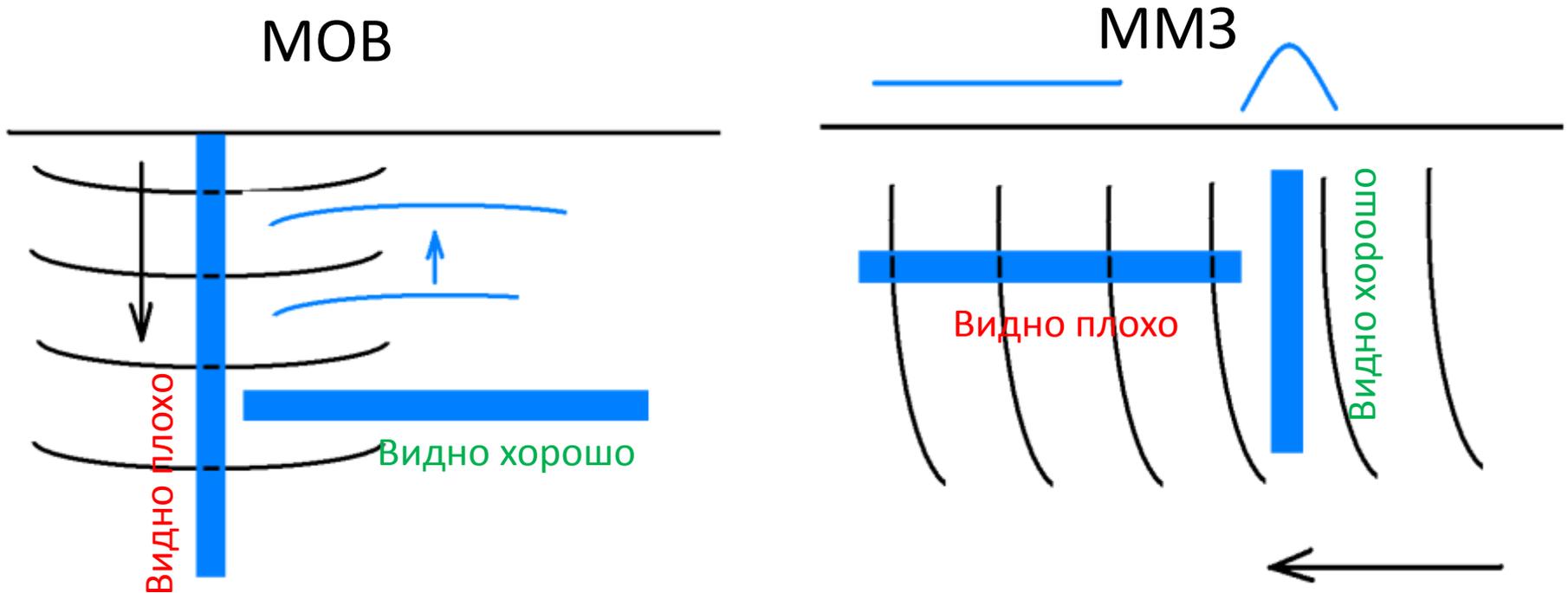
- Взаимодействие микросейсм с неоднородностями **происходит**, если последние расположены на **глубине, равной около 0.4 длины волны**.
- Если неоднородности расположены на **другой глубине ($\neq 0.4\lambda$)**, то **взаимодействие с микросейсмками этой частоты не происходит**.

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.

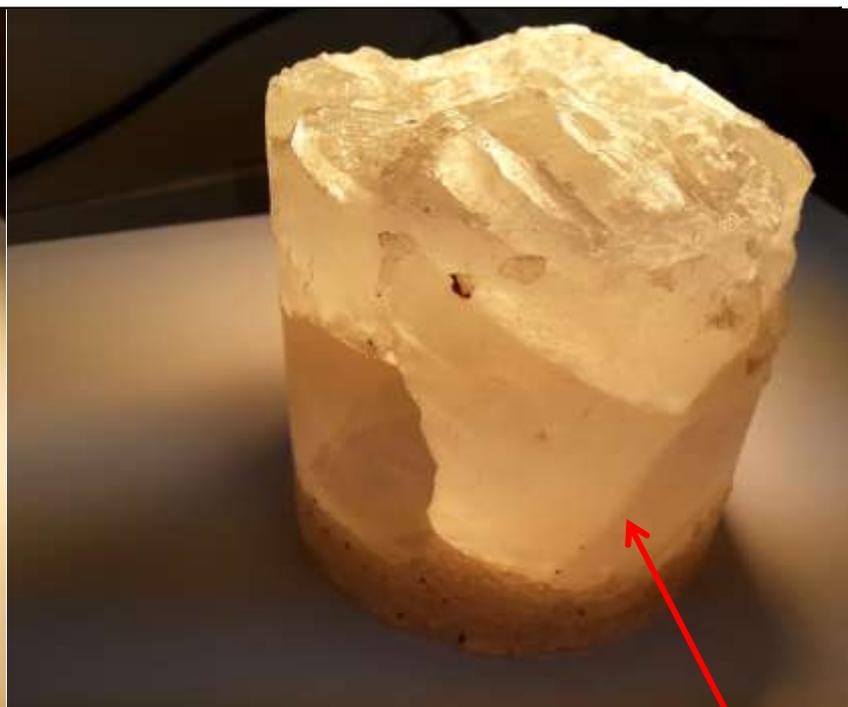


- 1) Не любой геологический объект обязательно будет «виден» с помощью **любого** сейсмического метода.
- 2) ММЗ может успешно выделять структуры, плохо доступные другим сейсмическим методам.

Керн каменной соли в лучах света под разным углом



Ничего не наблюдается

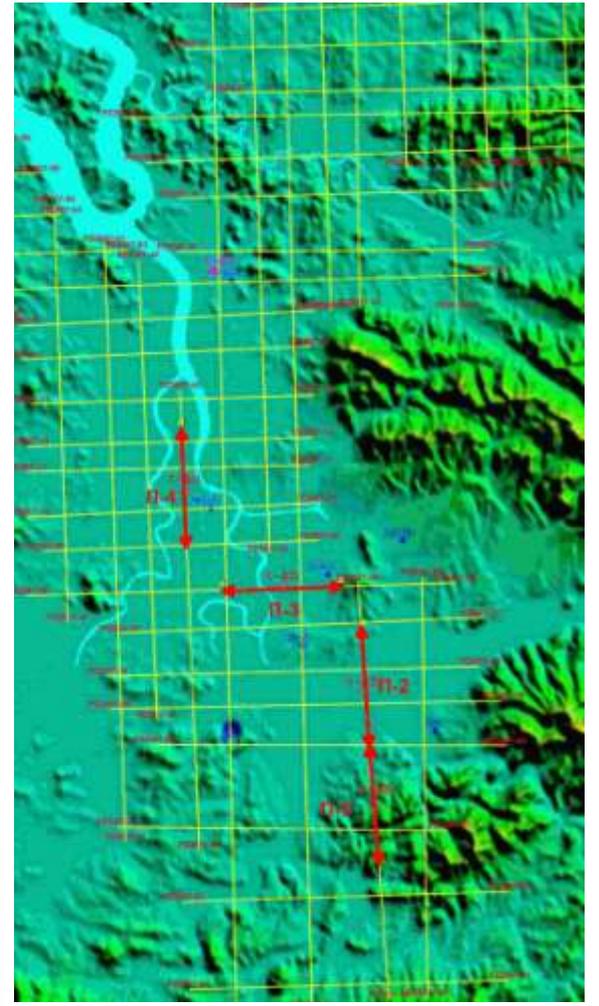
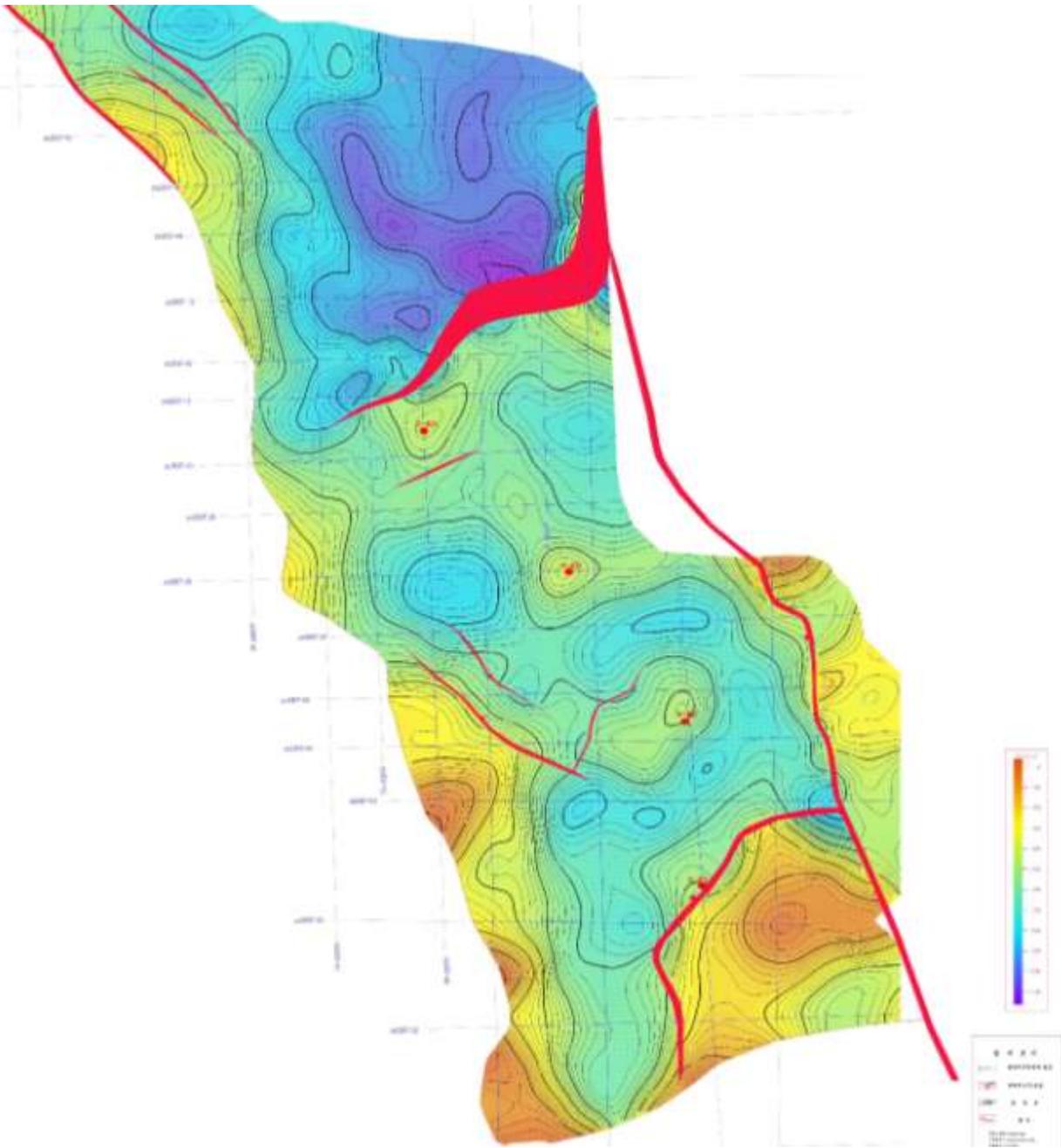


Наблюдается внутренняя поверхность разлома

ТОЧНОСТЬ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

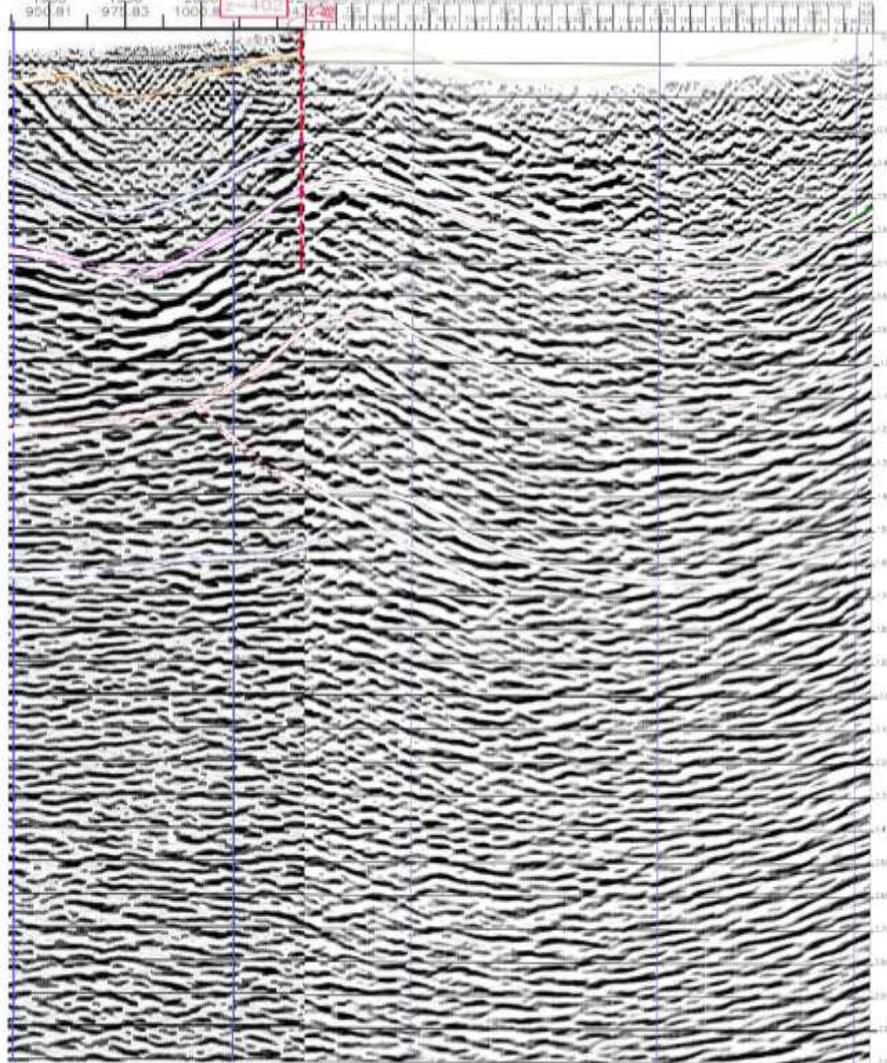
- Из результатов моделирования следует, что малая компактная скоростная неоднородность (с характерными размерами $\sim 20\%$ от глубины залегания или более) может быть обнаружена ММЗ. В плане ее центр определяется без ошибок при достаточно длительном накоплении сигнала.
- Две отдельные неоднородности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

Тем не менее ММЗ способен обеспечить существенную независимую информацию!



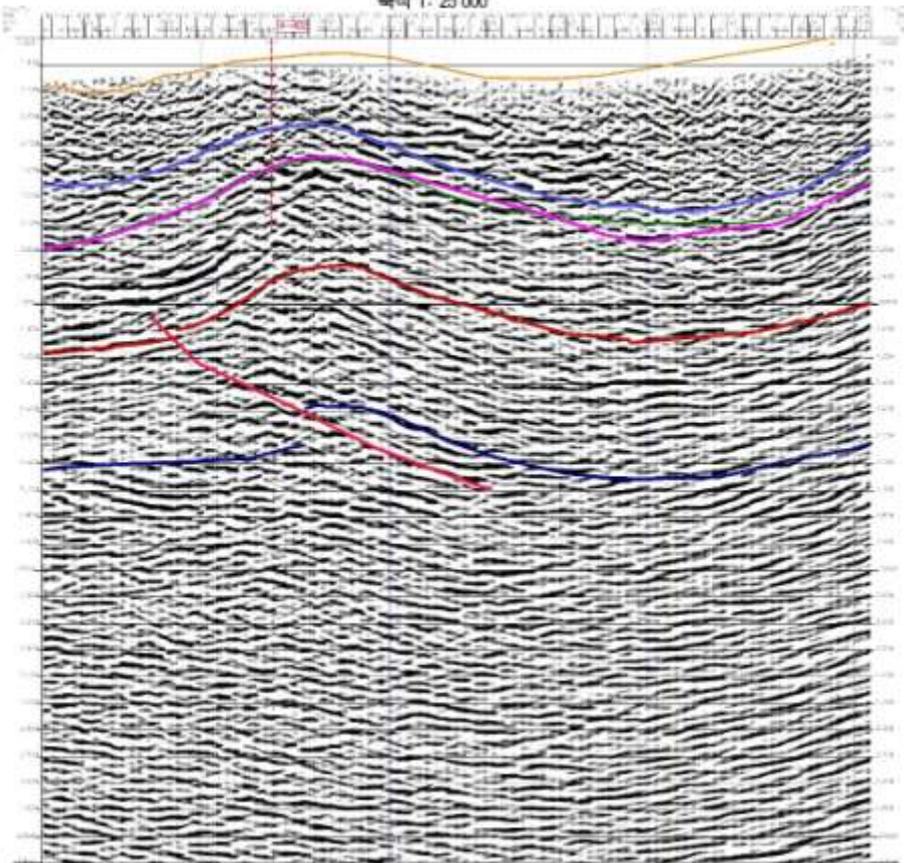
07-04 1900 1880 2000 pz2007-05
924 91 978 83 1007 74 1051 65 1095 56 1139 47 1183 38 1227 29 1271 20 1315 11 1359 2 1403 -7 1447 -16 1491 -25 1535 -34 1579 -43 1623 -52 1667 -61 1711 -70 1755 -79 1799 -88 1843 -97 1887 -106 1931 -115 1975 -124 2019 -133 2063 -142 2107 -151 2151 -160 2195 -169 2239 -178 2283 -187 2327 -196 2371 -205 2415 -214 2459 -223 2503 -232 2547 -241 2591 -250 2635 -259 2679 -268 2723 -277 2767 -286 2811 -295 2855 -304 2899 -313 2943 -322 2987 -331 3031 -340 3075 -349 3119 -358 3163 -367 3207 -376 3251 -385 3295 -394 3339 -403 3383 -412 3427 -421 3471 -430 3515 -439 3559 -448 3603 -457 3647 -466 3691 -475 3735 -484 3779 -493 3823 -502 3867 -511 3911 -520 3955 -529 4000

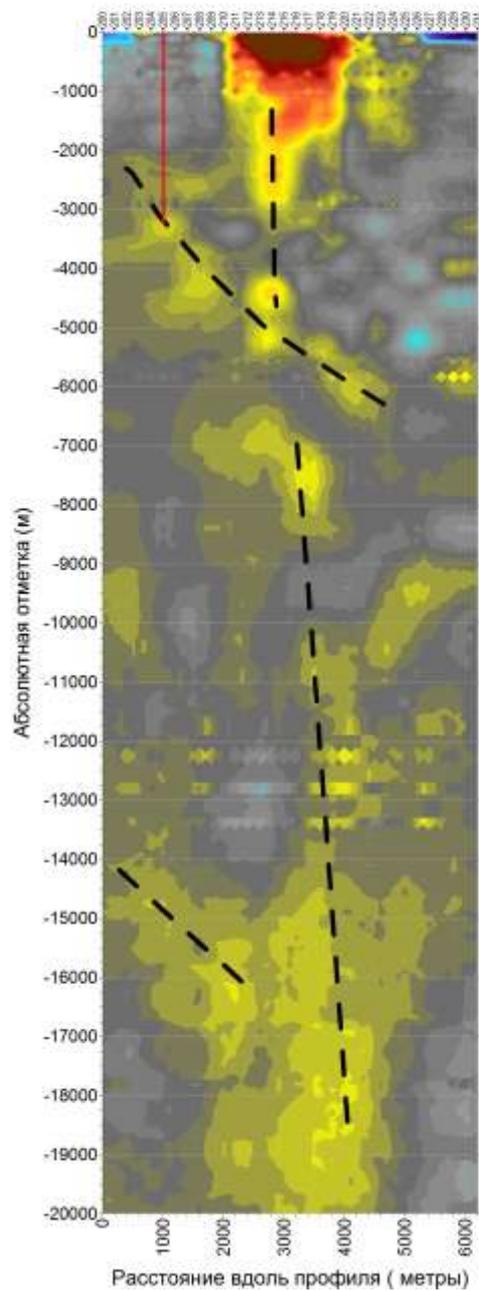
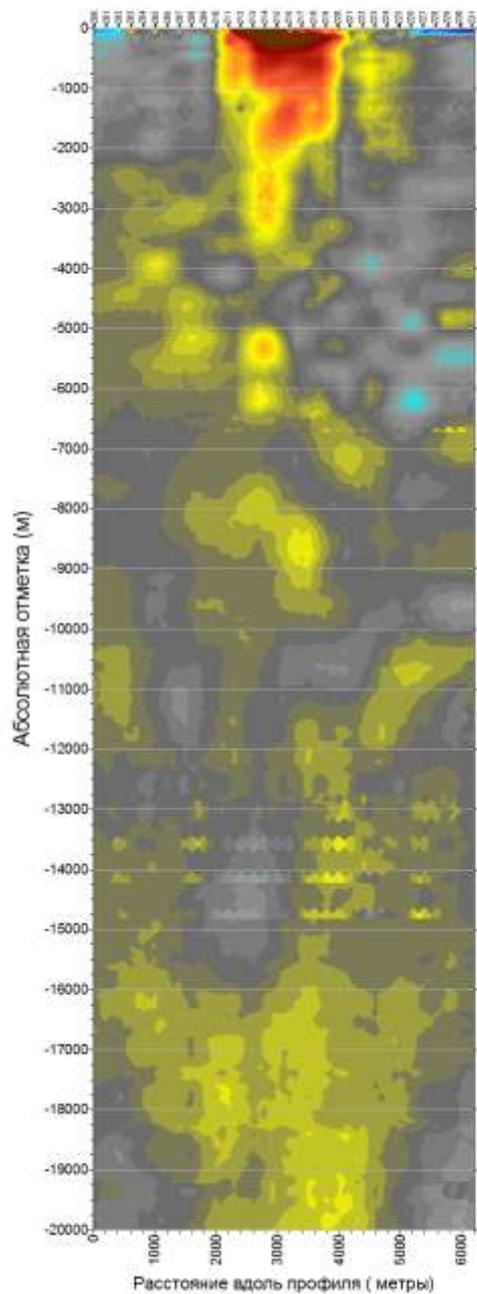
축적 1: 25 000



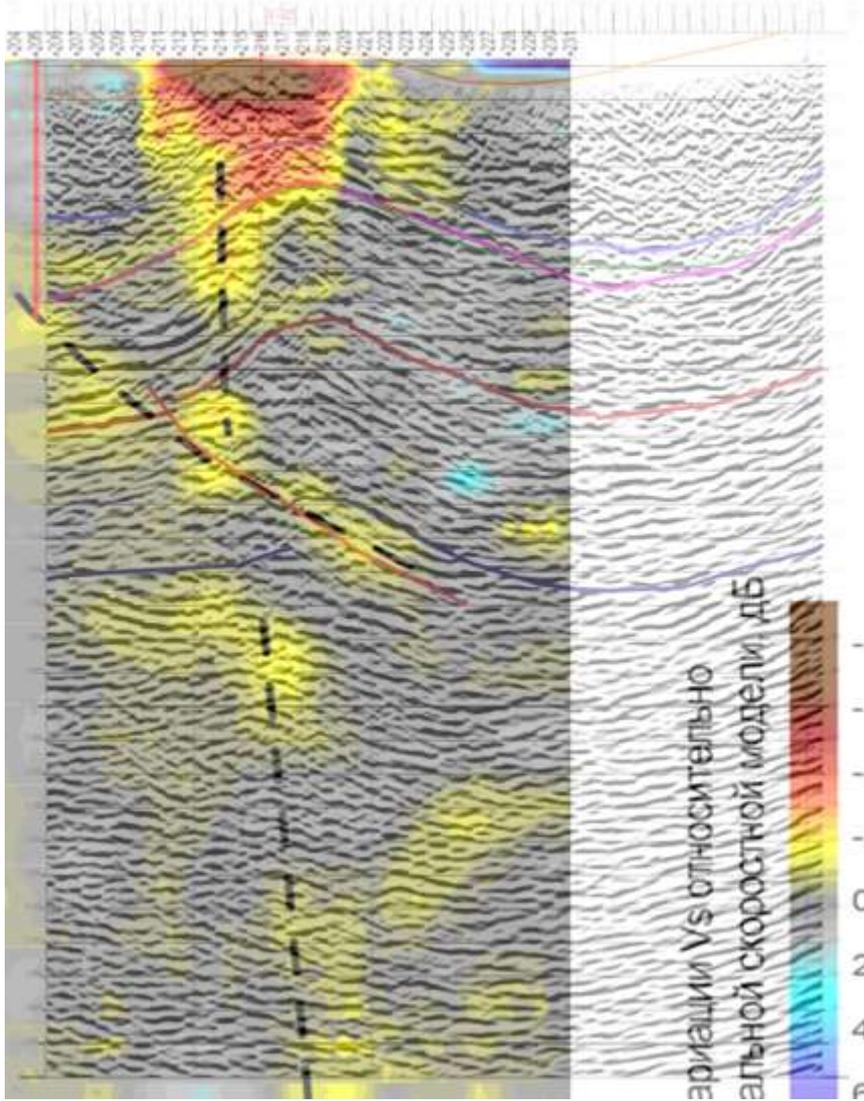
pz2007-49선 탄성파해석자름면(류정리구조 남북선)

