

# НЕФТЕГАЗОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА:

аппаратурные и методические решения

**А.В.Череповский (SERCEL)**



Революция	Время, гг.	Метод/ Методика/ Техника	Метод/ Методика/ Техника	Время, гг.	Технологич. уровень
	с 1920	Метод преломлённых волн (МПВ)	Метод преломлённых волн (МПВ)	с 1930	1
1	1930-1940	Метод отражённых волн (МОВ), аналоговая регистрация	Метод отражённых волн (МОВ), аналоговая регистрация	1940-1970	2
2	1960-1970	Цифровая регистрация данных, профильная сейсморазведка (2D)	Метод многократных перекрытий МОГТ 2D, цифровая регистрация данных	1970-1990	3
3	1980-1990	Трёхмерная сейсморазведка (3D)	Трёхмерная сейсморазведка МОГТ (3D)	1990-2010	4
4	2005-2010	Высокоразрешающая и высокоплотная (HDSSSS, HDS <sup>4</sup> )			
5	с 2010	Бескабельная / многоволновая / комплексная 3D	Высокоразрешающая и высокоплотная сейсморазведка 3D	с 2012	5

# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) источники и приёмники сейсмических колебаний
- Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
- Высокая плотность наблюдений
- Полная азимутальность
- Высокая точность определения координат ПП и ПВ
- Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
- Мега-партии

**HDSSSS = HDS4 = S<sup>4</sup>HD-3D**

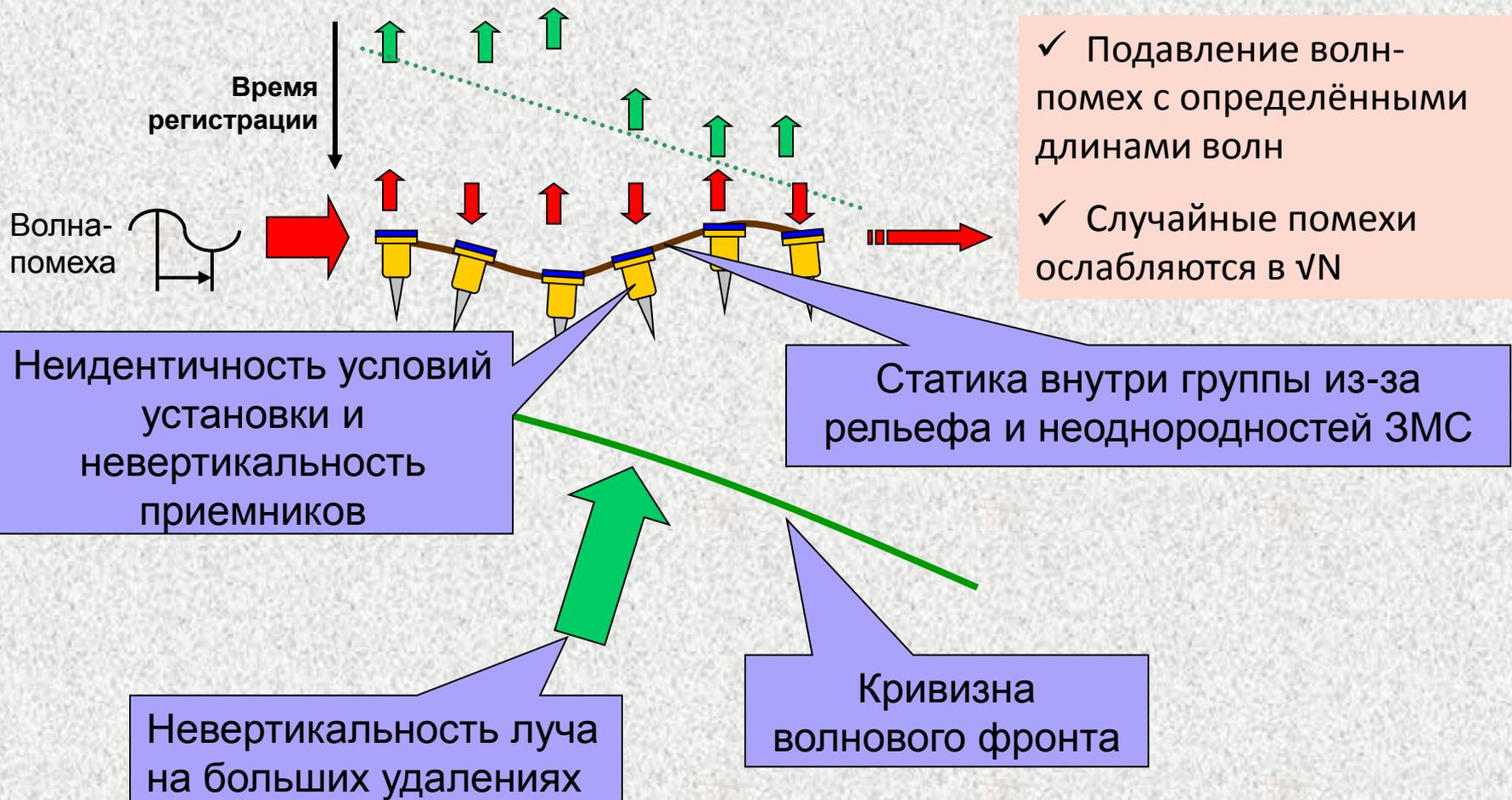
**High-Density Single-Source Single-Sensor**

---

# Сейсморазведка нового технологического уровня

- **Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний**
  - Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
  - Высокая плотность наблюдений
  - Полная азимутальность
  - Высокая точность определения координат ПП и ПВ
  - Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
  - Мега-партии
-

# Реальность группирования



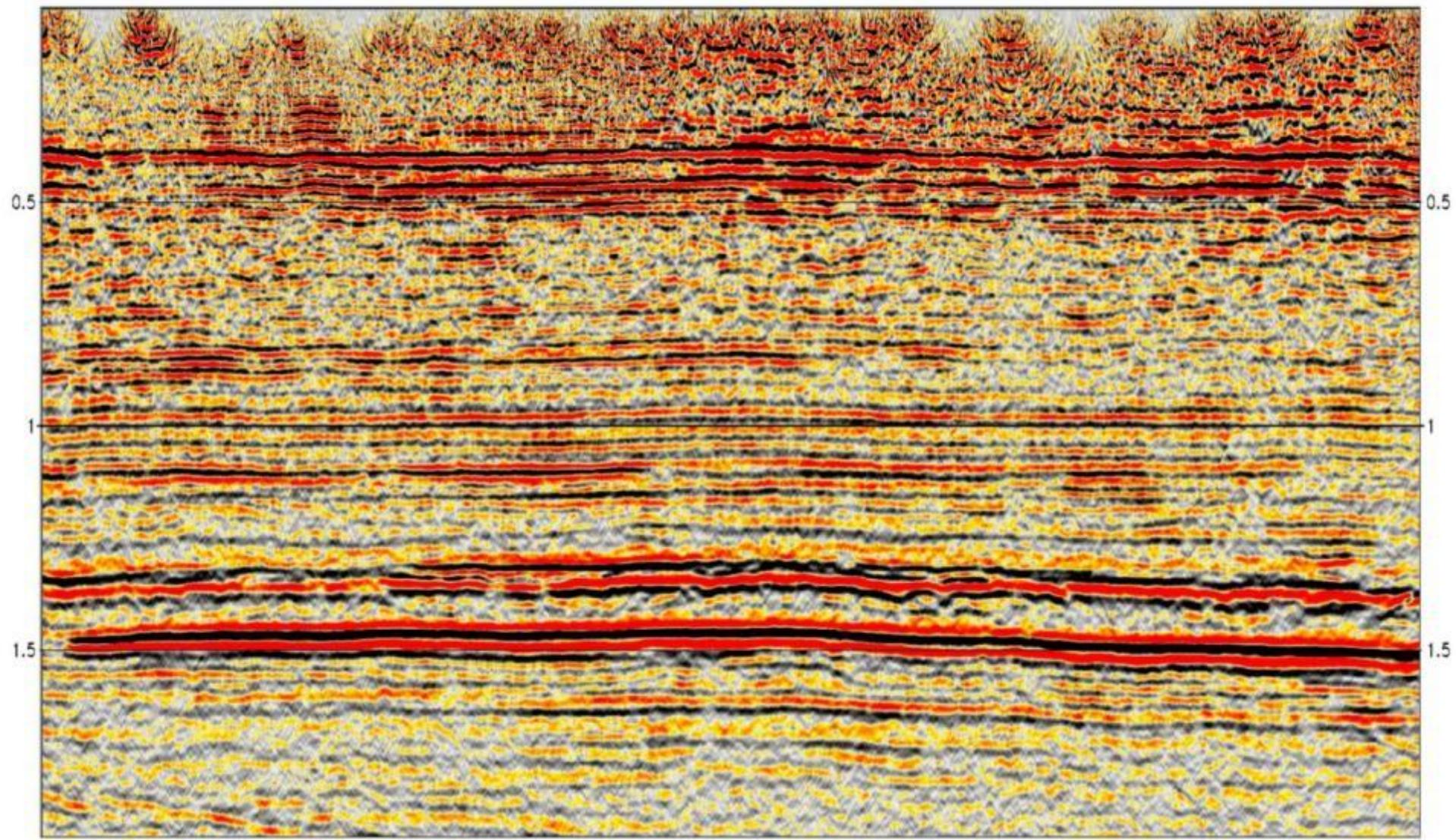
# Сравнение DSU с 24 геофонами

- Подрядчик: **Sinores**
- Обработка: **CGG**



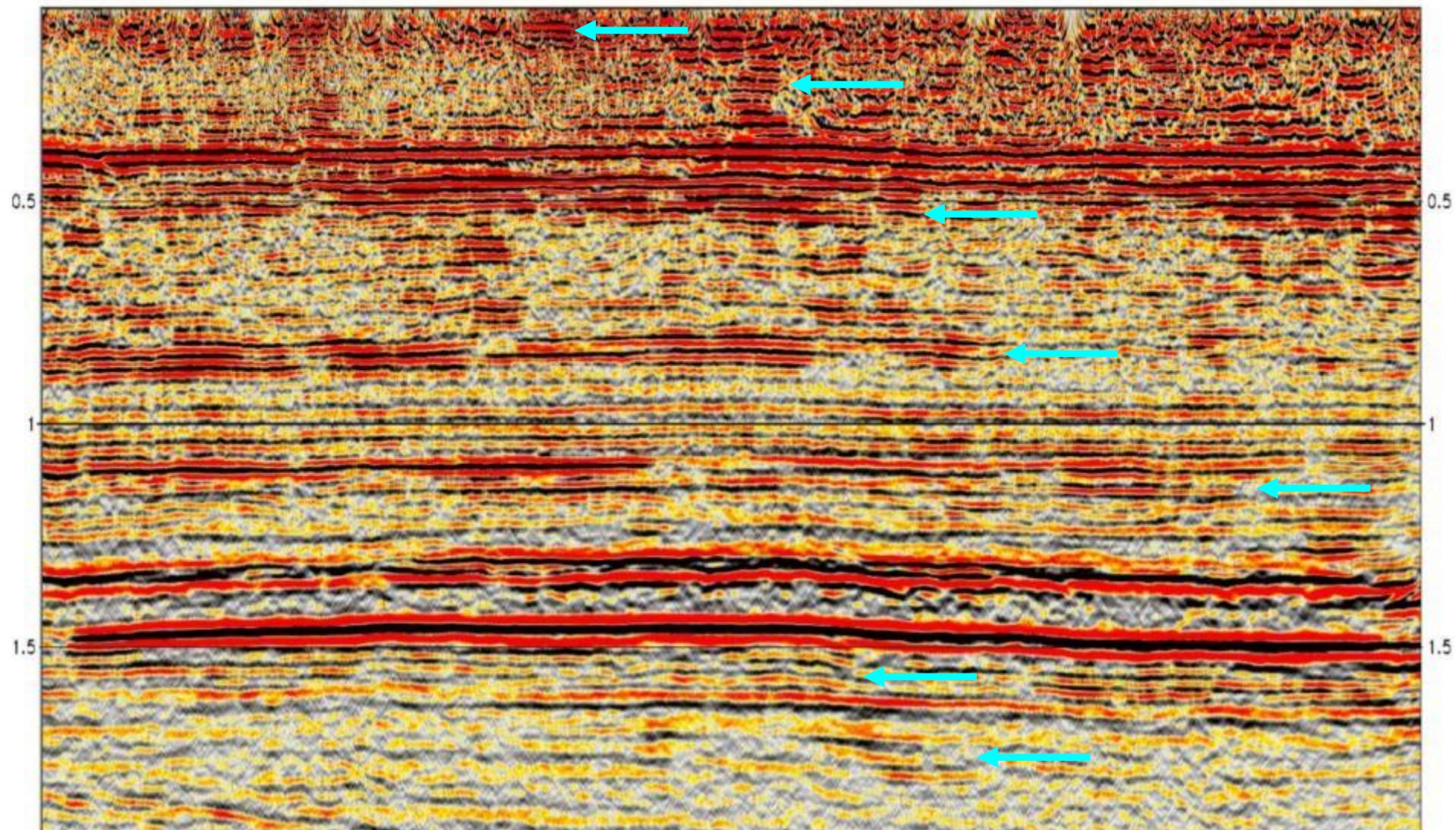
# Геофоны, миграция до суммирования

RD04 2501 2601 2701 2801 2901 3001 3101 3201 3301 3401 3501 3601 3701 3801 3901 4001 4101



# DSU, миграция до суммирования

RD04 2501 2601 2701 2801 2901 3001 3101 3201 3301 3401 3501 3601 3701 3801 3901 4001 4101



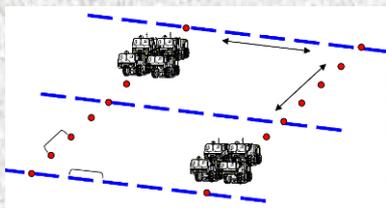
## 2D с цифровыми датчиками

Детальные взрывные работы 2Д с целью детального изучения многослойного неоднородного коллектора: пример из Китая



