

# Роль рентгеновской ламинографии в океанографических исследованиях

Константин Чекан  
Олег Корнейчик  
Евгений Микулинский  
Dr Rob Bradley  
James Shreeve

k.chekan@technoinfo.ru  
o.korneychik@technoinfo.ru  
e.mikulinsky@technoinfo.co.uk  
james.shreeve@geotek.co.uk  
robert.bradely@geotek.co.uk



**Geotek Ltd / ООО Техноинфо**

4 Sopwith Way, Daventry, UK / Кутузовский пр. д.9 кор.2а оф.77

[www.geotek.co.uk](http://www.geotek.co.uk) / [www.technoinfo.ru](http://www.technoinfo.ru)

# Рентгеновский техники для геологических наук

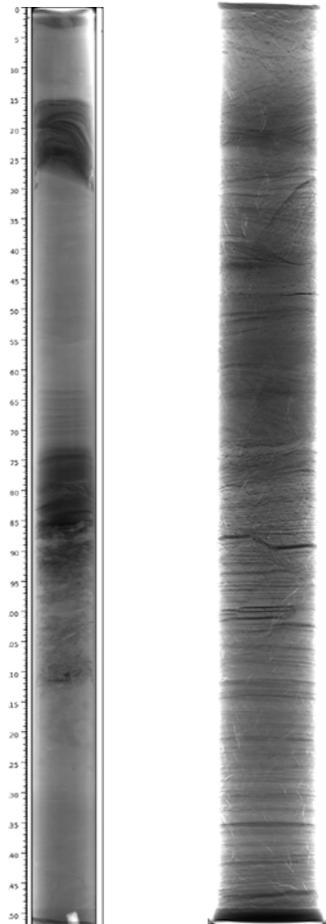
- Рентгеновское изображение дает информацию о внутреннем строении геологических кернов:
  - Структура и литология;
  - Состав:
    - Исходя из разностей в рентгеновской плотности;
    - Средний атомный номер и массовая плотность по **DECT**.
  
- Широко используется в геонауках (седиментология, петрология, минералогия, вулканология, геотехника, климатология и т.д.):
  - Оцифровка всех данных до разрушающего анализа;
  - Контроль качества - загрязнение и нарушения в керне при бурении;
  - Корреляция данных по керну с данными каротажа;
  - Определение литологии, наслоений, микрофоссилий и т.д.;
  - Изучение размера зерен;
  - Распределение минералов и анализ формы зерен;
  - Измерение пористости, проницаемости, трещиноватости;
  - **In-situ** исследования гидравлических свойств;
  - Построение **3D** модели горной породы (многомасштабная визуализация).



# Техники рентгеновской томографии для геонаук

- Рентгеновская съемка образцов дает информацию о внутренней структуре геологических кернов и является обычной практикой анализа геологических образцов в научных и производственных целях.

## 2D Радиография



2D



3D

Small data



Big data

Faster



Slower

## 3D Компьютерная томография



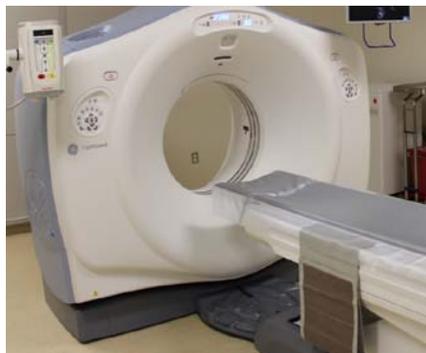
# Техники КТ для полноразмерного керна

Субкерна

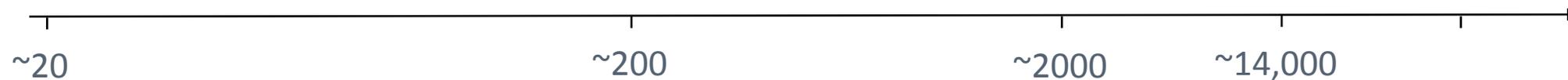
Цельный керн



мКТ и прочее



ГБ / 100 м

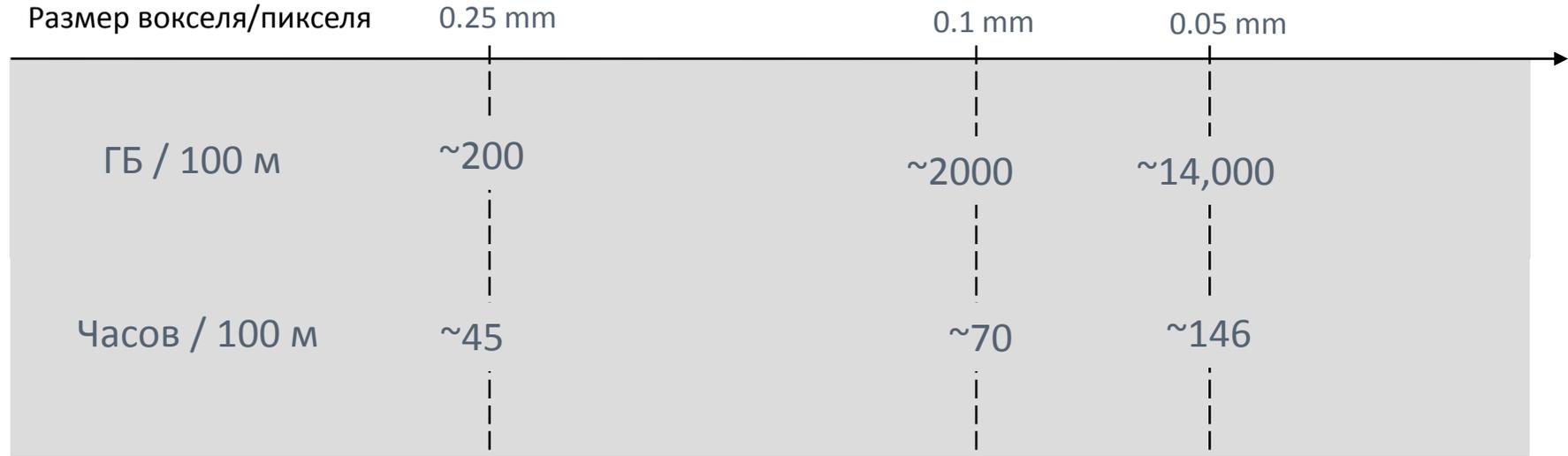


Часов / 100 м



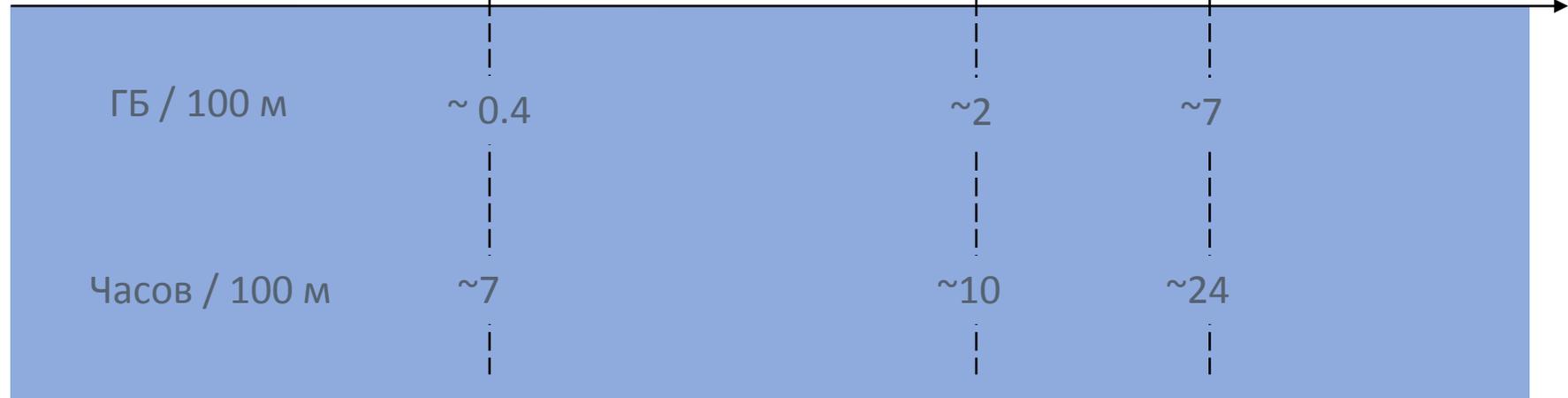
# Техники КТ для полноразмерного керна

КТ



Радиография

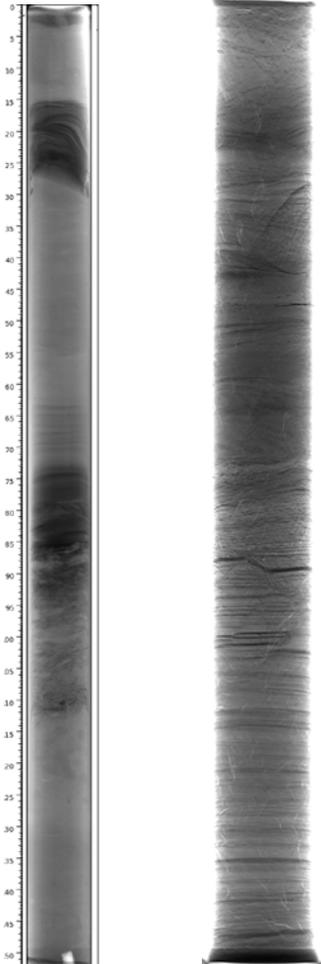
(Высококачественное сканирование при 1 угле)