축적 1: 25 000





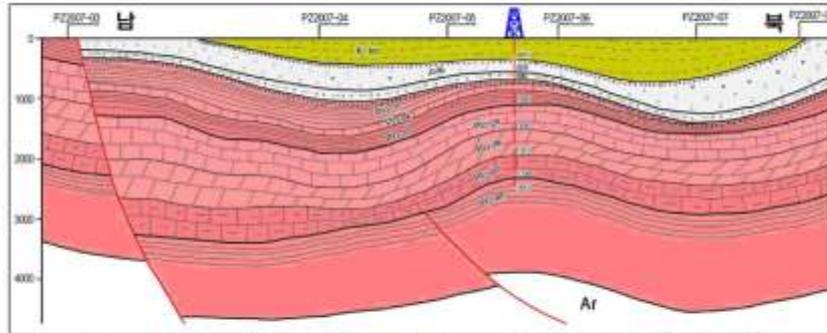
pz2007-49선 탄성파해석지름면(무정리구조 남북선)
축척 1: 25 000



**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

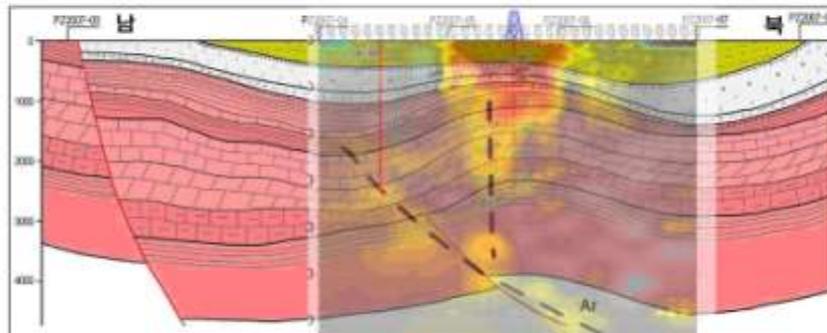
사당유군층상반
구조정점심도: 1040m
최저폐합선: 1690m
폐합높이: 650m
폐합면적: 15kl

※ 심도는 지표로부터
계산된 수직심



류정리구조를 지나는 지질자름면도 (PZ2007-49선)

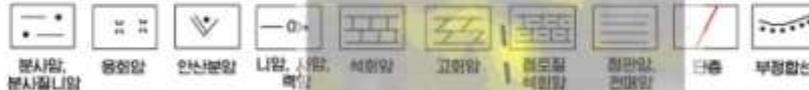
축척 1:25,000



구조요소

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

※ 심도는 지표로부터
계산된 수직심

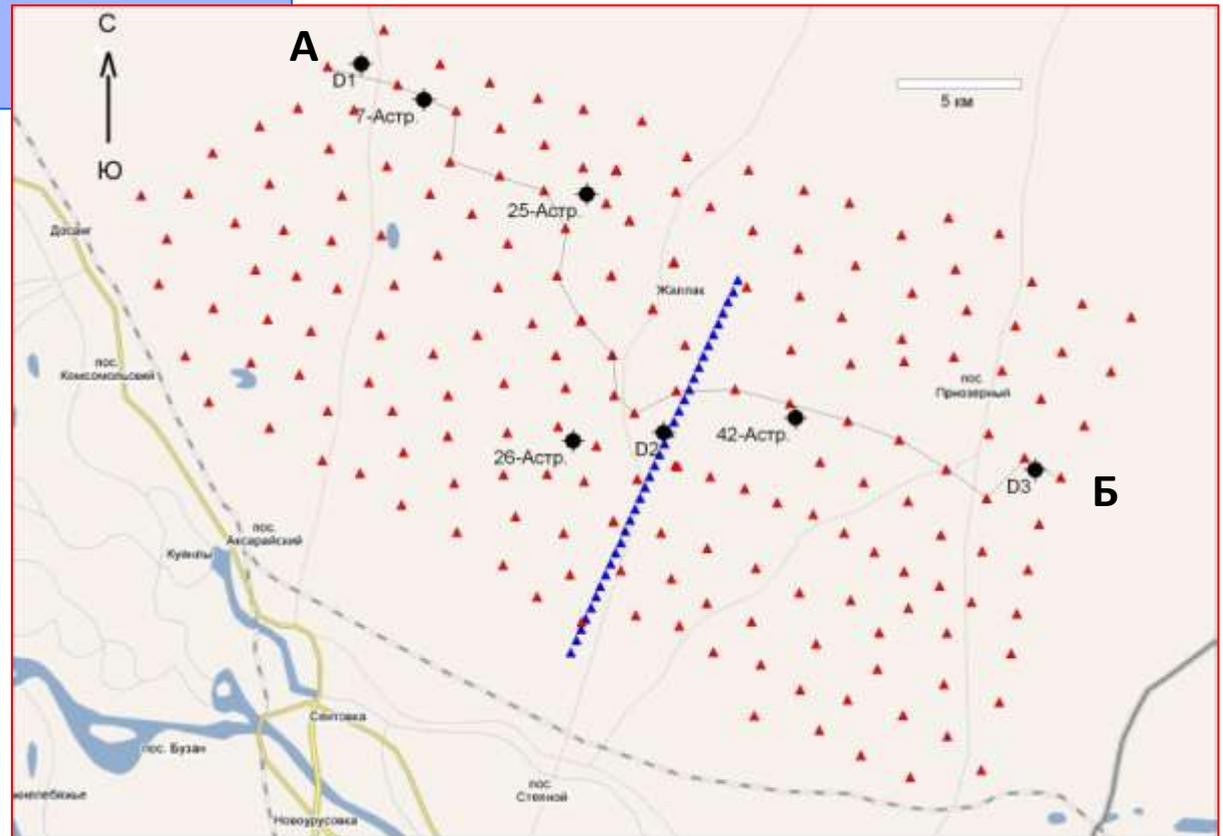
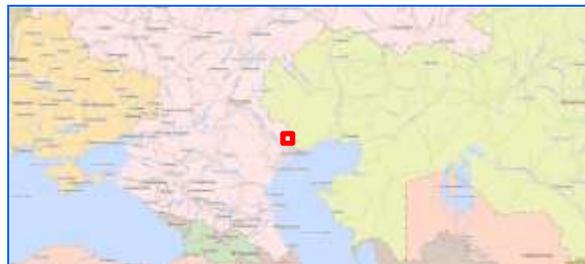


**ЕЩЕ НЕСКОЛЬКО ПРИМЕРОВ
НЕЗАВИСИМОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ММЗ**

Астраханское газо-конденсатное месторождение (АГКМ)



Площадная и профильная съемка ММЗ



пикеты ММЗ по сети



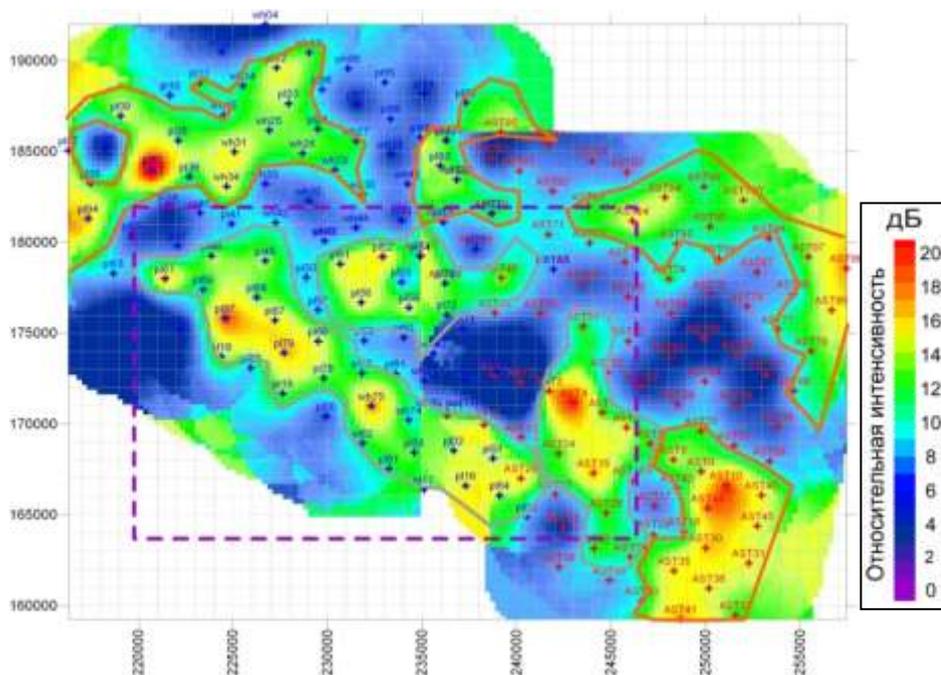
детальный профиль ММЗ



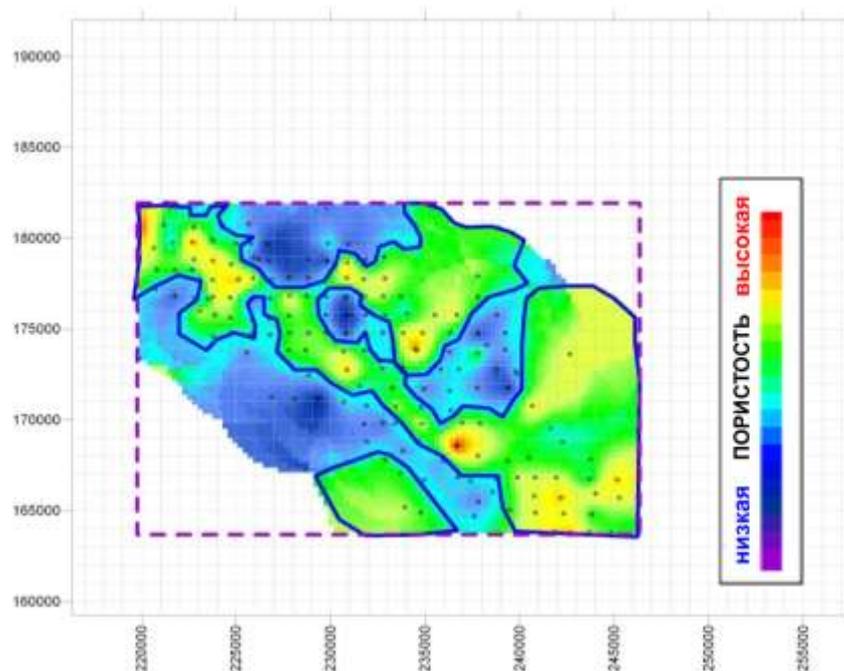
скважины, по которым построен геологический разрез А-Б (см. ниже)

Сравнение данных по пористости с результатами ММЗ

амплитуды микросейсм для
глубины 4.03 км

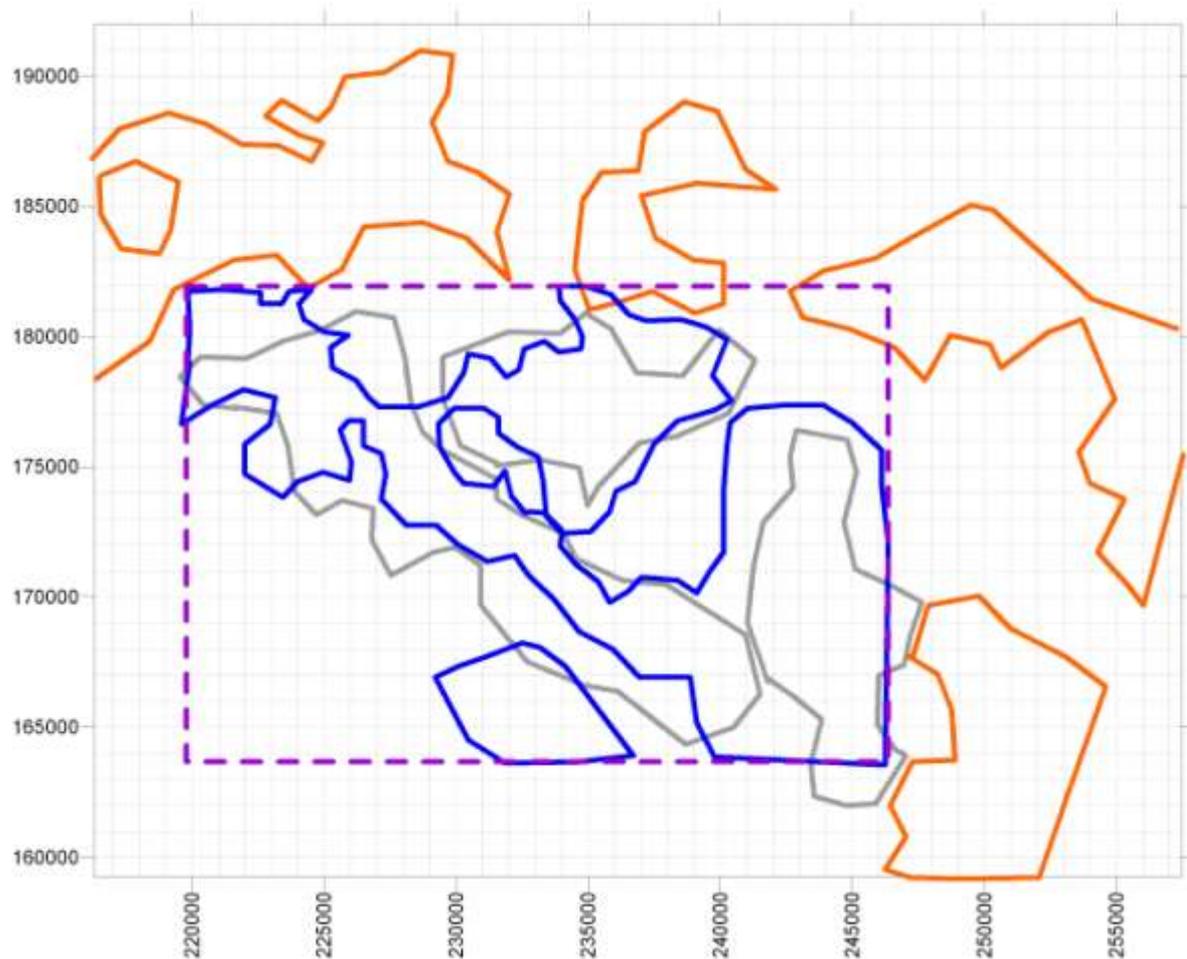


средняя пористость по
измерениям в скважинах в
диапазоне глубин 4-4.1 км



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



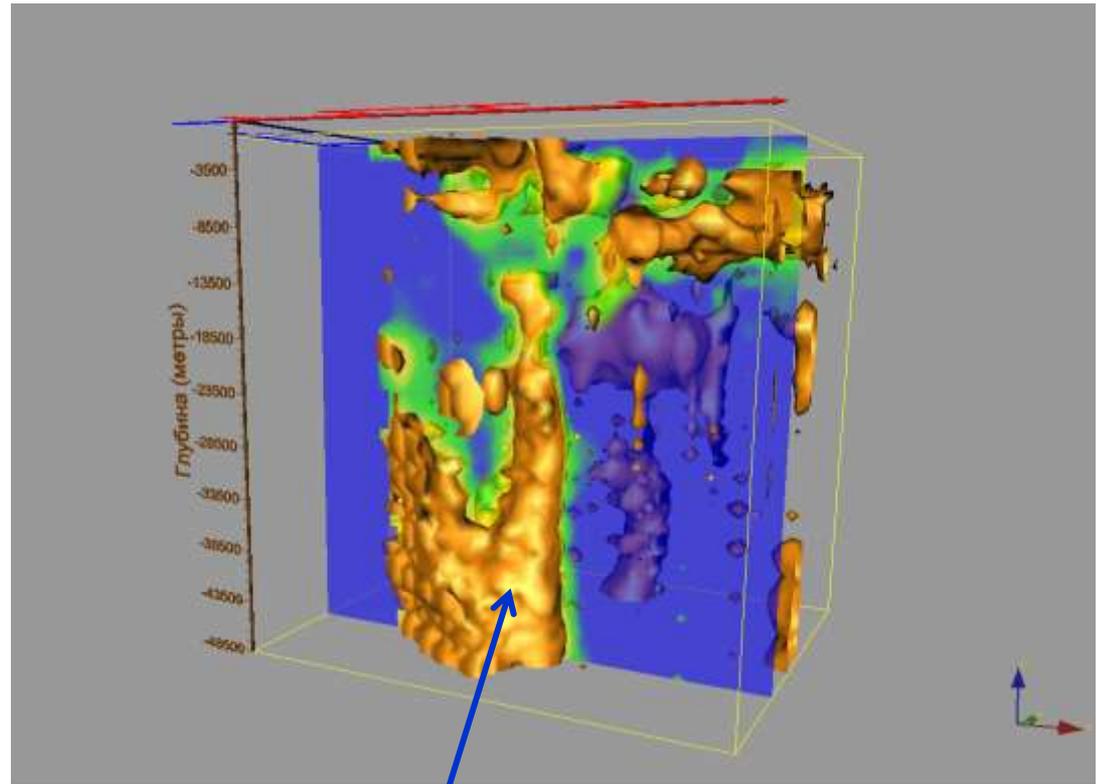
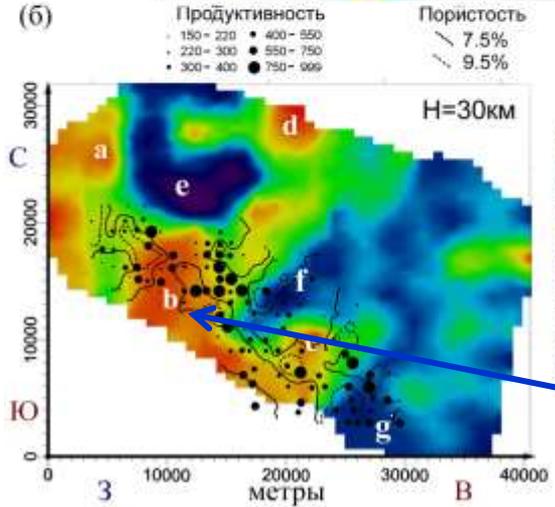
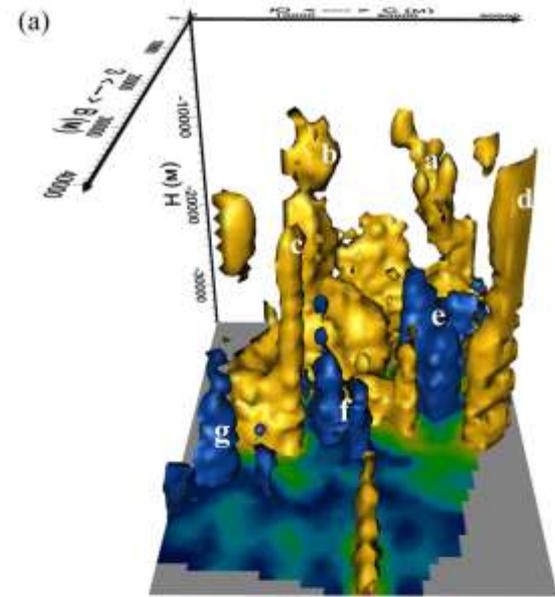
Вероятность попадания в область высокой пористости в зоне обучения при случайном выборе места бурения: **42%**

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:

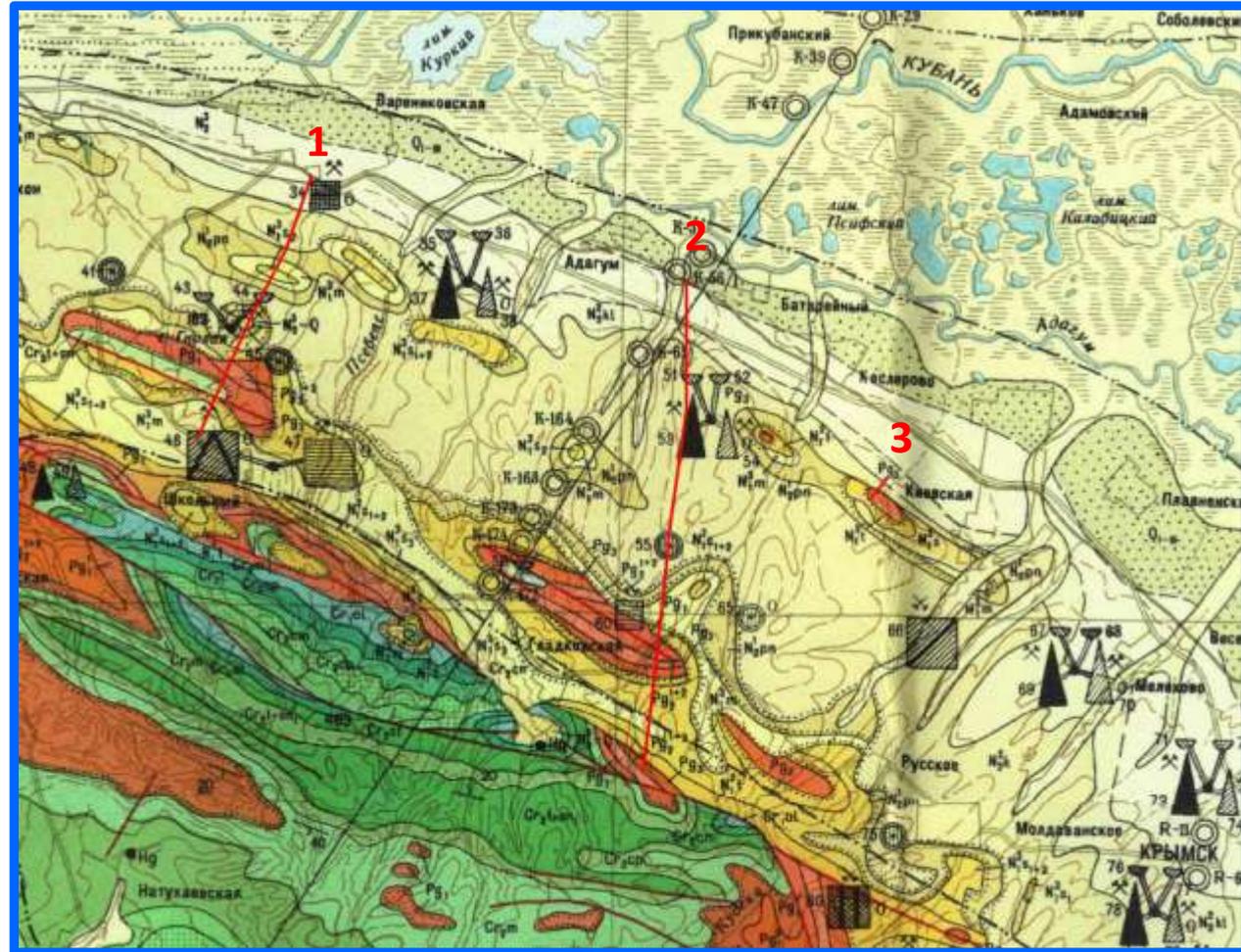
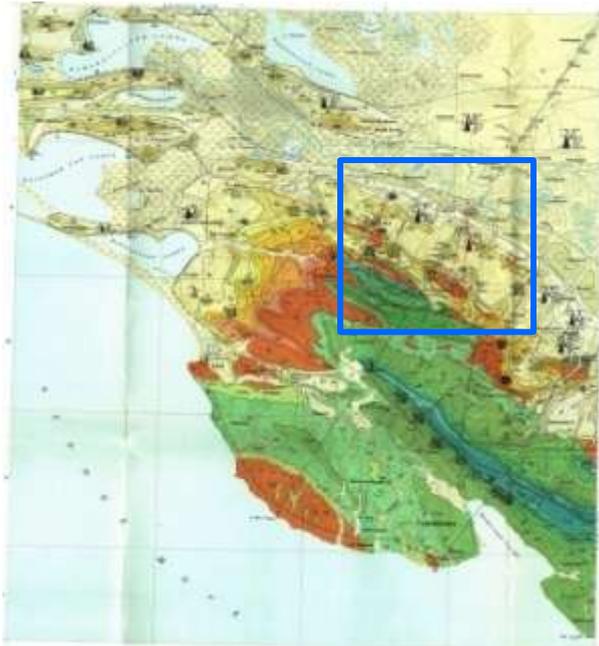
Помимо пористости на продуктивность влияет геометрия флюидных каналов.