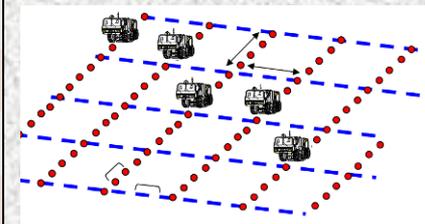
- ✓ Цифровые одиночные датчики лучше сохраняют динамику записи на больших удалениях, чем традиционные группы сейсмоприёмников, что повышает надежность AVO-анализа и упругой инверсии
- ✓ Прогноз коллекторских свойств подтвержден 30 новыми скважинами. Эффективно выделены газонасыщенные фрагменты многослойного неоднородного коллектора с эффективной мощностью менее 10 м
- ✓ Процент успешного эксплуатационного бурения вырос с 62% до 94%. Добыча природного газа на месторождении выросла в ТРИ раза - от 1,3 до 4 млрд. кубометров.

# Снижение отпечатка (футпринта)

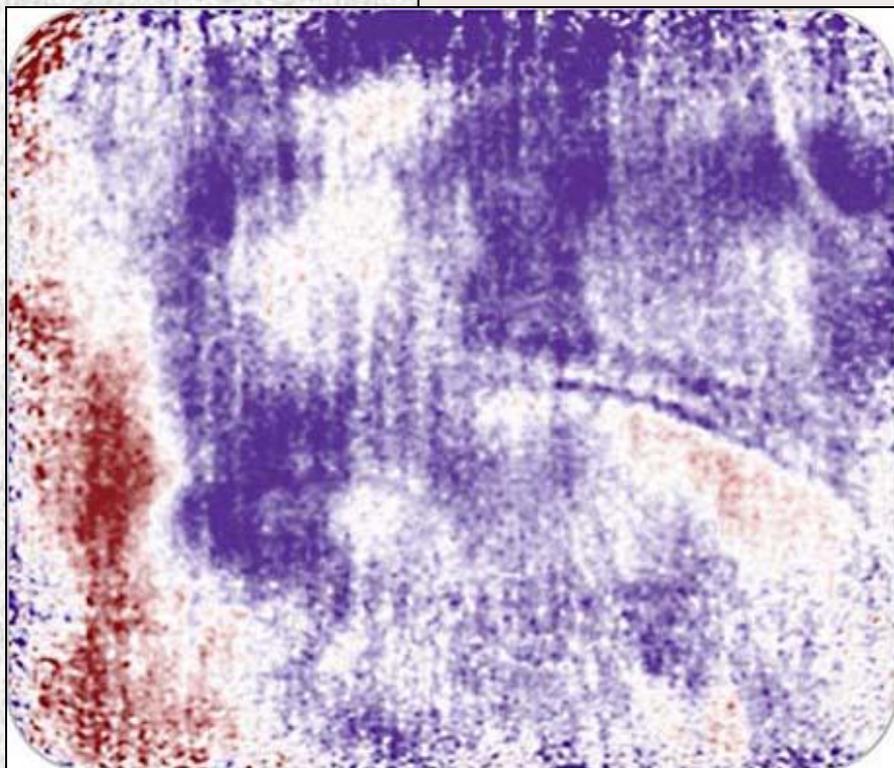


**Slip-sweep with 4-vibrator fleets**

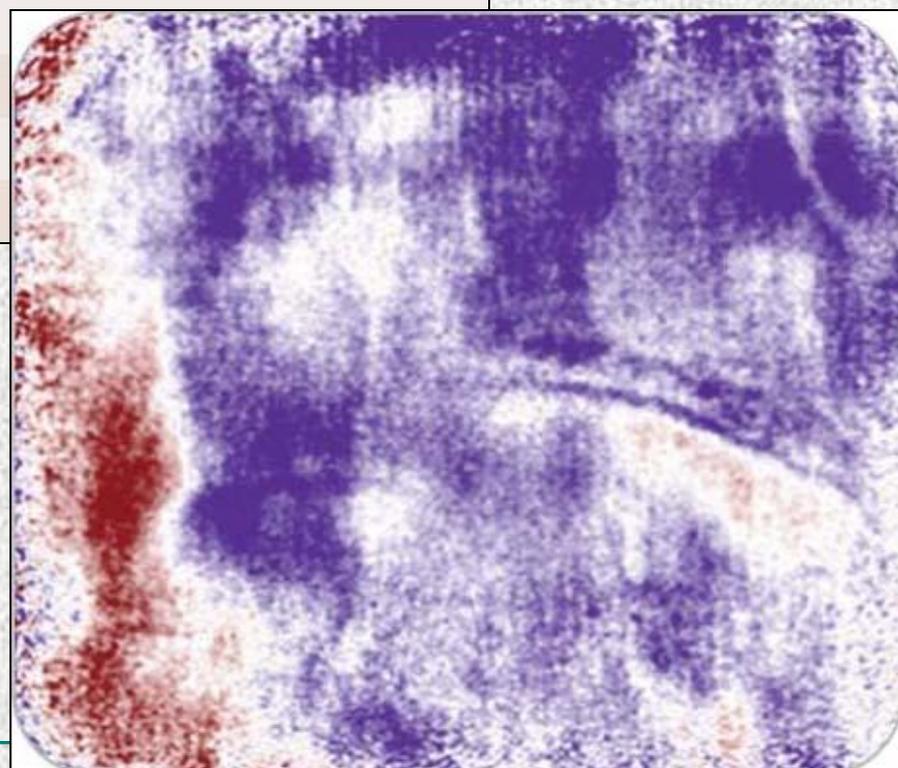
Vibrators	4 fleets x 4 vibs	14 fleets x 1 vibs
Sweep length	16 s	42 s
Slip time	10 s	5 s
Shot line interval	300 m	150 m
Shot point interval	25 m	25 m
Receiver line interval	200 m	200 m



**Slip-sweep with 1-vibrator fleets**

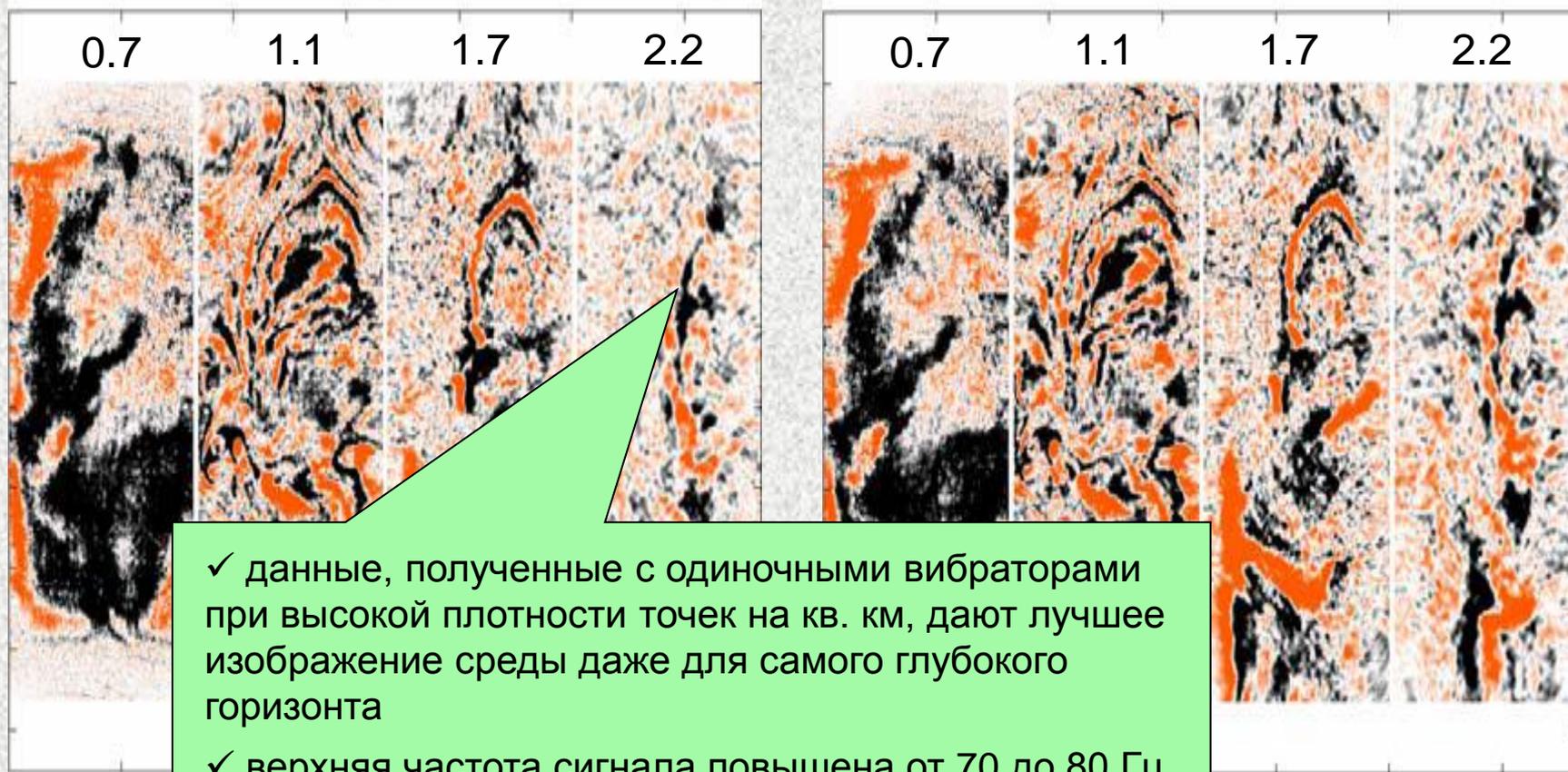


**Срез на времени 800 мс**



# Сохранение высоких частот

Фрагменты горизонтальных срезов на временах 0.7, 1.1, 1.7 и 2.2 с



✓ данные, полученные с одиночными вибраторами при высокой плотности точек на кв. км, дают лучшее изображение среды даже для самого глубокого горизонта

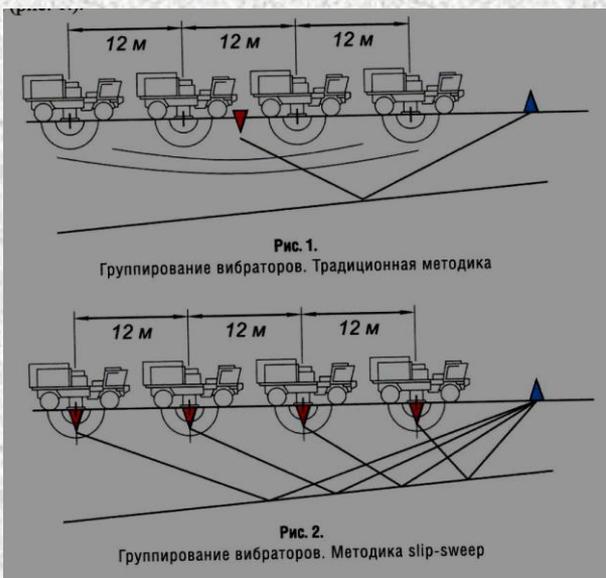
✓ верхняя частота сигнала повышена от 70 до 80 Гц благодаря лучшему сохранению высоких частот с одиночными вибраторами