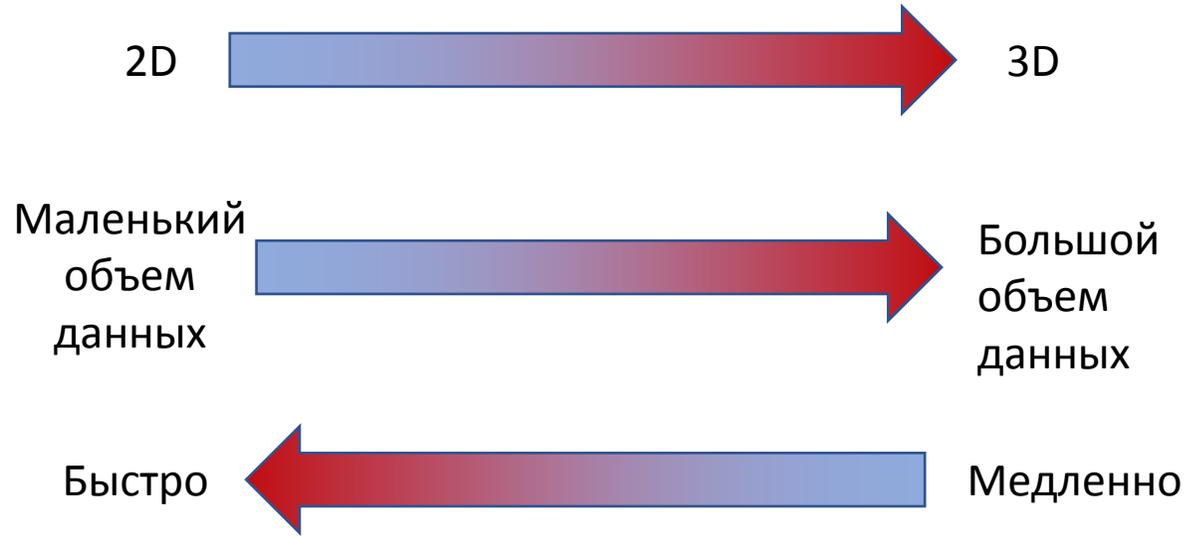
# Техники рентгеновской КТ для геонаук

➤ Рентгеновская съемка дает представление о внутренней структуре образцов

## 2D Радиография



## 3D Компьютерная томография



# Новая техника рентгеновских исследований полноразмерных кернов

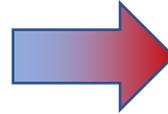
2D Radiography



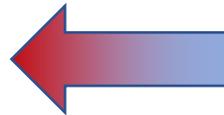
Ламинаграфия

Псевдо - 3D  
"2.5D"

"фокусированная радиография"



Маленький объем данных  
(10-20 focussed radiographs)



Время сканирования как при радиографии



3D CT



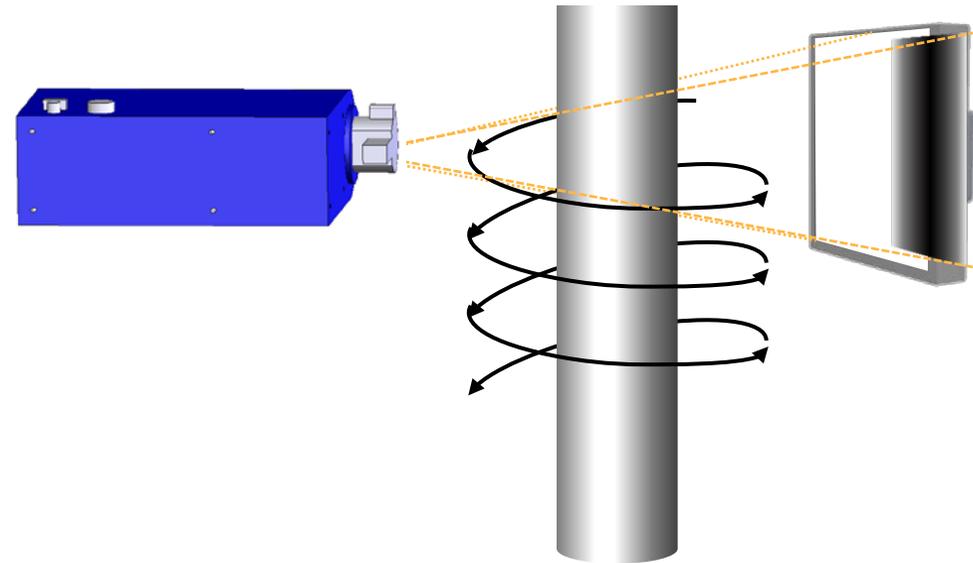
# Что такое ламинография?

- Техника получения томограмм, которая нацелена на реконструкцию слоев объекта путем его съемки с разных углов;
- Не предоставляет достаточной информации для «точной» 3D-реконструкции.

Условие Тая достаточности данных для компьютерной томографии с коническим пучком:

«Каждая плоскость, пересекающая интересующий объект, должна содержать точку фокусировки конического луча»

Круговое сканирование



Доступно на других системах от Geotek

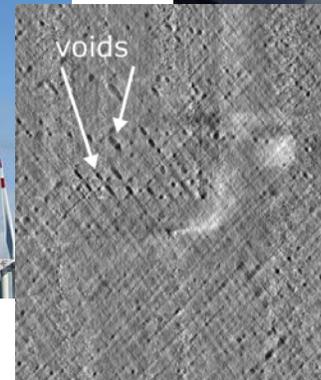
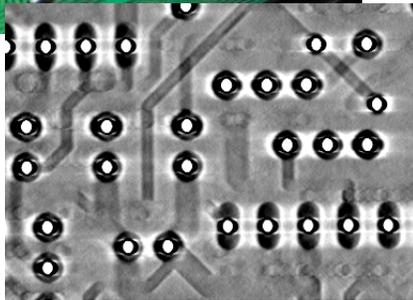
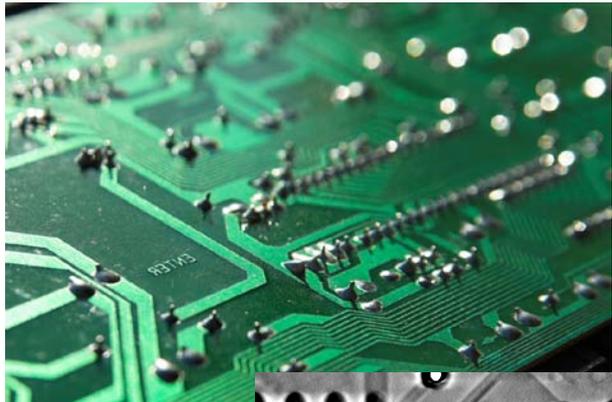
# Ламинография в промышленном неразрушающем контроле

- Широко используется для сканирования “нестандартных” объектов:
  - Большой, с высоким соотношением сторон или недоступный под углами, необходимыми
- Реконструирование плоскостей с высоким разрешением для поиска дефектов.

Трещины в сварных швах

## Дефекты в композитах из углеродного волокна

Проверка плат



Schumacher et al. DIR2019



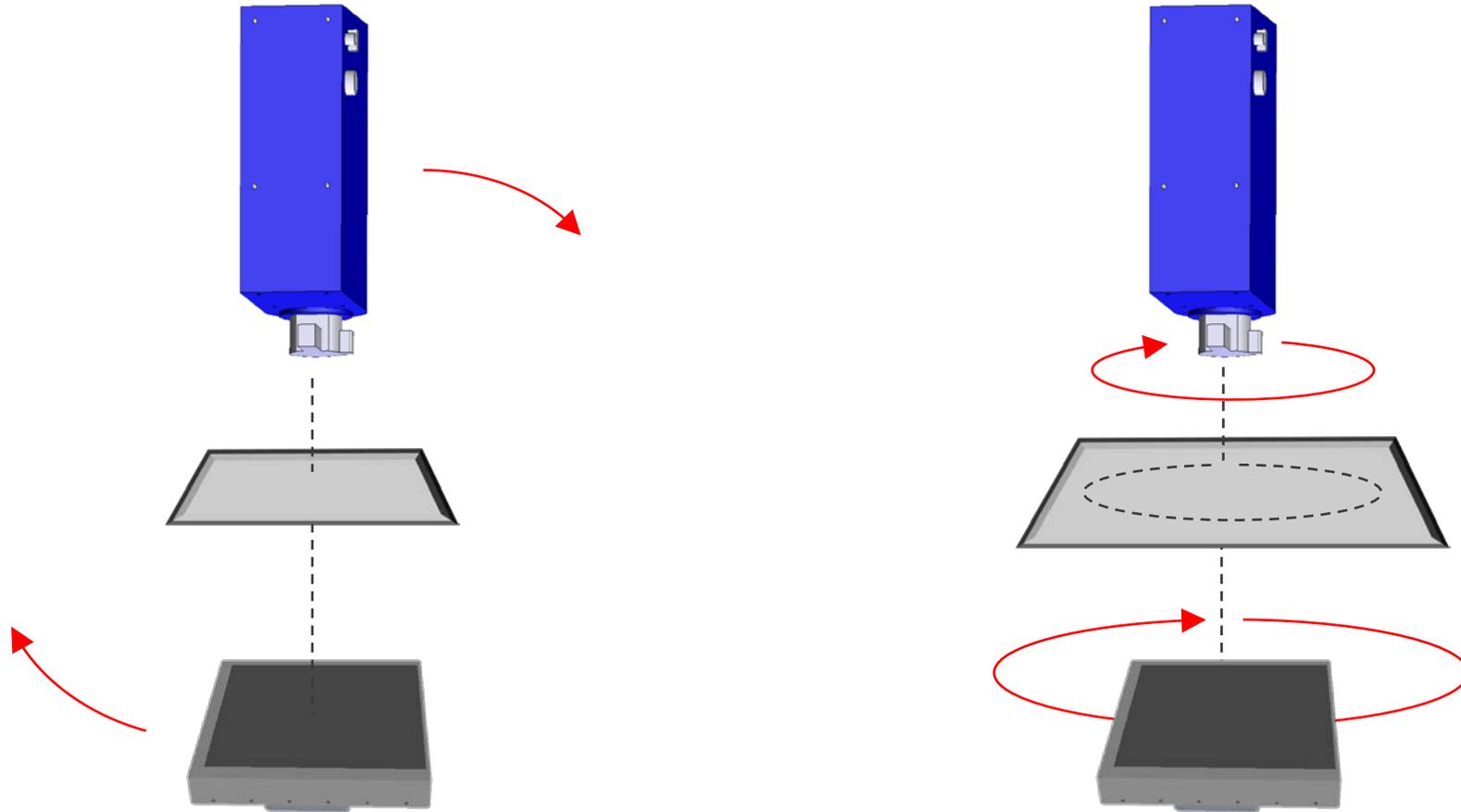
Trampert et al. 2017 J Xray Sci Technol. 25(4), 533