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

Карта нефтегазоносности Западного Предкавказья

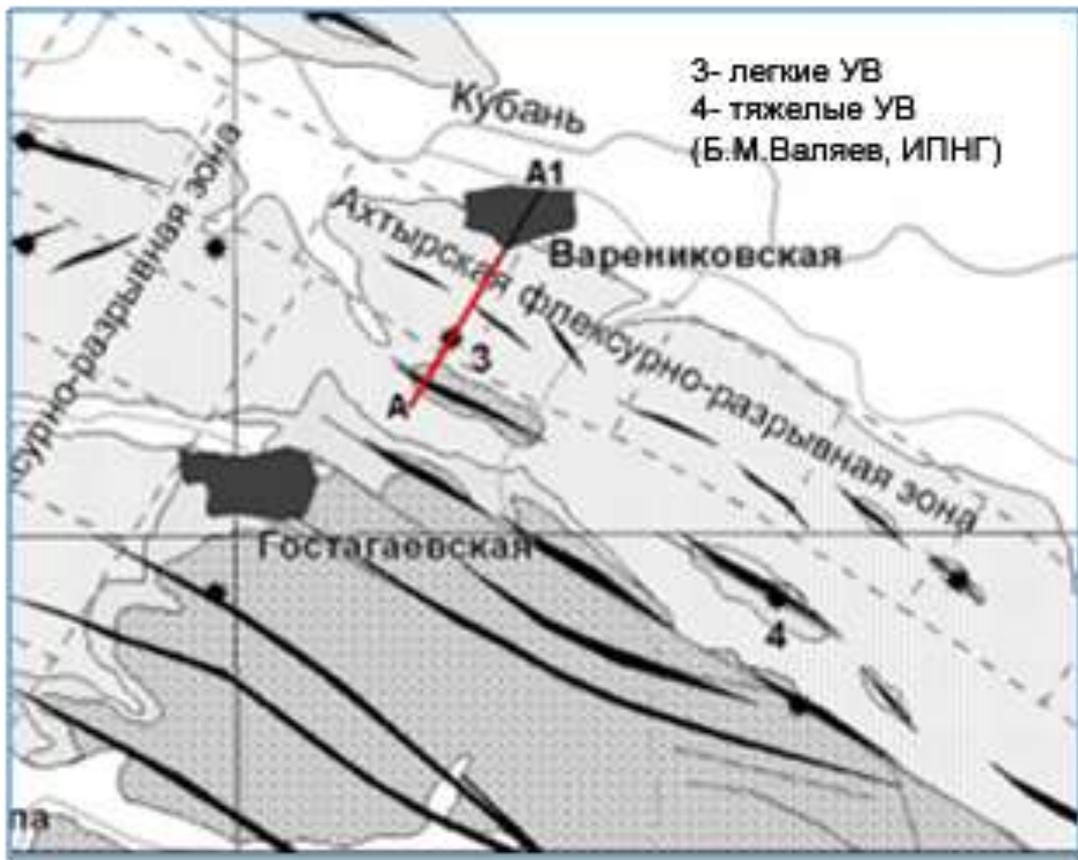


профиль ММЗ

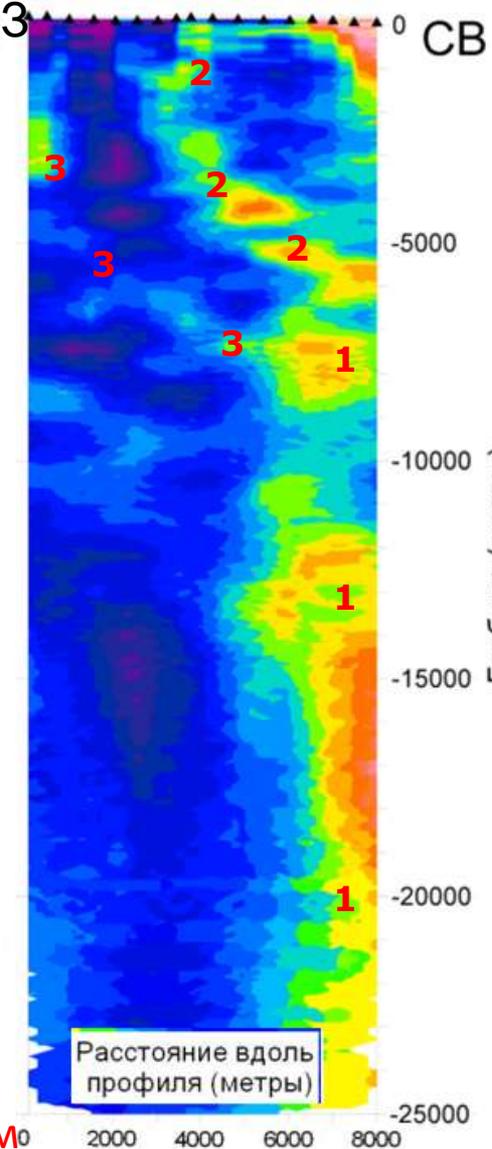


Створ Gladkovskogo

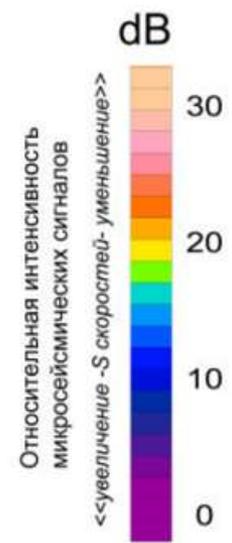
Шуго



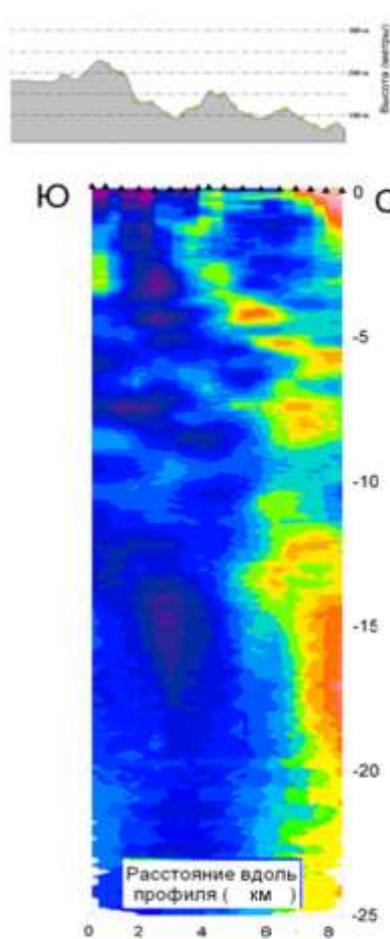
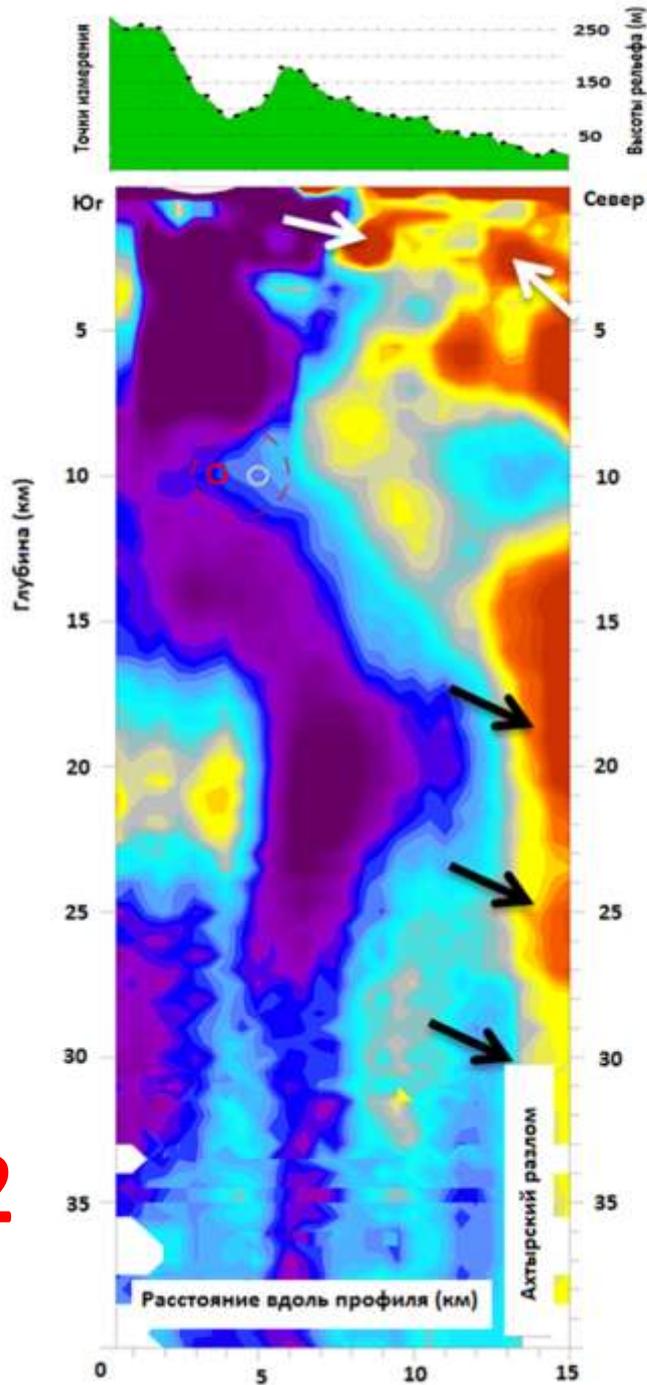
ЮЗ 0 СВ



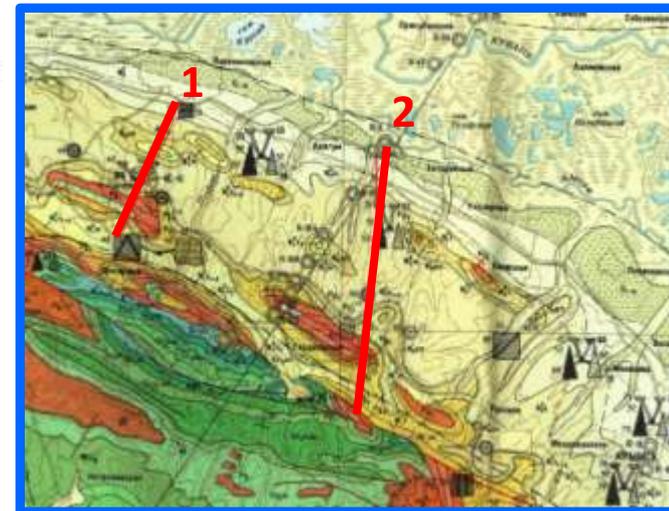
- 1** – зона пониженных скоростей, ассоциируемая с Ахтырским разломом;
- 2** – зона пониженных скоростей, ассоциируемая с питающим разломом вулкана Шуго;
- 3** – зона пониженных скоростей, ассоциируемая с Gladkovским разломом

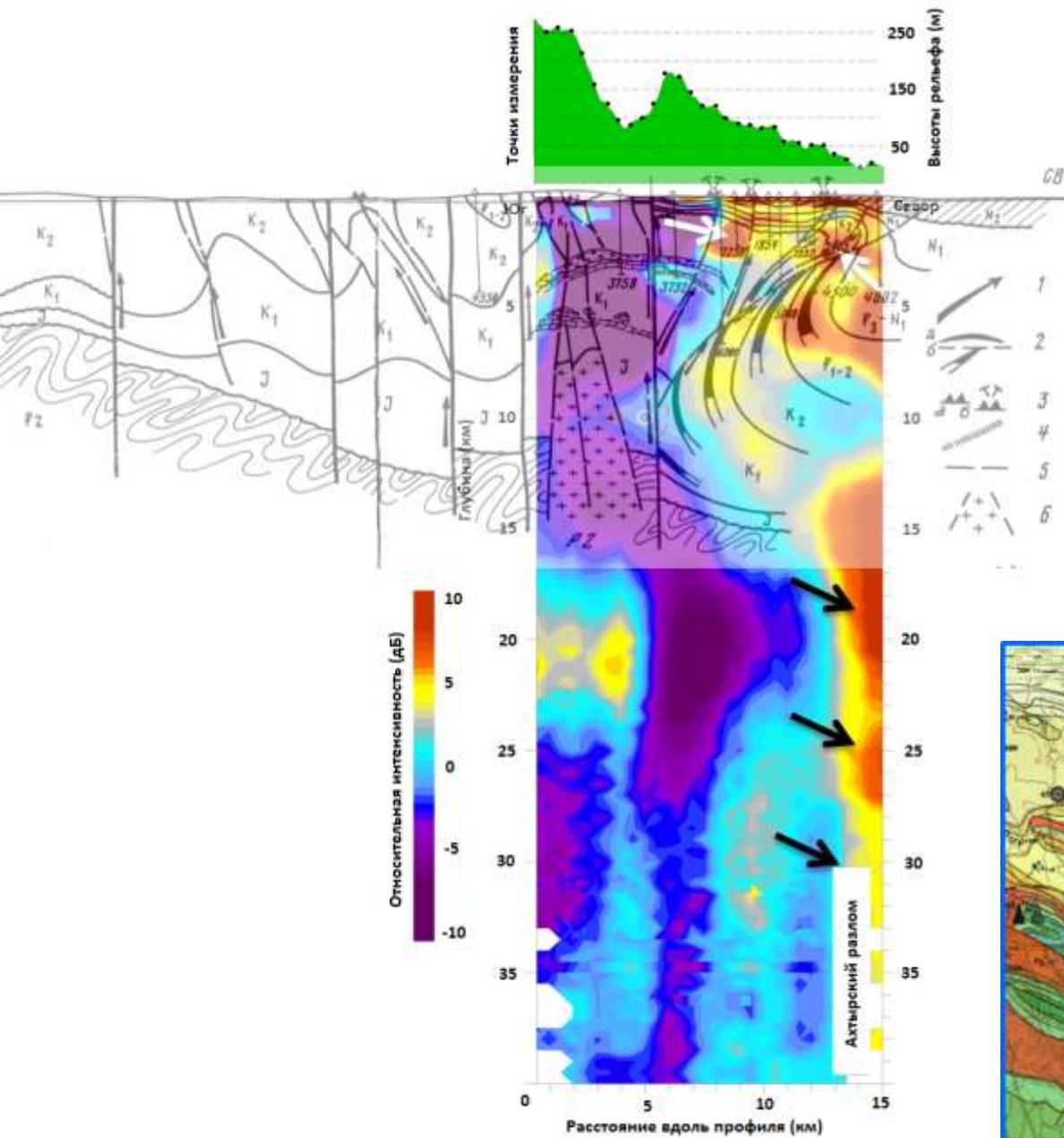


Условия коллизии и надвига с левосторонним сдвигом



- ✓ 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).

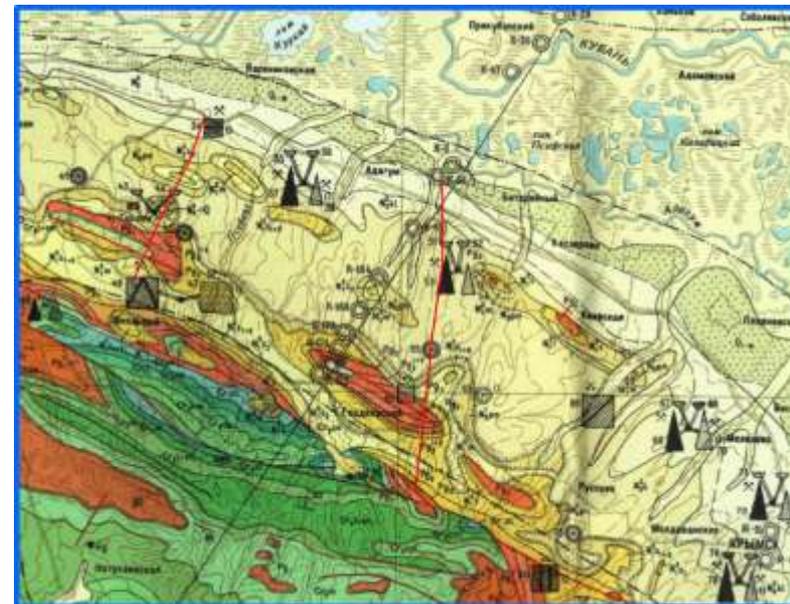




Летавин А.И., Перерва В.М Разрывная тектоника и перспективы нефтегазоносности краевой зоны Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1987

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

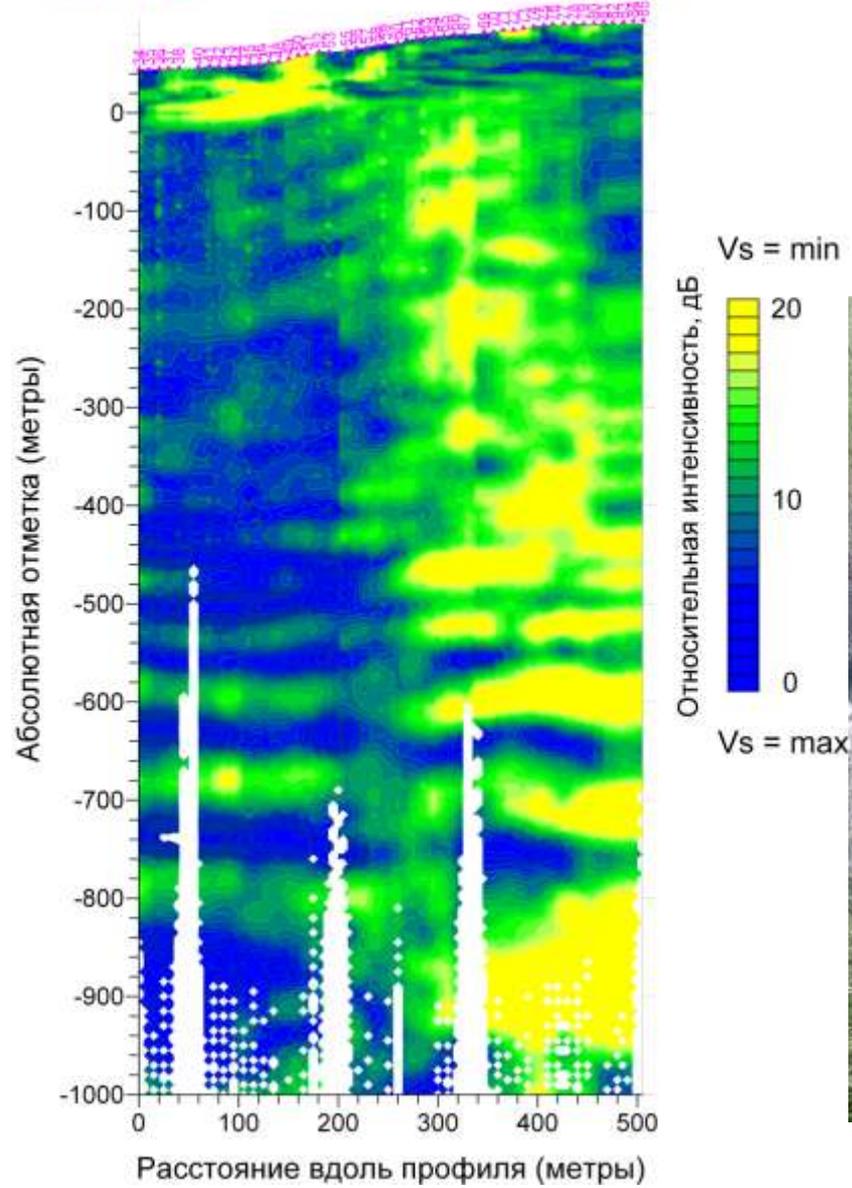
1 — предполагаемое направление миграции пластовых флюидов (в том числе УВ); 2 — газонефтяные залежи: а — установленные, б — предполагаемые; 3 — грязевые вулканы: а — древние, б — современные; 4,5 — разрывные нарушения: 4 — региональные, 5 — локальные; 6 — предполагаемые интрузии



