



ЗЕНИТ

Метод сейсмической голографии на рассеянных волнах **RTH (Reverse Time Holography)**

Ерохин Г. Н.

ПОТРЕБНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОФИЗИКИ



Повышение детальности и качества сейсмического разреза без увеличения стоимости полевых работ

Получение сейсмических атрибутов высокого разрешения за счет новых математических решений при оптимальных вычислительных затратах

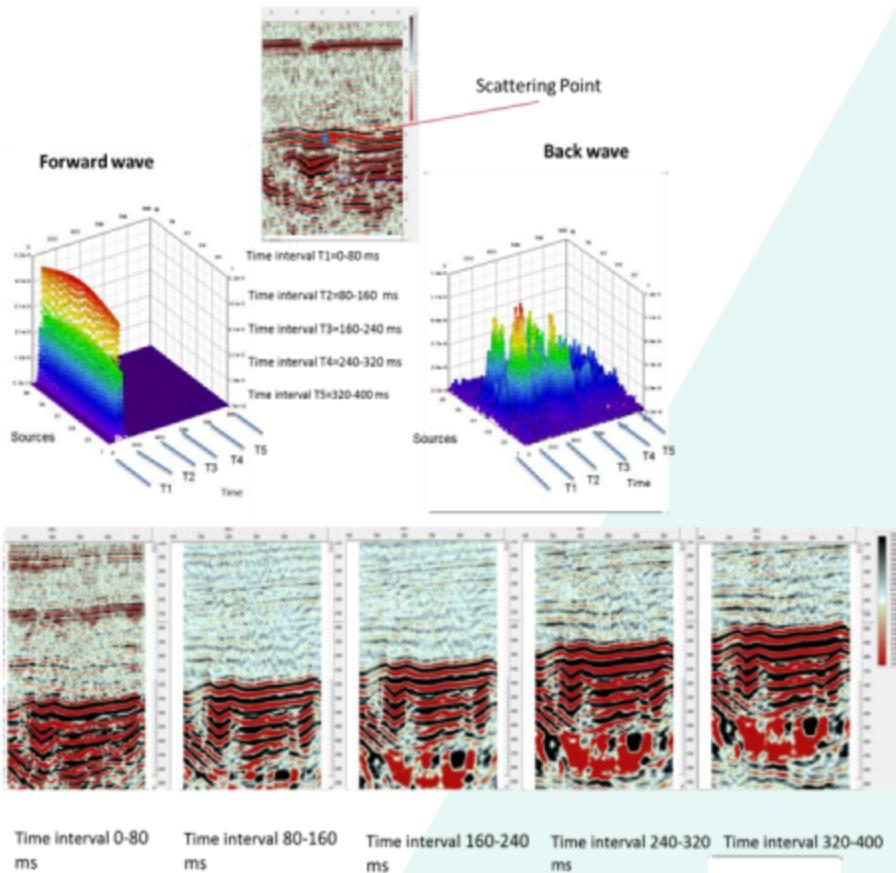
Увеличение пространственного разрешения сейсмических разрезов для поддержания технологий высокоточного горизонтального бурения

Прямой поиск залежей углеводородов на основе комплексирование данных сейсмики и ГИС с помощью методов искусственного интеллекта

Краткое описание метода RTH

Reverse Time Holography – RTH – новый метод обработки данных сейсморазведки, основанный на обращении волнового поля во времени и сейсмоголографической интерферометрии

Свойство галограммы:



Свойство галограммы:

теории сопряженных уравнений и обращения волнового поля во времени (reverse time);

численном пространственно-временном моделировании интерференции волн (голография);

статистическом накоплении результатов интерференции (аналог - набор фотопластинок);

фильтрации событий многомерного статистического распределения;

статистической оценке параметров многомерного распределения;

технологиях многомерной визуализации;

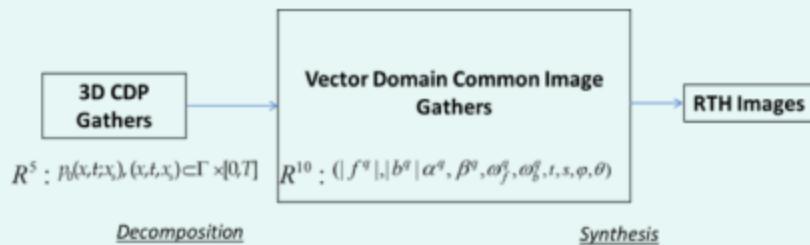
параллельных вычислениях на суперкомпьютерах;

обработке сверхбольших объемов данных.

Сравнение RTH и существующих методов

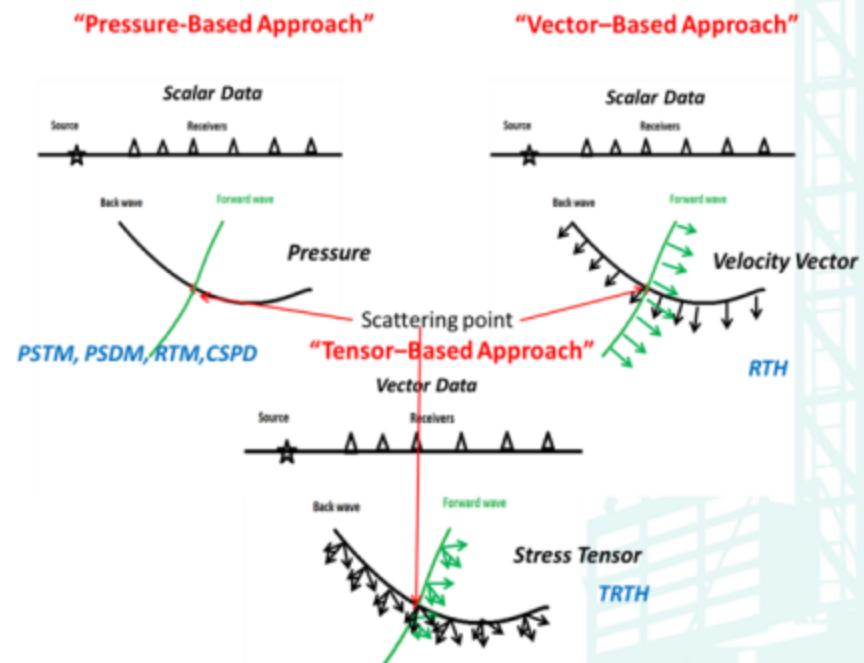
Основные стадии процесса обработки в RTH

Декомпозиция. Метод RTH обеспечивает пересчет исходных сейсмических данных (например полученных по технологии ОГТ) в векторные данные «общей точки изображения» (VDCIG) с сохранением высокоточной информации об амплитудах, фазах и частотах кругового вращения двух взаимосвязанных векторов: вектора падающей волны и вектора обращенной во времени «обратной» волны (данные VDCIG).

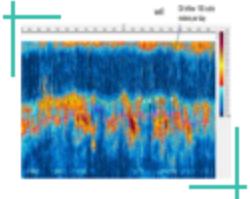


Синтез. Пересчитанные векторные данные VDCIG имеют существенно больший, чем исходные данные МОГТ объем, но позволяют на этапе синтеза одновременное построение атрибутов высокого пространственного разрешения, которые включают, как частный случай, все известные атрибуты глубинной миграции, а также AVO, AVAZ и MVO и пр., как то: рефлекторы, дифракторы, изображения на дуплексных волнах, углы наклонов, анизотропию рассеяния, азимутальную анизотропию, AVO атрибуты, скорость и пр.

Место RTH в классификации сейсмических методов обработки данных

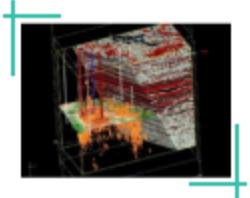


Практическое применение метода



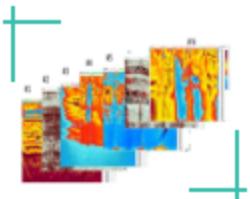
Обеспечение сопоставления сейсмики с данными ГИС

- поиск зон с аномально-высоким давлением;
- поиск неструктурных ловушек углеводородов;
- прямой прогноз залежи углеводородов.



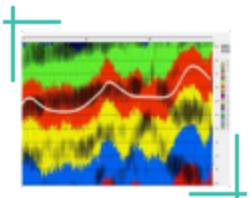
Аудит нефтяных месторождений со сложным геологическим строением

- выявление зон разуплотнения в целевых горизонтах, открытой трещиноватости, связанной с разломами;
- выявление повышенной проницаемости;
- определение зон с улучшенными коллекторскими свойствами;
- 4D-сейсмомониторинг.



Поиск неструктурных залежей углеводородов

- поиск трещинных коллекторов;
- поиск зон замещения.