Godrom et al. 1999 Int. Symp. On Computerized Tomography for industrial Applications and Image Processing in Radiology

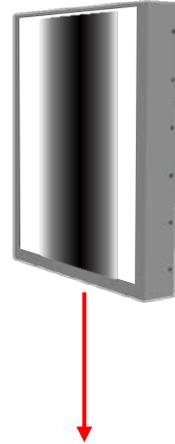
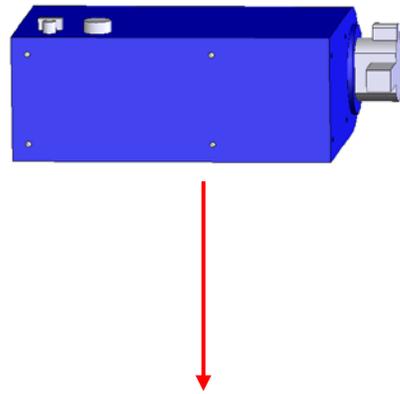
# Траектории при проведении ламинографии в промышленности

- Выбирается траектория, которая дает широкий диапазон углов относительно объекта.

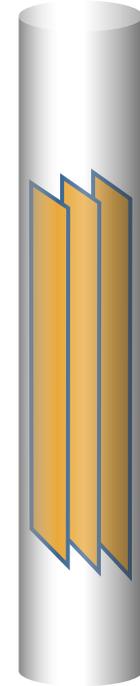


# Ламинография от Geotek

## ➤ Трансляционная ламинография



Глубина поперек керна

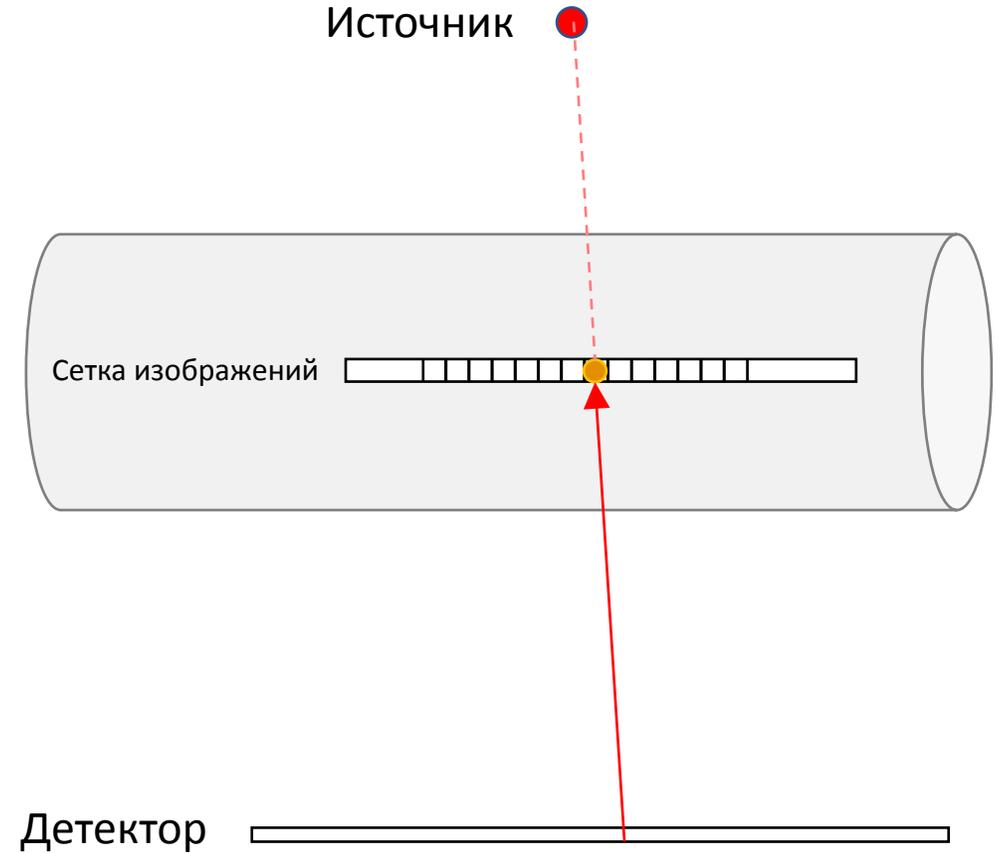
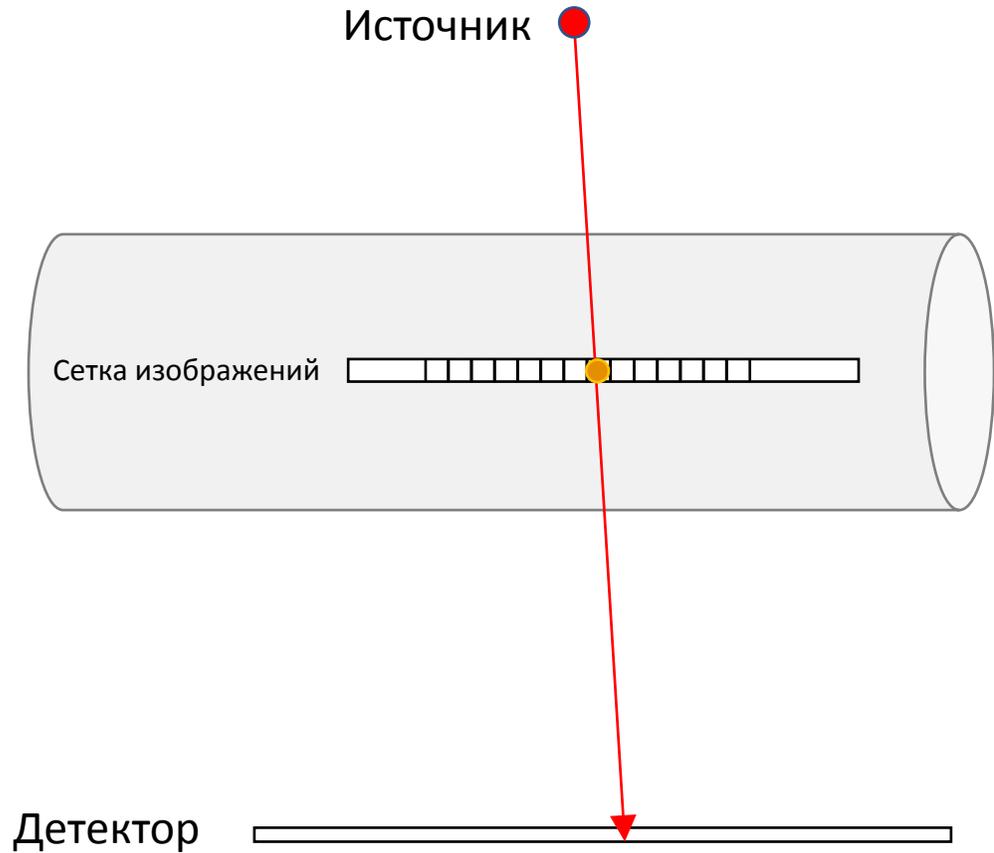


Длина  
вдоль  
керна

- Подходит для **сканирования длинных объектов** (например керны);
- Быстрое непрерывное сканирование (**3-4 мин м.**);
- Реконструируемые плоскости параллельны направлению движения - высокое разрешение (**ок. 80 мкм на пиксель для 4" керна**) вдоль керна;
- Более высокая точность при близком расположении источника и детектора - более быстрое сканирование
- Быстрое сканирование с высоким разрешением и предоставлением необходимой трехмерной информации - **идеально подходящей для размещения прибора на море** (в

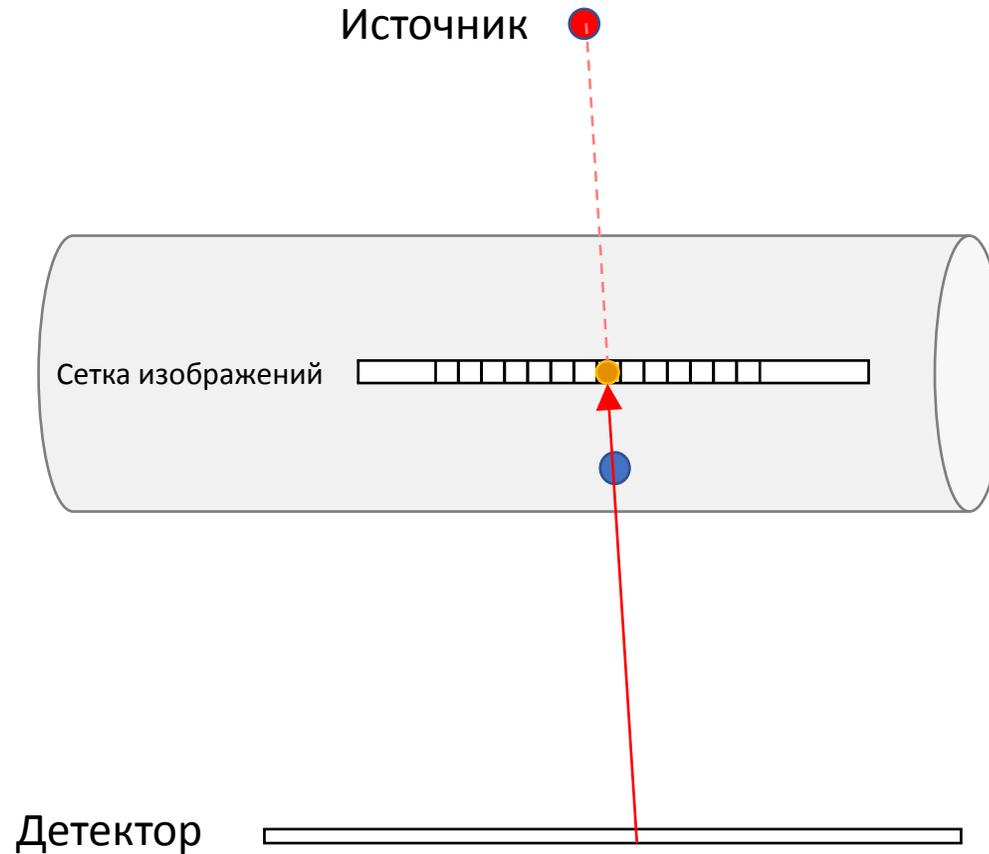
# Реконструкция данных ламинографии

- Как и 3D томография основана на основе обратной проекции данных на сетку вокселей