3

Север

Юг



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗЛОМА

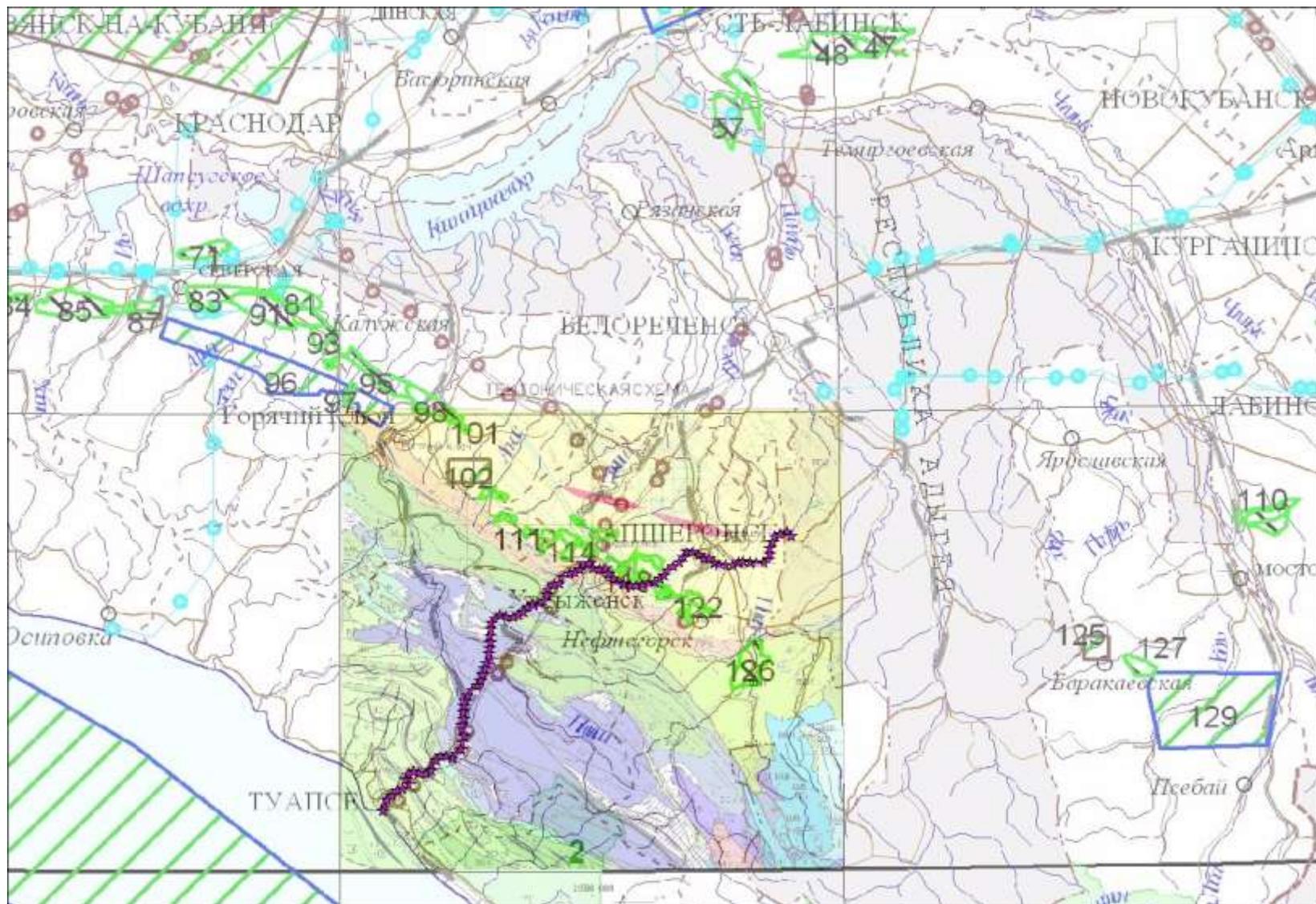


**ММЗ позволяет по-новому взглянуть
на стратегию разведки и поиска УВ:**

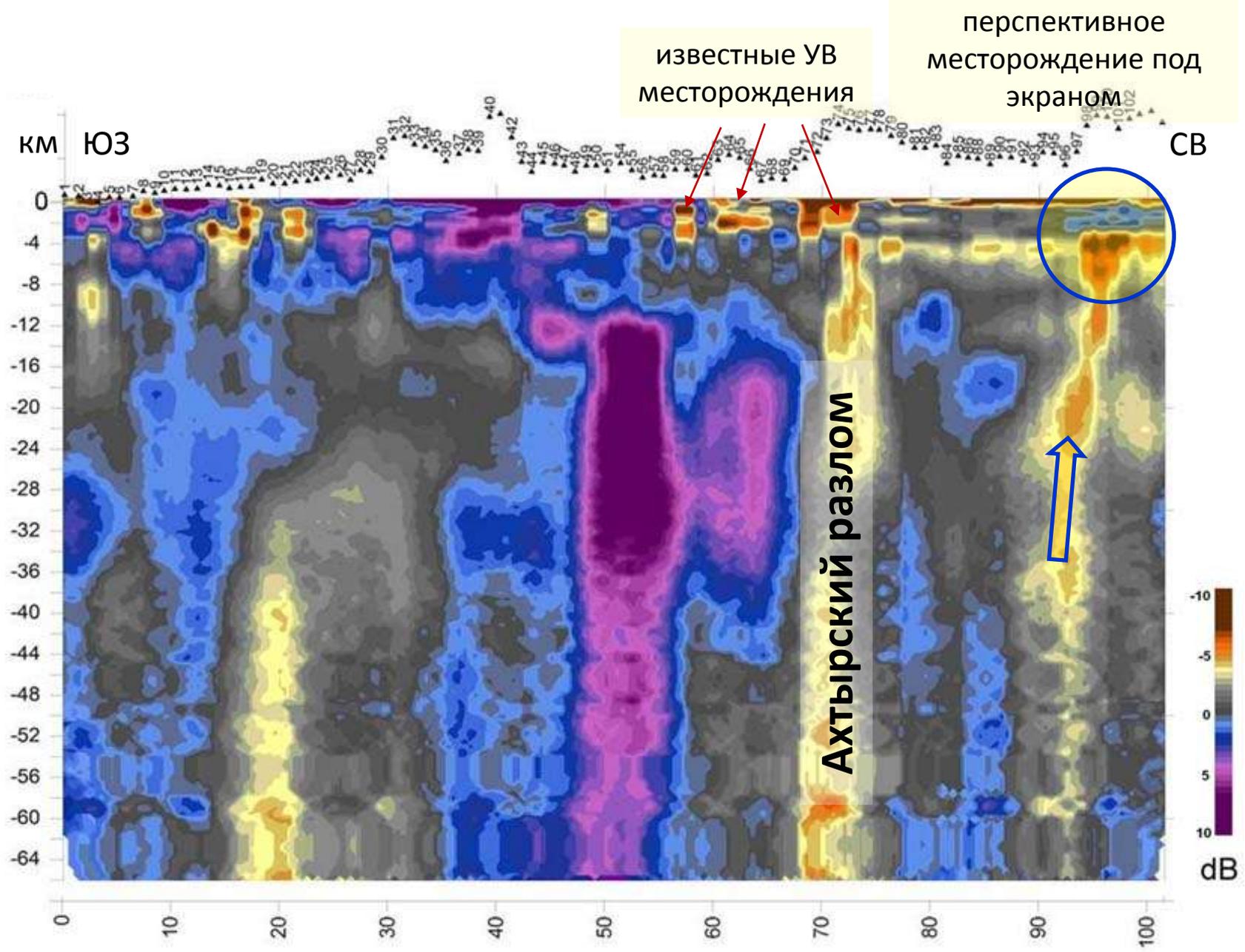
**во-первых, поиск системы
флюидодинамических каналов и,**

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

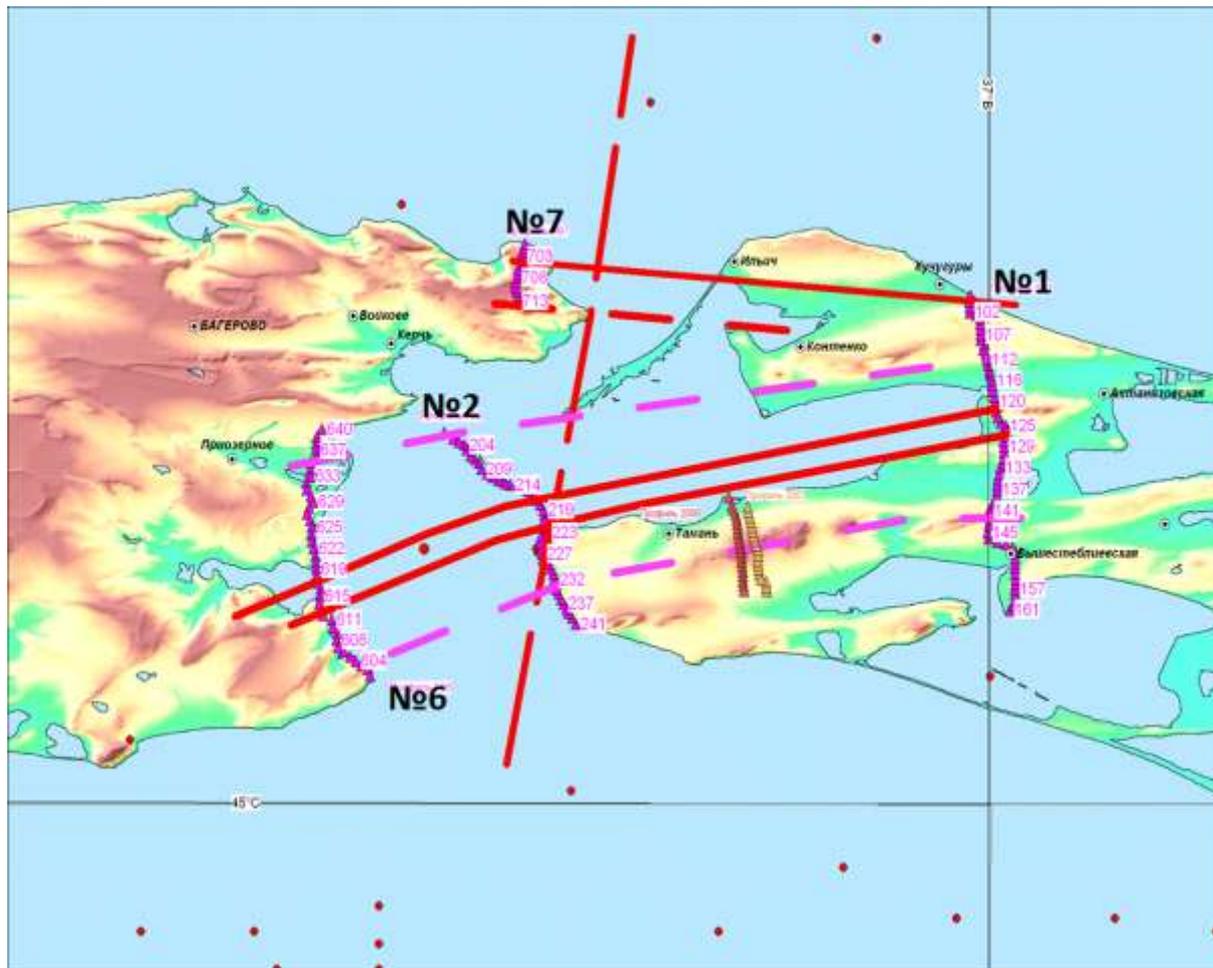
Краснодарский край, 2013



Сейсмический профиль через Кавказ и Предкавказье

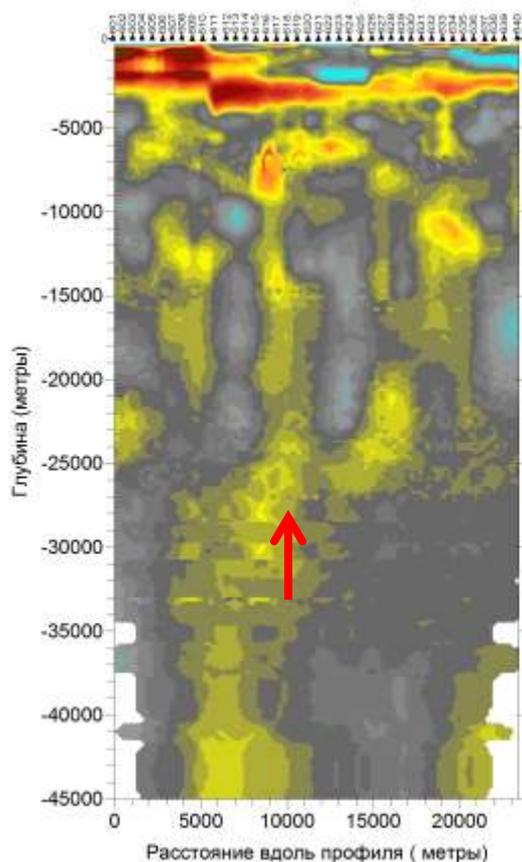


ЗОНА СОЧЛЕНЕНИЯ КРЫМ-КАВКАЗ

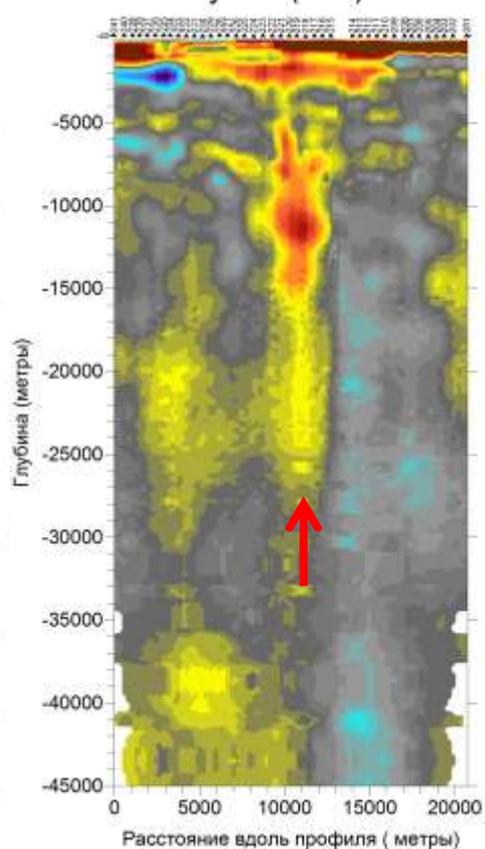


Положение профилей ММЗ в районе проектируемого объекта и карта рельефа.
Треугольники – пункты расстановки сейсмостанций. Красные кружки – последние слабые землетрясения.
Сплошные красные линии – выделенные по ММЗ активные разломы в фундаменте. Пунктирные красные линии – предполагаемые разломы в фундаменте 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.

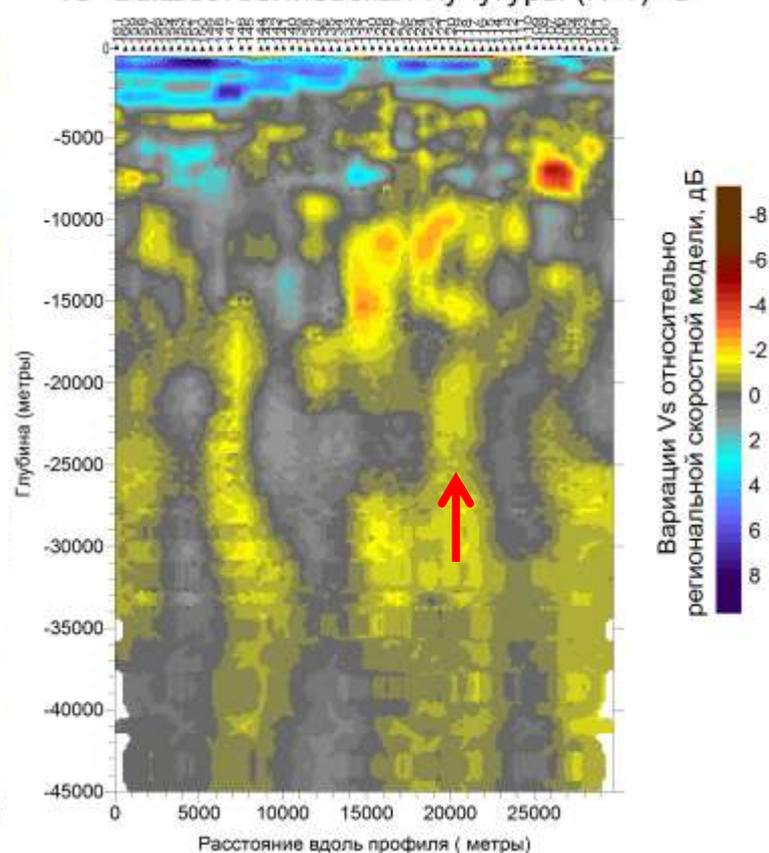
Ю Заветное - Керчь (№6) С



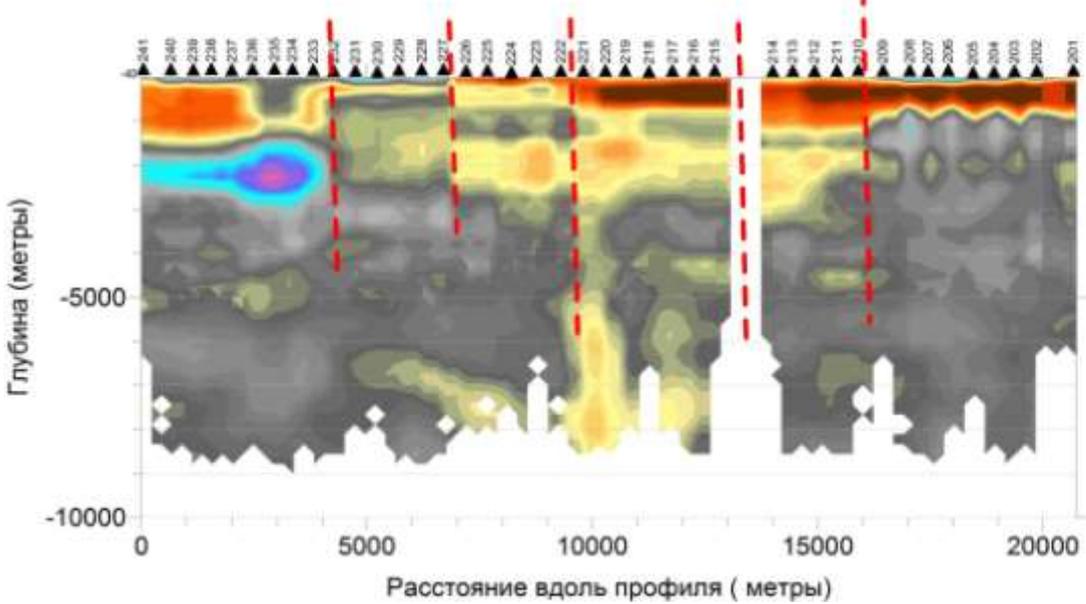
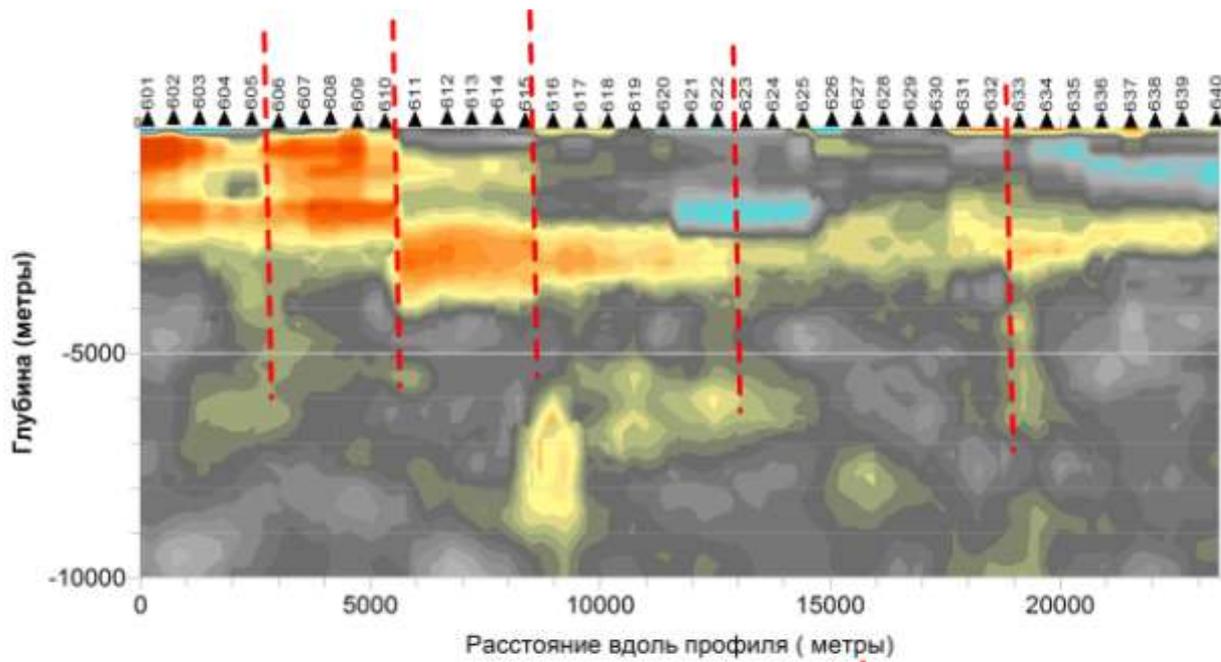
Ю Тузла (№2) С



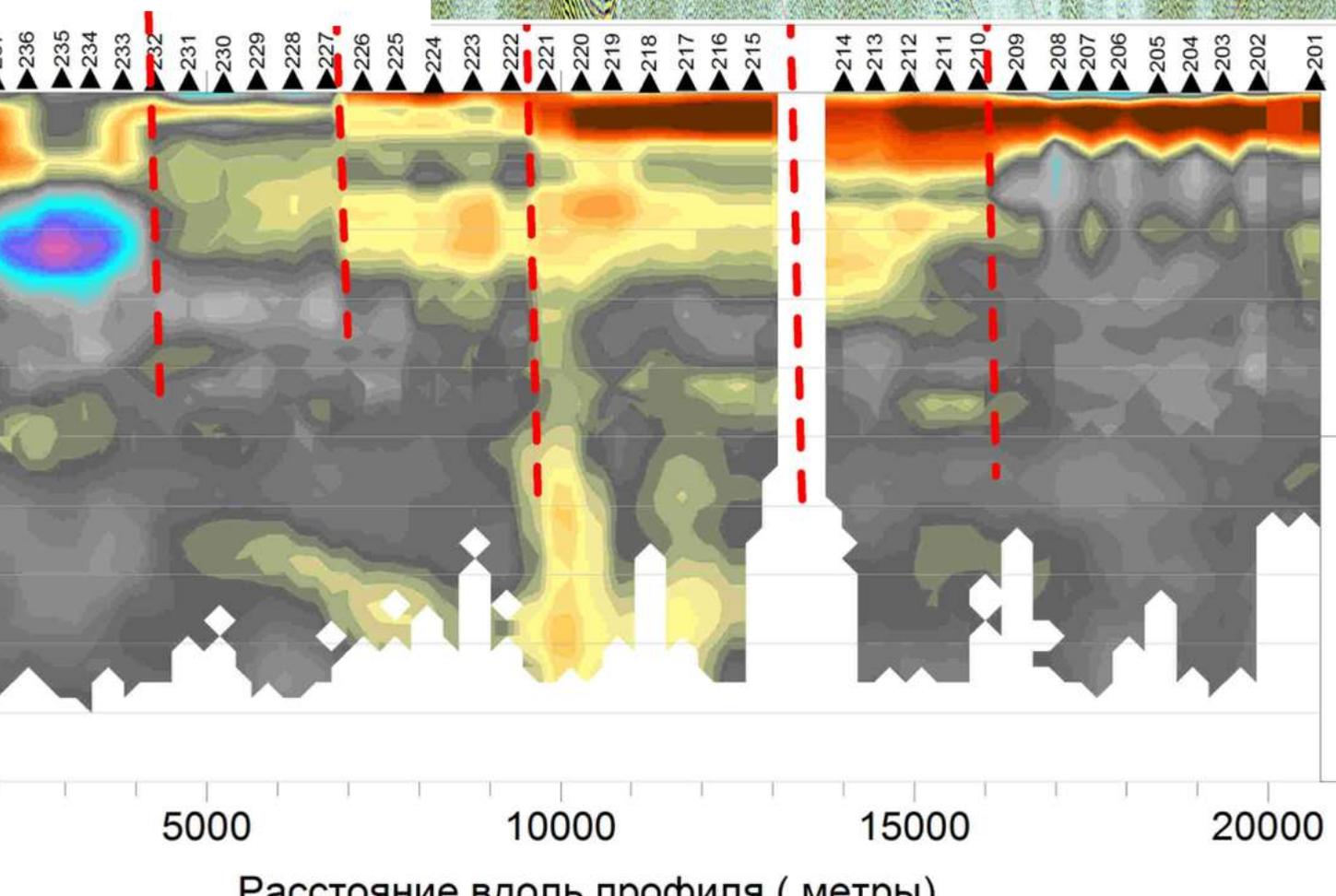
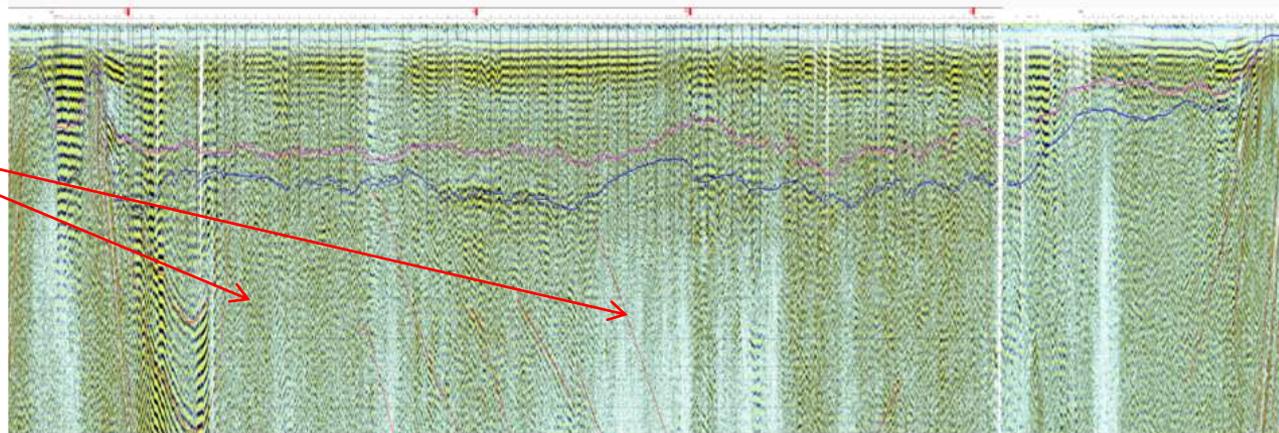
Ю Вышестеблиевская-Кучугуры (№1) С



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 !