Сейсмическое обеспечение горизонтального бурения

- построение скоростной модели высокого пространственного разрешения;
- выявление зон с повышенными свойствами дренирования.



Практическое применение метода

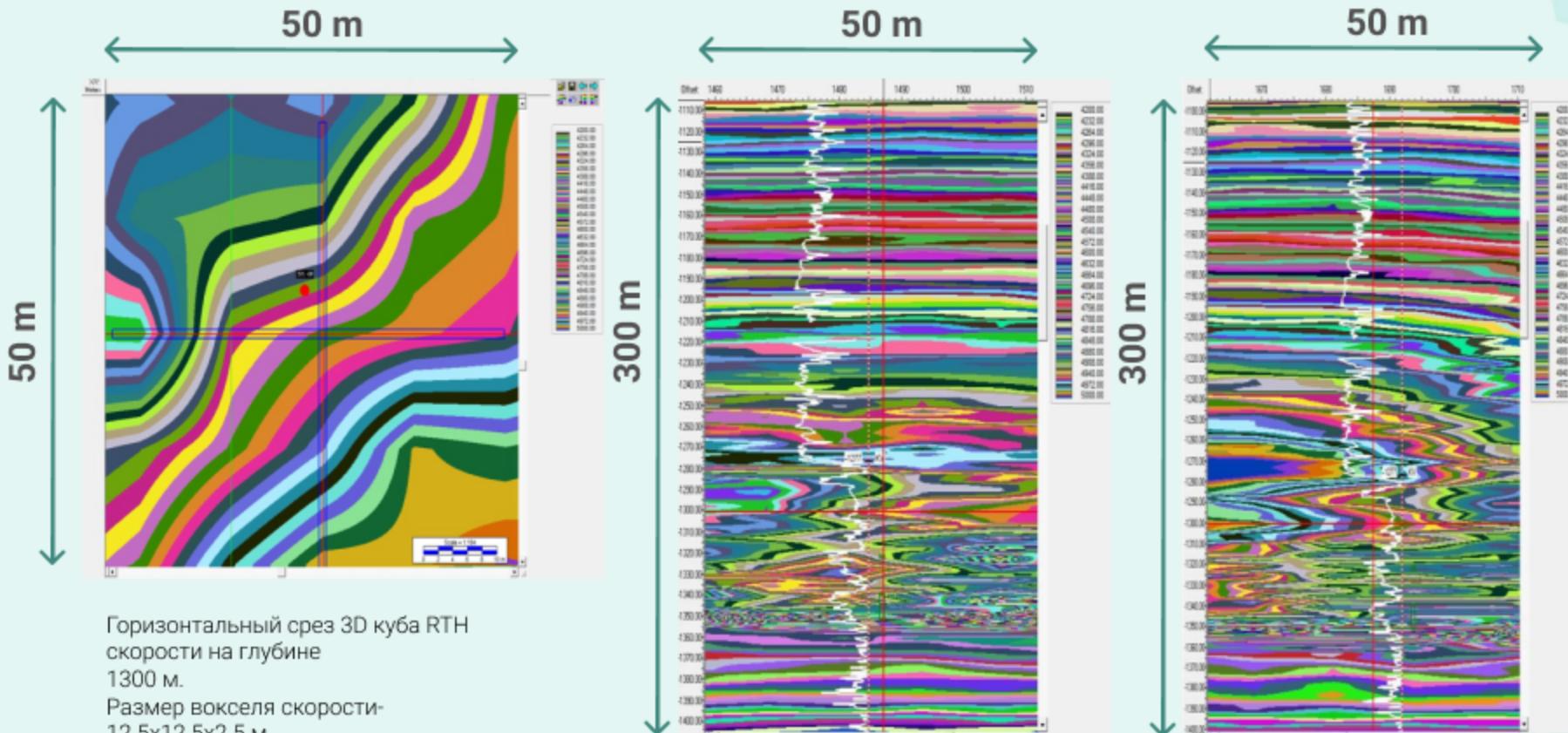
Преимущества метода RTH:

- пространственное разрешение миграционных изображений в 3-6 раза выше по сравнению с обычной глубинной миграцией до суммирования;
- скоростная томография среды высокого пространственного (до 1 метра) разрешения;
- автоматический учет ВЧР;
- устойчивость к разреженным регулярным и нерегулярным системам регистрации и возбуждения;
- одновременный и независимый расчет всех известных сейсмических атрибутов, таких как: RTM, AVO, Dip, Opening Angle, азимутальной и пространственной анизотропии рассеяния и еще более 50 новых, ранее неизвестных атрибутов.

Задачи метода RTH:

- выявление зон разуплотнения (неоднородности) целевых горизонтов, которые связаны с разломами, трещинами, повышенной проницаемостью и улучшенными коллекторскими свойствами;
- сейсмическая основа для высокоточной геонавигации при горизонтальном бурении скважин;
- обеспечение комплексирования с данными ГИС;
- выделение перспективные зоны для разведки и бурения скважин;
- оценка текущего состояния нефтяных месторождений со сложным геологическим строением на основе традиционных и новых сейсмических атрибутов.

Скоростная томография среды высокого пространственного (до 1 метра) разрешения



Горизонтальный срез 3D куба RTH

скорости на глубине
1300 м.

Размер voxel'a скорости-
12.5x12.5x2.5 м.

Размер среза 50x50 метров.
Скоростная шкала 4200- 5000 м/с.
Восточная Сибирь.

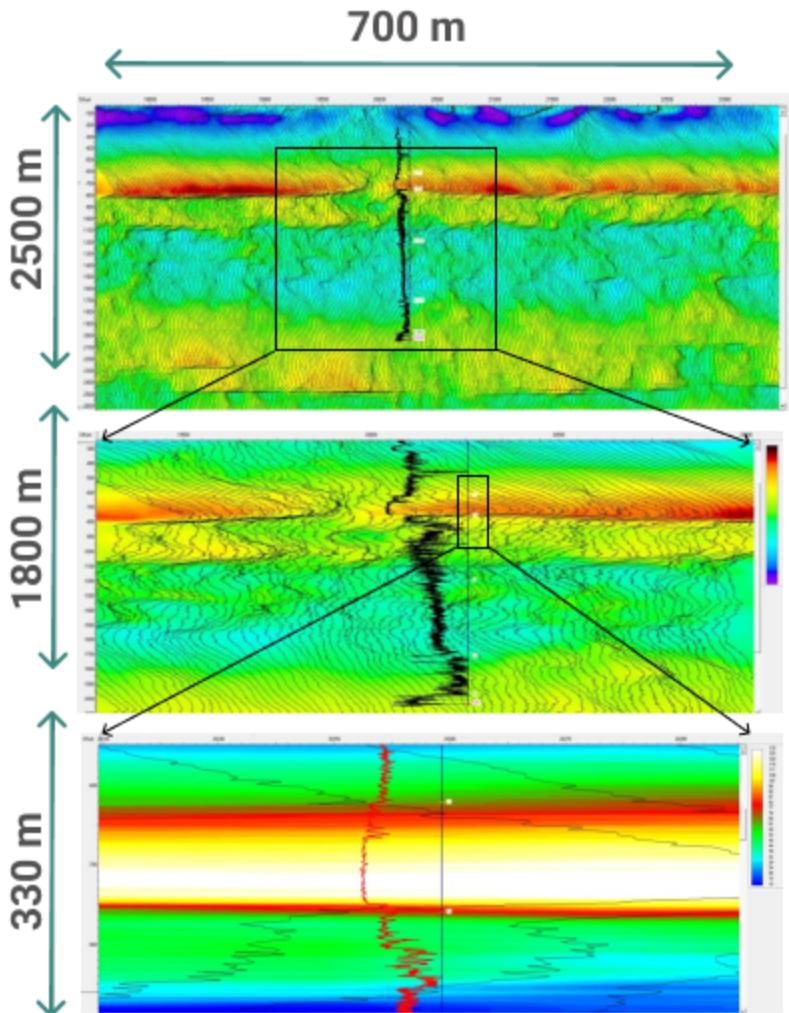
Вертикальное сечение куба RTH
скорости. Inline, 50x300 м.
Глубины 1100- 1400 м.
Скоростная шкала 4200- 5000 м/с.
Белая линия – кривая ГК.

Вертикальное сечение куба RTH
скорости.

Crossline, 50x300 м. Глубины
1100-1400 м.

Скоростная шкала 4200- 5000 м/с.
Белая линия – кривая ГК.

Увеличение пространственного разрешения сейсмических разрезов



- ▶ Пространственное разрешение миграционных изображений в 3-6 раза выше по сравнению с обычной глубинной миграцией до суммирования.
- ▶ Сверхвысокое разрешение (до 1 метра).
- ▶ Обеспечение эффективного сопоставления сейсмики с данными ГИС благодаря эквивалентному пространственному разрешению сейсмики и данных ГИС.