ибраторов

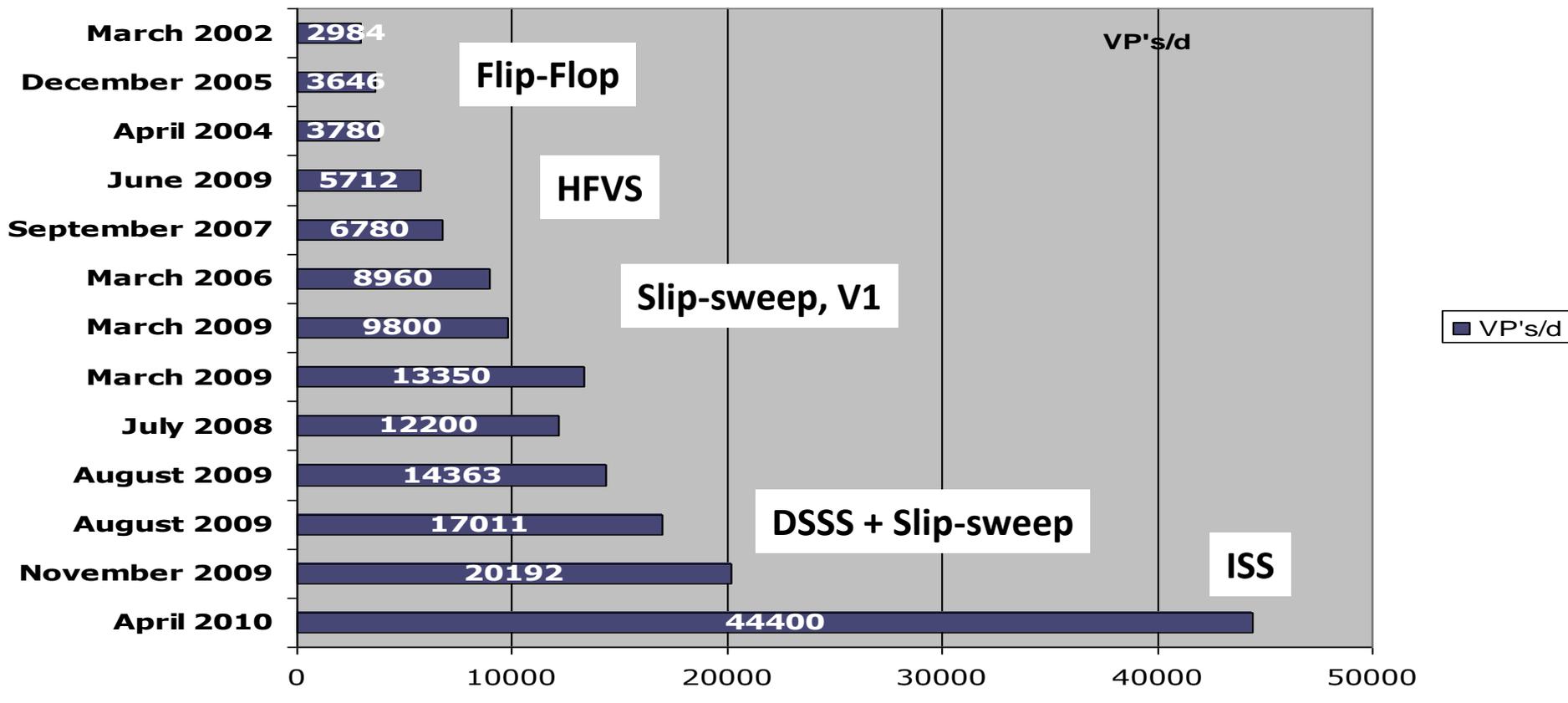
# Преимущества «слип-свип»

Получены следующие преимущества в отношении к традиционной методике:

- высокая кратность наблюдения позволяет кардинально снизить влияние шумов нерегулярного характера (автомагистрали, железные дороги, населённые пункты, ветровая помеха);
- **меньший размер бина улучшает пространственную разрешённость и делает возможным выявление мелких геологических объектов, таких как разломы, врезы, выклинивания, литологические замещения;**
- **увеличение доли высокочастотной составляющей сейсмического сигнала на 30% за счёт точечного возбуждения;**
- увеличение количества виброточек в 3-4 раза и повышение общей производительности работ на 60%.



# Производительность вибропартий



- Рекорд, поставленный на Ближнем Востоке в апреле 2010 года при тестировании методики *ISS* с 18 одиночными вибраторами, около 45000 виброточек в сутки

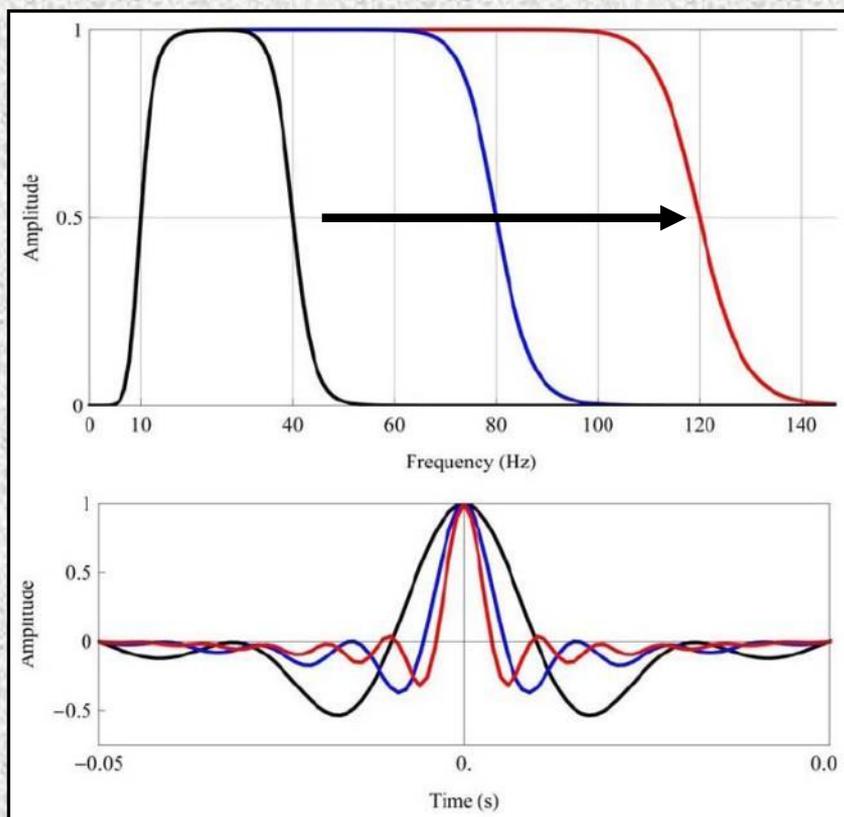
# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний
  - **Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала**
  - Высокая плотность наблюдений
  - Полная азимутальность
  - Высокая точность определения координат ПП и ПВ
  - Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
  - Мега-партии
-

# Разрешенность и компактность импульса

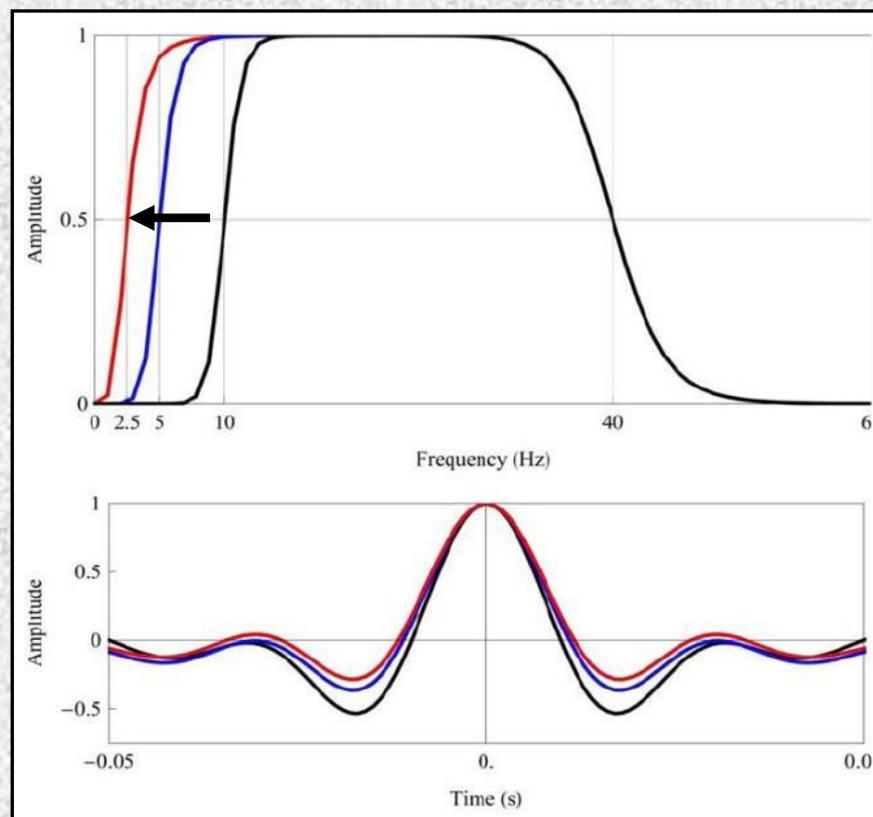
## Расширение в сторону ВЧ:

- гл. максимум компактнее
- меньше повторные максимумы



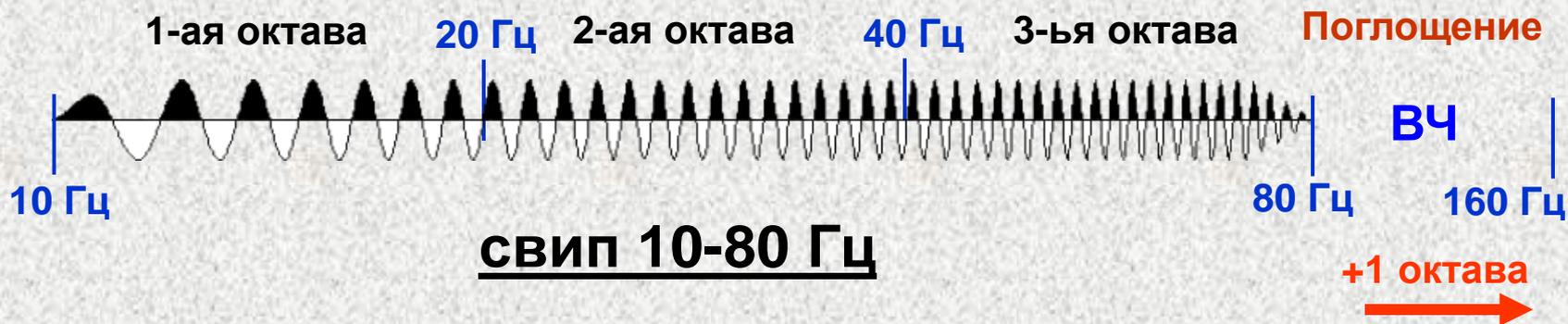
## Расширение в сторону НЧ

- нет эффекта на гл. максимум
- меньше боковые максимумы



# Расширение свип-сигнала

- Диапазон частот свип-сигнала в прошлом был обычно ограничен тремя октавами (10 – 80 Гц)



- Нет проблем для возбуждения частот до 160-180 Гц (на сухом грунте). Мы не можем повлиять на поглощающие свойства геологической среды, но **ВЧ** можно сохранить благодаря новым методическим приёмам

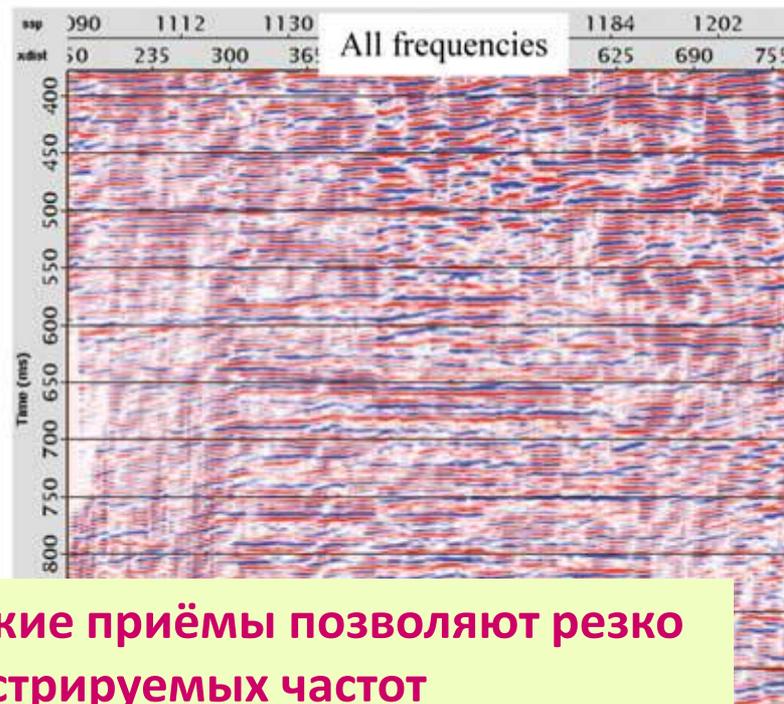
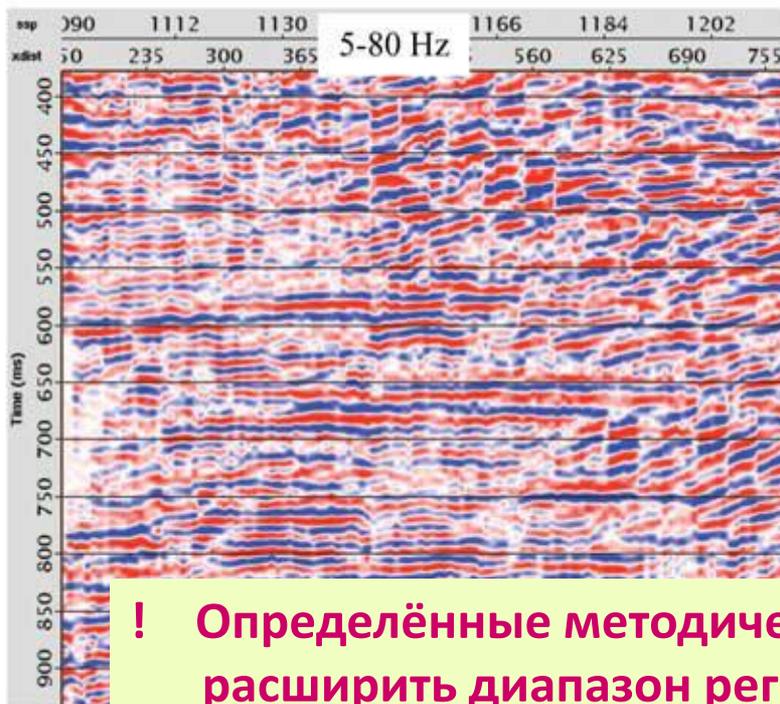
# Опытные работы в Омане