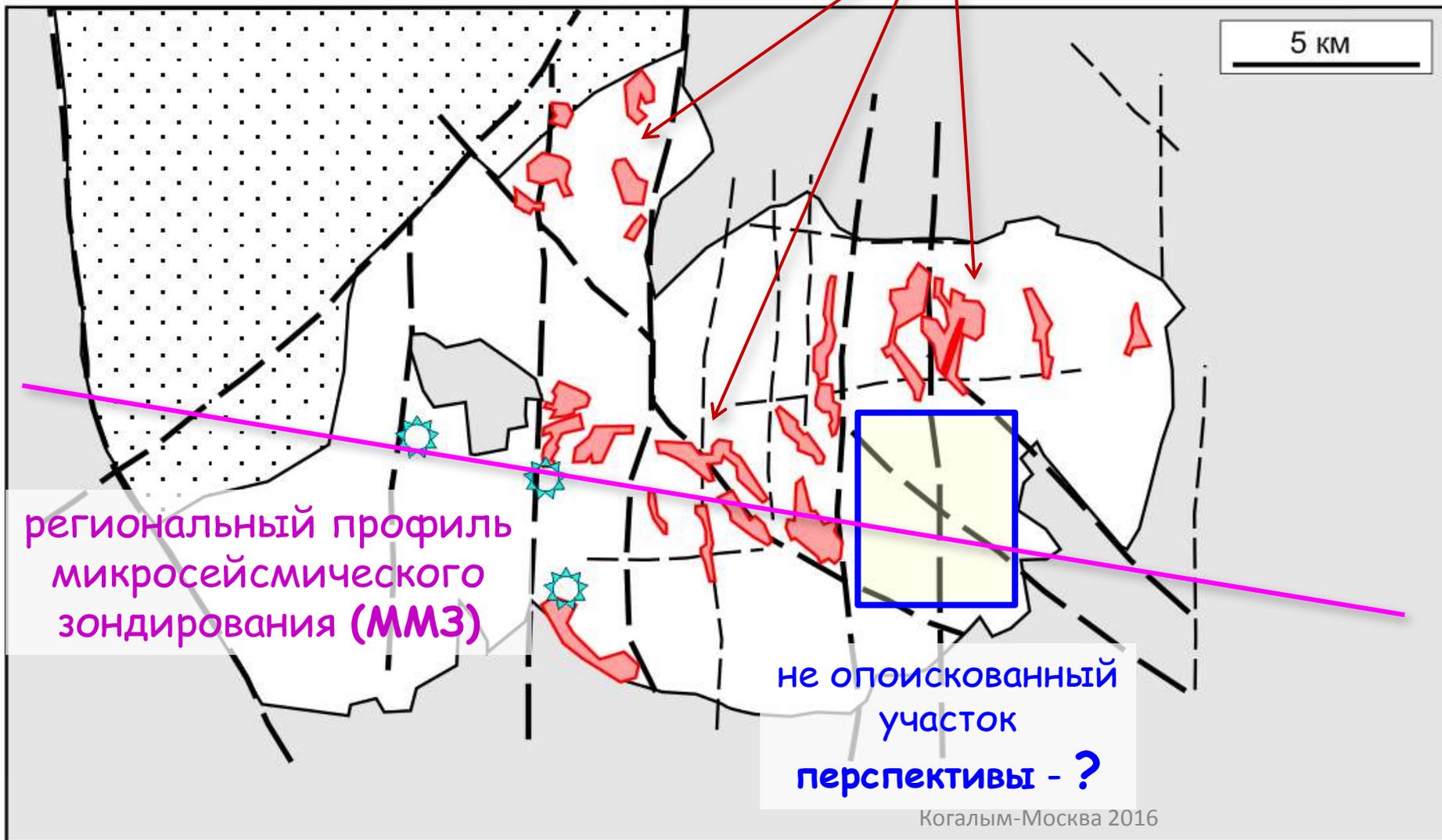
ММЗ на МО-У месторождениях Стрельцовского рудного поля



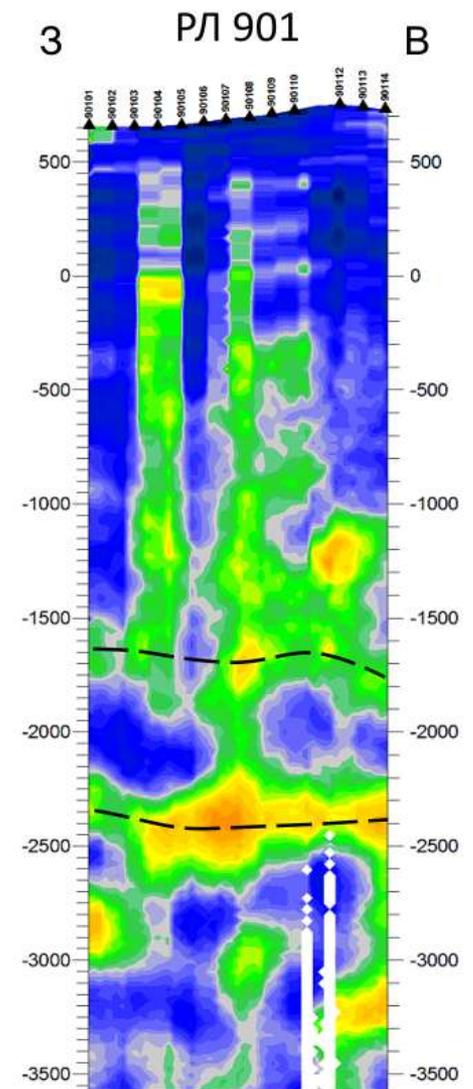
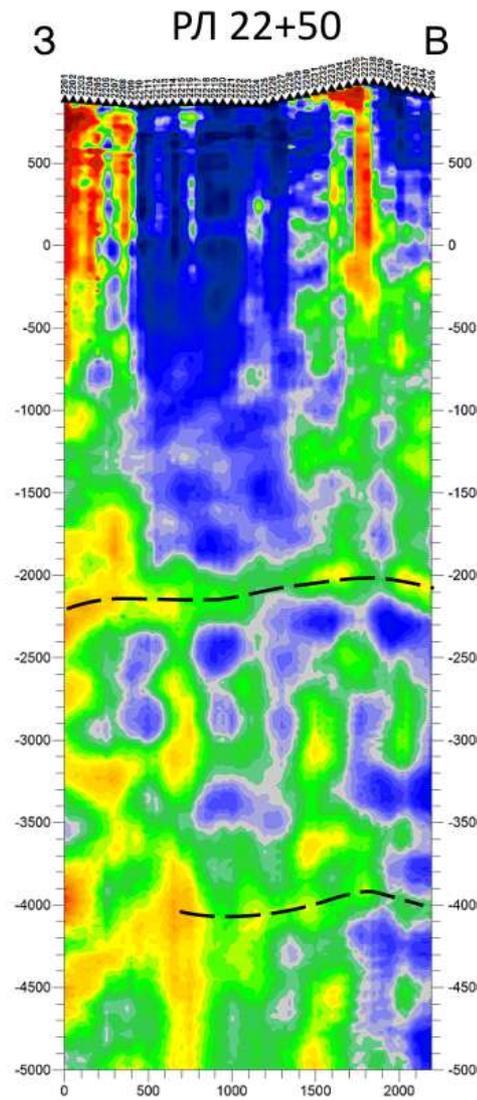
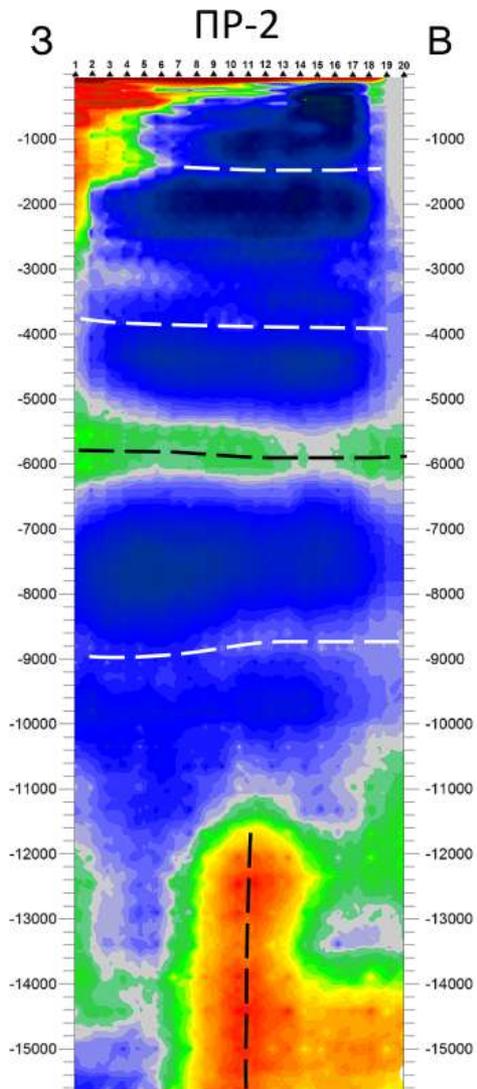
Когалым-Москва 2016

Стрельцовское урановорудное поле (Восточное Забайкалье)

Месторождения (250 тыс. тонн U)



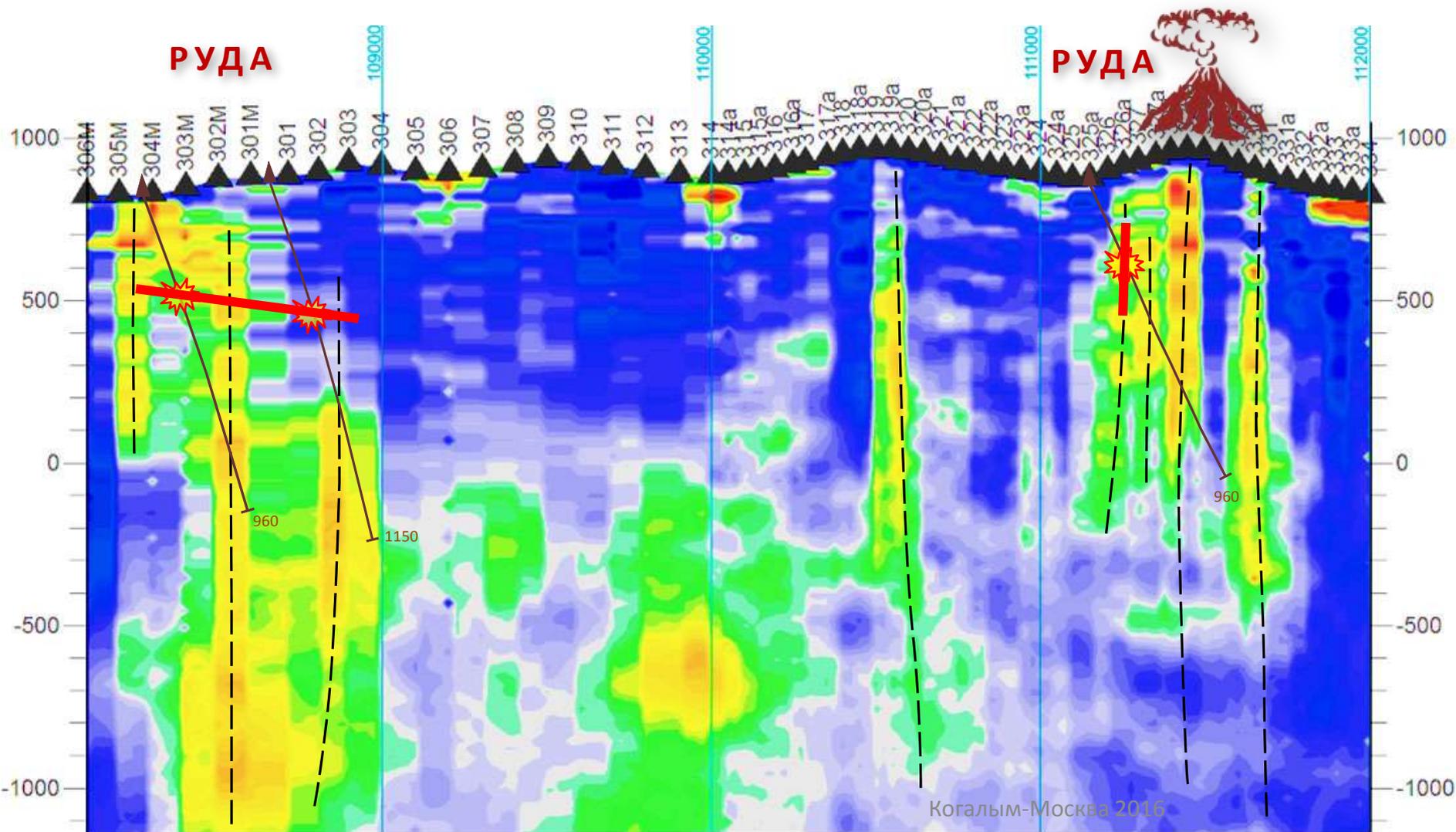
Полгие и субвертикальные структуры в сейсмических полях

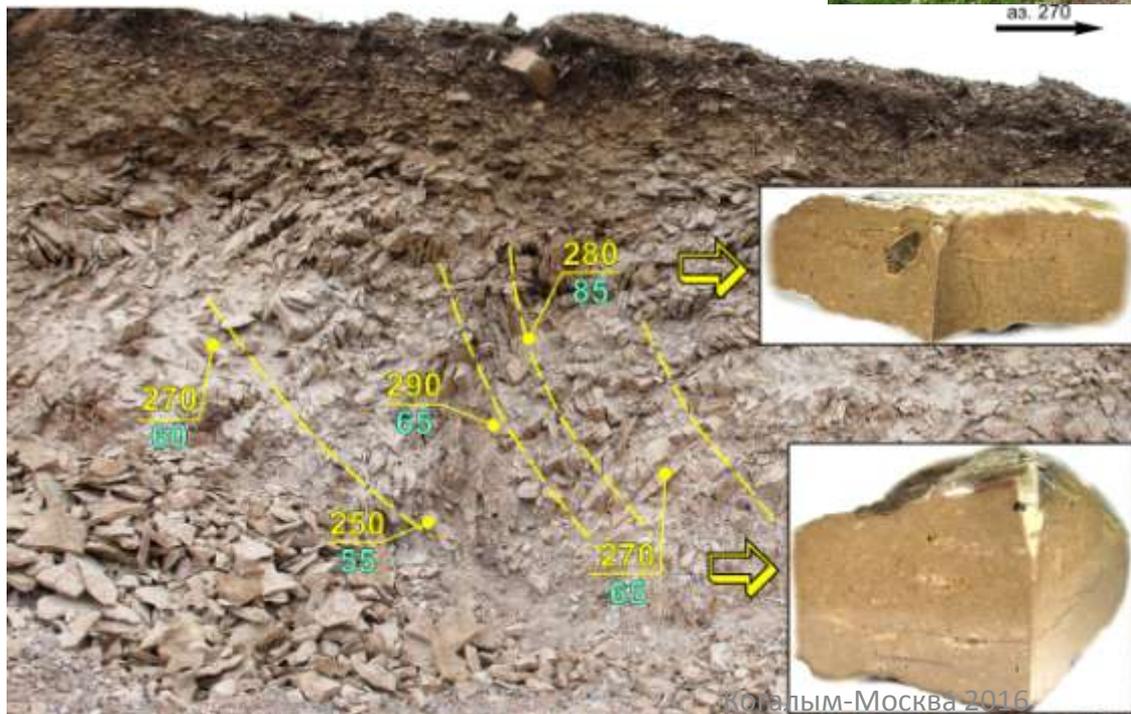


В сейсмических полях лучше выделяются субвертикальные разломы, однако и пологие структуры земной коры также заметны

Детальный микросейсмический разрез (поисковый участок)

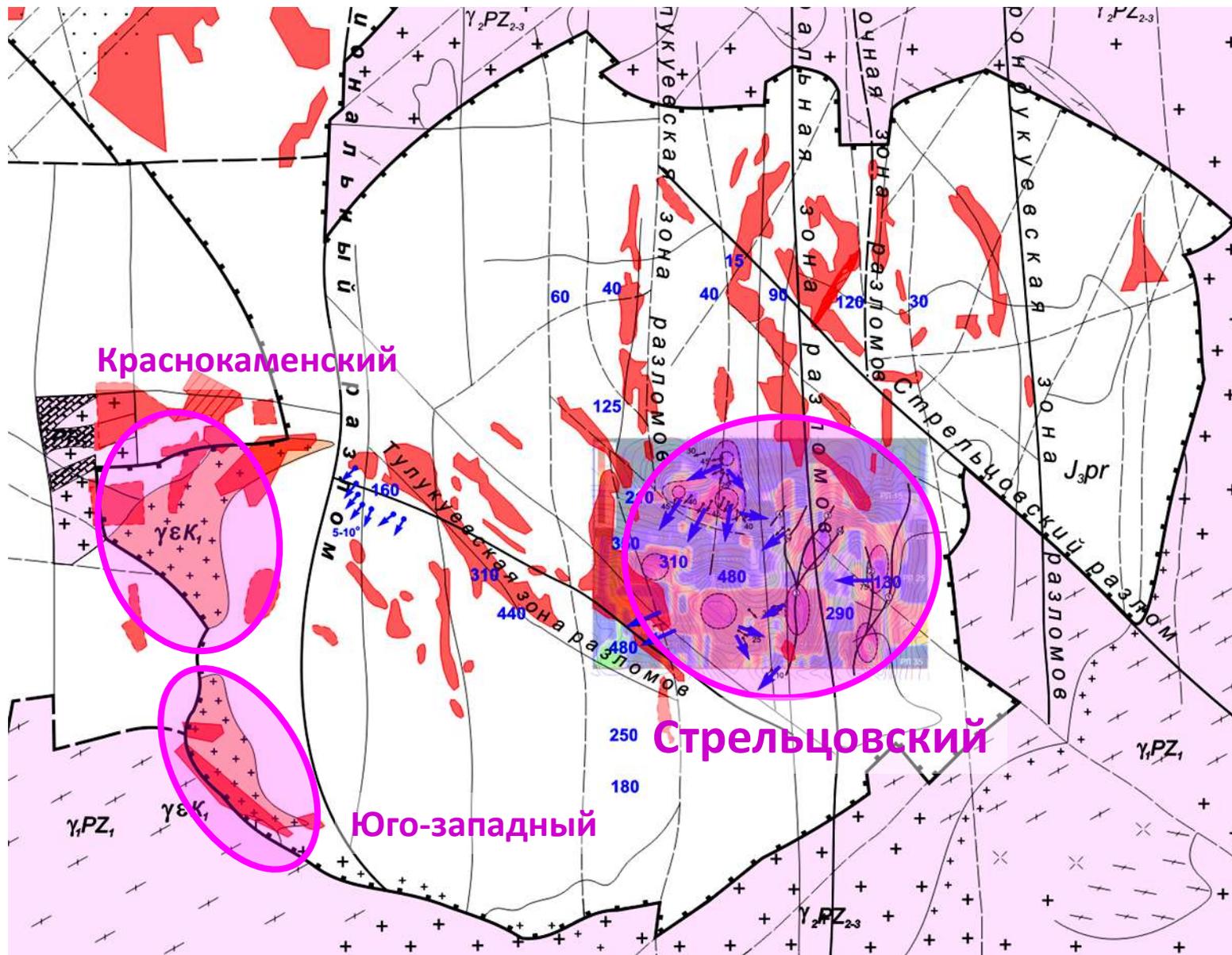
Обнаружен неизвестный ранее вулкан



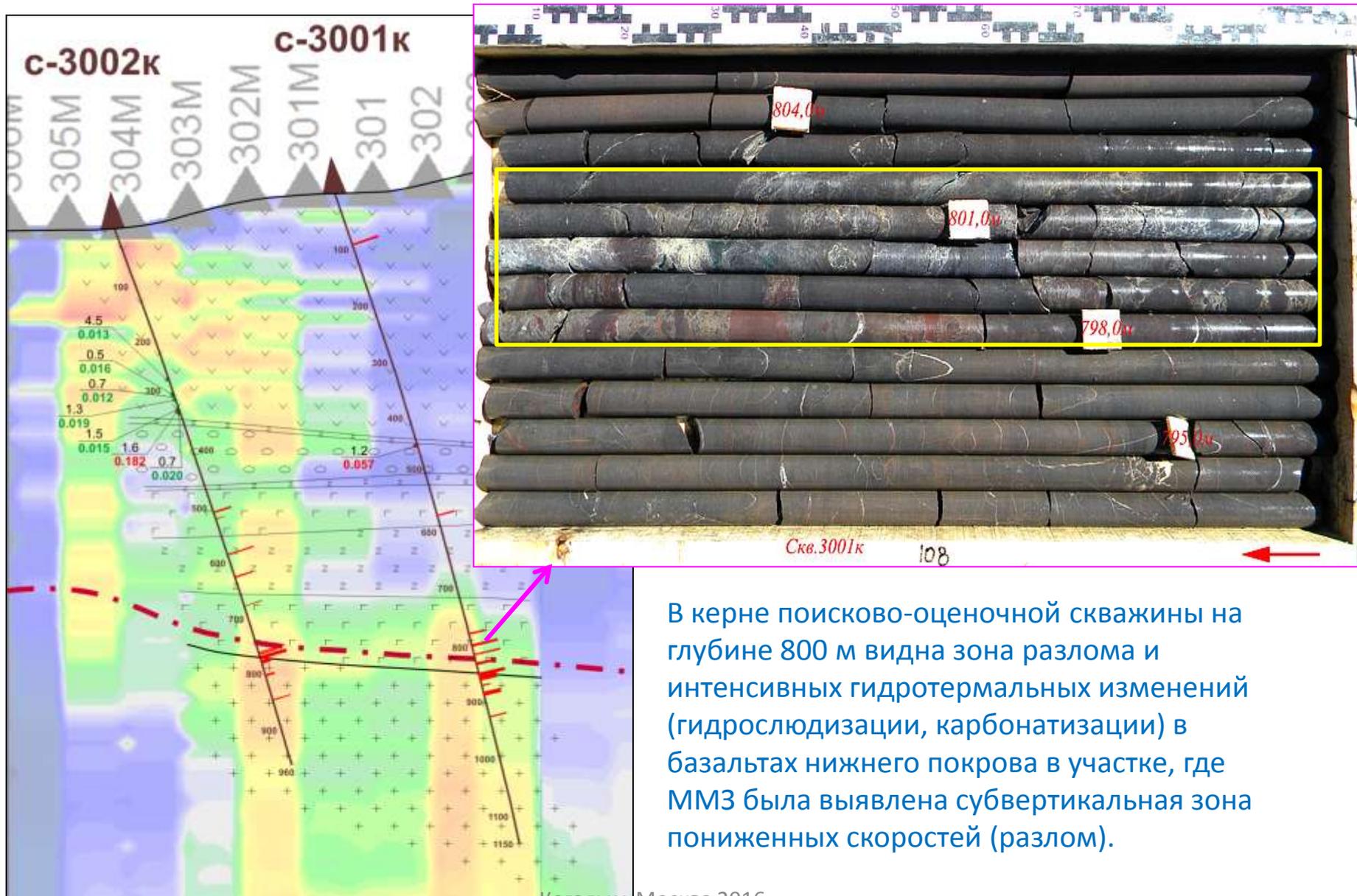


Фотодокументация южной стенки площадки под скважину 3004к. Места отбора ориентированных образцов показаны желтыми точками, результаты определения залегания флюиальности по образцам – цифрами (числитель – азимут падения, знаменатель – угол падения). На врезках приведены фотографии образцов. На верхней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

Открытие главного вулканического центра по данным ММЗ

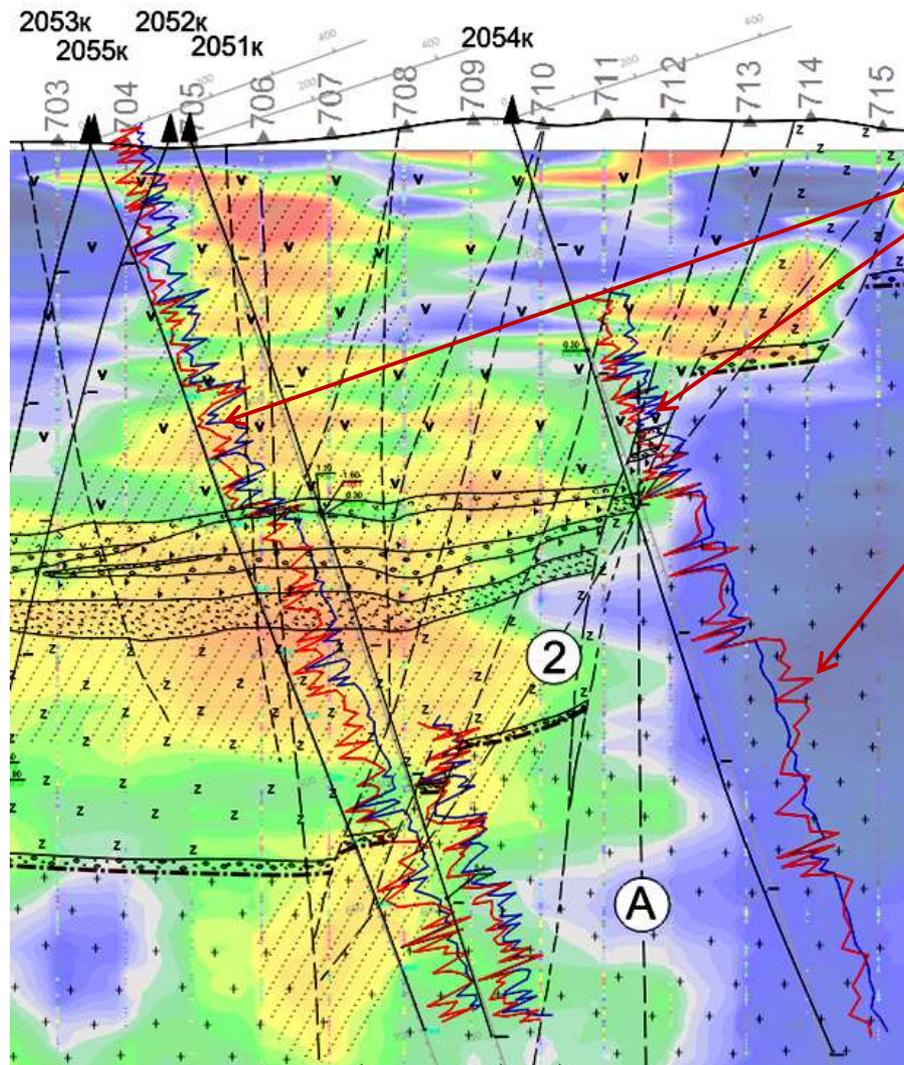


Геолого-геофизический разрез по 25 профилю



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.)