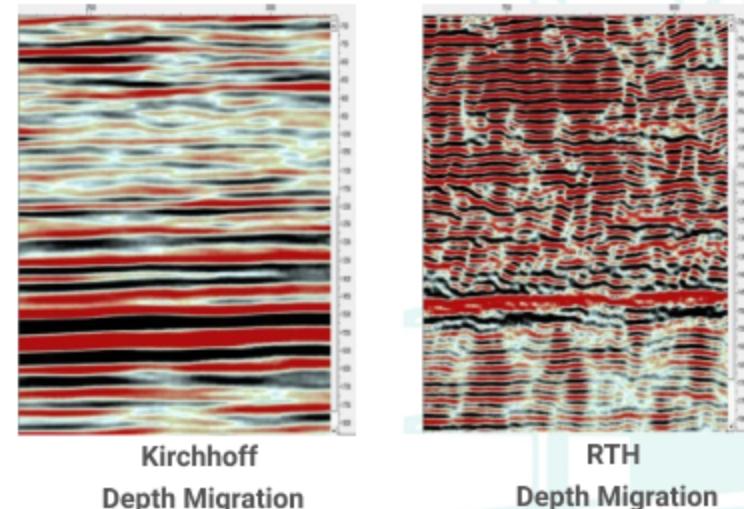
2D RTH скорость с наложенной кривой ГК.

Размер пикселя скорости -12.5x2.5 м.

Размер всей области - 7.0x2.5 км.

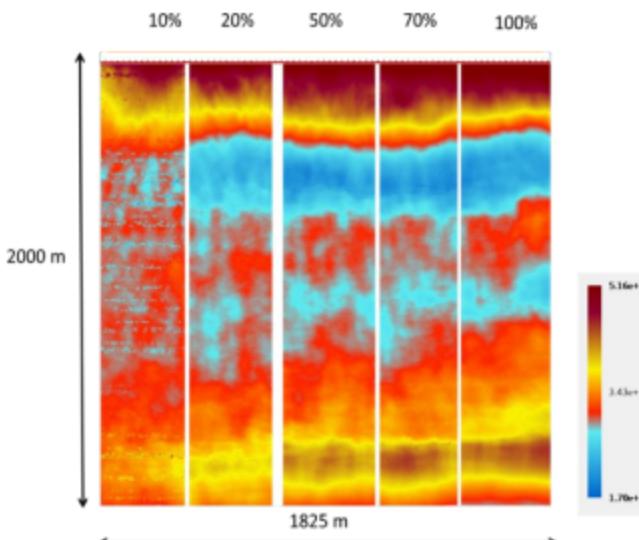
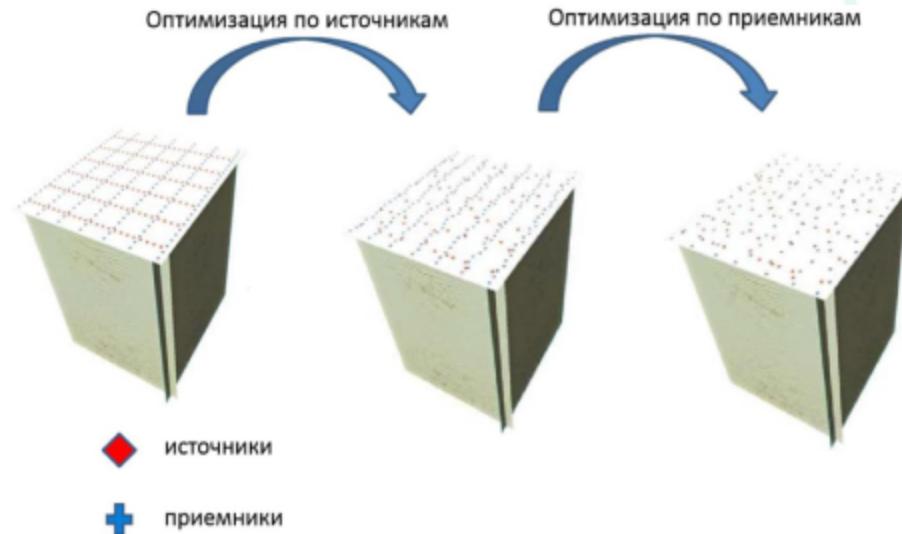
Красный цвет палитры - высокоскоростные отложения Перми. Балтийская синеклиза, Куршская впадина.

Сравнение PSDM и RTH

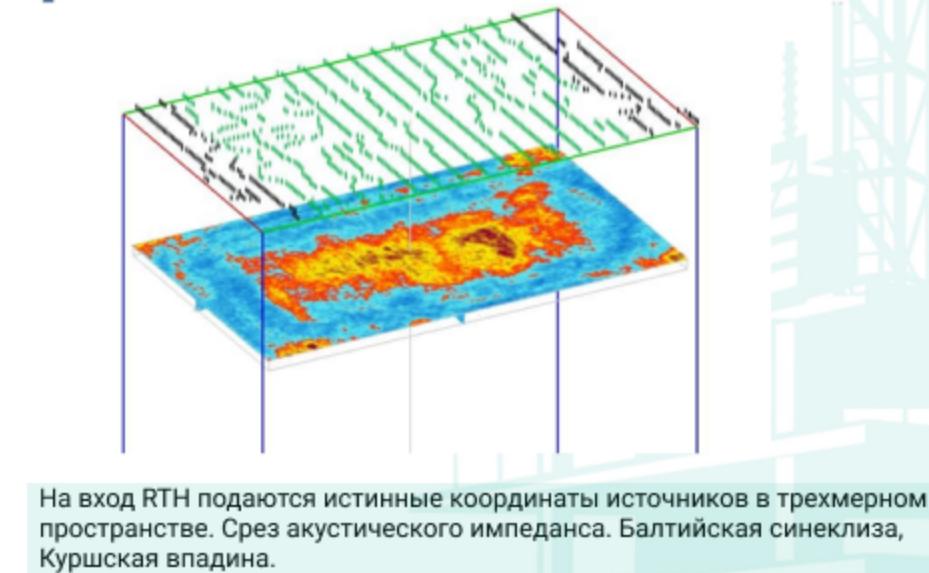


Устойчивость к разреженным регулярным и нерегулярным системам регистрации и возбуждения

- ▶ Оптимизация стоимости полевых работ: метод позволяет сократить количество источников и приемников при проведении полевых работ не менее чем в два раза.
- ▶ Сокращение числа источников не снижает качества обработки
- ▶ При нерегулярной системе расположения источников качество RTH возрастает



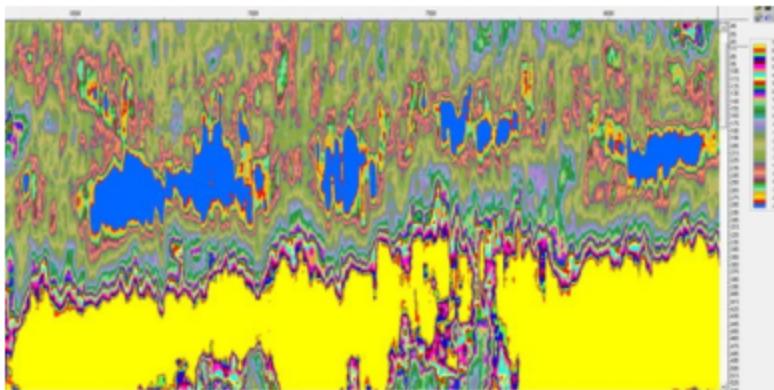
RTH Diffractivity при различных количествах источников



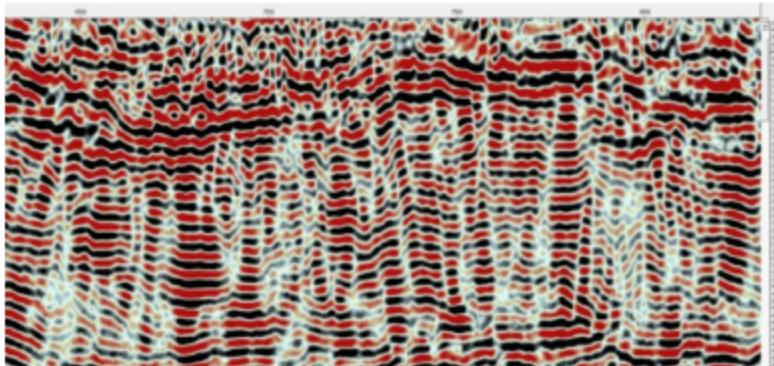
Автоматический учет верхней части разреза (ВЧР)

- Метод RTH определяет скоростной разрез ВЧР с высоким пространственным разрешением. При построении всех глубинных атрибутов RTH (включая скорость) специально учитывать поправки за ВЧР не требуется. Западная Сибирь.