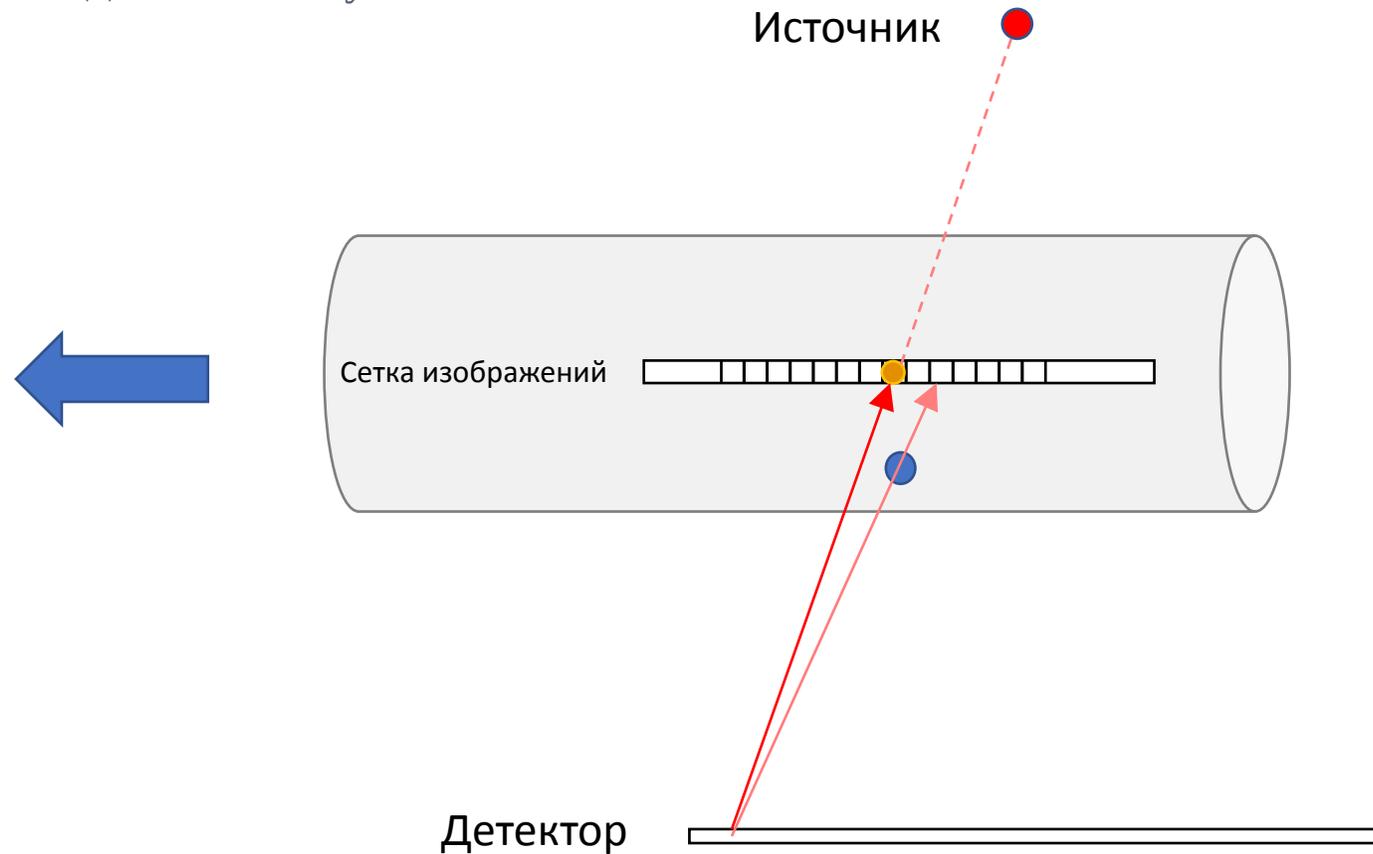
# Реконструкция данных ламинографии

- Детали на разной глубине (поперек керна) перемещаются по детектору с разной скоростью



# Реконструкция данных ламинографии

- Детали на плоскости реконструкции складываются «конструктивно» - помогает больший диапазон углов!



- Уменьшение контраста вне плоскости за счет фильтрации до или после обратной проекции, т. е. модифицированных алгоритмов реконструкции КТ

# Реконструкция данных ламинографии

➤ “Фокусирование на слоях”

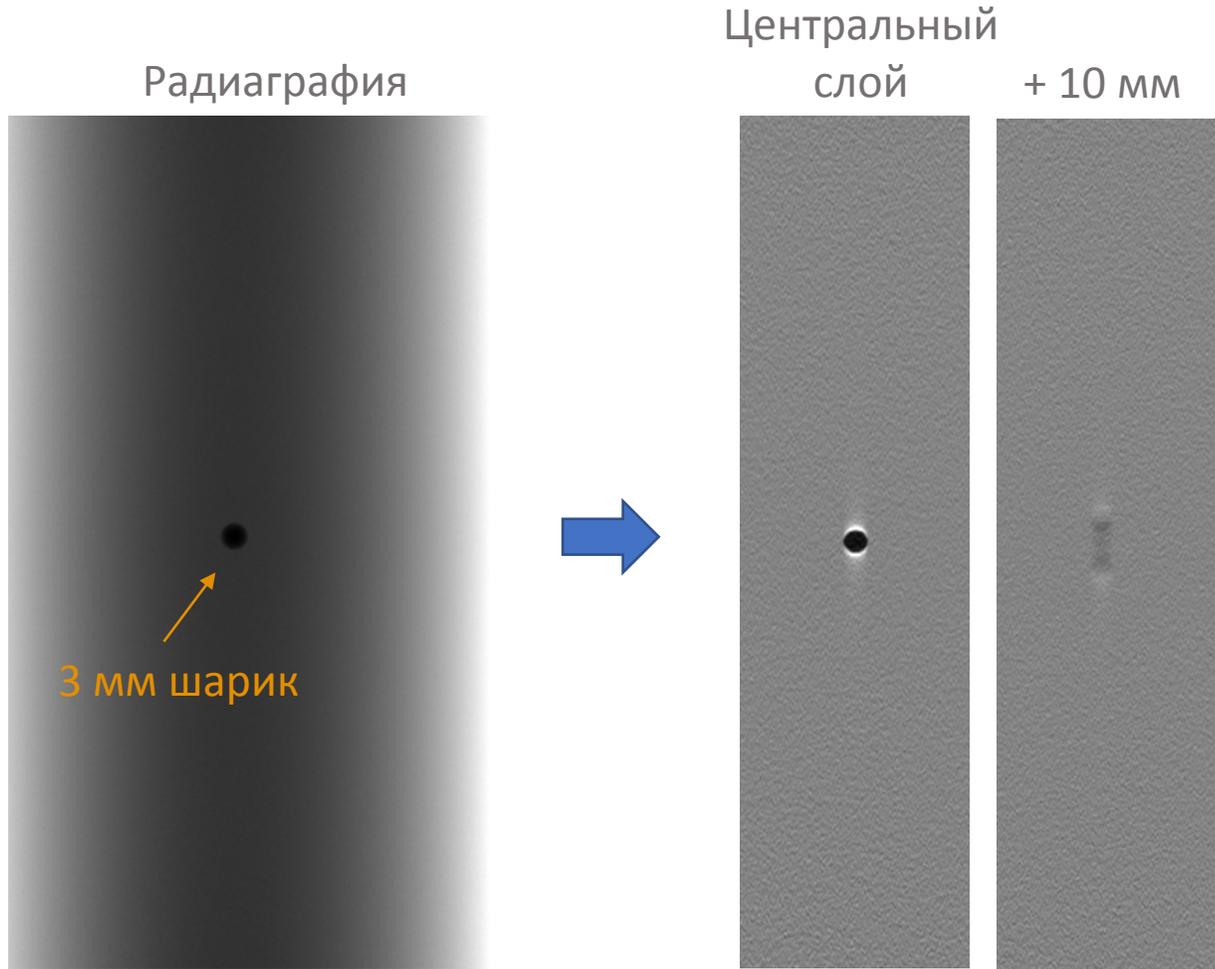
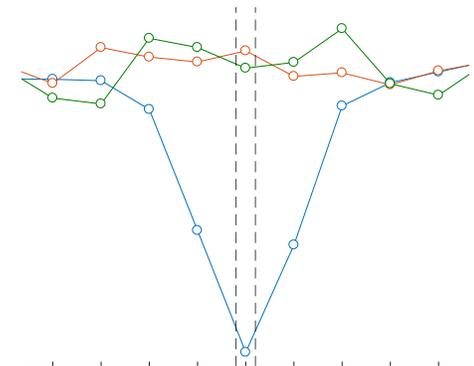
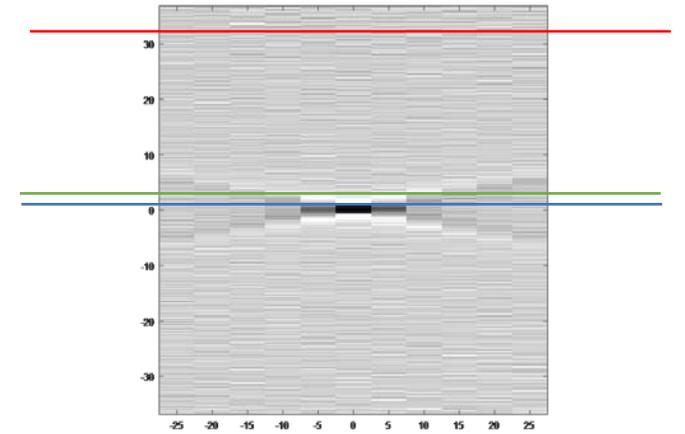