- Опытные работы в Омане по получению высоких частот от относительно глубокозалегающих горизонтов (до 2000 м)
- Одиночные приёмники. Поставленные «в точку» 6 геофонов (на площадке 20 x 20 см) с шагом 5 м
- Одиночные вибраторы. Свип-сигналы были разделены на два: один линейный от 8 до 80 Гц, а второй нелинейный от 80 до 150 Гц. Хотя линейную и нелинейную части можно было совместить в одном широкополосном свипе, предпочли поочерёдное возбуждение двух свипов с разными частотными диапазонами.



# Опытные работы в Омане

- Амплитудно-частотные спектры показывают, что очень высокие частоты, вплоть до 150 Гц, можно получить при такой методике наблюдений для довольно глубоких отражающих границ, до 2000 м



**! Определённые методические приёмы позволяют резко расширить диапазон регистрируемых частот**

Стандартный свип 8-80 Гц

Объединённый широкополосный свип 8-150 Гц

# Расширение свип-сигнала

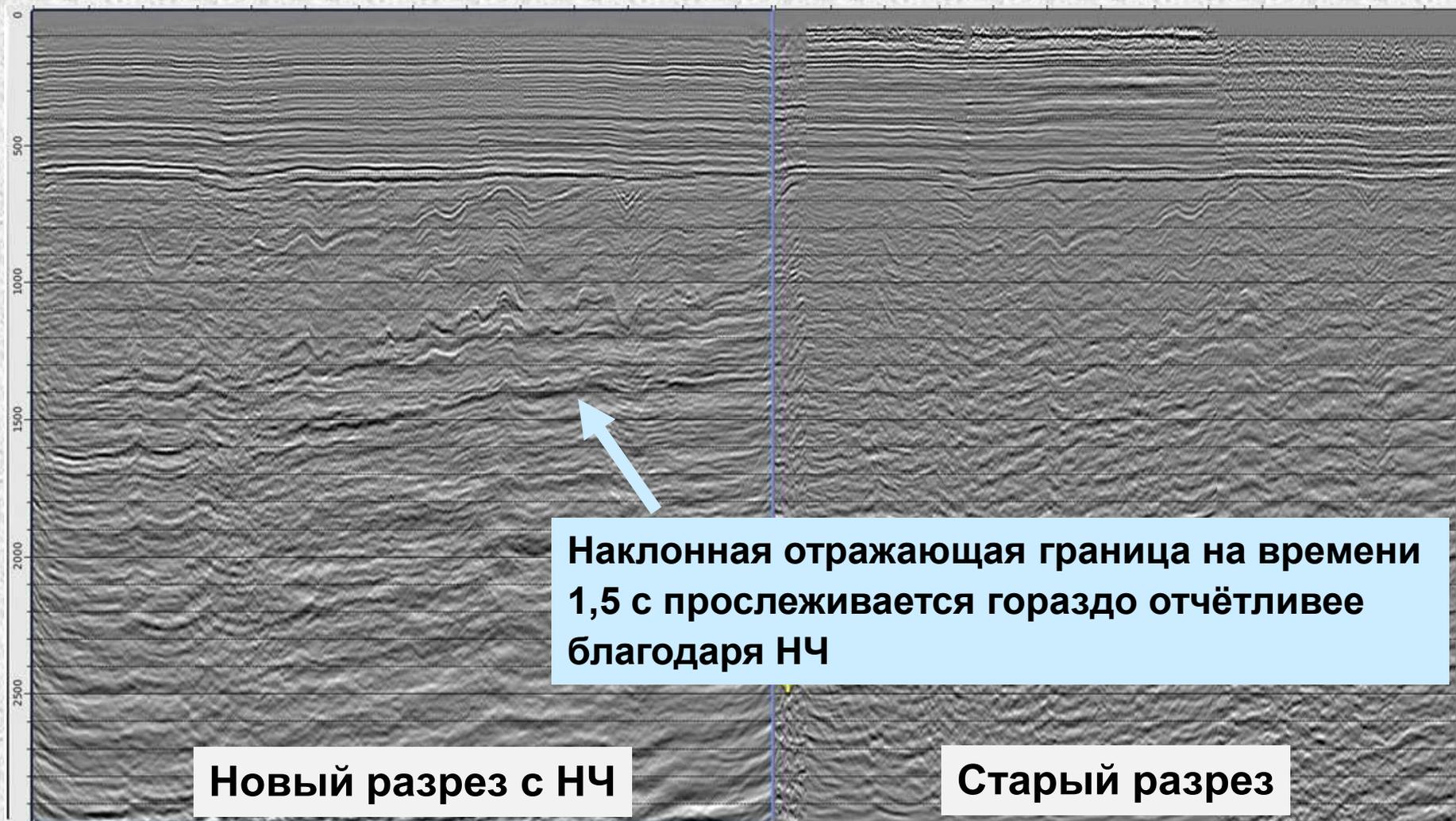
- Диапазон частот свип-сигнала в прошлом был обычно ограничен тремя октавами (10 – 80 Гц)

Мех. и гидр.  
ограничения



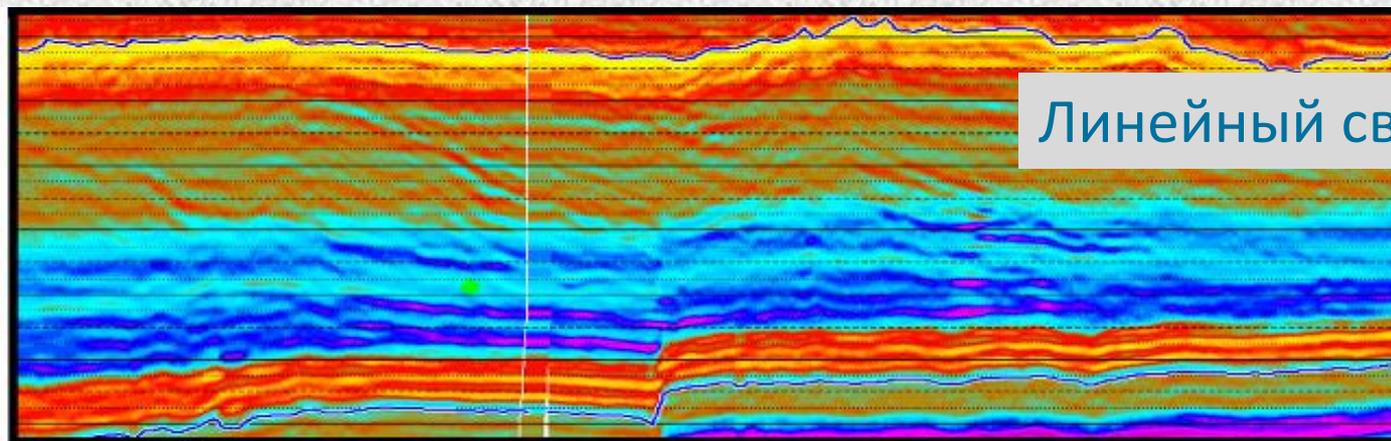
- Нет проблем для возбуждения частот до 160-180 Гц (на сухом грунте). Мы не можем повлиять на поглощающие свойства геологической среды, но **ВЧ** можно сохранить благодаря новым методическим приёмам
- Не требуется конструктивных изменений для возбуждения **НЧ** от 1 Гц, но амплитуда сигнала очень небольшая на первых Герцах. Разработаны специальные нелинейные свип-сигналы с упором на **НЧ**

# Низкие частоты в Омане

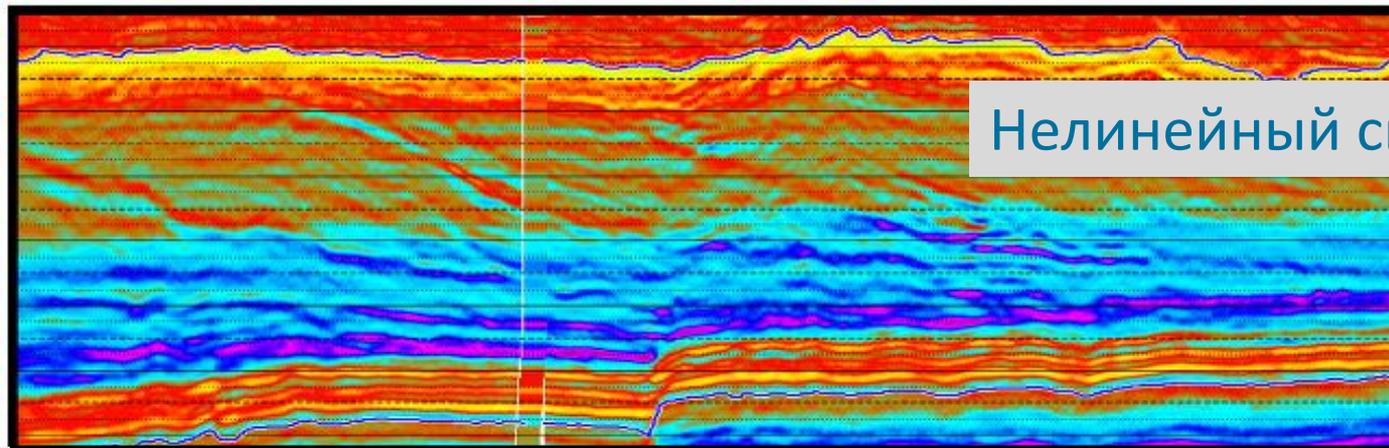


*From: "Land seismic low frequencies: acquisition, processing and full wave inversion of 1.5 – 86 Hz",  
SEG Las Vegas 2012 Annual meeting abstracts.*

# Вибросейсморазведка на Аляске



Линейный свип 8-80 Гц



Нелинейный свип 4-80 Гц

“Figure 6 shows improved P-impedance inversion results and better thin beds separation using the added low frequency content”.

# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний
  - Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
  - **Высокая плотность наблюдений**
  - Полная азимутальность
  - Высокая точность определения координат ПП и ПВ
  - Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
  - Мега-партии
-

# Вертикальная и горизонтальная разрешённость

Министерство  
природных ресурсов  
Российской Федерации

Министерство  
энергетики  
Российской Федерации

## 3.2.1 Рекомендации по сбору данных (с.31):

### 3.2.1.1 Системы наблюдений при сборе данных 3D должны обеспечивать:

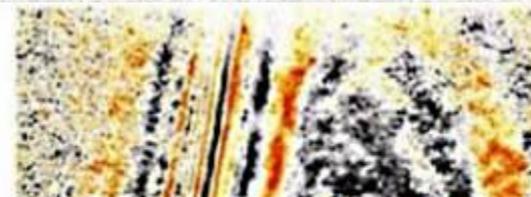
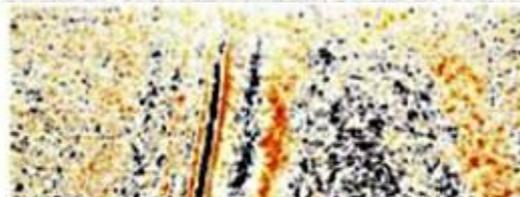
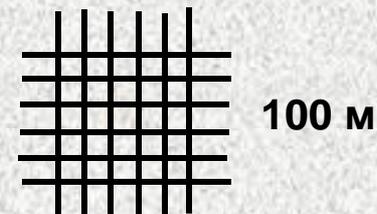
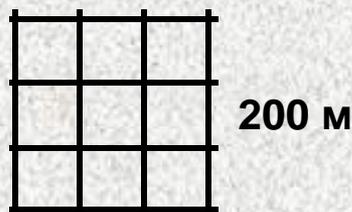
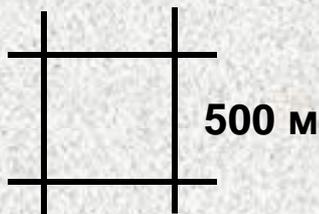
а) Максимально возможное... повышение уровня сигнал/шум, необходимое для использования динамических характеристик отражений... и обеспечения высокой их разрешённости на сейсмической записи.