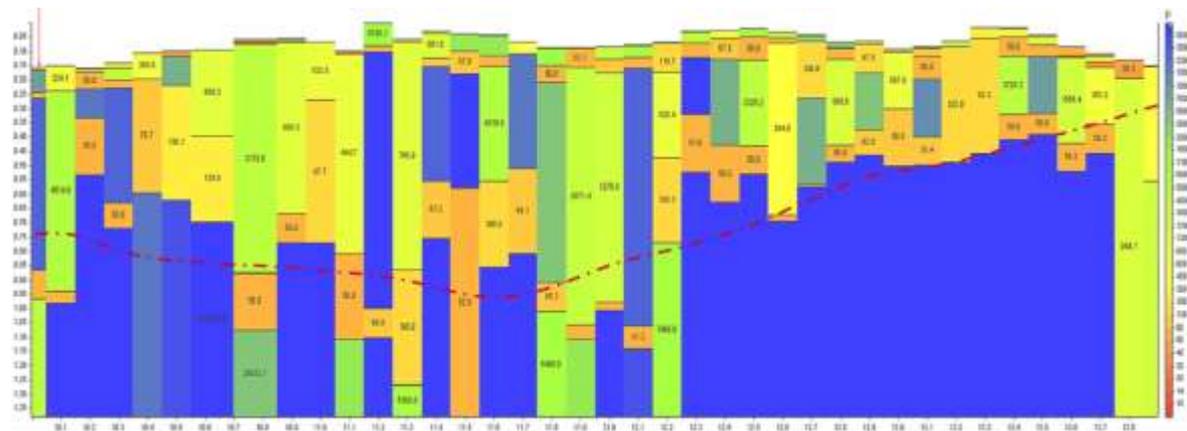
Низкие значения RQD
(трещиноватые породы) –
низкие скорости микросейсм
(высокие амплитуды)

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

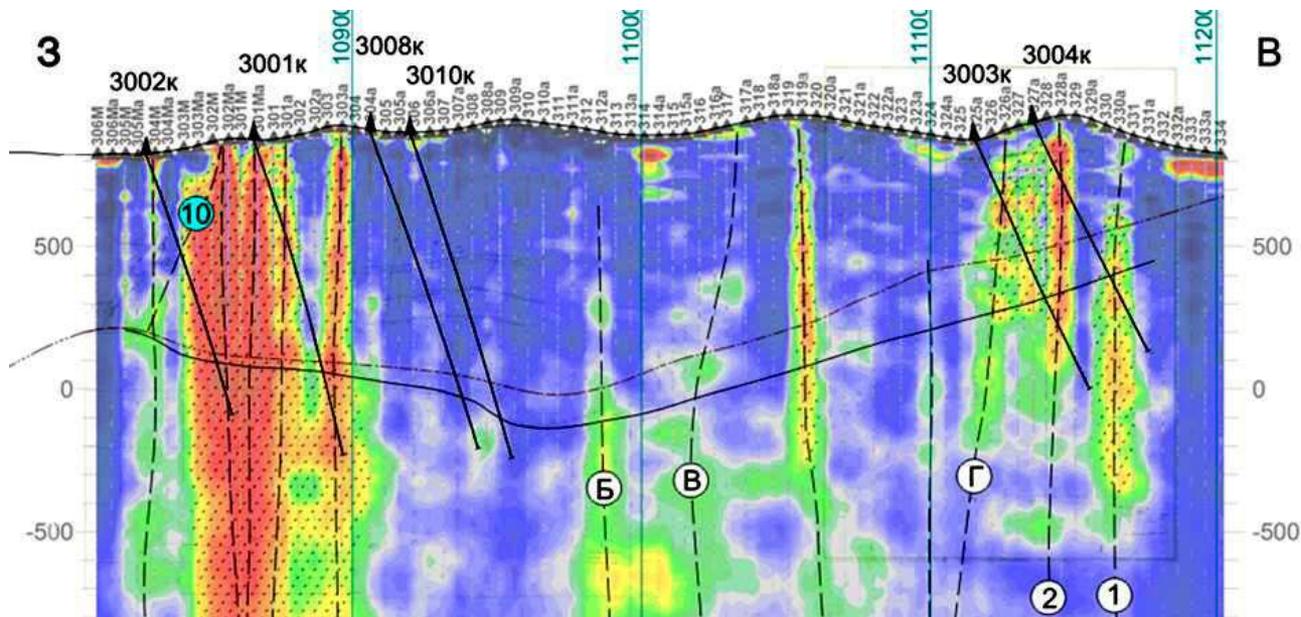
Установлена хорошая корреляция между относительными скоростями микросейсм и степенью нарушенности пород

Сопоставление данных АМТЗ и ММЗ (центральная часть СРП)

АМТЗ
геоэлектрический
разрез

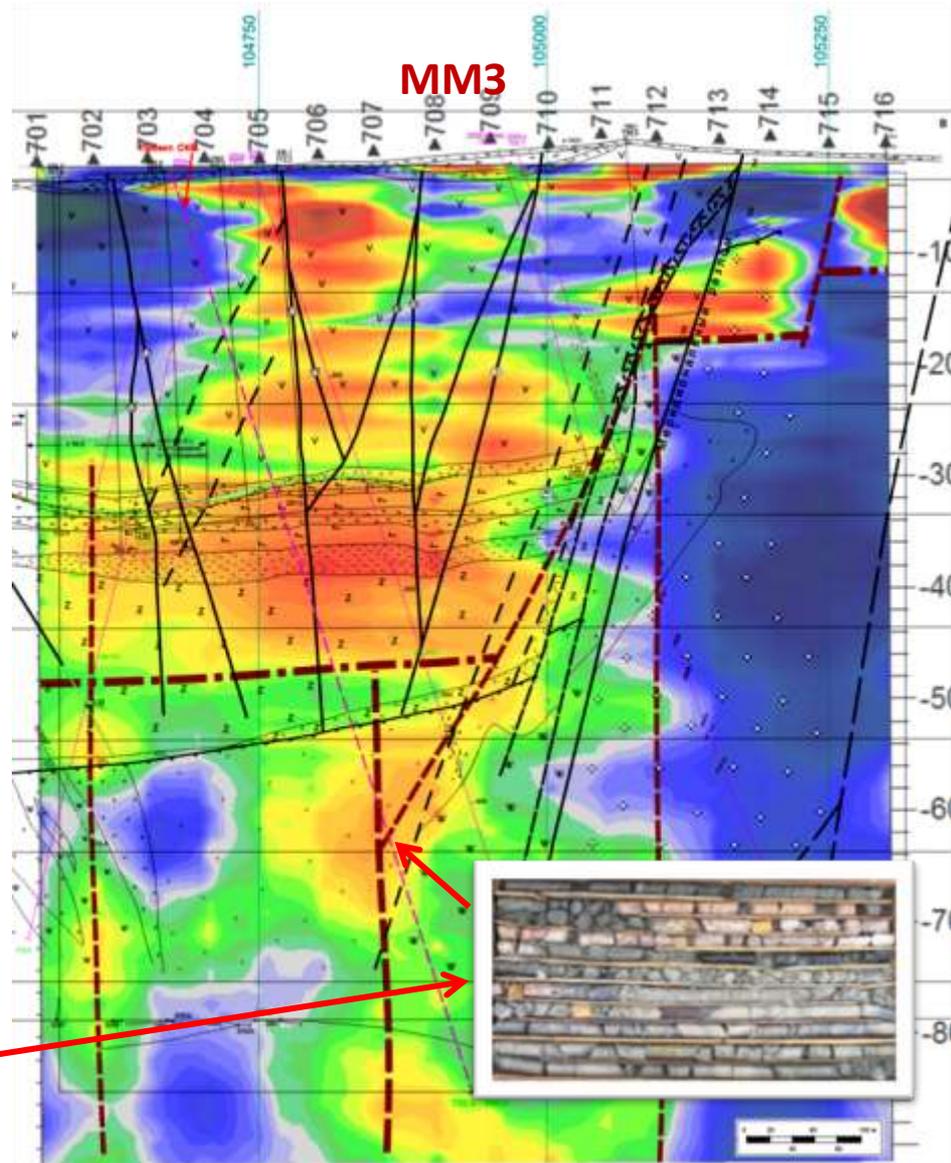
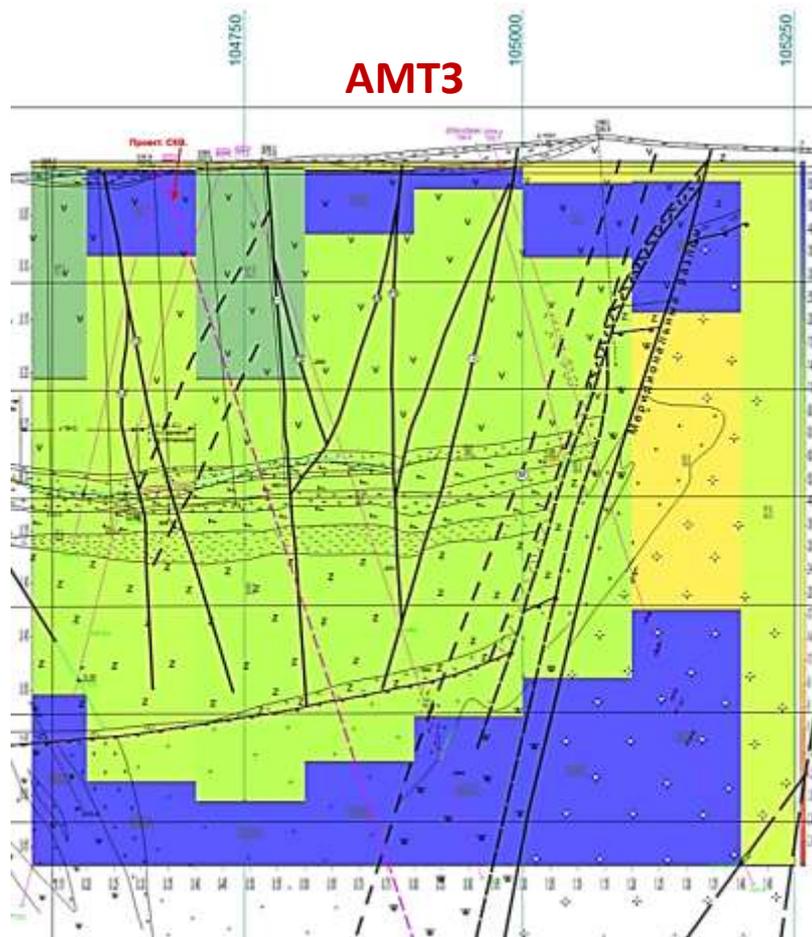


ММЗ
сейсмический
разрез



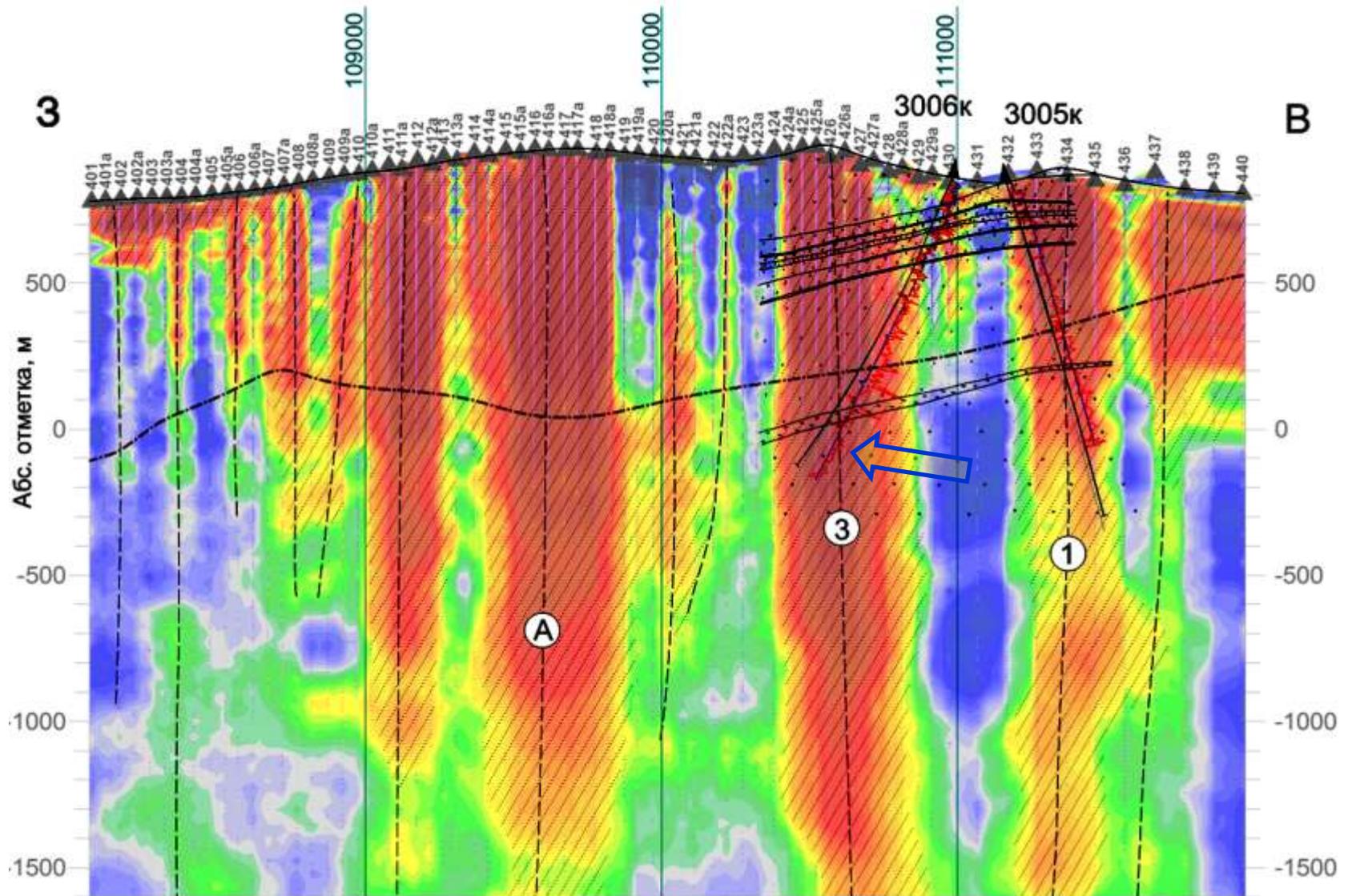
Все скважины, заданные в области повышенных амплитуд микросейсм, **вскрыли разломы.**

Сравнение результатов ММЗ и АМТЗ (северная часть СРП)



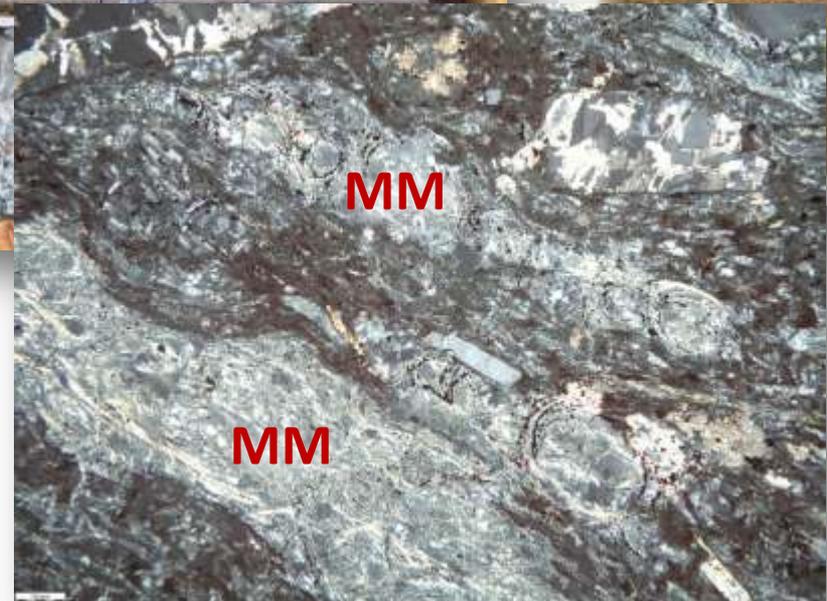
Скважина, заданная в область повышенных амплитуд микросейсм по данным ММЗ, вскрыла серию пегматовых жил в зоне разлома

Влияние структурной рыхлости минералов на скорости микросейсм

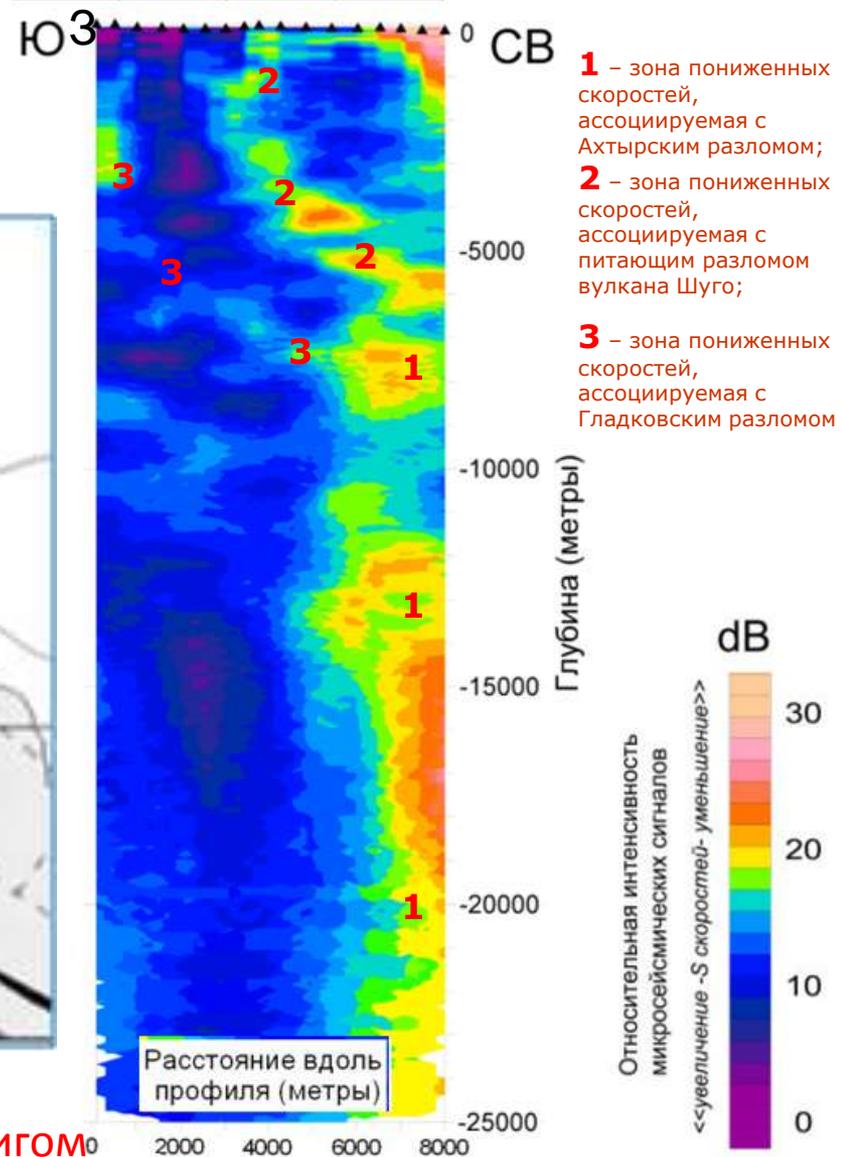
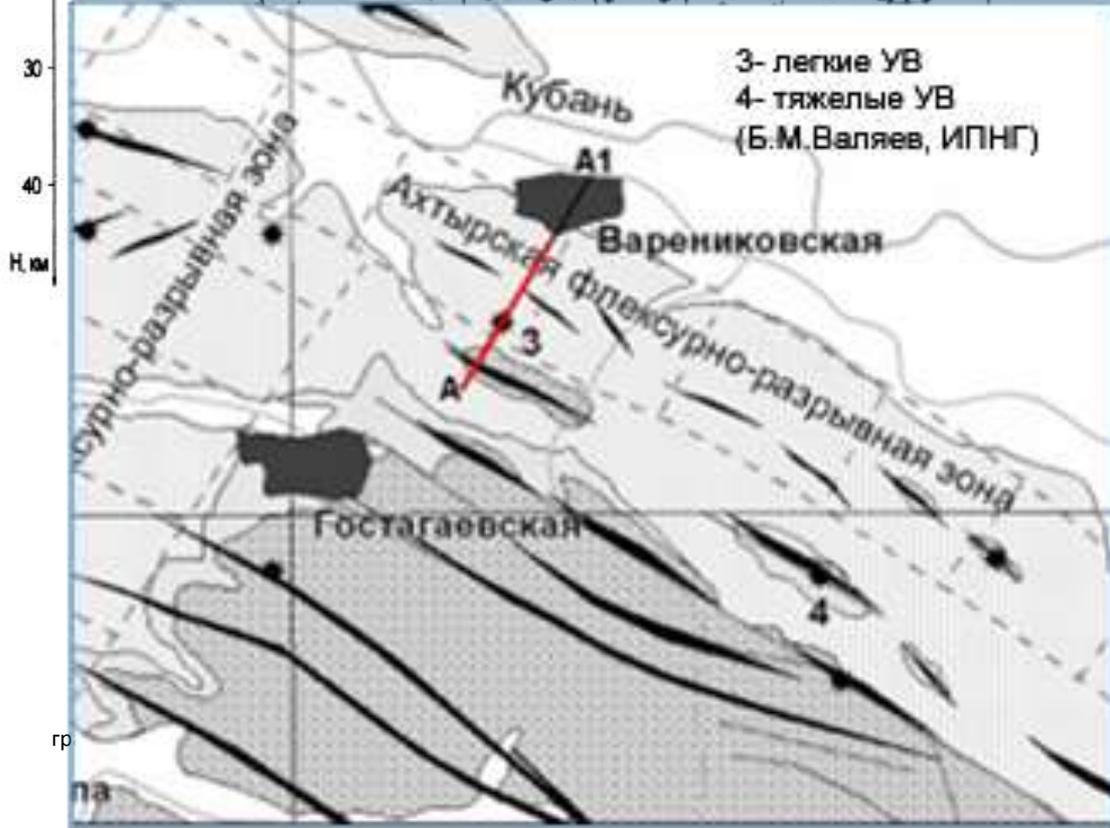
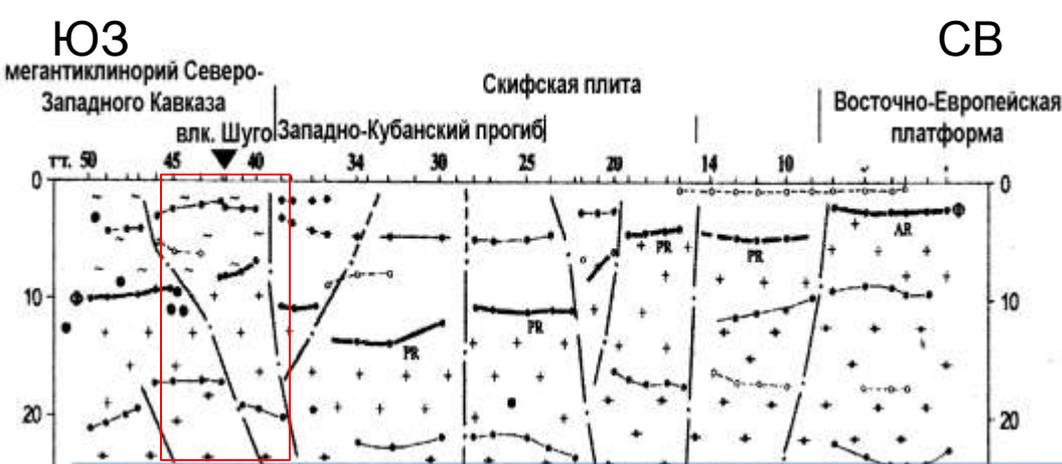


Породы в области с низкими скоростями микросейсм характеризуются относительно высокой монолитностью (высокие значения RQD). Парадокс?