Анализ верхней части разреза

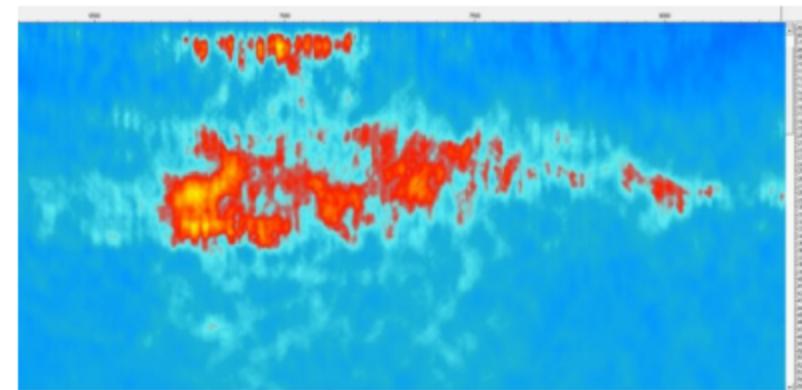


Отклонение RTH скорости от базового градиента, 5м

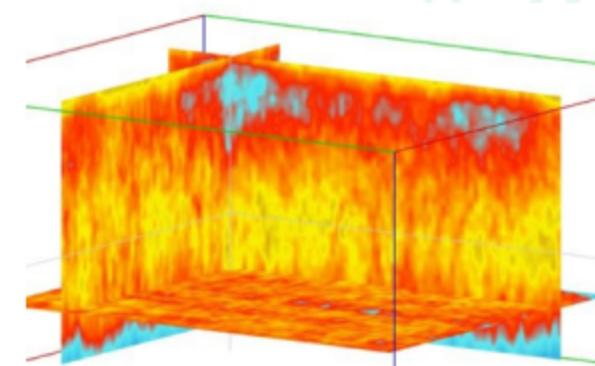


RTH рефлекторы, 5 м

Анализ верхней части разреза



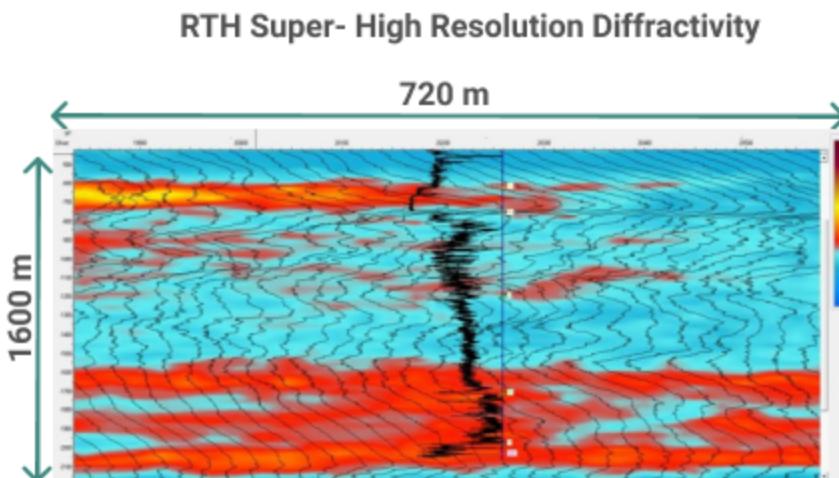
RTH дифракторы, 5м



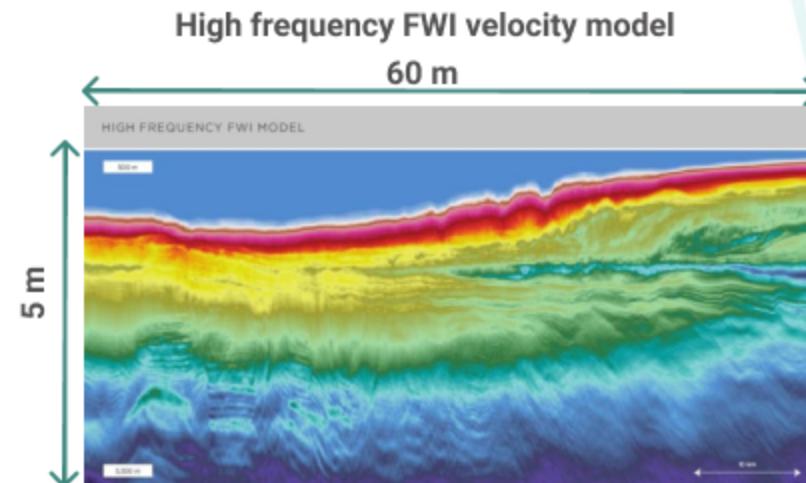
RTH скорость, 10 м

Получение сейсмических атрибутов высокого разрешения за счет новых математических решений при оптимальных вычислительных затратах

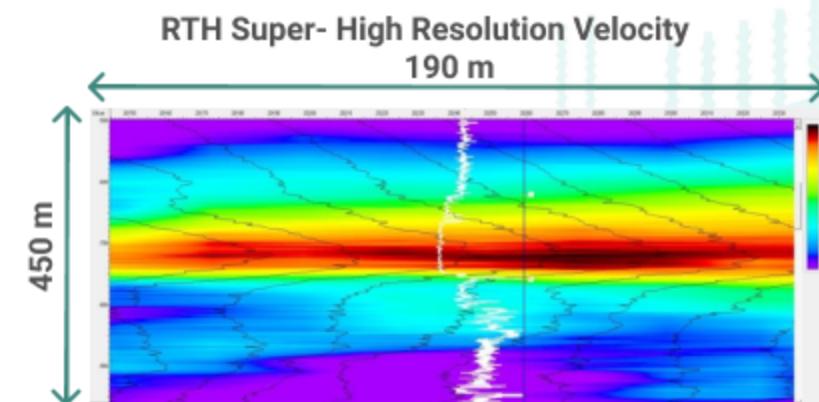
- ▶ Получение скорости с меньшими на порядки , чем в методе FWI, вычислительными затратами и существенно большим разрешением
- ▶ Вычисление более 20 новых независимых информативных сейсмических атрибутов сверхвысокого разрешения



2D RTH дифракторы с наложенной кривой ГК скорость (wiggle). Размер пикселя - 12.5×2.5 м. Размер всей области - 720x1600 м. Балтийская синеклиза, Куршская впадина.



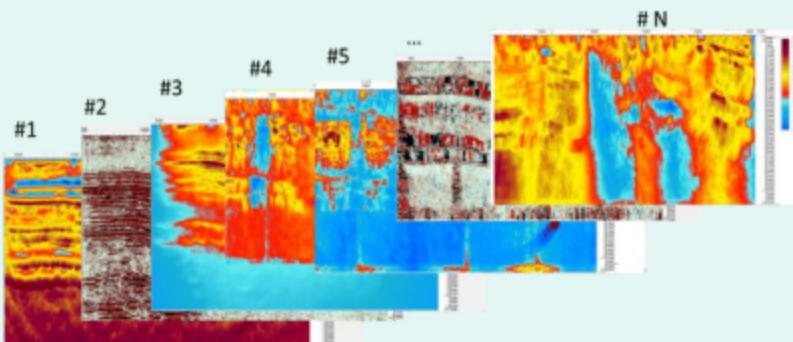
High frequency FWI velocity model by DUG company. Size 60x5 km.
<https://dug.com/dug-geo/full-waveform-inversion-fwi/>. DUG HPC is 250 PF.



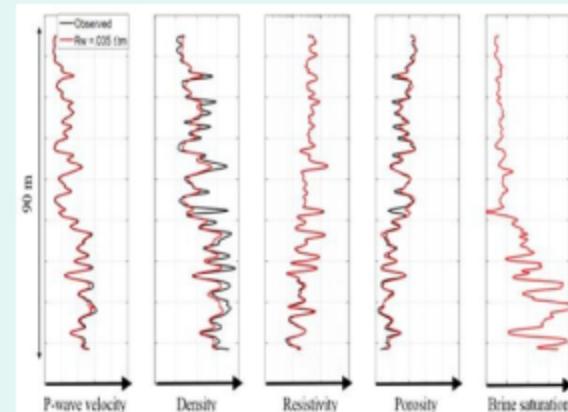
2D RTH скорость с наложенной кривой ГК. Размер всей области - 190x450 м. Размер пикселя скорости - 12.5×2.5 м. Красный слой-высокоскоростные отложения Перми. Балтийская синеклиза, Куршская впадина. Использованные вычислительные мощности 0.005 PF.