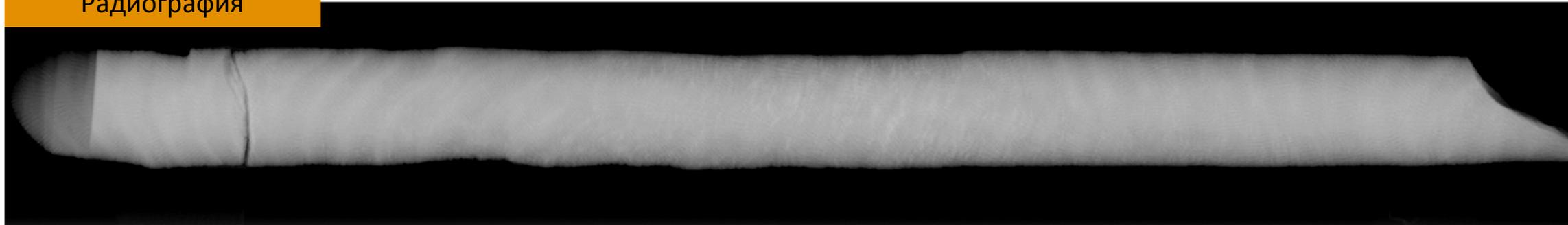
График изменения изображения по глубине поперечного сечения керна



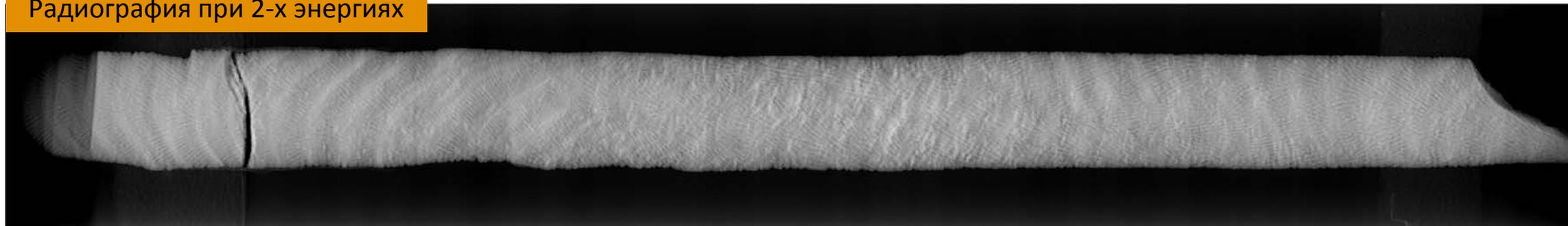
# Пример: съемка коралла в высоком разрешении

Ламинография и радиография сняты при размере пикселя 30.4 мкм на образце коралла длиной 41 см

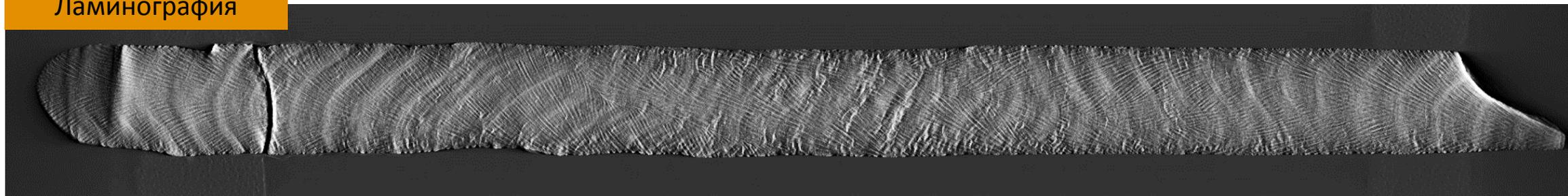
Радиография



Радиография при 2-х энергиях



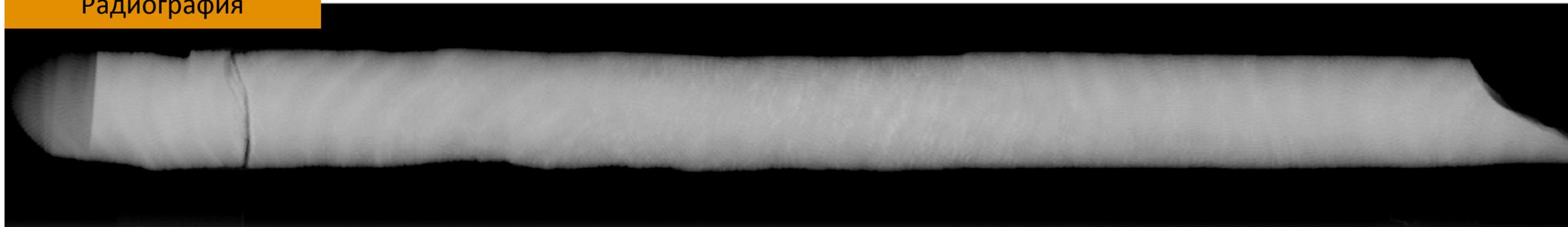
Ламинография



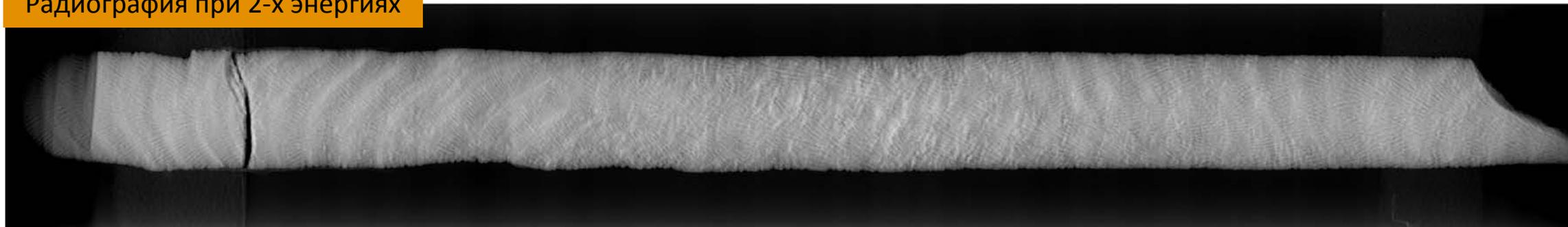
# Пример: съемка коралла в высоком разрешении

Ламинография и радиография сняты при размере пикселя 30.4 мкм на образце коралла длиной 41 см

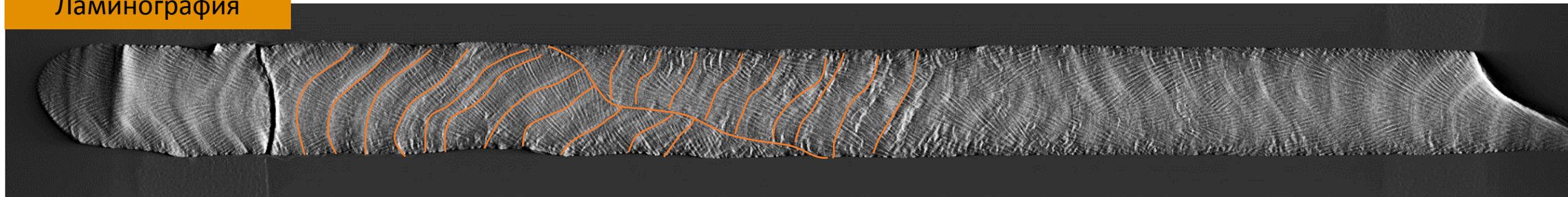
Радиография



Радиография при 2-х энергиях



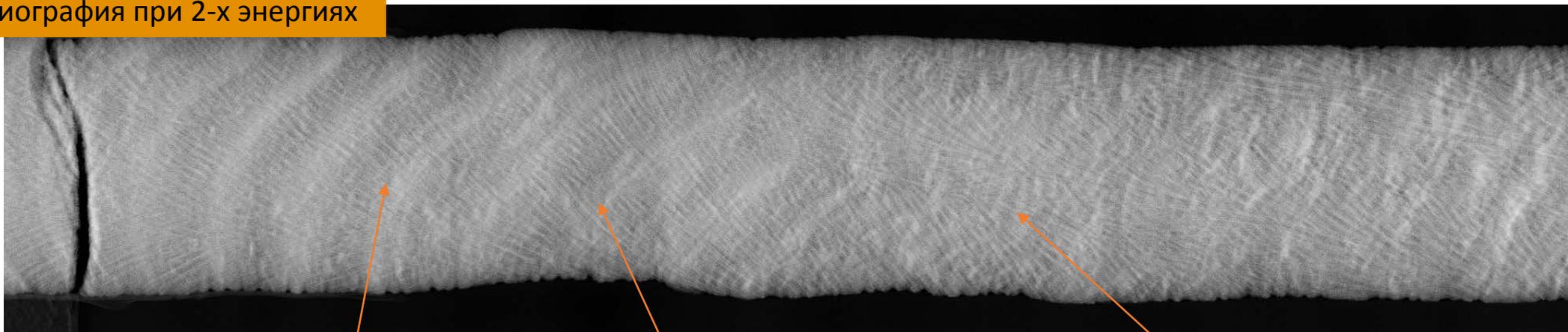
Ламинография



# Пример: съемка коралла в высоком разрешении

Ламинаграфия и радиография сняты при размере пикселя 30.4 мкм на образце коралла длиной 41 см