б) Высокую пространственную разрешённость, т.е. малое расстояние между результативными сейсмическими трассами в кубе, что необходимо как для детального трассирования тектонических нарушений и литологических замещений, так и для эффективности 3-мерной миграции в условиях крутонаклонённых границ.

# Вертикальная и горизонтальная разрешённость

- В 1984 году Берхаут (A.J.Berkhout) предложил использовать “**пространственные импульсы**” для количественной оценки горизонтальной разрешённости.
- Опираясь на “**пространственные импульсы**” можно показать, что вертикальная и горизонтальная разрешённость взаимосвязаны и не могут рассматриваться независимо:
  - Улучшение временной разрешённости влечёт за собой улучшение пространственной разрешённости
  - Улучшение пространственной разрешённости влечёт за собой улучшение временной разрешённости
- ✓ И временная разрешённость, и пространственная разрешённость зависят от плотности наблюдений. Высокоразрешающая сейсморазведка не может быть эффективной только за счёт возбуждения широкополосного сигнала, если плотность наблюдений недостаточна.

# Значение плотности наблюдений



- “Reservoir grade survey”<sup>TM</sup> (*Global Geophysical*)
- “Съёмка для картирования коллекторов и расчёта ФЕС”
- Плотность трасс в >10 раз выше стандартной



## Срезы на времени 900 мс после временной миграции до суммирования

- Одинаковый граф обработки применён к трём массивам данных с шагом линий 100, 200 и 500 м. Отчетливо видно, что С/П и разрешённость повышаются с увеличением плотности наблюдений
- Удивительным результатом было то, что доминирующая частота повышается примерно от 20 до 40 Гц на уровне целевого коллектора

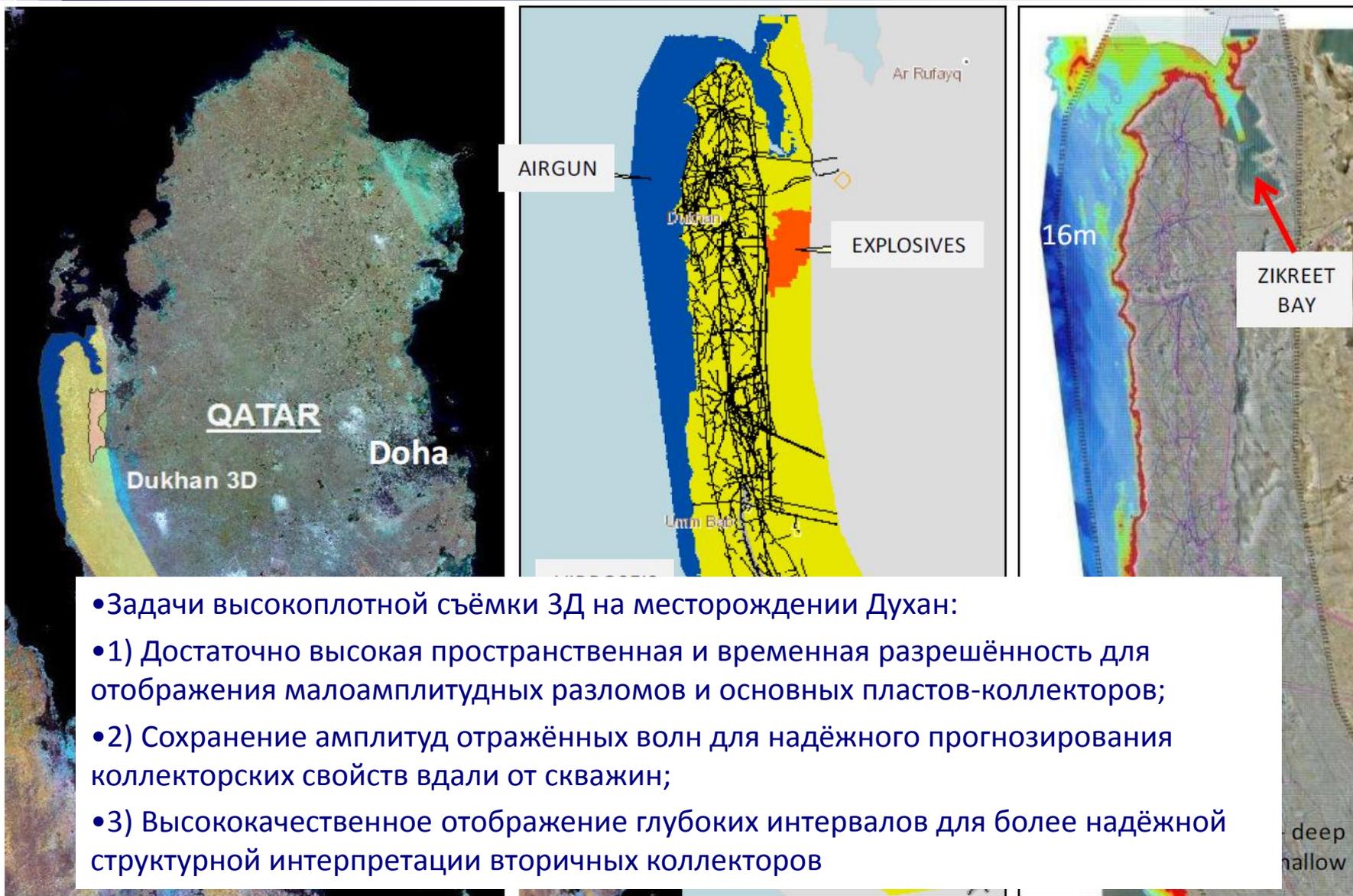
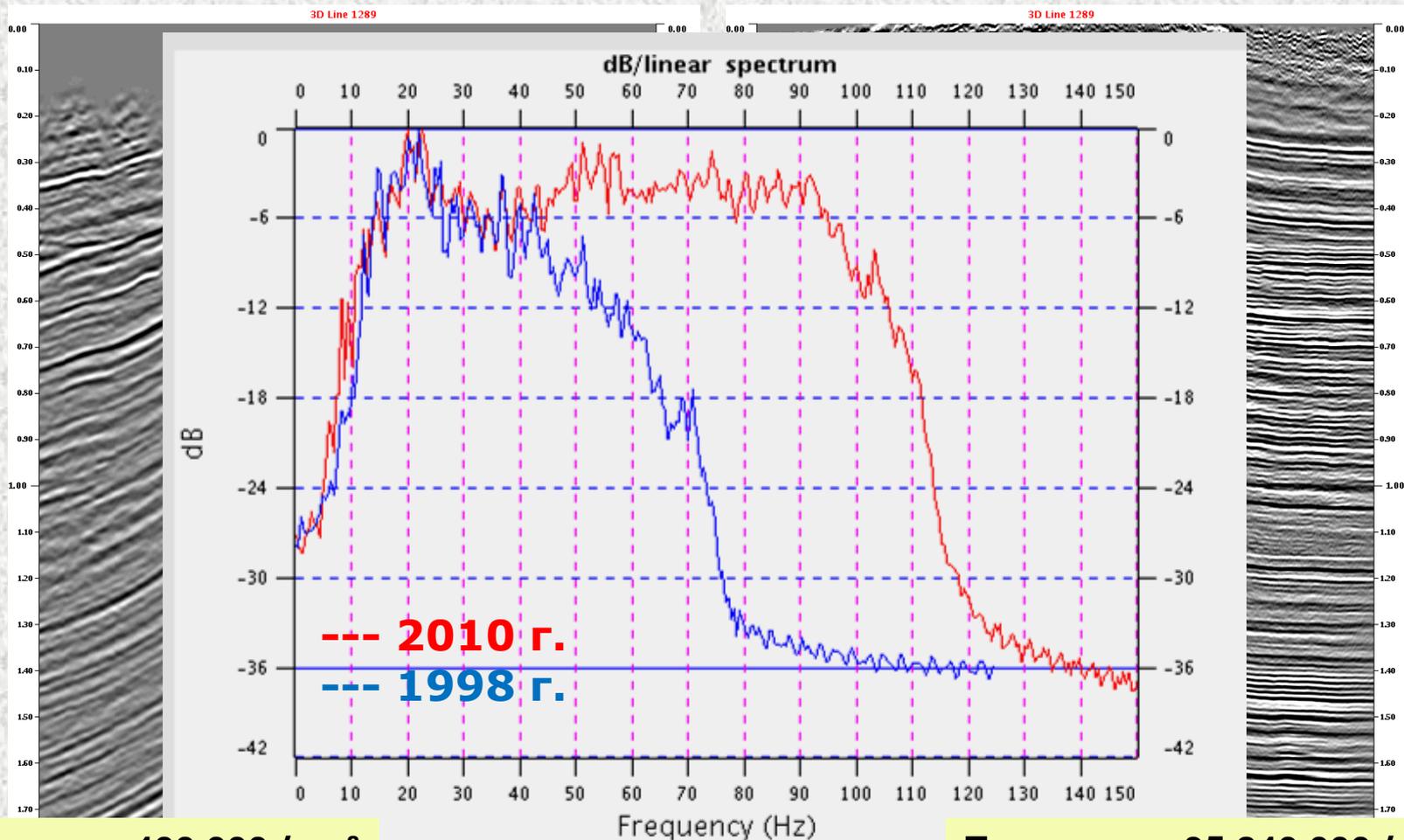


Figure 1: Survey Location Map, Seismic Source Map, Marine Water Depth Map

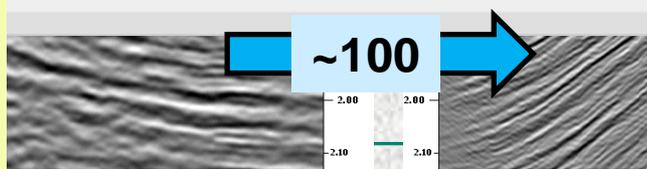
- Задачи высокоплотной съёмки 3Д на месторождении Духан:
- 1) Достаточно высокая пространственная и временная разрешённость для отображения малоамплитудных разломов и основных пластов-коллекторов;
- 2) Сохранение амплитуд отражённых волн для надёжного прогнозирования коллекторских свойств вдали от скважин;
- 3) Высококачественное отображение глубоких интервалов для более надёжной структурной интерпретации вторичных коллекторов

# Сравнение разрезов 1998 и 2010 гг.



--- 2010 г.  
--- 1998 г.