Прямой поиск залежей на основе сейсмики и ГИС

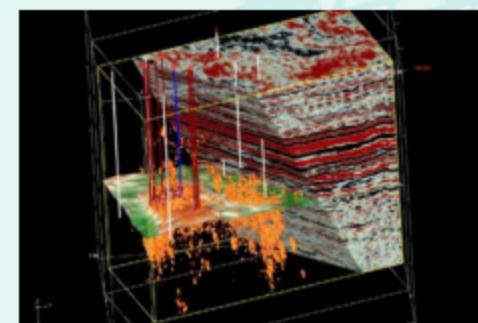
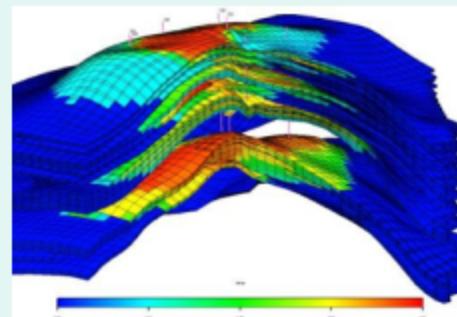
Синхронное вычисление атрибутов RTH в каждом
вокселе геологической среды размером от 1 метра



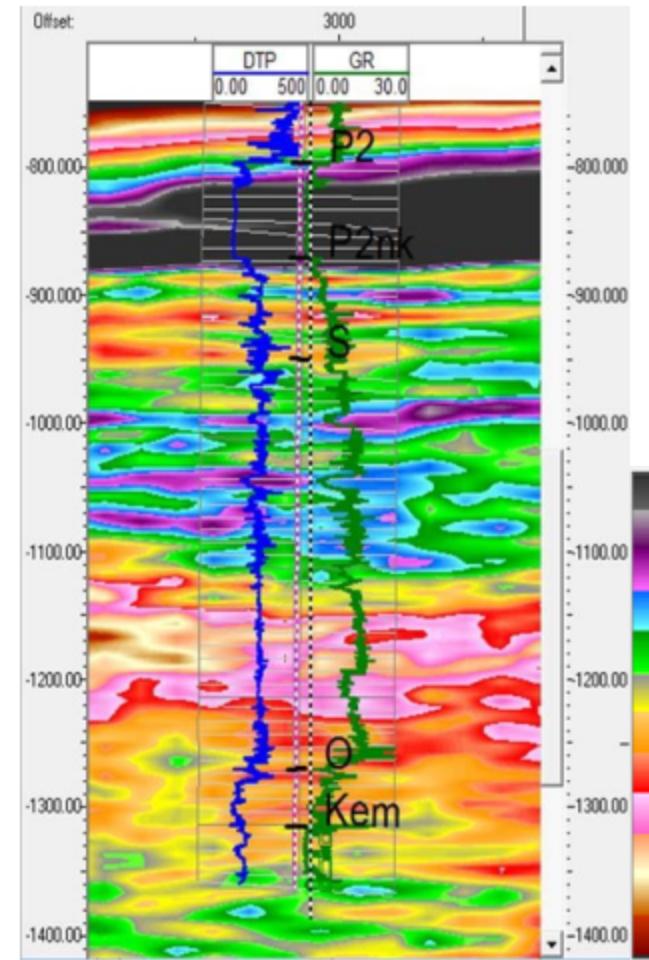
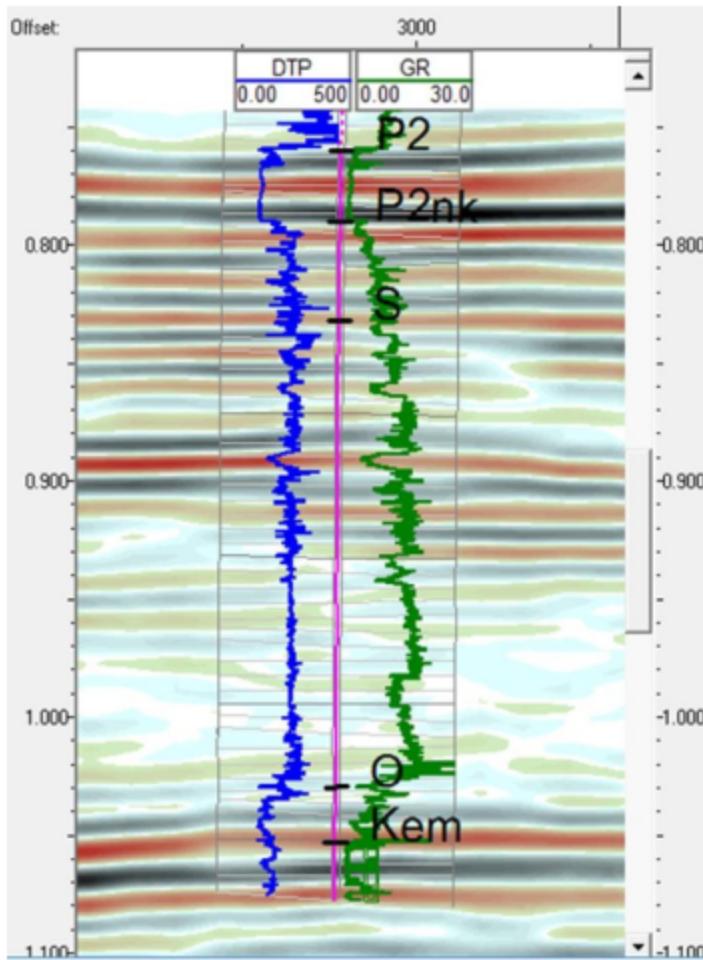
Данные геофизических измерений скважин (ГИС)



Машинное обучение для прогнозирования залежей углеводородов во всем объеме геологической среды

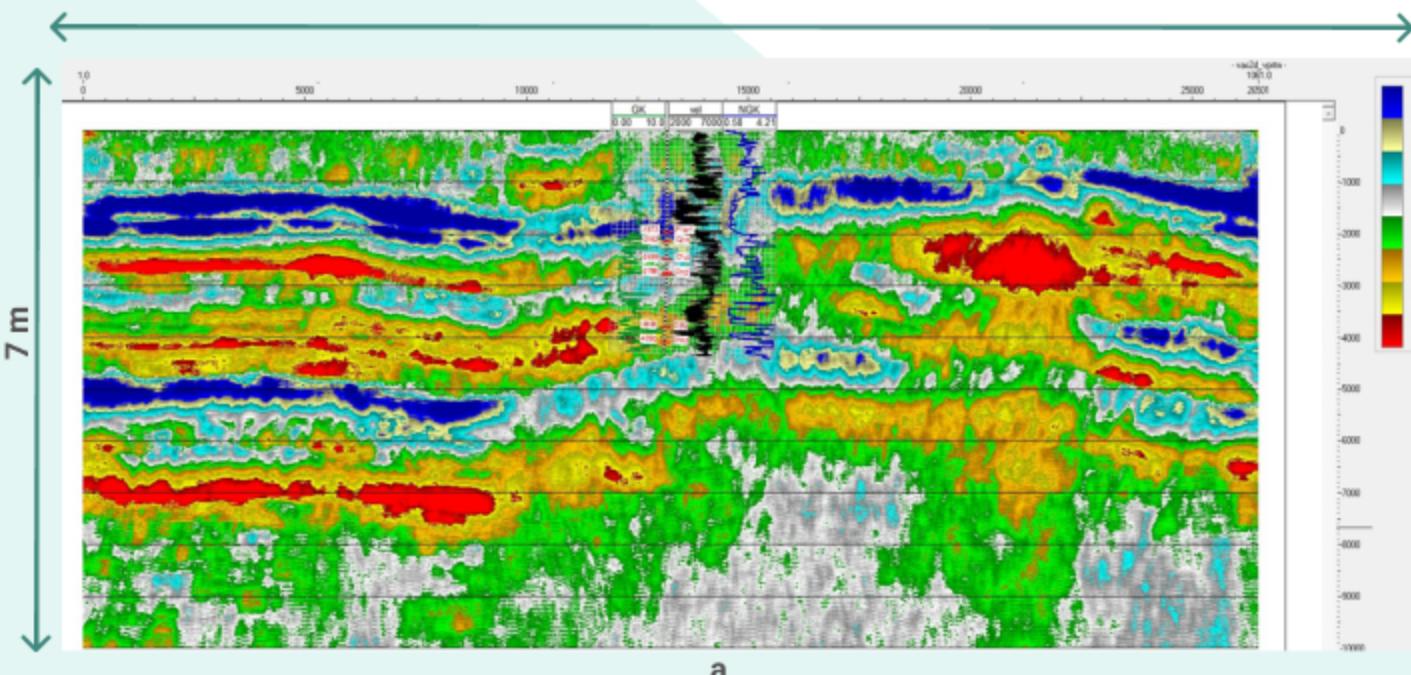


Повышение точности на основе ранее собранных данных



Сравнение PSTM и RTH скорости, в районе вертикальной скважины. Темный цвет палитры – высокоскоростные отложения Перми. Балтийская синеклиза, Куршская впадина.