Глинистые изменения в породах

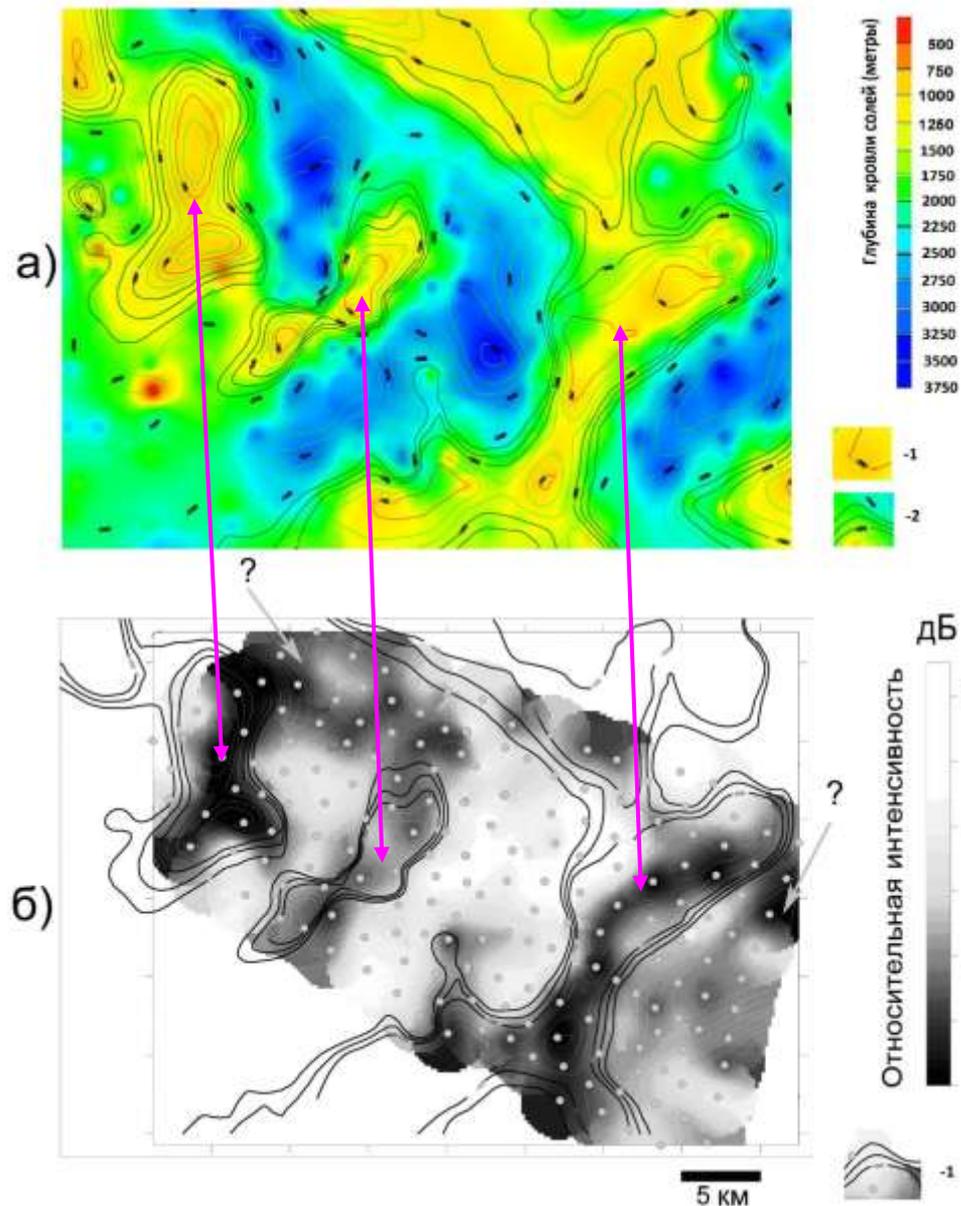


В этих участках выявлено интенсивное развитие глинистых разбухающих минералов (монтмориллонита), определяющих высокую структурную рыхлость относительно монолитных пород. Структурная рыхлость – третий фактор после пористости и трещиноватости, влияющий на понижение скорости микросейсм



Условия коллизии и надвига с левосторонним сдвигом

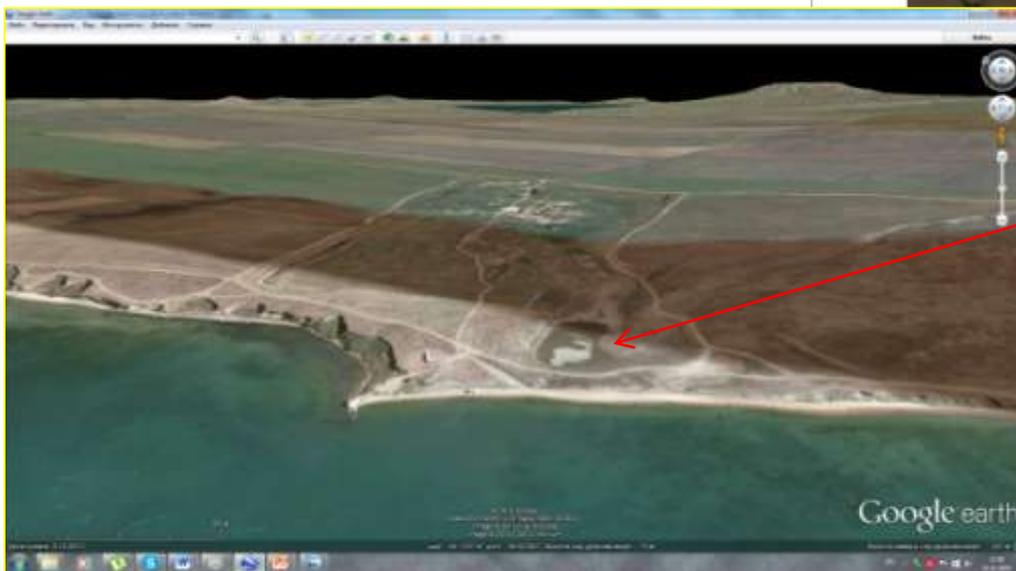
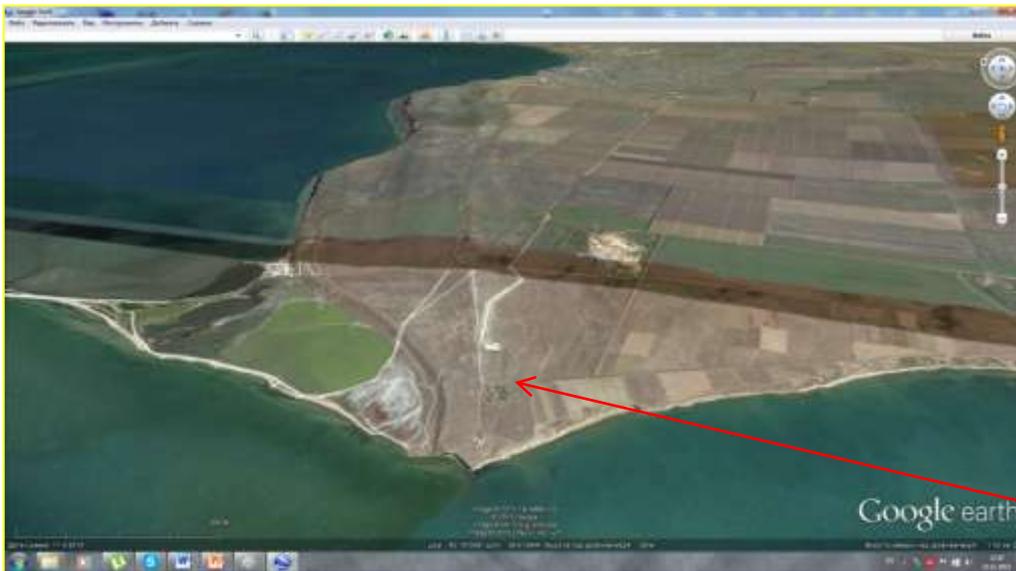
Сравнение результатов ММЗ и результатов бурения на примере системы соляных куполов



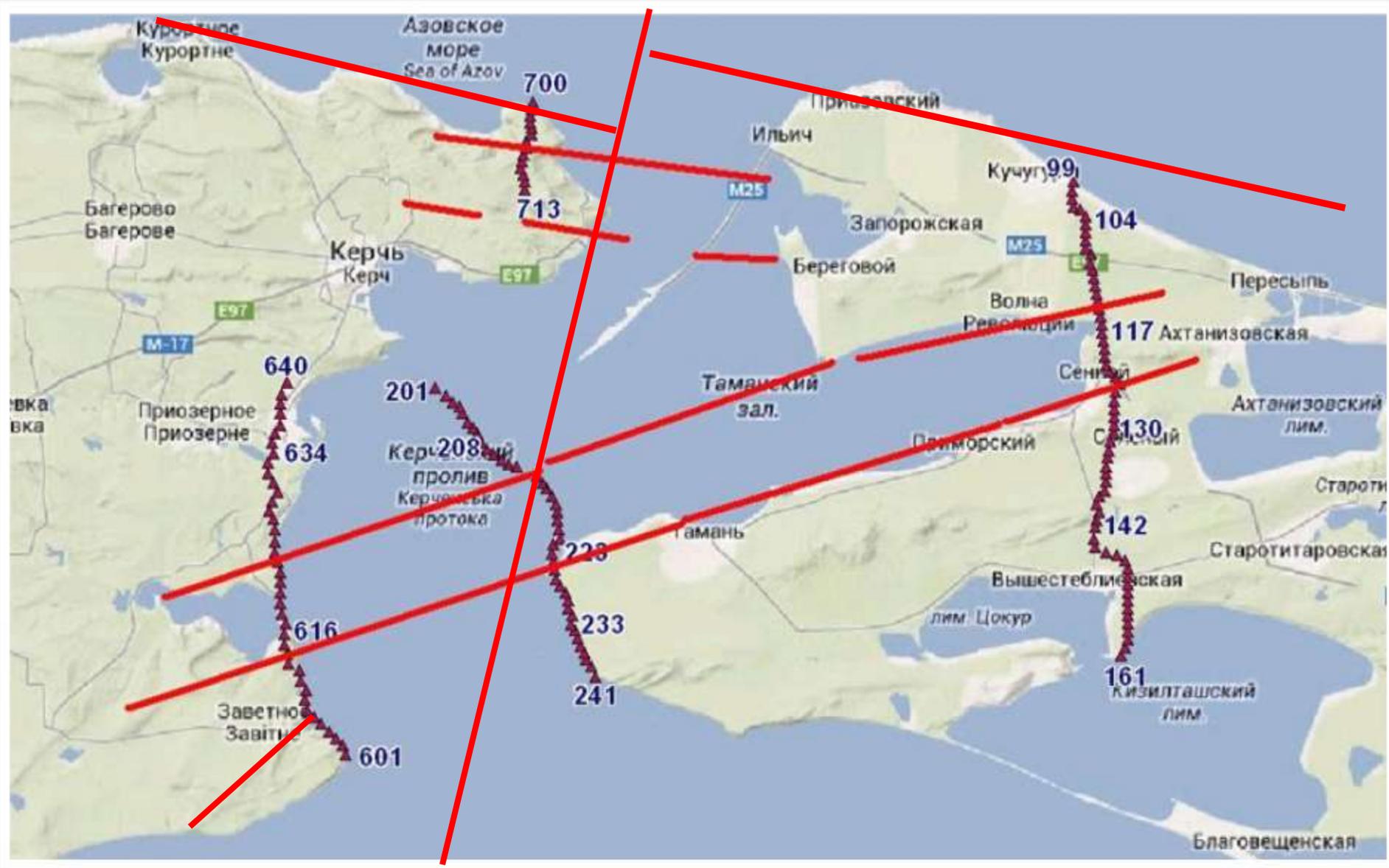
а) Карта-схема глубины кровли соляных отложений по данным бурения на территории Астраханского газо-конденсатного месторождения;
1- изогипса глубины 750м,
2- изогипсы глубин 1500, 1750 и 2000 метров.

б) Карта-схема пространственного распределения относительной интенсивности микросейсмического сигнала для спектральной частоты $f=0.235$ Гц;
1- изогипсы глубин 1500, 1750 и 2000 метров; серыми кружками обозначены места измерений микросейсм.

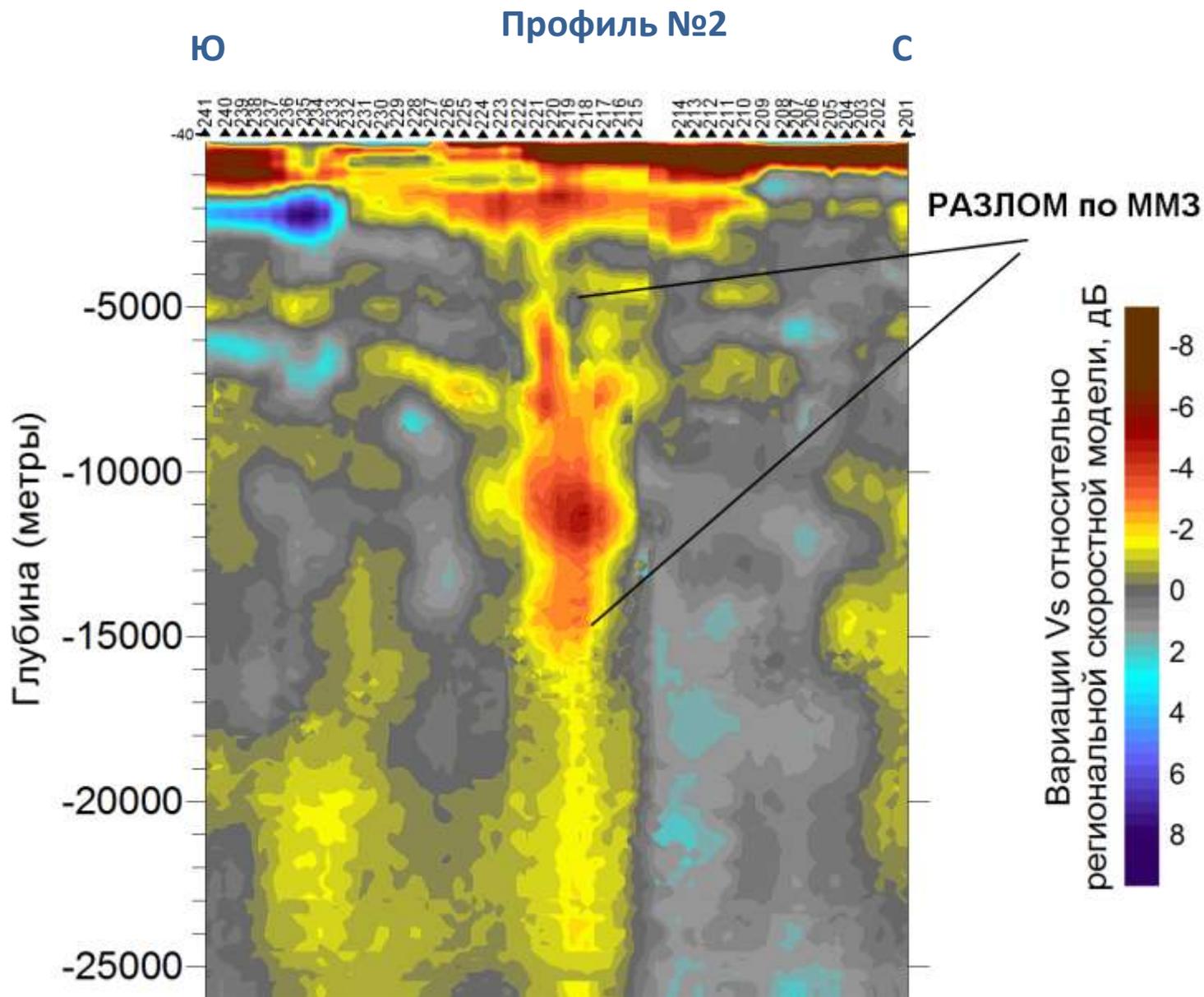
По данным Астраханской геофизической экспедиции, ПГО «Центр геофизика» Мин. Геологии СССР пластовые скорости в куполах каменной соли $V_p=4450-4500$ м/с, в мульдах (представленных ангидритами с прослоями солей и терригенных пород) $V_p=3940$ м/с



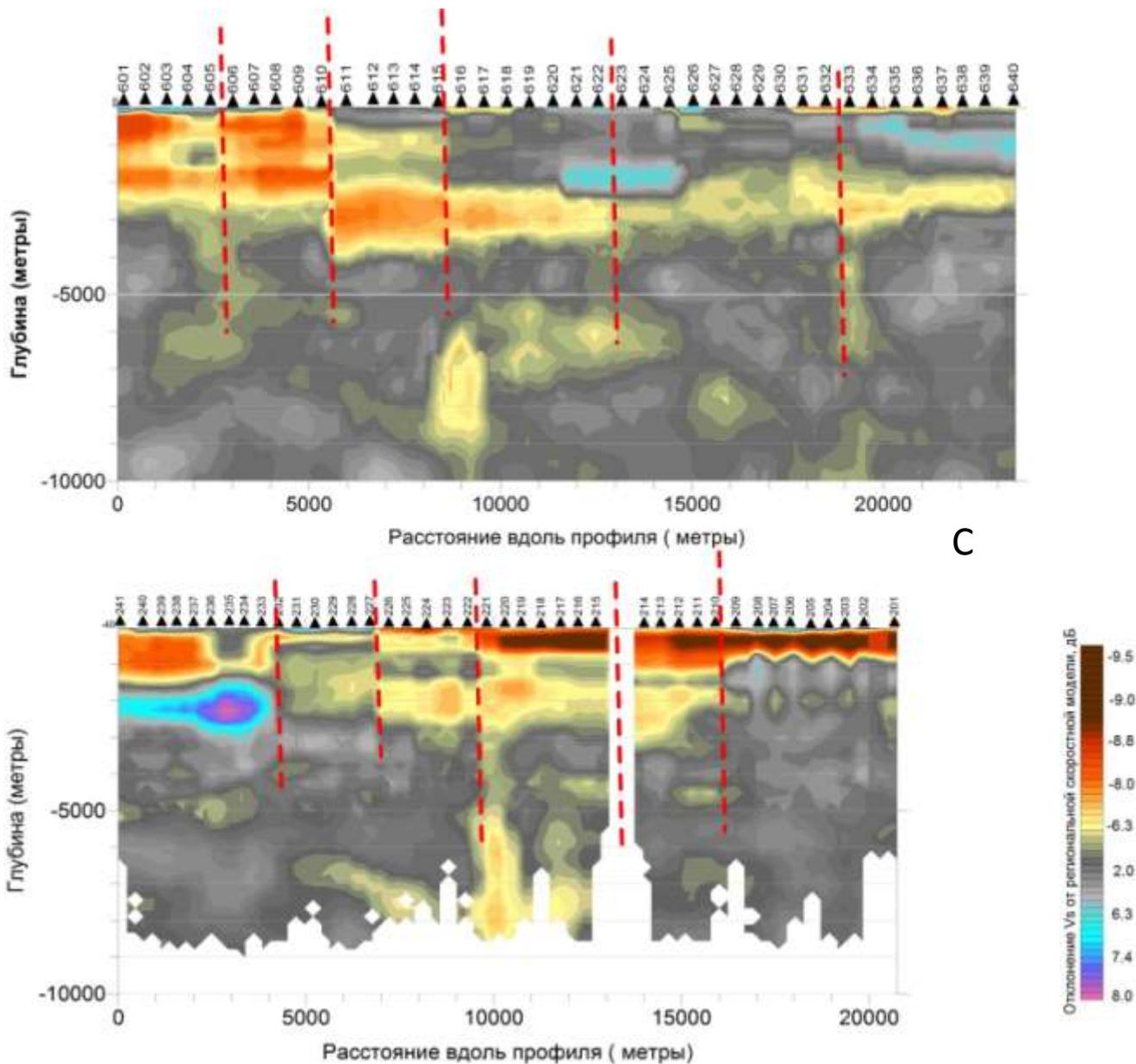
Положение профилей ММЗ и выявленные глубинные разломы на Тузлинском створе