**Плотность: 400,000 / км<sup>2</sup>**  
**4000 активных каналов**  
**бин 25 x 25 м**  
**кратность 250**



**Плотность: 35,840,000 / км<sup>2</sup>**  
**24192 активных каналов**  
**бин 3,75 x 3,75 м**  
**кратность 504**

# Планирование НОВОЙ скважины

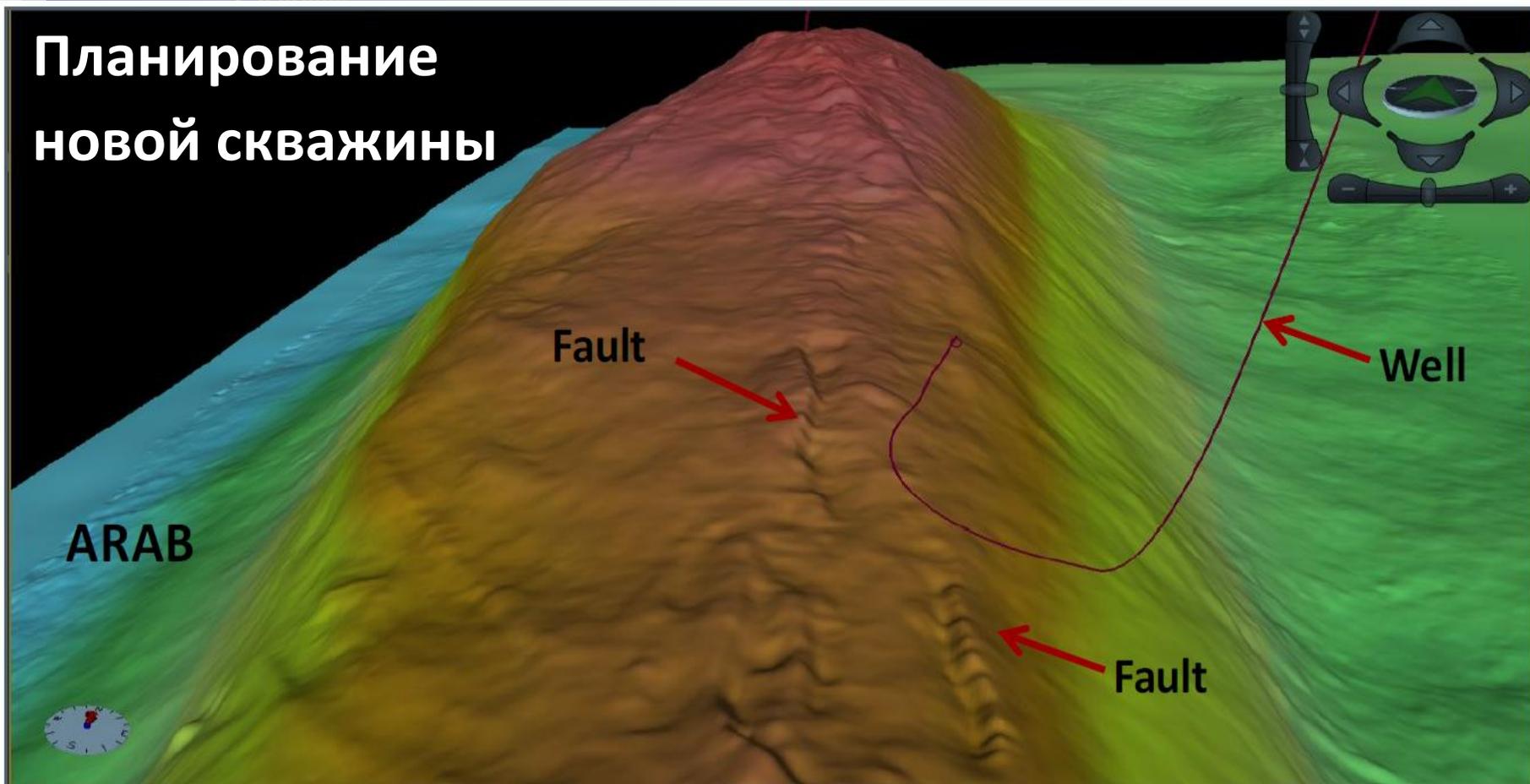


Figure 9: Recently planned well trajectory based on new seismic data

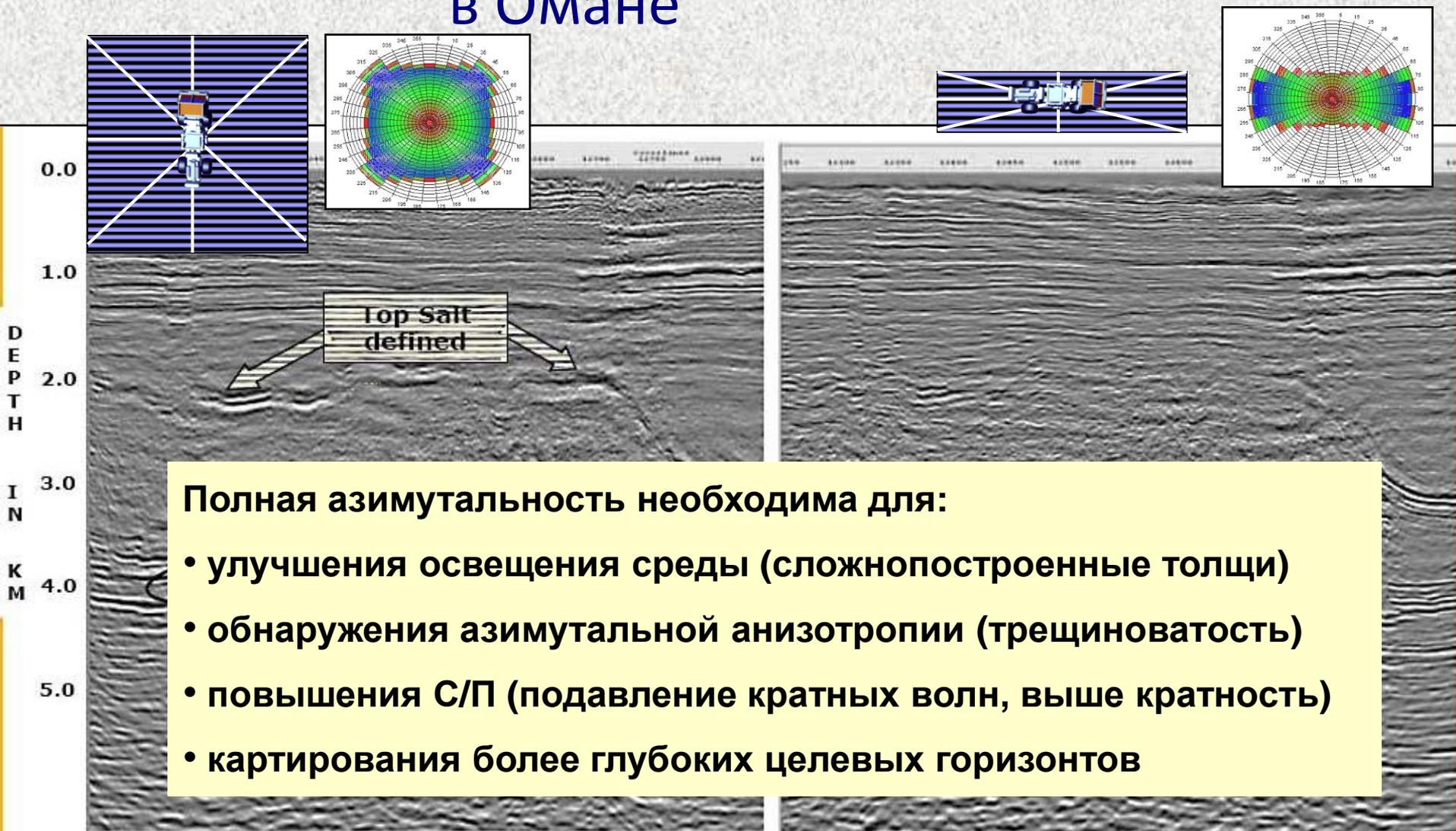
«Минимальная мощность выделяемого пласта уменьшилась с 40 до 14 м, благодаря чему стала лучше видна стратиграфическая изменчивость. Новые данные позволяют уверенно выделять и картировать малоамплитудные разломы с амплитудой всего 4 м, что позволяет точнее определять траектории стволов скважин, повысить безопасность бурения и оптимизировать разработку и добычу». \*

\* From: Salvarajah Seeni et al., Processing and preliminary interpretation of the Ultra high-density full-azimuth 3D seismic survey, Dukhan field, Qatar. – IPTC-17533, Doha, Qatar, 20-22 Jan2014.

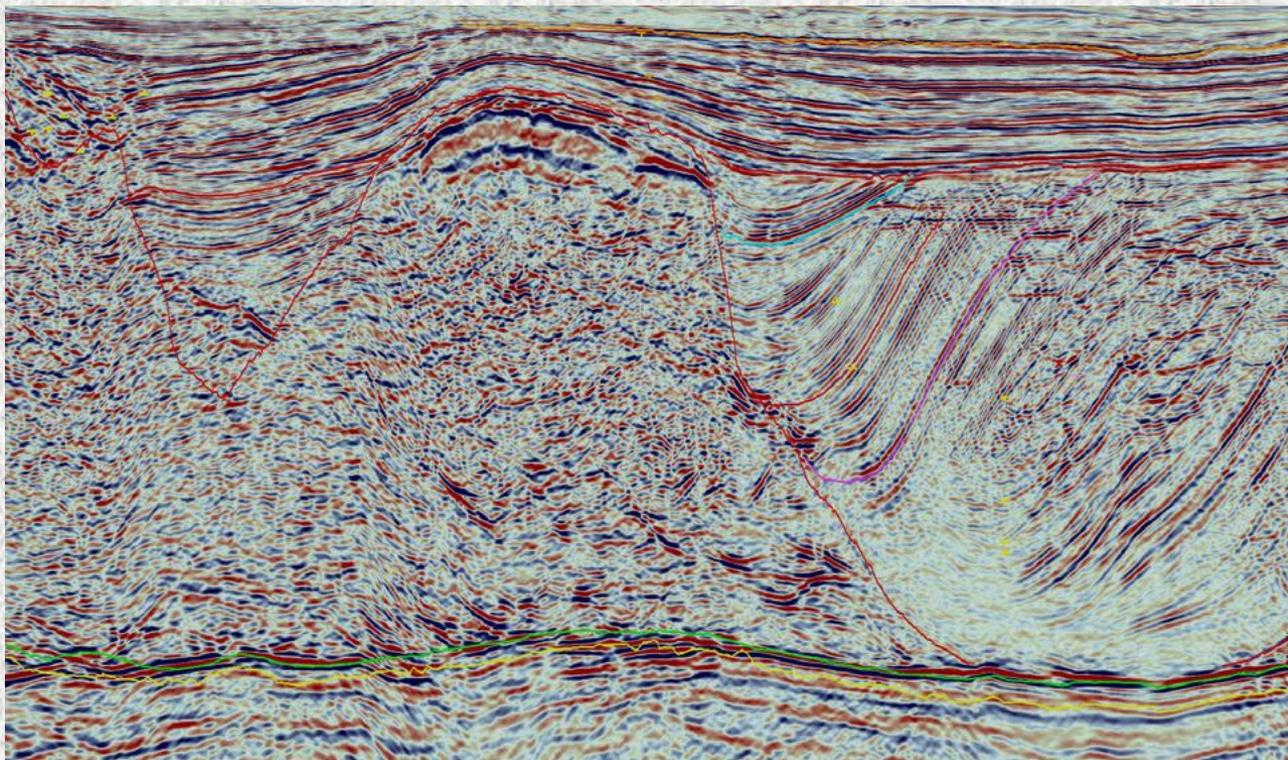
# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний
  - Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
  - Высокая плотность наблюдений
  - **Полная азимутальность**
  - Высокая точность определения координат ПП и ПВ
  - Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
  - Мега-партии
-

# Полноазимутальная съёмка 3D в Омане



# Широкоазимутальная съёмка 3D в условиях солянокупольной тектоники



*Данные: Лукойл-Инжиниринг, ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть*

«Широкоазимутальная сейсморазведка становится важным инструментом изучения месторождений углеводородов в сложных сейсмогеологических условиях, а также для решения специальных задач, недоступных существующим стандартным съёмкам». \*

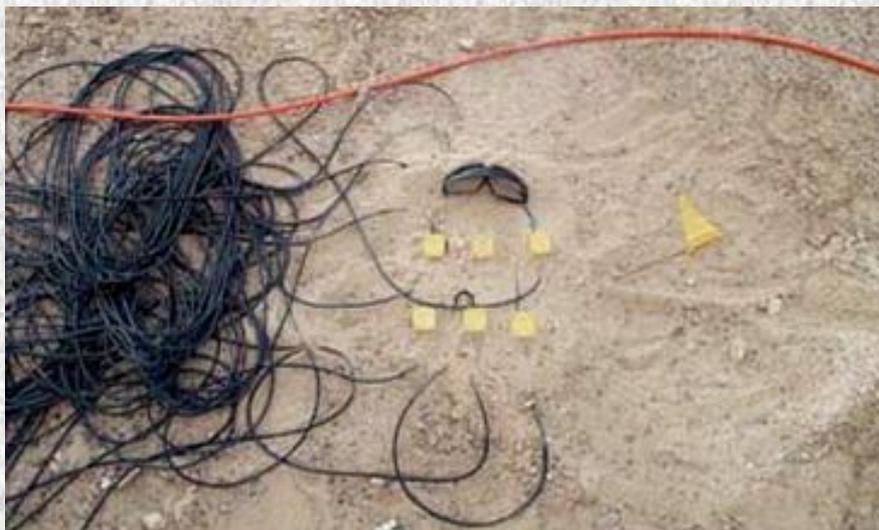
\* Из статьи: И.Н.Керусов, С.В.Делия, А.В.Фирсов, 2013, «ША сейсморазведка 3D в условиях солянокупольной тектоники: от планирования до результатов». – Геомодель-2013, Геленджик, 09-12 сентября 2013 г.

# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний
  - Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
  - Высокая плотность наблюдений
  - Полная азимутальность
  - **Высокая точность определения координат ПП и ПВ**
  - Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
  - Мега-партии
-

# Точность местоопределения

- Для высокоразрешающей сейсморазведки важно минимизировать отклонения источников и приёмников от плановых положений и погрешности их установки, что необходимо не только для поддержания проектной кратности, но и для концентрации средних точек вблизи центров бинов, исходя из требований обработки [См. *Варенков Е.В., 2011, ГеоСейсКонтроль, «О требованиях к геометрии съёмки 3D»*]
- Точное местоопределение необходимо для таких процедур, как взвешенное цифровое группирование, ввод кинематики и т.п.



При тесте в Омане точность топогеодезических работ для пунктов возбуждения составляла 0,5 м, а точность вывода вибраторов на заданные пункты возбуждения составила 0,3 м. Погрешность определения центра тяжести поставленных «в точку» приёмников была меньше, чем 0,2 м.