Выделение региональных зон разуплотнения

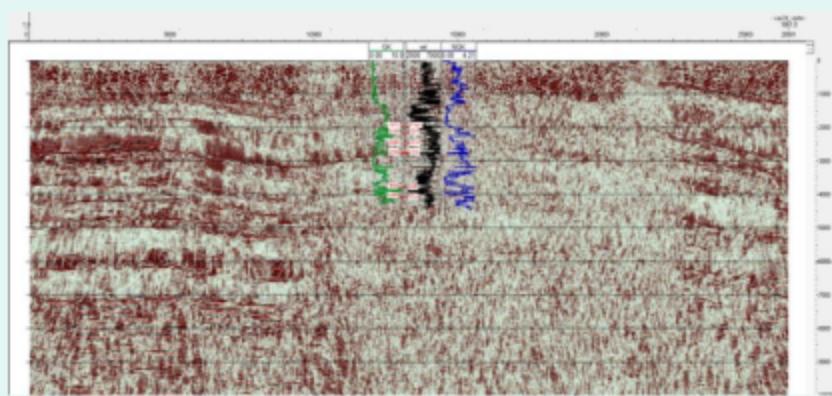


a

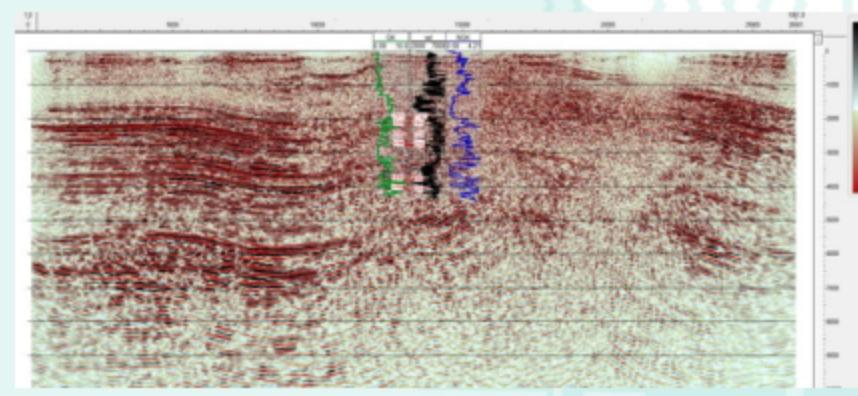
(a) Зоны пониженной RTH скорости в верхней части разреза (синий цвет)

(b) PSDM

(c) RTH Depth Migration.
Данные ГИС слева направо:
GK, Velocity, NGK.
Архангельская область.

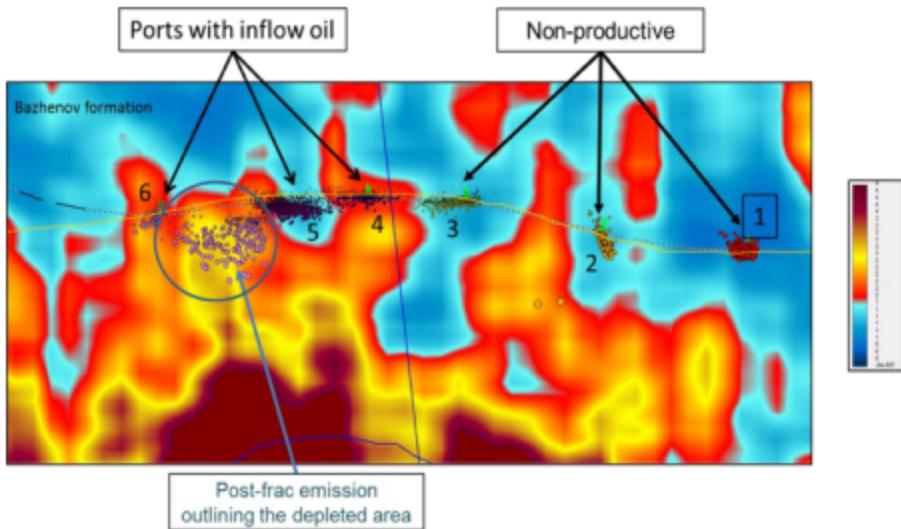


b

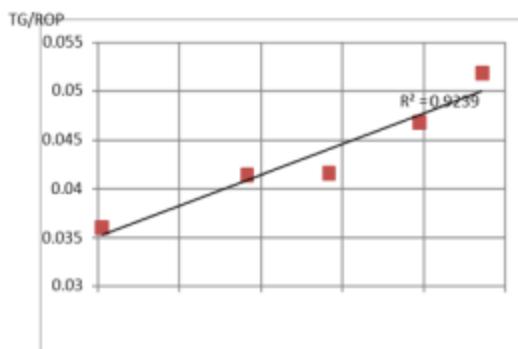


c

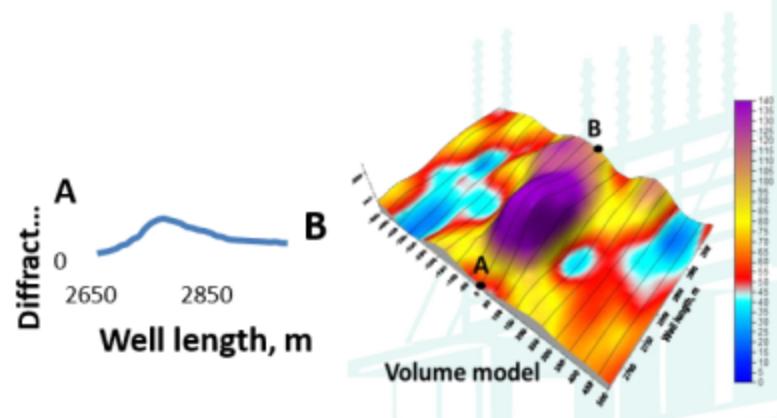
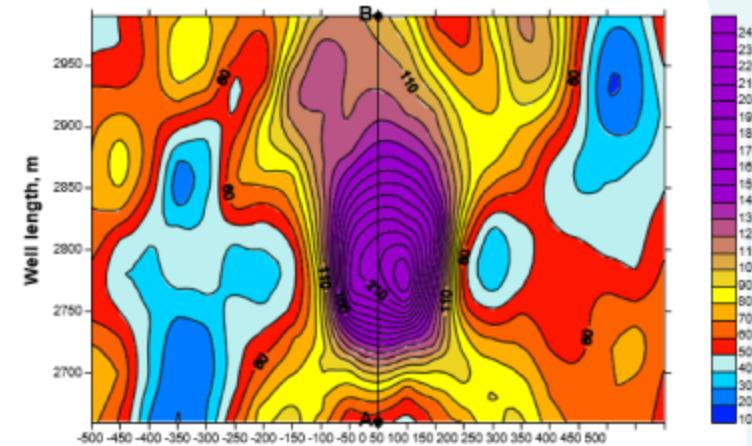
Обеспечение геонавигации при горизонтальном бурении скважин



Вертикальный срез куба трещиноватости (sweet spot)
вдоль ствола горизонтальной скважины. Порты №№ 1



Корреляция между трещиноватостью (sweet spot) и продуктивность на основе статистики по горизонтальным скважинам.

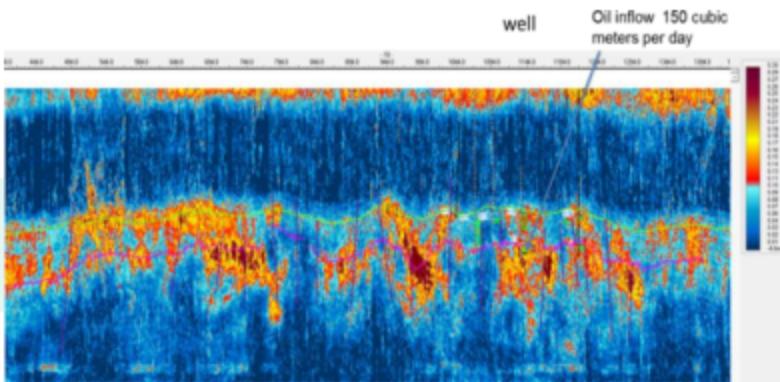


Горизонтальное сечение куба трещиноватости (sweet spot) вдоль ствола горизонтальной скважины (A-B).
Газовое месторождение. Восточная Сибирь.