Радиография при 2-х энергиях

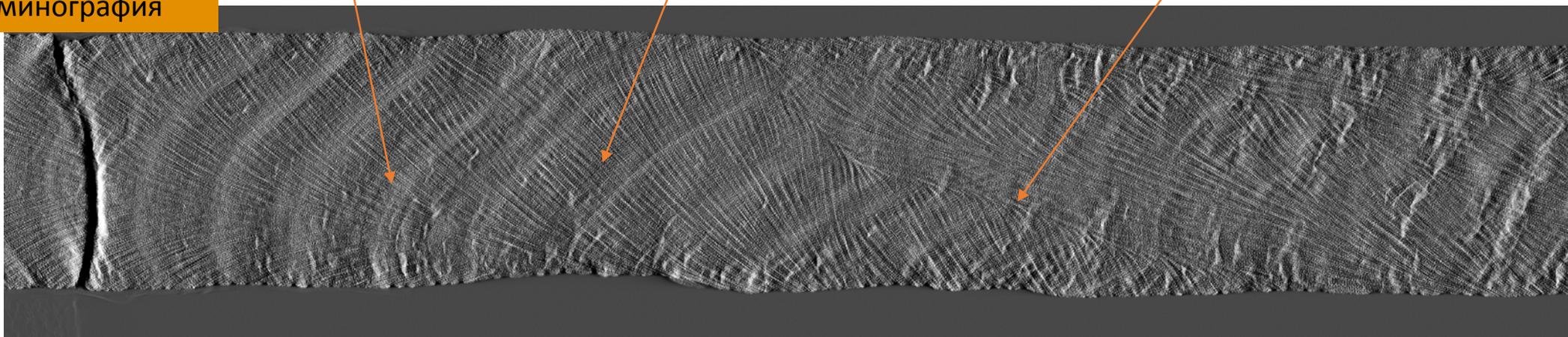


Маркеры роста

Маркеры роста

Перемены в процессе роста и развития

Ламинаграфия



# Пример: съемка коралла в высоком разрешении

Ламинография и радиография сняты при размере пикселя 30.4 мкм на образце коралла длиной 41 см

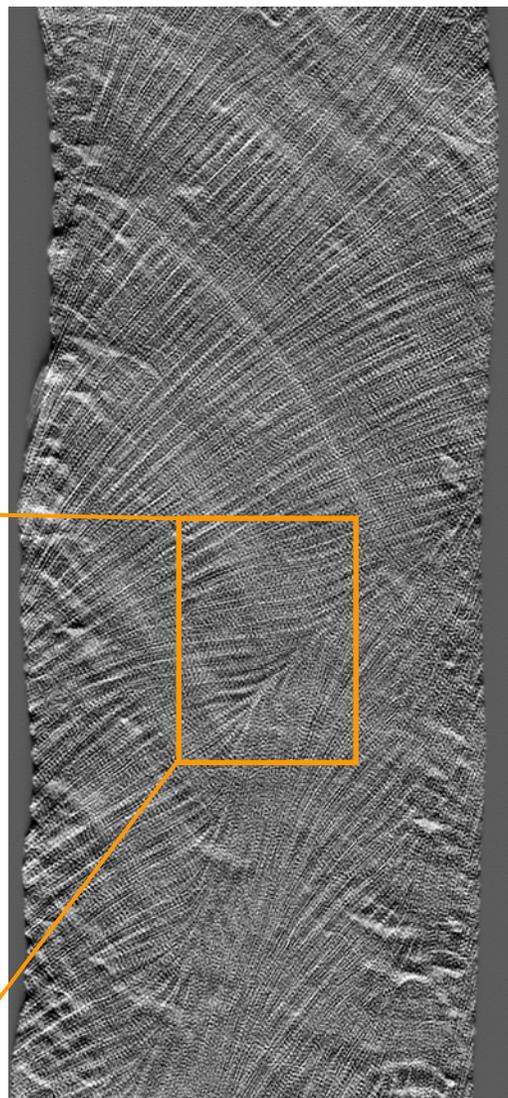
## Ламинография

### Получение данных

- 9 мин
- 30 ГБ

### Обработка изображений

- 10 плоскостей
- 0.5 ГБ



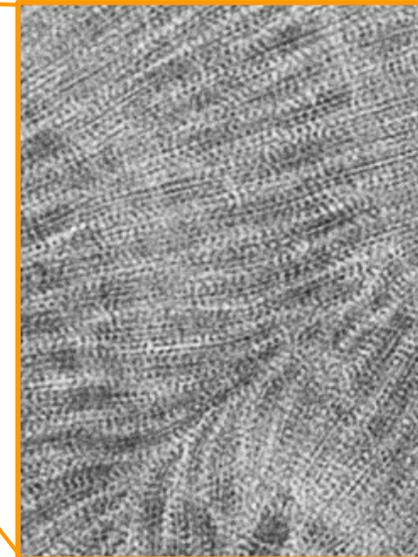
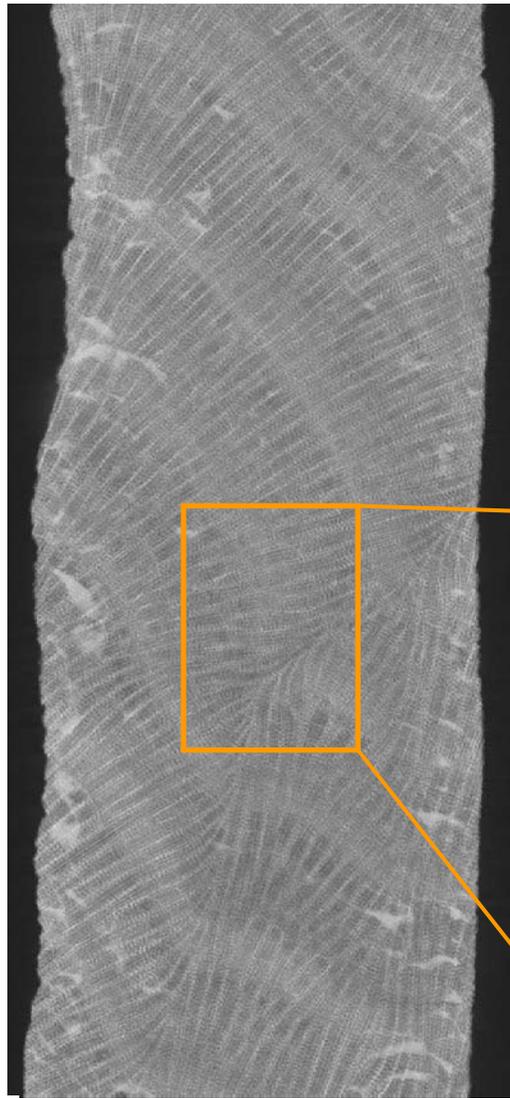
## КТ 0.9 мм срез

### Получение данных

- 90 мин
- 300 ГБ

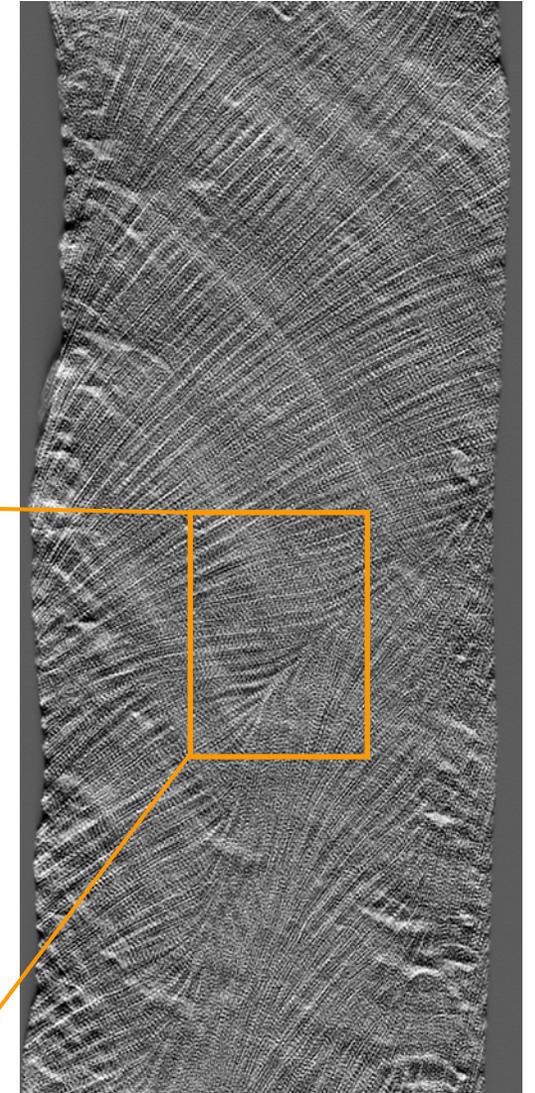
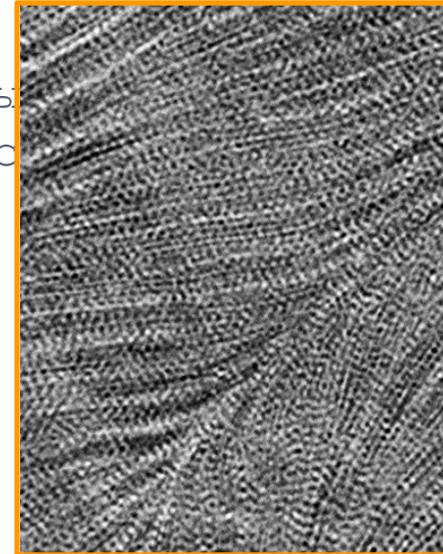
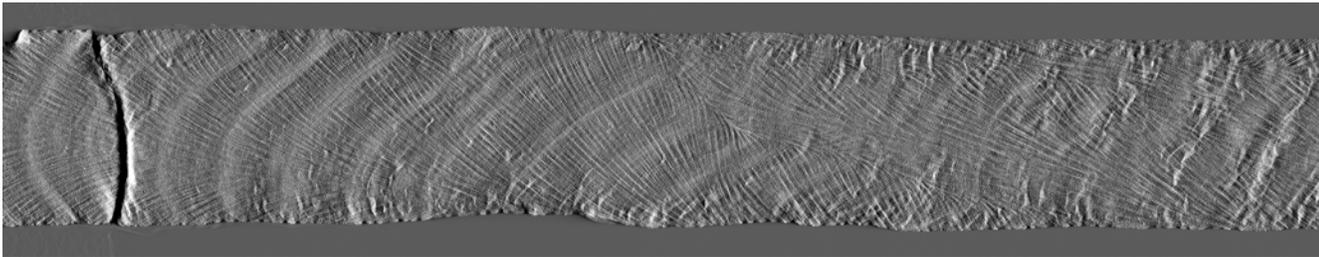
### Обработка изображений