## Двухчастотные GPS-приёмники в Катаре

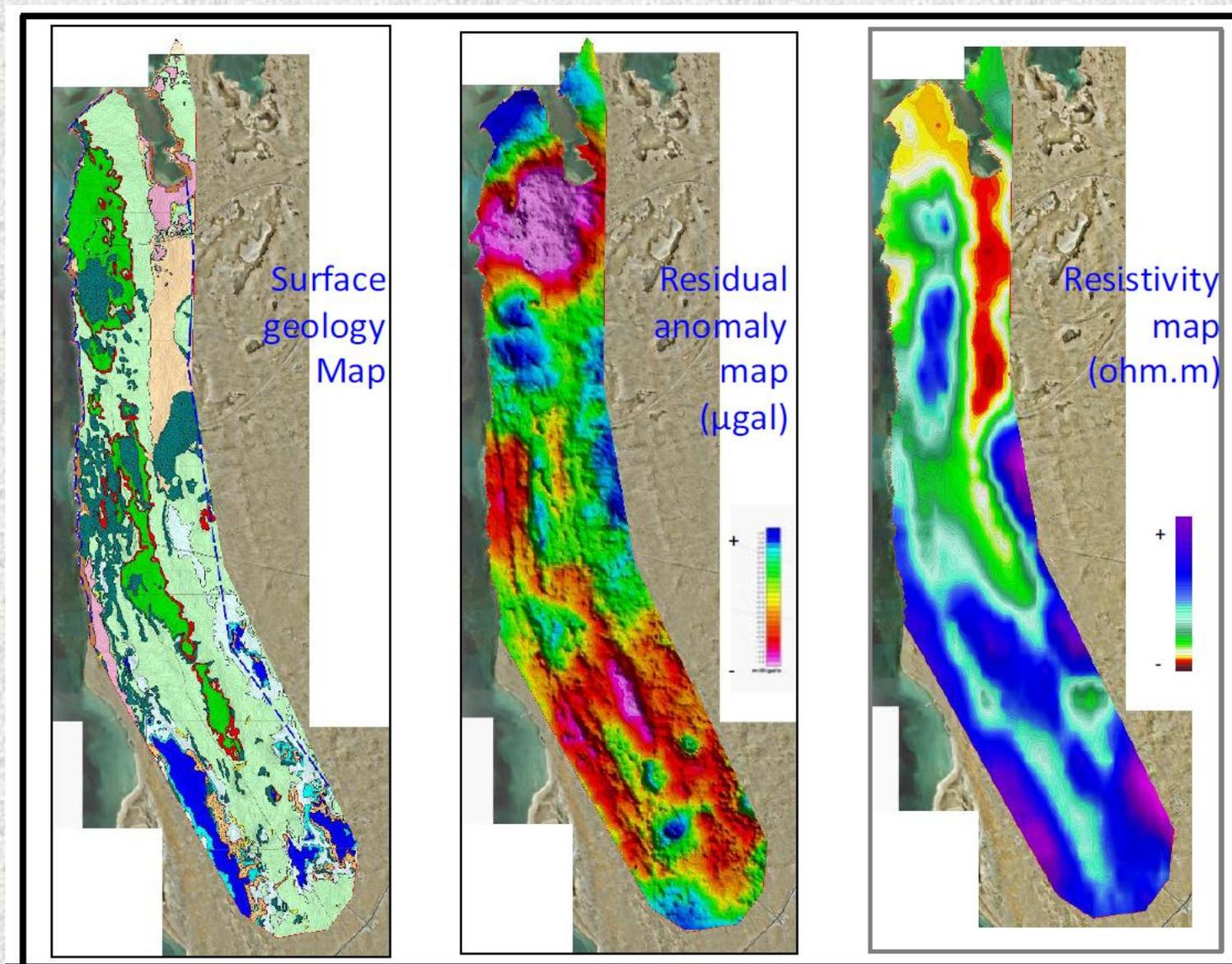


- Точность определения координат пунктов приёма: 1 см (метод RTK)
  - Ошибки выноса (установки): 0.5 м
-

# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний
  - Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
  - Высокая плотность наблюдений
  - Широкие азимуты
  - Высокая точность определения координат ПП и ПВ
  - **Комплексирование (+ гравика; + электроразведка)**
  - Мега-партии
-

# Комплексирование в Катаре



# Электроразведка ВЭЗ для уточнения модели ЗМС и статпоправок

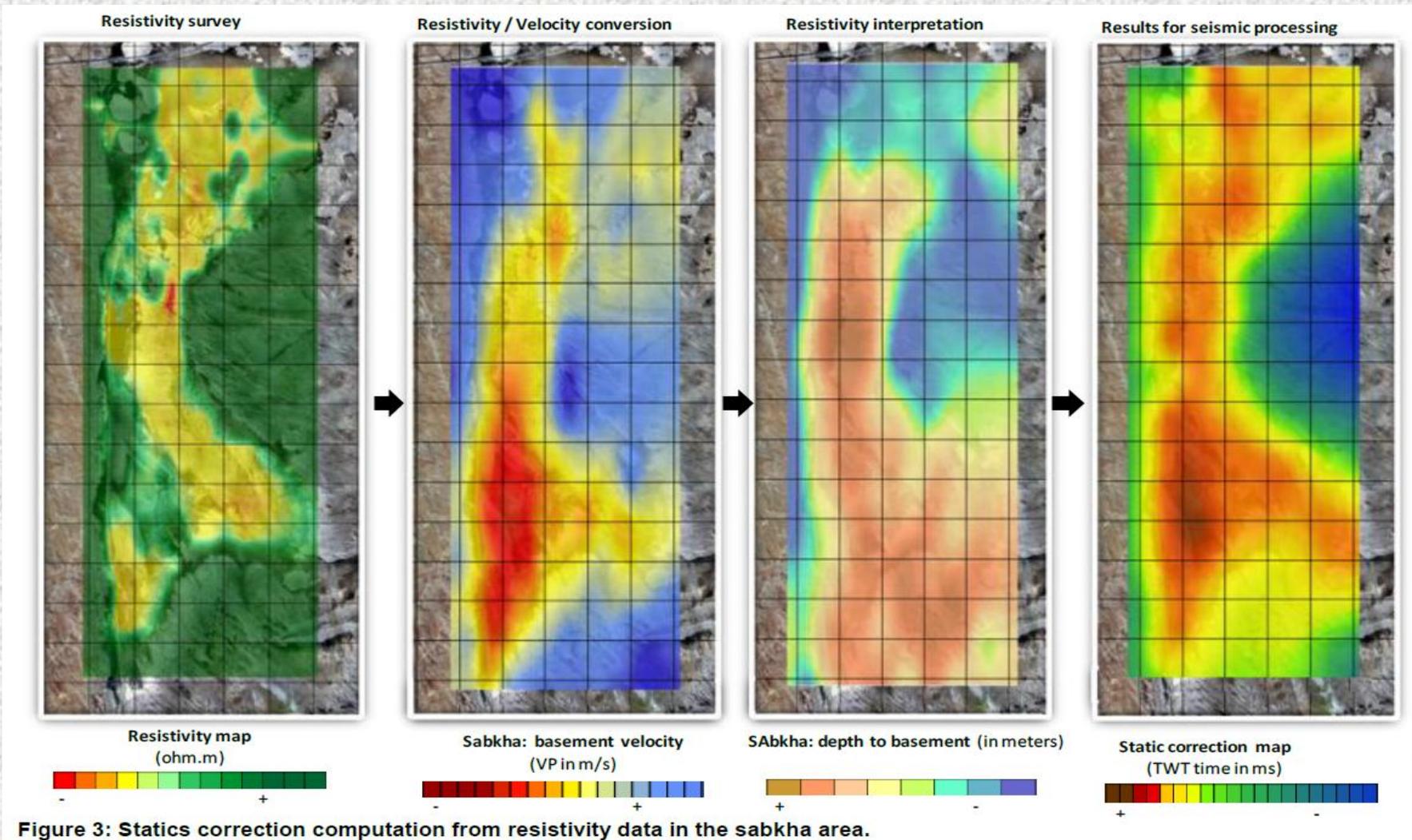


Figure 3: Statics correction computation from resistivity data in the sabkha area.

From: Salvarajah Seeni et al., Processing and preliminary interpretation of the Ultra high-density full-azimuth 3D seismic survey, Dukhan field, Qatar. – IPTC-17533, Doha, Qatar, 20-22 Jan2014.

# Комплексное представление

Граница по всем трём типам  
геофизических данных

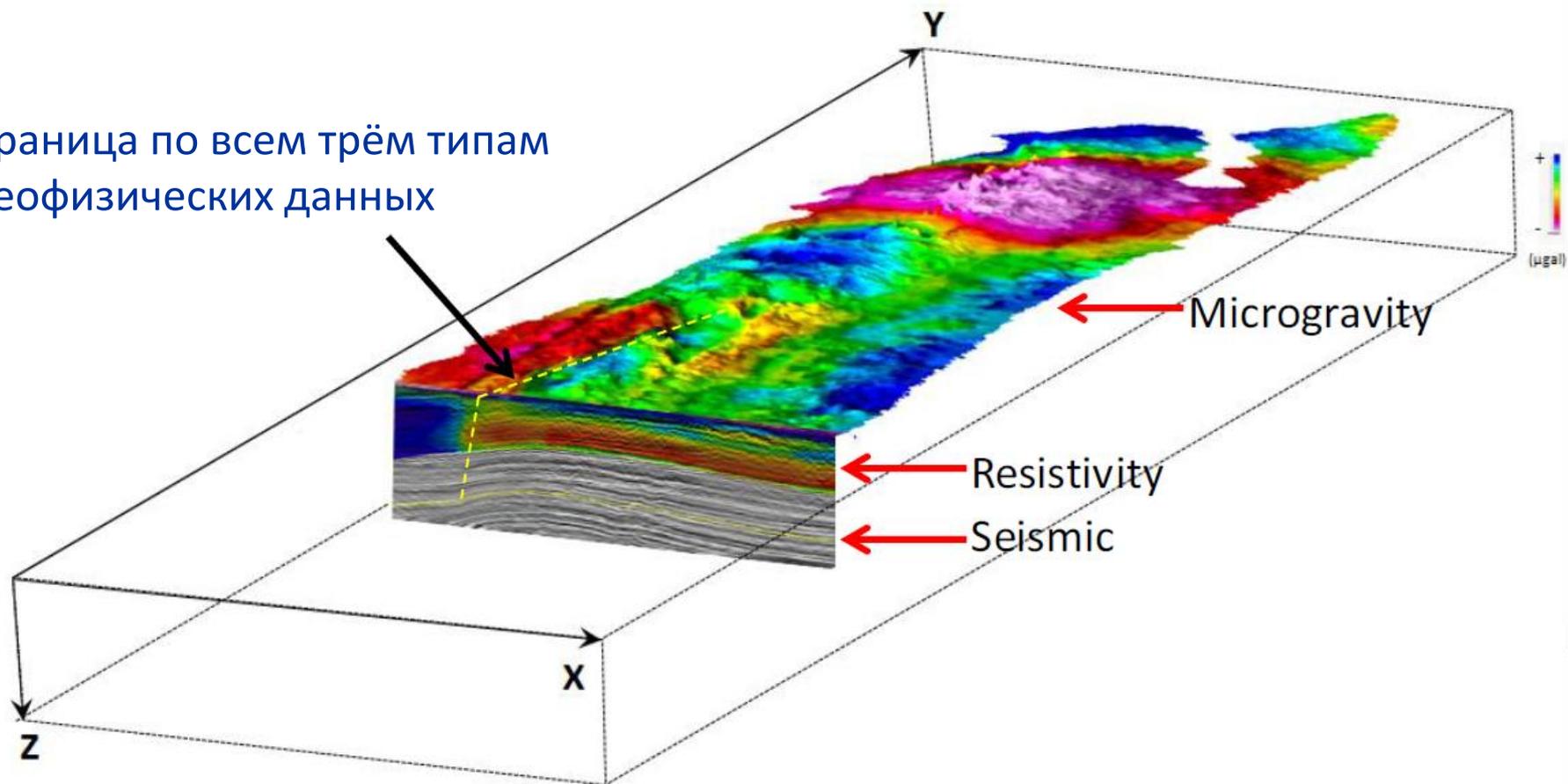


Figure 17: Good correlation among seismic, microgravity and resistivity data

From: Salvarajah Seeni et al., Processing and preliminary interpretation of the Ultra high-density full-azimuth 3D seismic survey, Dukhan field, Qatar. – IPTC-17533, Doha, Qatar, 20-22 Jan 2014.