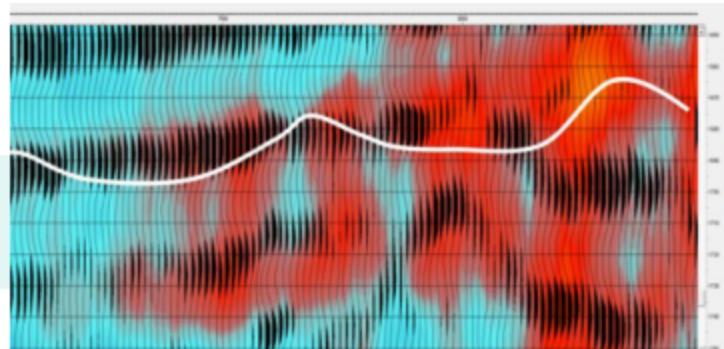
Поддержка высокоточного горизонтального бурения

Пример 4

Поиск трещинных коллекторов

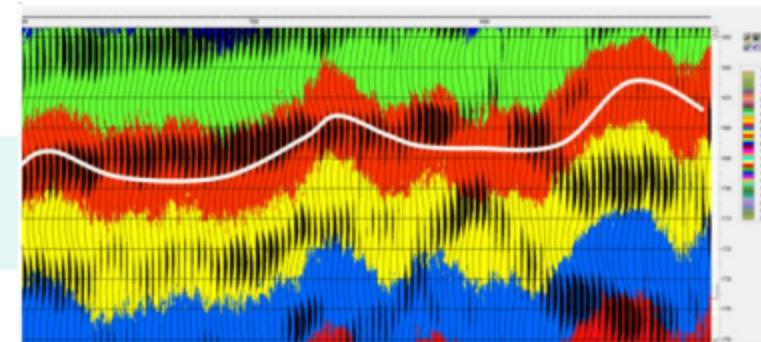


Зоны трещиноватости по RTH атрибуту Scattering Index с аномальными дебитами нефти в кровле фундамента. Зеленая кривая- базен. Область 23x3 км. Западная Сибирь.

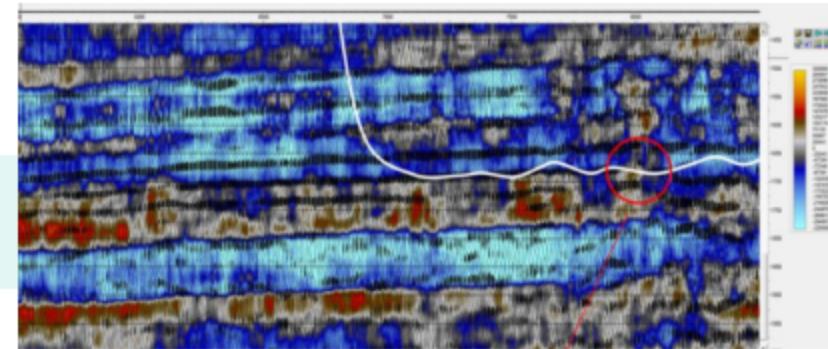


Зоны трещиноватости по RTH атрибуту Scattering Index, для горизонтального бурения. Размер области 3000x100 м. Разрешение по глубине 2 метра. Архангельская область.

Сейсмическая основа для высокоточной геонавигации при горизонтальном бурении скважин



Атрибут RTH скорости. Размер области 3000x100 м. Разрешение по глубине 2 метра. Архангельская область.

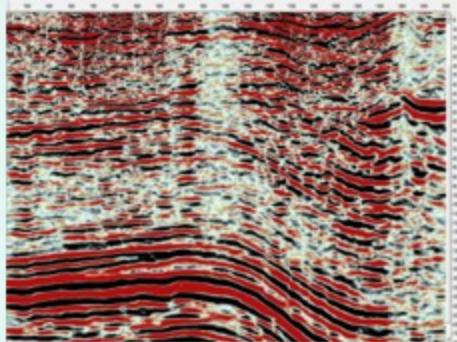


Change of Properties
Атрибут RTH AVO Poisson . Размер области 6000x600 м. Разрешение по глубине 2 метра. Архангельская область.

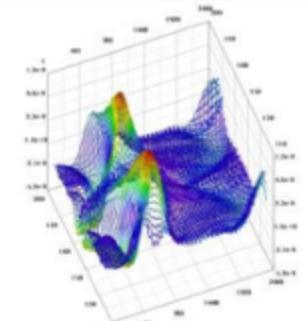
Поддержка высокоточного горизонтального бурения

Разработанные решения

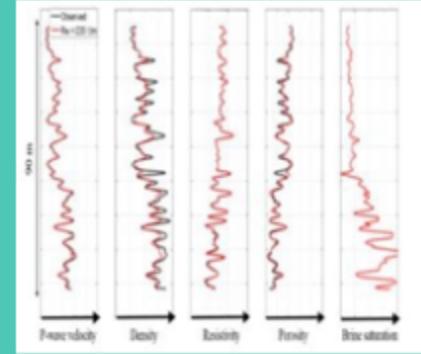
Процесс



Декомпозиция исходных сейсмических данных



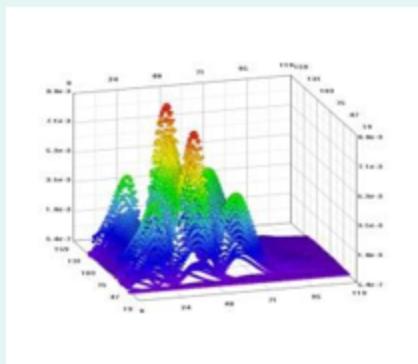
Синтез на основе данных многомерного статистического распределения VDCIG



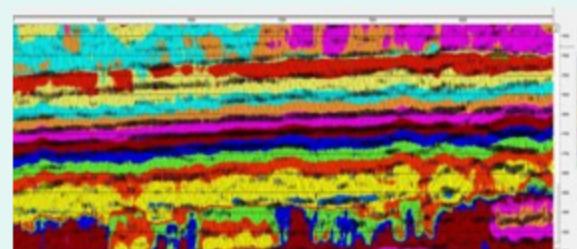
Комплексирование атрибутов RTH с данными ГИС



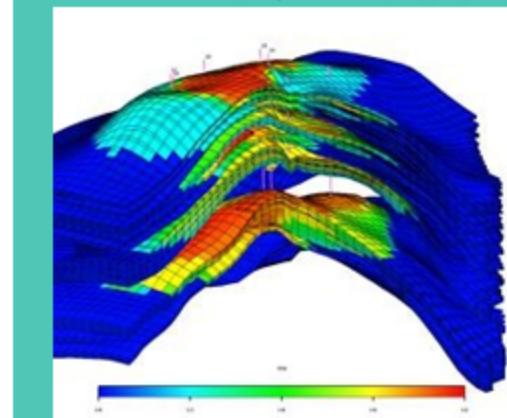
Результат



Формирование хранилища векторных данных общей точки изображения- VDCIG



Сейсмические атрибуты RTH высокого пространственного разрешения

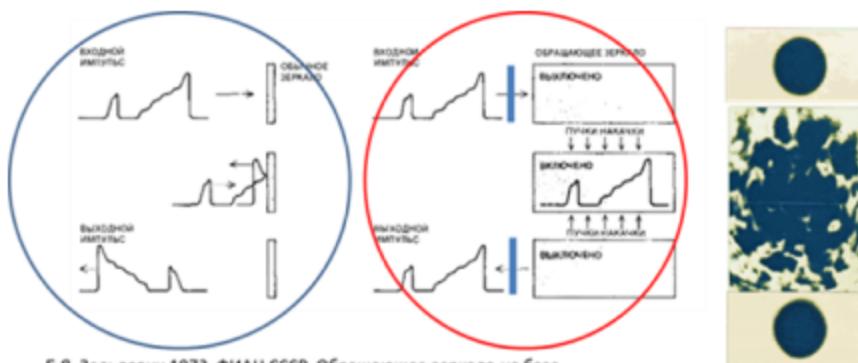


Прямой прогноз литологических свойств среды

Суть метода RTH

Сутью метода RTH – Reverse Time Holography является численная реализация для сейсмики физического эффекта «обращающего зеркала» открытого для лазеров, Б.Я. Зельдович (ФИАН СССР) в 1972 году. Реализация осуществляется на основе теории сопряженных уравнений.

В отличие от обычного отражающего зеркала, в котором выполняется упорядоченность во времени отражений (импульс, пришедший первым - первым отразился), оптический или волновой фронт, после взаимодействия с обращающим зеркалом, обращается во времени (Reverse Time: первым пришел - последним отразился).

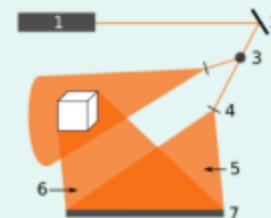


Б.Я. Зельдович 1972, ФИАН СССР. Обращающее зеркало на базе вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюзнатамета в метане. Опыты с матовой пластиной.