- 16400 срезов
- 115 ГБ



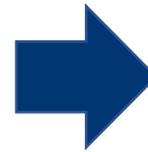
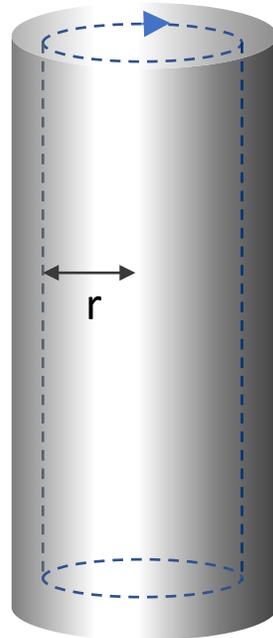
# Пример: съемка коралла в высоком разрешении

- Ламинография обеспечивает большую четкость включений и особенностей образца по сравнению с рентгенографией за то же время сканирования
- Ламинография похожа на получение толстого КТ-среза (усреднение по глубине)
  - Сохранено высокое разрешение в плоскости;
  - На сканирование ушло **10% времени**;
  - **Сохранено >100 ГБ** места в хранилище данных;
  - Возможность сканирования большого количества образцов.

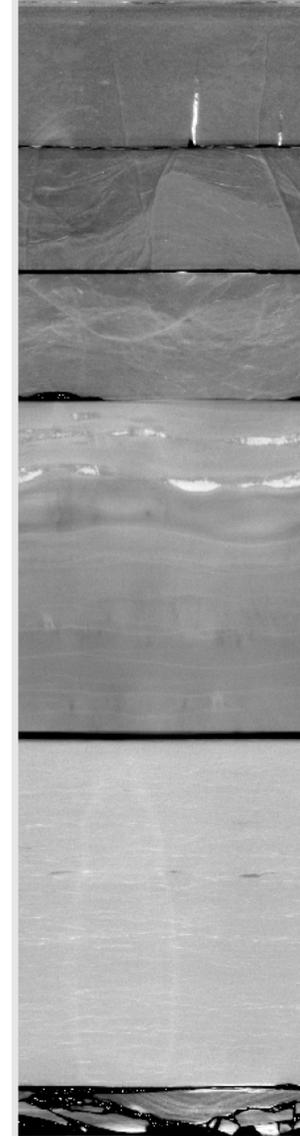


# Расширенная ламинография для круговой визуализации

- Данные КТ можно развернуть и получить круговое изображение:
- Облегчает изучение слоев;
  - Измерение угла и направления падения;
  - Сравнение с изображениями со скважины;
  - Ориентирование керна относительно каротажа скважины.



0° —————> 360°

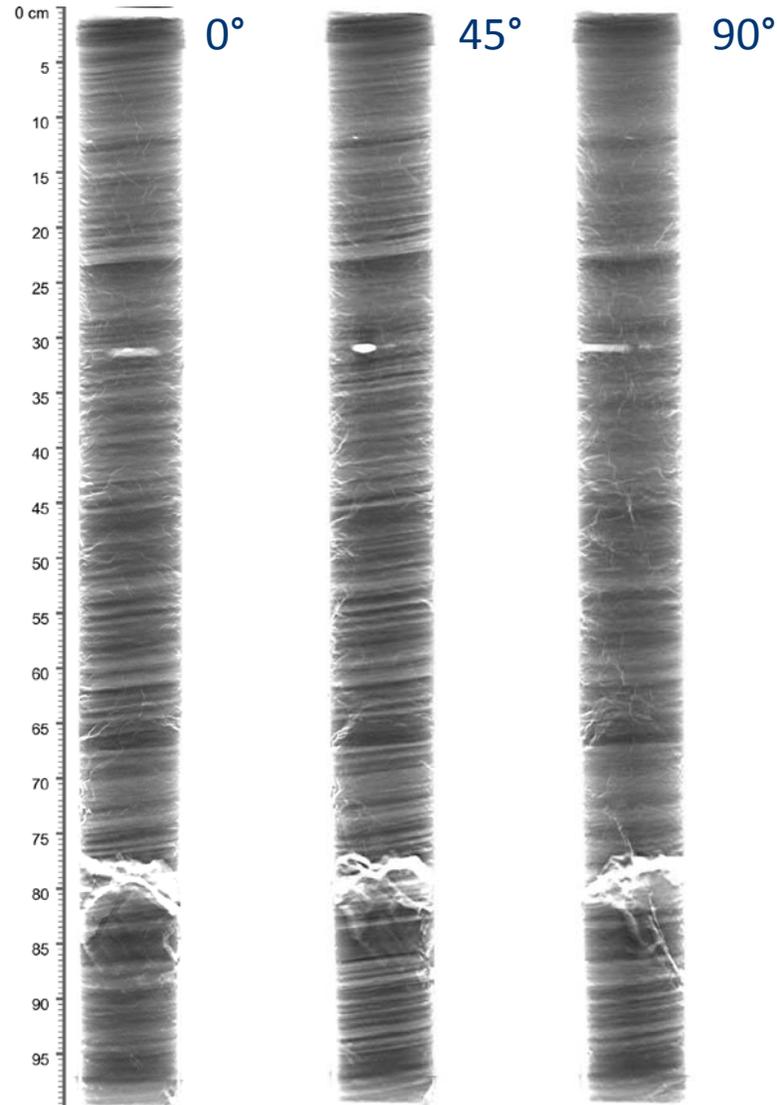


Развернутое  
изображение КТ

# Пример: круговая ламинография для измерения угла падения слоев

- Осадочный керн с Черного моря;
- Диаметр керна 10 см;
- Мультиуголовая 2D радиография полученная при размере пикселя 127 мкм;
- Время сканирования = 51 сек./м;
- Изображения получены при углах 0, 45, 90°.