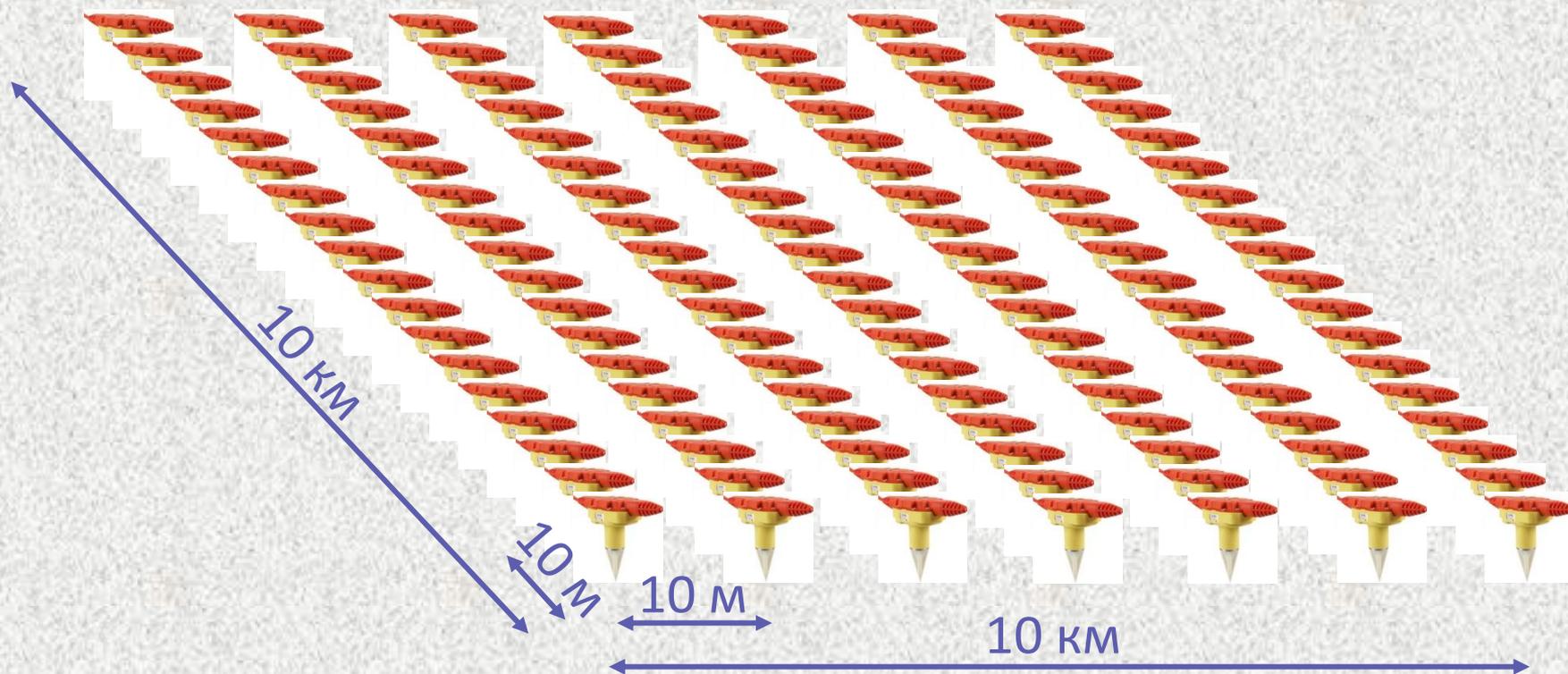
# Сейсморазведка нового технологического уровня

- Одиночные (точечные) приёмники и источники сейсмических колебаний
  - Возбуждение и регистрация широкополосного сигнала
  - Высокая плотность наблюдений
  - Широкие азимуты
  - Высокая точность определения координат ПП и ПВ
  - Комплексование (+ гравика; + электроразведка)
  - **Мега-партии**
-

# Мега-партии

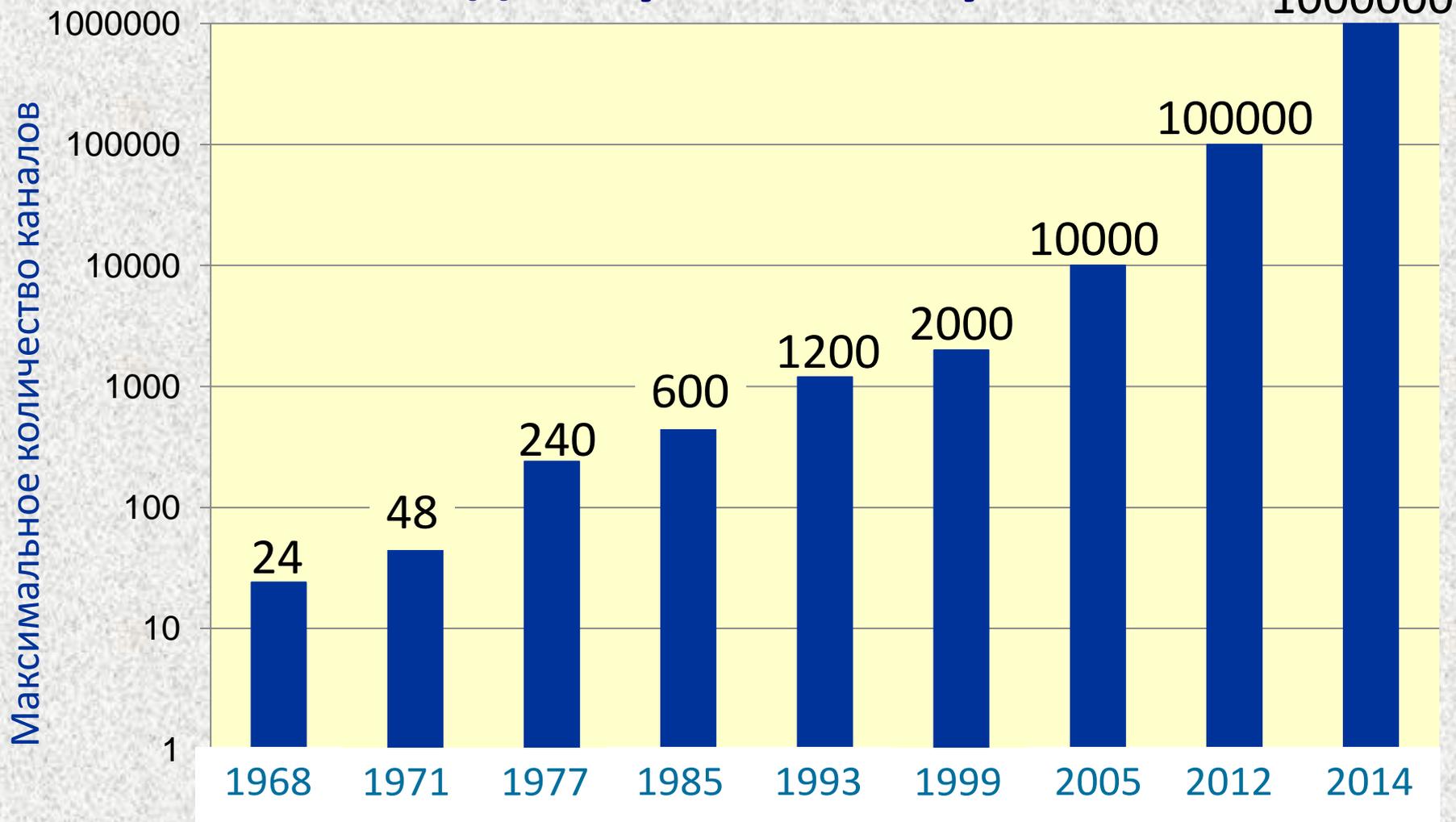
- Для сейсморазведки нового технологического уровня необходимы мега-партии с очень большим количеством каналов, измеряемым десятками тысяч, а в отдельных случаях – и сотнями тысяч каналов.
- Для эффективной работы мега-партий необходимо:
  - тщательно планировать полевые работы,
  - использовать лёгкое и надёжное наземное оборудование,
  - обеспечивать высокую скорость передачи данных,
  - контролировать качество полевых работ в реальном времени,
  - внедрять высокопроизводительные методики.
- Потребуется изменить привычные подходы к контролю качества. В мега-партиях супервайзеры будут, в первую очередь, сосредоточены на соблюдении технологий полевых работ, на контроле качества источников колебаний, а не на количественных оценках исходных сейсмограмм, как на прежних технологических уровнях.

# 1 миллион каналов?



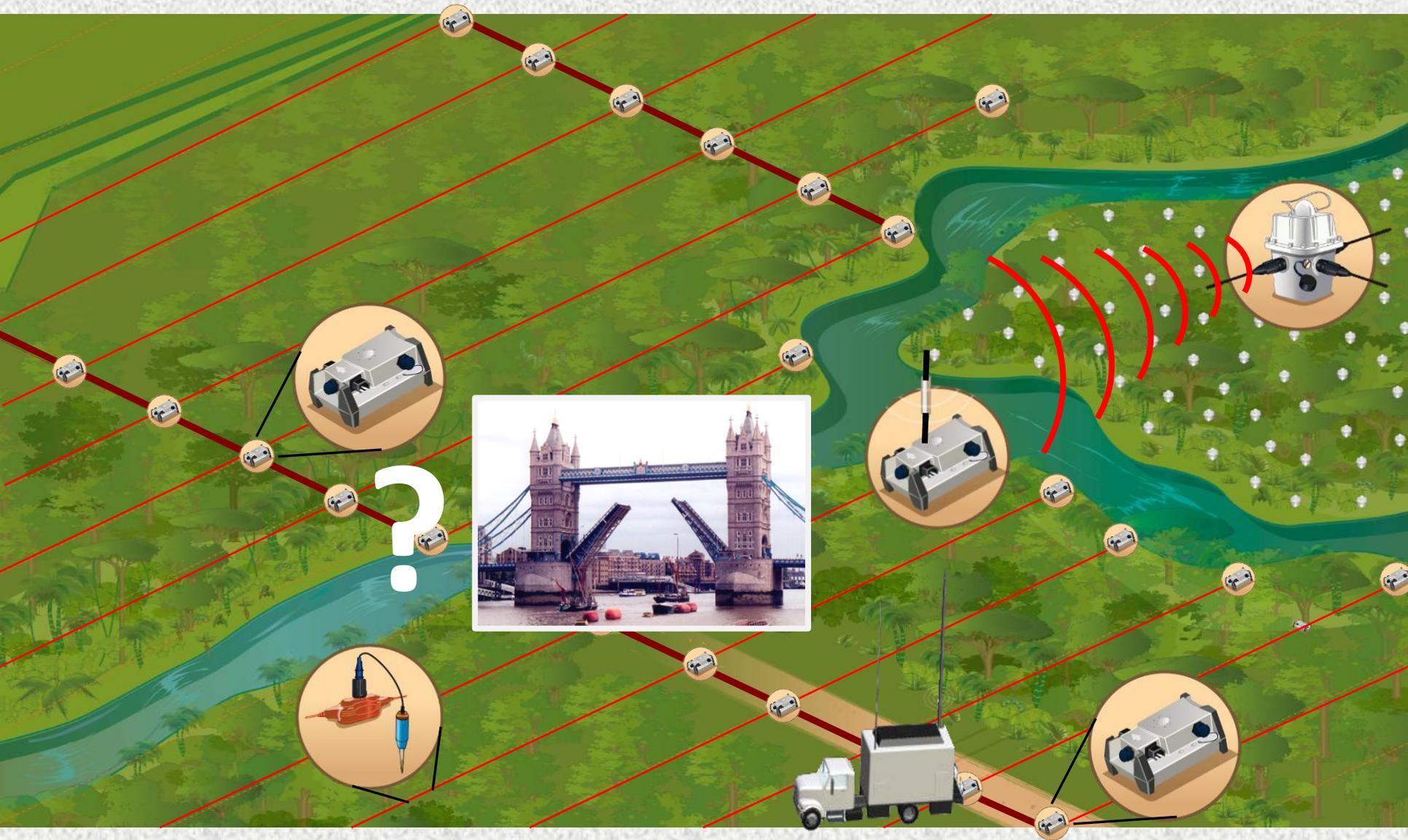
- ✓ Квантование волнового поля без аляйсинга по двум координатам
- ✓ Расстановка 10 x 10 км с шагом датчиков 10 x 10 м

# К одному миллиону каналов



- ✓ Рекорд по количеству каналов в одной партии: 210 тысяч (Кувейт)
- ✓ Ожидается тендер на Ближнем Востоке: 500 тысяч каналов

# Комбинированная расстановка 3D



Из презентации компании SERCEL, 2014 г.

## Заключение

1. Сейсморазведка 3D нового технологического уровня – это эффективный инструмент для решения «тонких» структурных и динамических задач, которые ставятся перед сейсморазведчиками нефтегазовыми компаниями.
2. Расширение спектра сигнала в сторону НЧ и ВЧ, повышение плотности наблюдений, увеличение расстояний источник-приёмник и полная азимутальность повышают качество изображений геологической среды и надёжность инверсии сейсмических данных.
3. Сейсморазведка 3D нового технологического уровня – это целый аппаратно-методический комплекс, для эффективного внедрения которого в тех или иных сейсмогеологических условиях требуется слаженная работа специалистов разного профиля – от планировщиков до интерпретаторов – а также масштабные опытные работы.

А.В.Череповский (SERCEL)

---

апрель 2014 г.