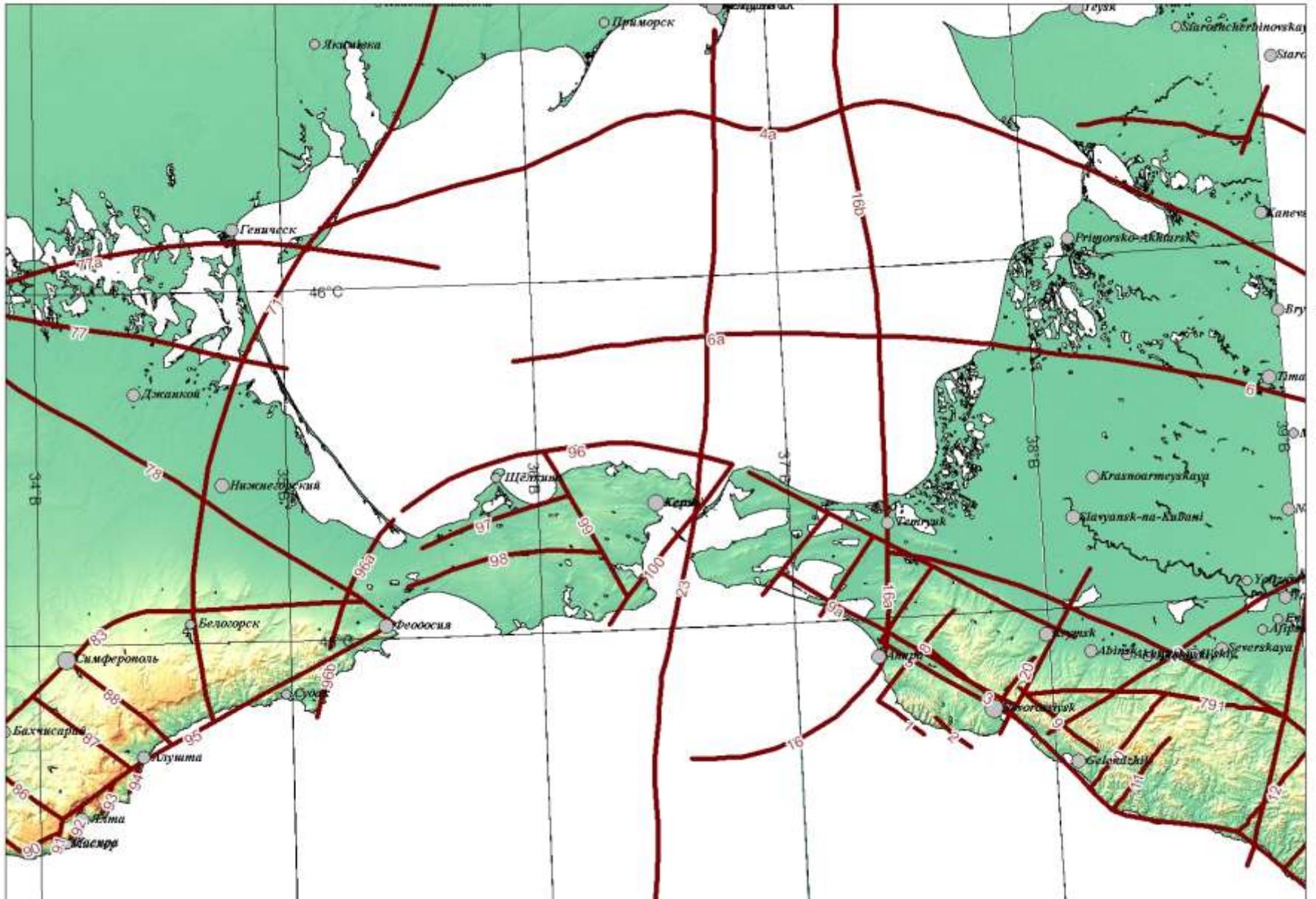
Глубинный разлом под проектируемым мостом



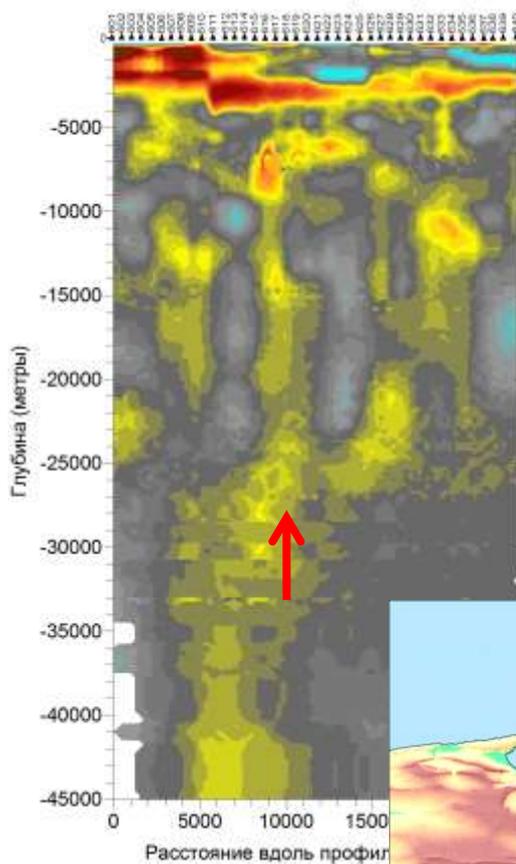
Разломы в других профилях



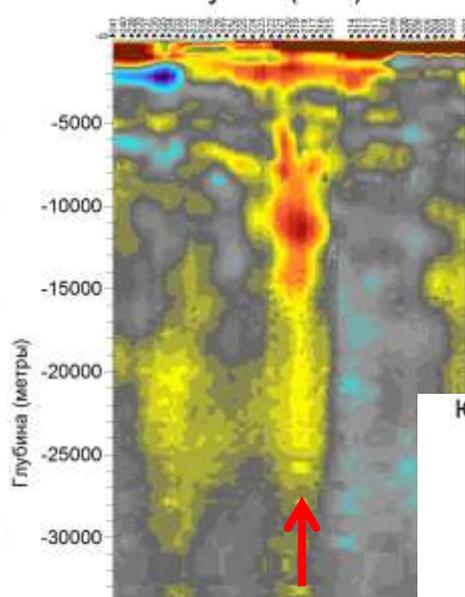
Активные разломы по В.Г. Трифонову



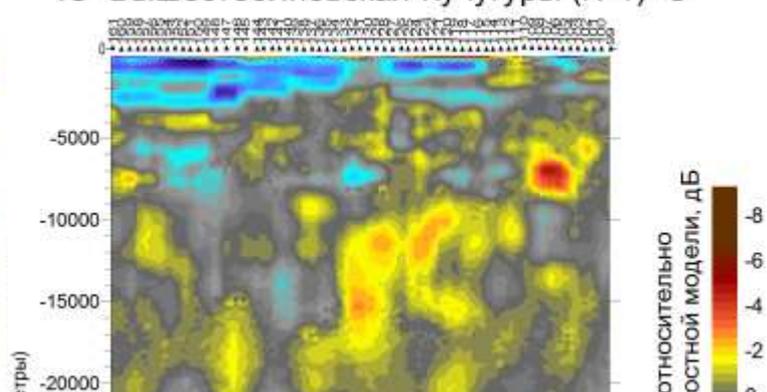
Ю Заветное - Керчь (№6) С



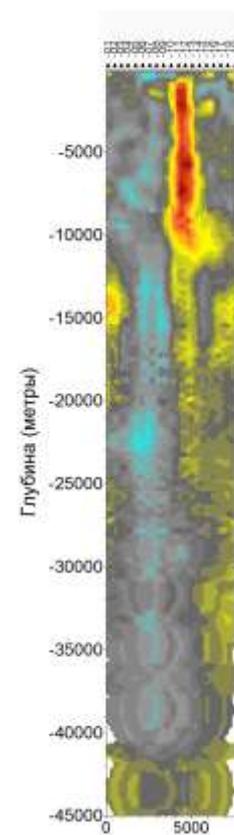
Ю Тузла (№2) С



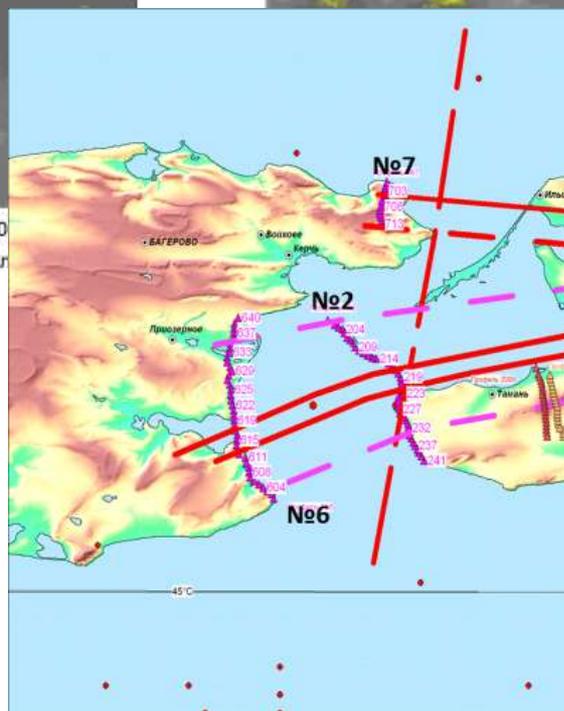
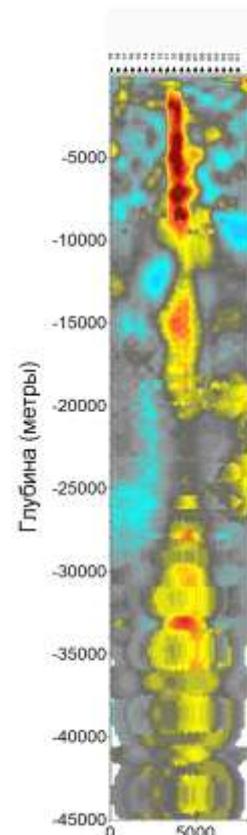
Ю Вышестеблиевская-Кучугуры (№1) С



Ю Карabetова гора (2007) С

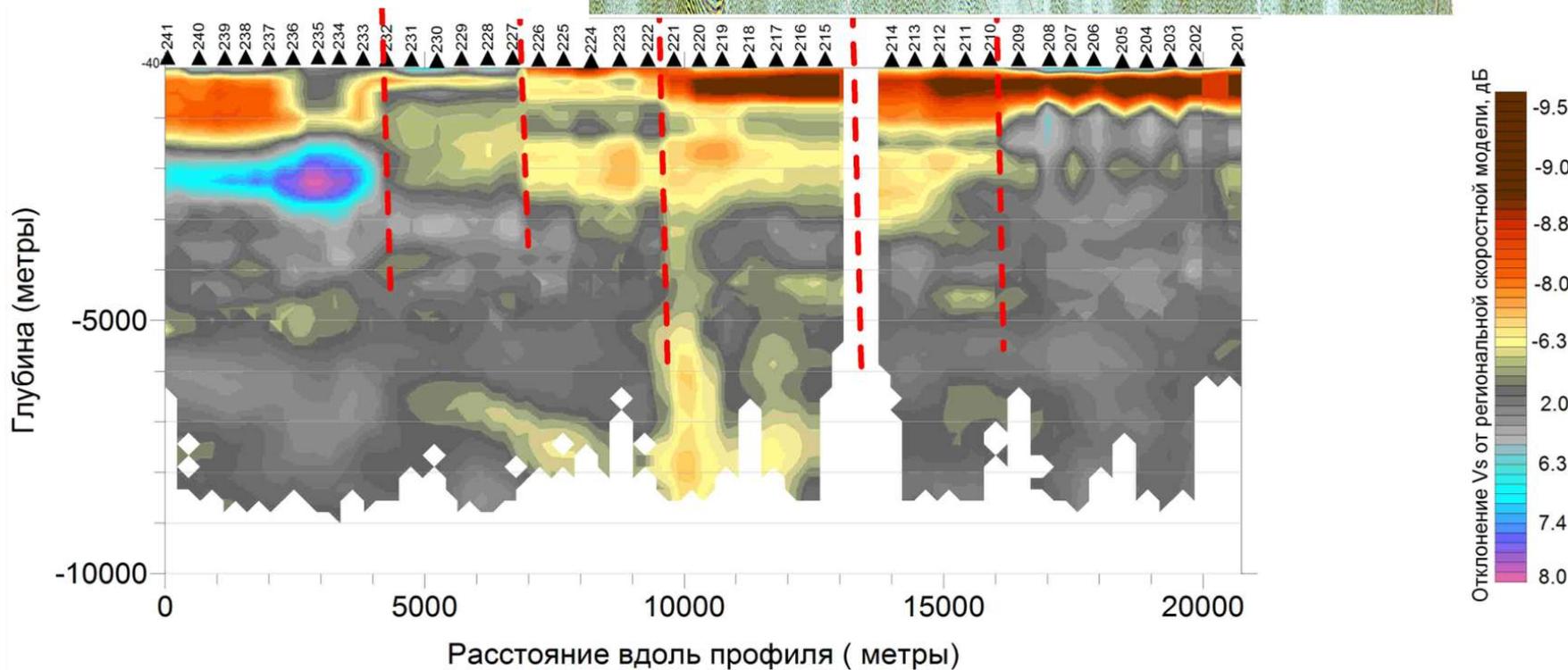
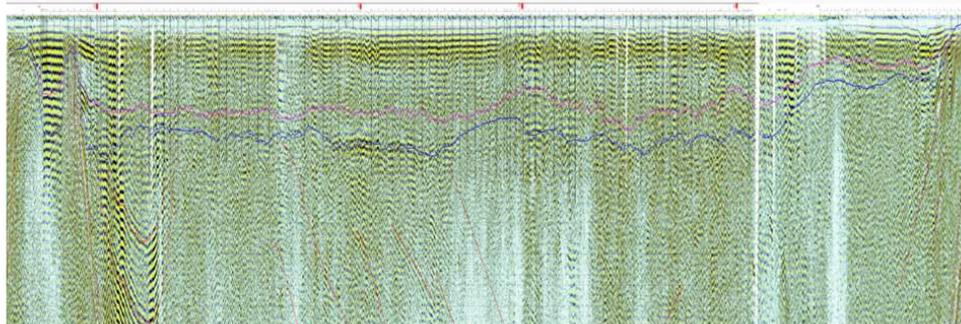


Ю Карabetова гора (2008) С

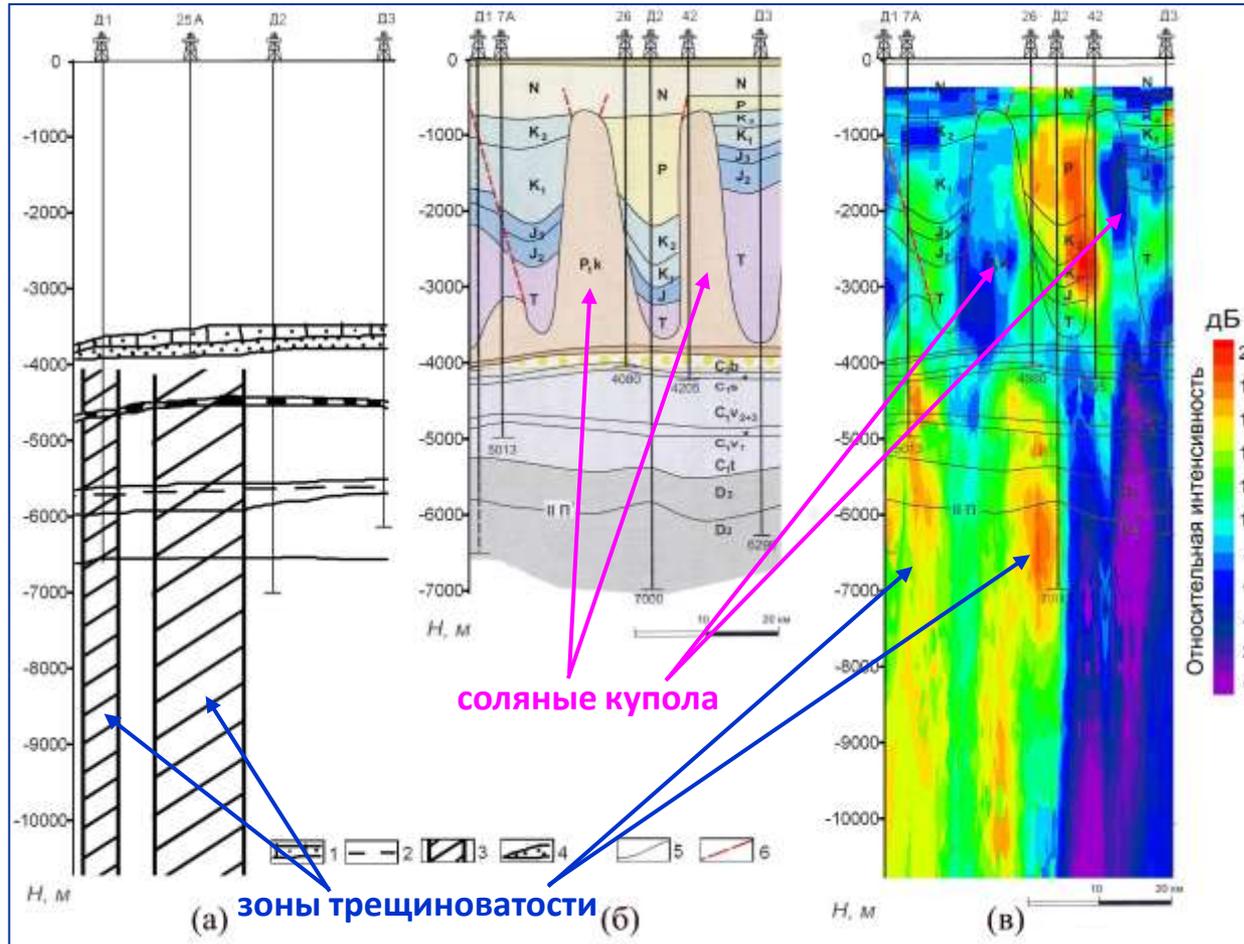


Расстояние вдоль профиля (метры)

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

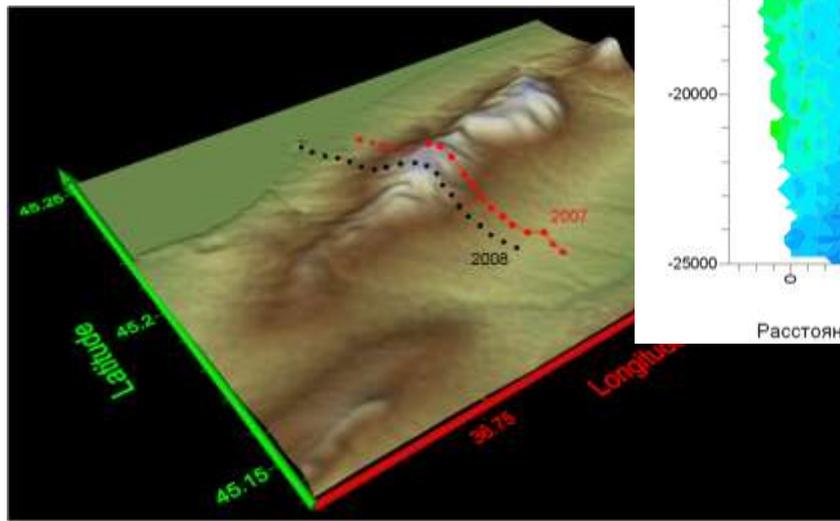
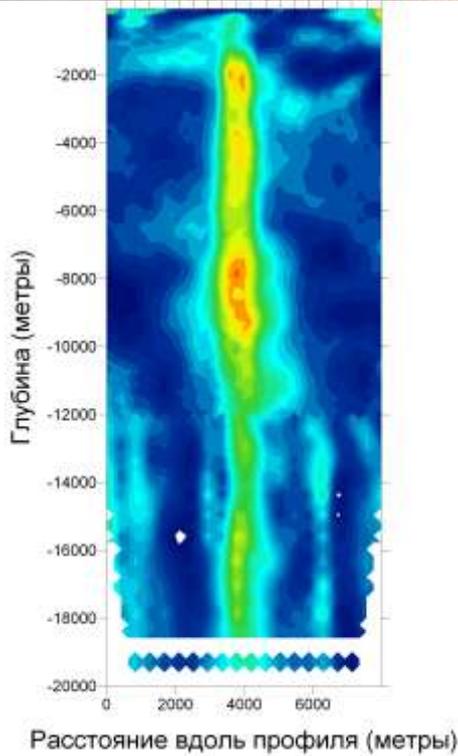
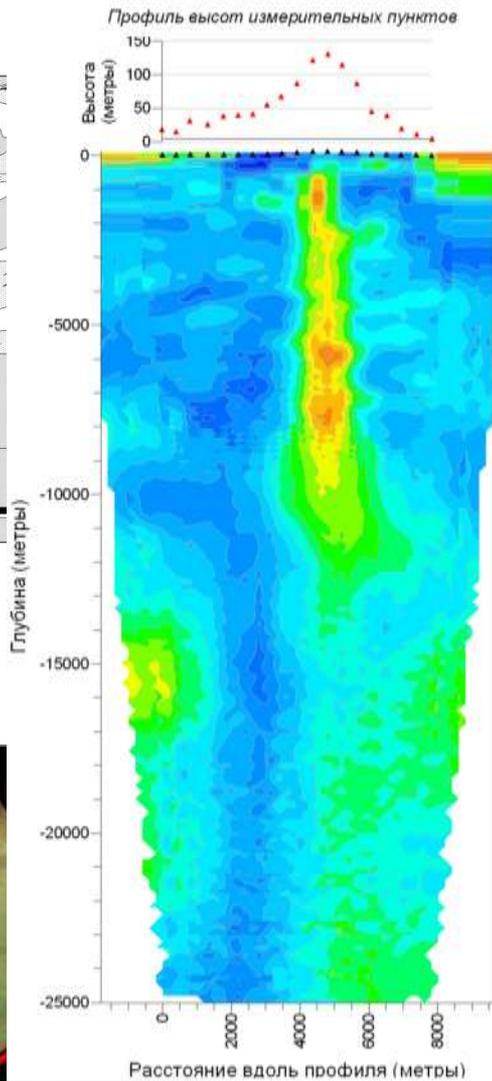
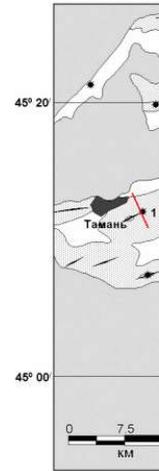
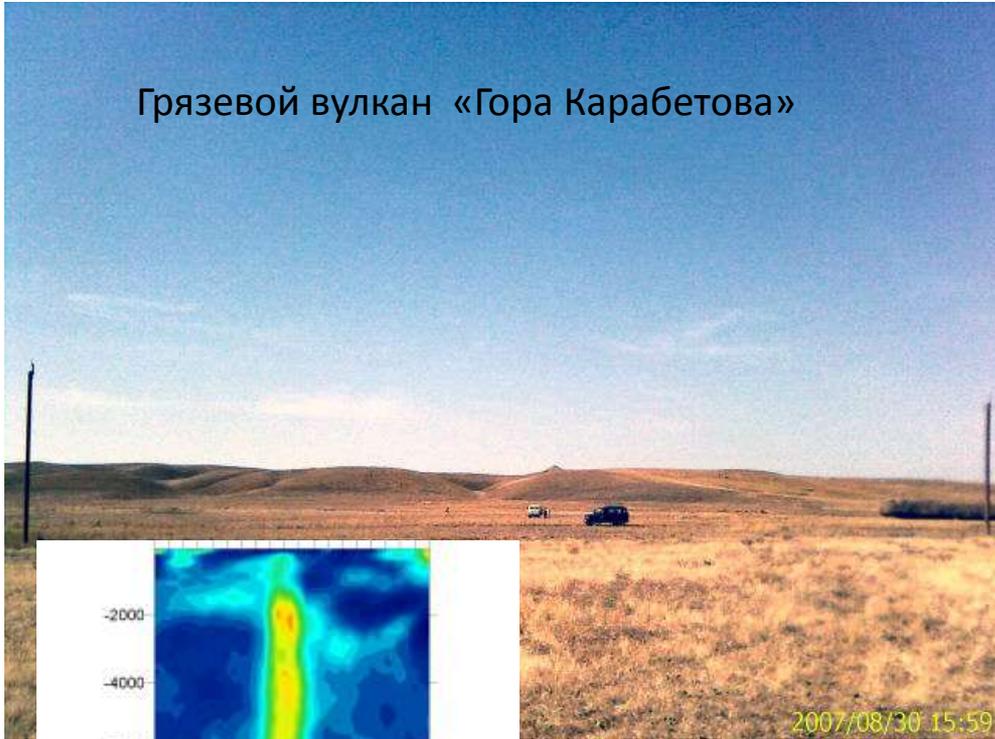
геологический разрез по линии А-Б

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»



Условия чистого сдвига (левосторонний сдвиг)

**Благодарим
за внимание!**