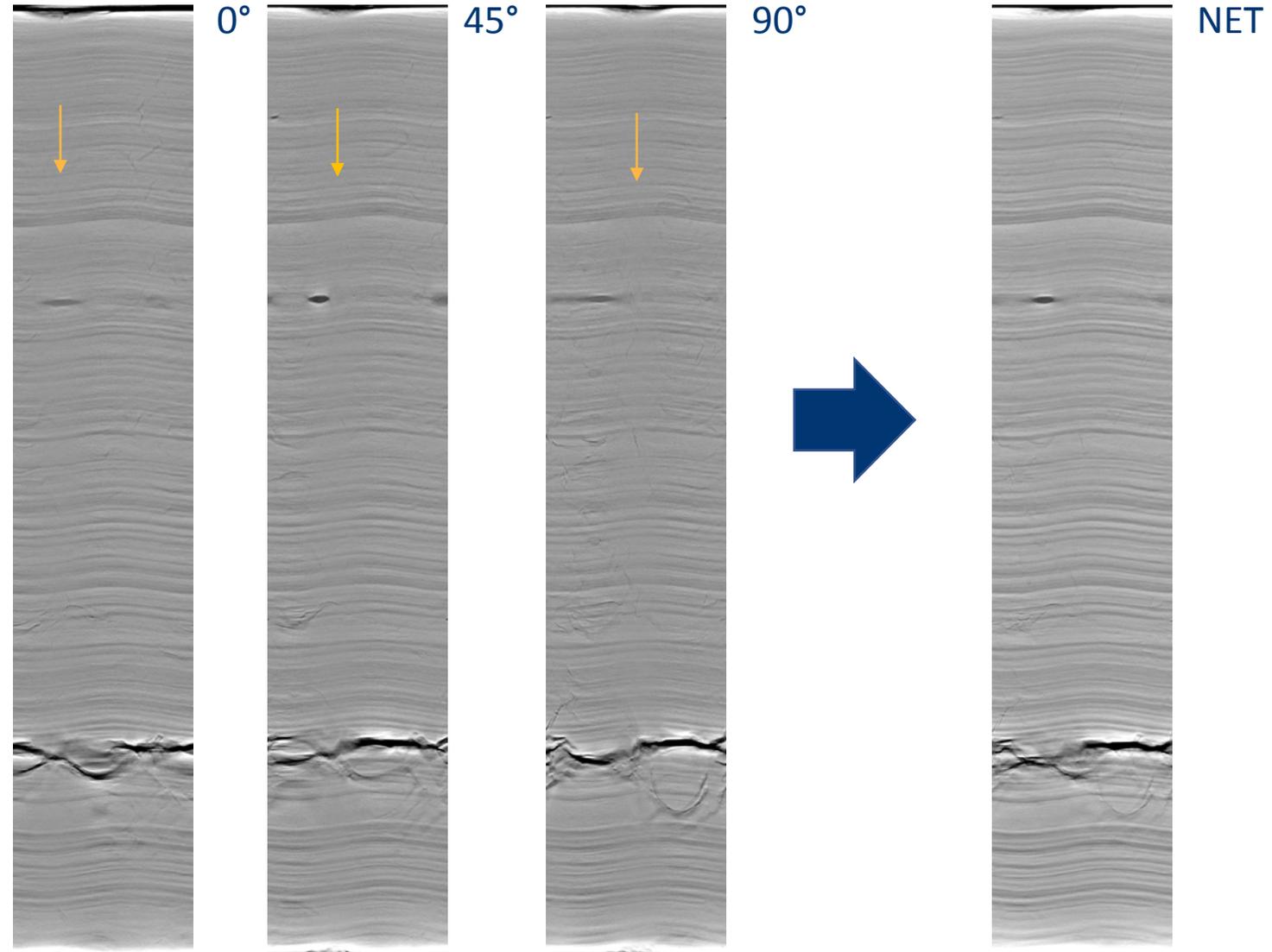
Радиография при 2-х энергиях



Угол максимального падения близок к 45°

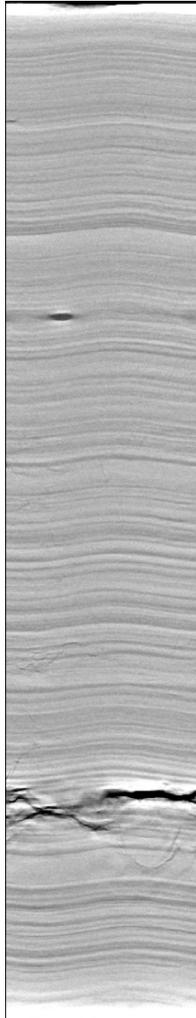
# Пример: круговая ламинография для измерения угла падения слоев

- Совмещены изображения, полученные с 3 разных углов для улучшения кругового изображения
  - Осадочный керн диаметром 10 см;
  - Сканирование при размере пикселя 127 мкм;
  - **Время сканирования = 51 сек/м;**
  - Изображения получены при 0, 45, 90°
  
- Получить 3 изображения при быстрой скорости сканирования вместо одного долгого сканирования в высоком разрешении
  
- Объединение изображений круговой ламинографии после реконструкции для улучшения соотношения сигнал/шум и

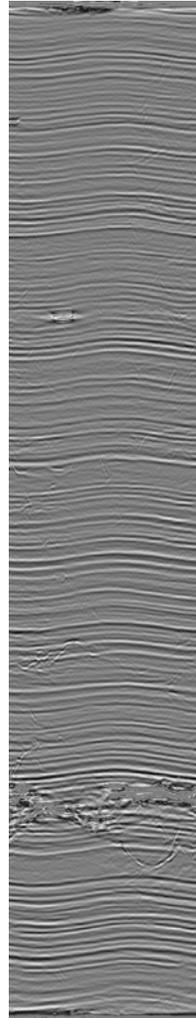


# Пример: круговая ламинография для измерения угла падения слоев

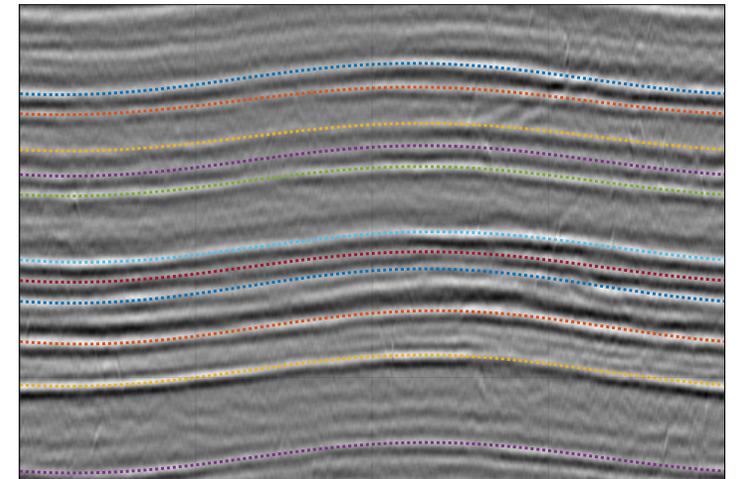
➤ Автоматическое измерение направления падения и угла падения по круговому изображению



Увеличение  
контрастности  
наслоений



Обнаружение  
синусоидальных  
кривых



Удаление кривых с низким  
контрастом

# Пример: круговая ламинография для измерения угла падения слоев

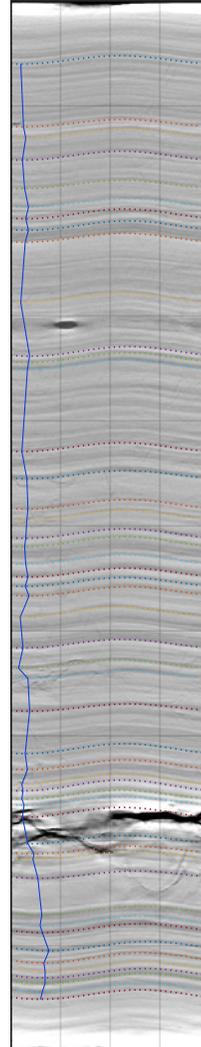
- Изменение направления падения и угла падения по минимумам кривых на круговом изображении

## Направление максимального падения

Среднее значение =  $34 \pm 14^\circ$

Медиана =  $30^\circ$

Диапазон =  $14 - 69^\circ$



## Угол падения

Среднее значение =  $8.1 \pm 0.8^\circ$

Медиана =  $8.2^\circ$

Диапазон =  $6.5 - 9.7^\circ$



# Заключение

- Ламинаграфия представляет собой новый метод быстрой рентгеновской визуализации всего керна:
  - Предоставляет больше информации, чем рентгенография: «2.5D» или «сфокусированная рентгенография»;
  - Меньшие объемы данных, полученные с высокой скоростью, чем эквивалентные СТ;
  - Сохраняется высокое разрешение вдоль всей длины керна (> 100 мкм);
  - Простая траектория сканирования (без вращения или с ручным для получения кругового изображения);
  - Но есть артефакты от особенностей вне плоскости и переменного контраста.
  
- Ключевые способы применения:
  - Получение рентгеновского изображения вне лаборатории - на руднике, буровой площадке, на море;
  - Оценка качества керна;
  - Изучение всей длины образца для нахождения представительных участков для отбора субкернов или КТ высокого разрешения;
  - Локализация объектов в 3D, например включений, окаменелости, каверн, сульфидов;
  - Корреляция керна и каротажа;
  - Измерение угла падения и направления падения слоев;
  - Эксперименты *in-situ*, например оценка насыщения керна (вместе с КТ)
  
- Быстрое развертывание на море или в полевых условиях



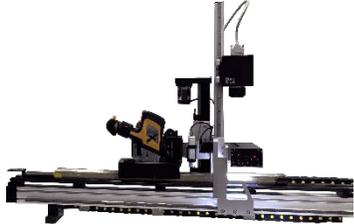
# Компьютерная томография кернa

ScoutXcan	КТ (ХСТ)	Вертикальный КТ (VХСТ)	Вращающийся КТ (RХСТ)	PlugXcan
2D-Радиография и Ламинография	Горизонтальный Томограф	Вертикальный Томограф	«Вращающийся» Томограф	Томограф для суб- и боковых кернов
				

Гибкая линейка томографов от Geotek обеспечивает высококачественное **2D- и 3D-сканирование как цельных, так и распиленных кернов**. Эти **доступные и специализированные** томографы являются идеальным решением для геологических и производственных лабораторий.

- Все томографы защищены специальным корпусом;
- 130/180 кВ источник и плоскочувствительный детектор;
- Не нуждаются во внешнем охлаждении;
- Длительная эксплуатация > 10,000 часов.
- Томографы позволяют сканировать как консолидированные, так и осадочные керны длиной до 1,5 м, и любой другой керновой материал;
- Диаметр образцов: от 25 до 150 мм;

# Сканирование керна

<p>Стандартный Мультисенсорный Сканер Керна (<b>MSCL-S</b>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Анализ любого типа керна;</li> <li>• Оснащается всеми физическими и геохимическими сенсорами;</li> <li>• Непрерывное сканирование;</li> <li>• Исследование образцов “один за другим”.</li> </ul>	
<p>XZ Мультисенсорный Сканер Керна (<b>MSCL-XZ</b> и <b>MSCL-XZ-XRF</b>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Настольный сканер;</li> <li>• Поверхностные измерения;</li> <li>• В основном для распиленных кернов;</li> <li>• Исследование образцов по очереди.</li> </ul>	
<p>XYZ Мультисенсорный Сканер Керна (<b>MSCL-XYZ</b> и <b>MSCL-XYZ-XRF</b>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Рабочая станция с большой производительностью;</li> <li>• Автоматизированный анализ нескольких образцов;</li> <li>• Работает с керновыми ящиками;</li> <li>• Поверхностные измерения.</li> </ul>	
<p>XYZ Компактный Мультисенсорный Сканер Керна (<b>BoxScan</b>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Компактный вариант для одновременного исследования нескольких образцов;</li> <li>• Автоматизированный анализ;</li> <li>• Работает с керновыми ящиками;</li> <li>• Поверхностные измерения.</li> </ul>	



Спасибо за внимание!

`geology@technoinfo.ru`