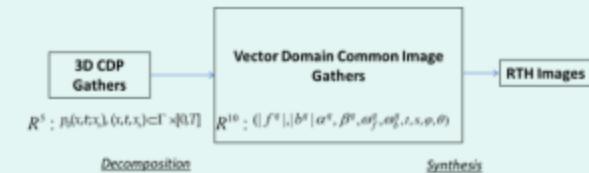
При этом обращенный во времени волновой фронт, отраженный от обращающего зеркала, «помнит» турбулентность или неоднородность среды, через которую волна проходила до попадания на обращающее зеркало и при прохождении через туже среду в обратном направлении, обращенный волновой фронт само корректируется, то есть очищается от этих первичных искажений.

В случае, когда первичное, падающее на обращающее «зеркало» сейсмическое волновое поле было уже рассеяно на неоднородностях геологической среды при его первичном прохождении, то после обращения и прохождения сквозь неоднородную среду в обратном направлении уже неискаженное скорректированное волновое поле будет точно фокусироваться в точках первичного рассеяния. В сейсмике такое первично-рассеянное волновое поле порождается обратным рассеянием среды от волны, генерируемой источником, расположенным на поверхности Земли.

Фиксация процесса фокусировки в пространстве и времени в методе RTH осуществляется с помощью метода интерферометрии, используемого голограммой при пространственном взаимодействии двух волн: опорной и рассеянной.



Роль голограммической фотопластинки в методе RTH выполняет цифровое хранилище 4-х мерных данных Vector Domain Common Image Gather – VDCIG, которое хранит всю амплитудную и фазовую информацию об обращенной во времени рассеянной на неоднородностях среды сейсмической волне.



Повышение точности информации в VDCIG обеспечивается многократным возбуждением сейсмического процесса в различных точках поверхности Земли.

Формирование репозитория данных VDCIG в методе RTH аналогично процедуре полной пространственно-временной «декомпозиции» рассеянной волны.

Оценка самих свойств неоднородной среды (скорости, импеданса, отражательной способности, индикатрисы рассеивания и пр.) на основе данных VDCIG – суть второго этапа RTH, этапа «синтеза».

Предпосылки создания метода RTH

Инструменты измерения физики. Оптическая голография.

1. Накопление
2. Интерференция

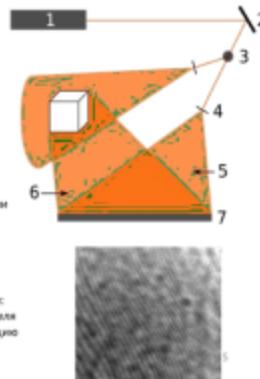
Голография — метод регистрации информации, основанный на интерференции волн. (D.Gabor 1947)

Накопление. МОГТ.
Кратность ($\text{fold} > 100$)

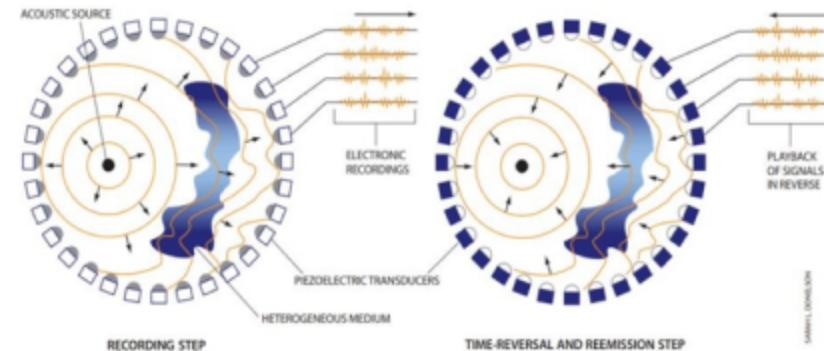


Метод голографии —
фиксация интерференции
двух волн оторной и
рассеянной на
фотоносителе.

Отличительная
особенность голографии:
каждая часть фотонесия
содержит всю информацию
об объекте рассеяния



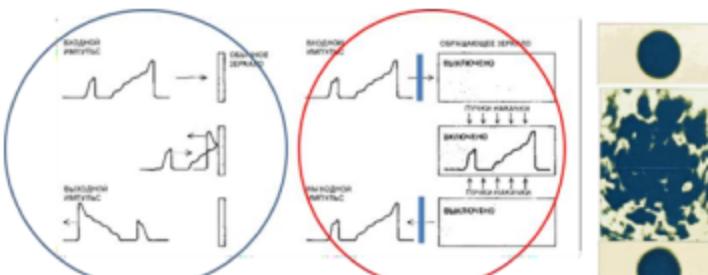
Обращение акустического фронта. Mathias Fink.



ACOUSTIC TIME-REVERSAL MIRROR operates in two steps. In the first step (left), a source emits sound waves (orange) that propagate out, perhaps being distorted by inhomogeneities in the medium. Each transducer in the mirror array detects the sound arriving at its location and feeds the signal to a computer.

In the second step (right), each transducer plays back its sound signal in reverse in synchrony with the other transducers. The original wave is re-created, but traveling backward, retracing its passage back through the medium, untangling its distortions and refocusing on the original source point.

* Обращающие зеркала.



Б.Я. Зельдович 1972, ФИАН СССР, Обращающее зеркало на базе вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюзманетана в метане. Опыты с матовой пластиной.

Forward wave $(p^f, \vec{u}^f)(x, t; x_s), t \in [0, T]$

$$p^f_t - c^2 \operatorname{div}(\vec{u}^f) = r(t) \delta(x - x_s) \quad (1)$$

$$\vec{u}_t^f = \nabla p^f \quad x_s \in \Gamma = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x^n = 0\}, \quad t \in (0, T)$$

$$p^f|_{t=0} = 0, \quad \vec{u}^f|_{t=0} = 0.$$

Back wave $(p^b, \vec{u}^b)(x, t; x_s), t \in [0, T] \quad p_0 = p^f|_{\Gamma \times [0, T]}$

$$p^b_t - c^2 \operatorname{div}(\vec{u}^b) = 0 \quad (2)$$

$$\vec{u}_t^b = \nabla p^b + p_0 \delta(x^n) \vec{v}_\Gamma$$

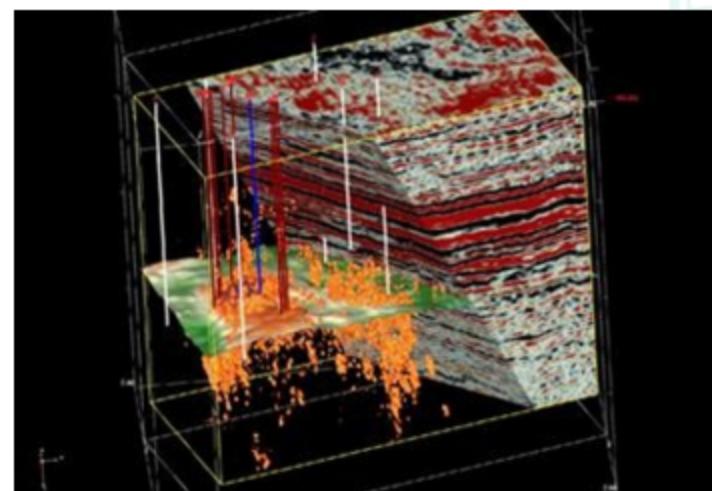
$$p^b|_{t=T} = 0, \quad \vec{u}^b|_{t=T} = 0,$$

$$f = \vec{u}^f$$

$$b = \vec{u}^b$$

ВЫВОДЫ

- Метод RTH, как и в оптической голограммии, с высокой точностью «фиксирует» информацию об амплитудах и фазах рассеянной и обращенной во времени сейсмической волны, используя некоторые „эталонную“ волну - стадия декомпозиции метода RTH.
- Эта информация сохраняется в репозитории VDCIG (Vector Domain Common Image Gathers). Построение сейсмических атрибутов основано на прямой статистической оценке набора данных из VDCIG - стадия синтеза метода RTH.
- Метод RTH позволяет одновременно получать различные атрибуты высокого пространственного разрешения, (до 1 метра) такие как рефлекторы, дифракторы, углы наклона, анизотропия рассеяния, азимутальная анизотропия, AVO и др.
- Метод обеспечивает выполнение скоростной томографии высокого пространственного разрешения.
- Метод RTH требует большей вычислительной мощности, чем обычные методы миграции уровня RTM, но существенно меньшие, чем высокочастотные методы FWI.
- Метод RTH устойчив к разреженной нерегулярной системе наблюдения по источникам и приемникам.
- Метод автоматически учитывает ВЧР



Отраженные и рассеянные компоненты волнового поля