

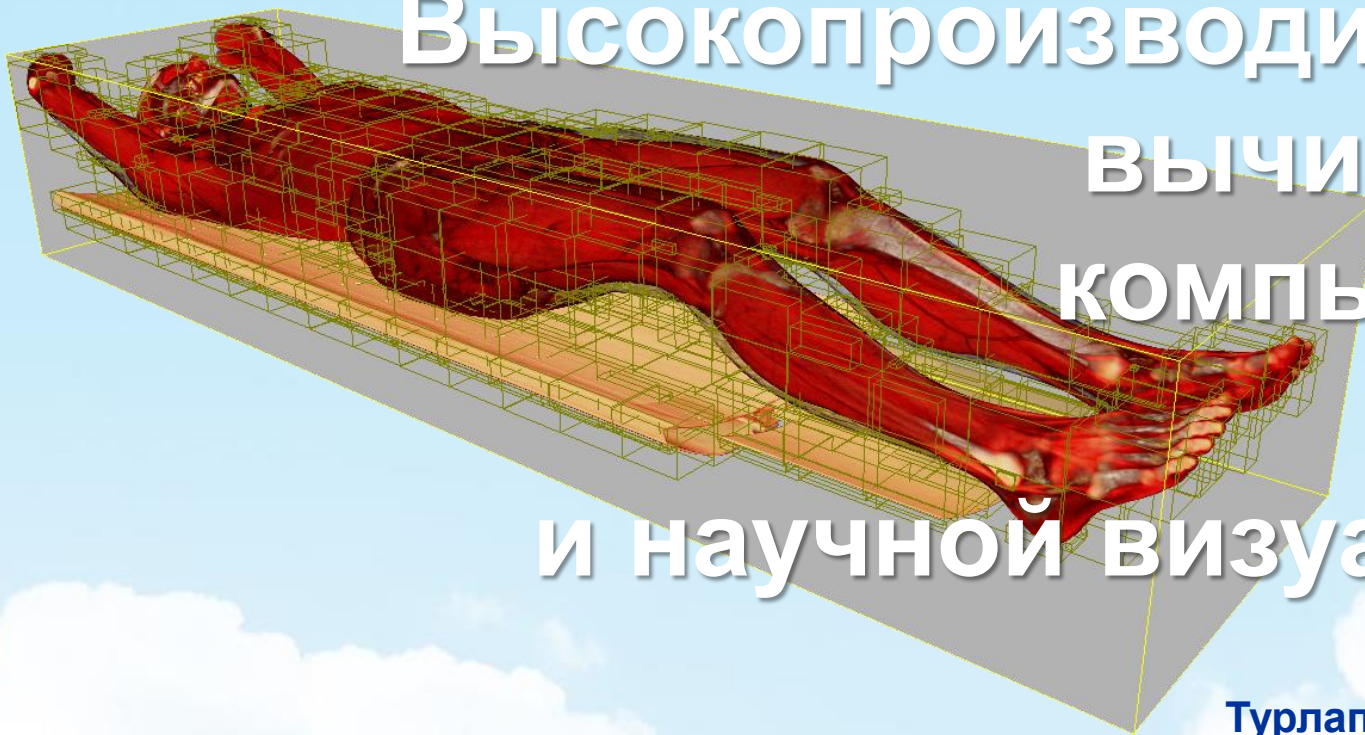


УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ИНСТИТУТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

Высокопроизводительные вычисления в компьютерной графике и научной визуализации



Турлапов Вадим Евгеньевич

д.т.н., проф. каф. МОЭВМ,
рук. лаб. компьютерной графики и мультимедиа
vadim.turlapov@gmail.com

Н.Новгород, HPC-School'2015



Многомасштабное моделирование, хранение и 3D визуализация геоповерхностей

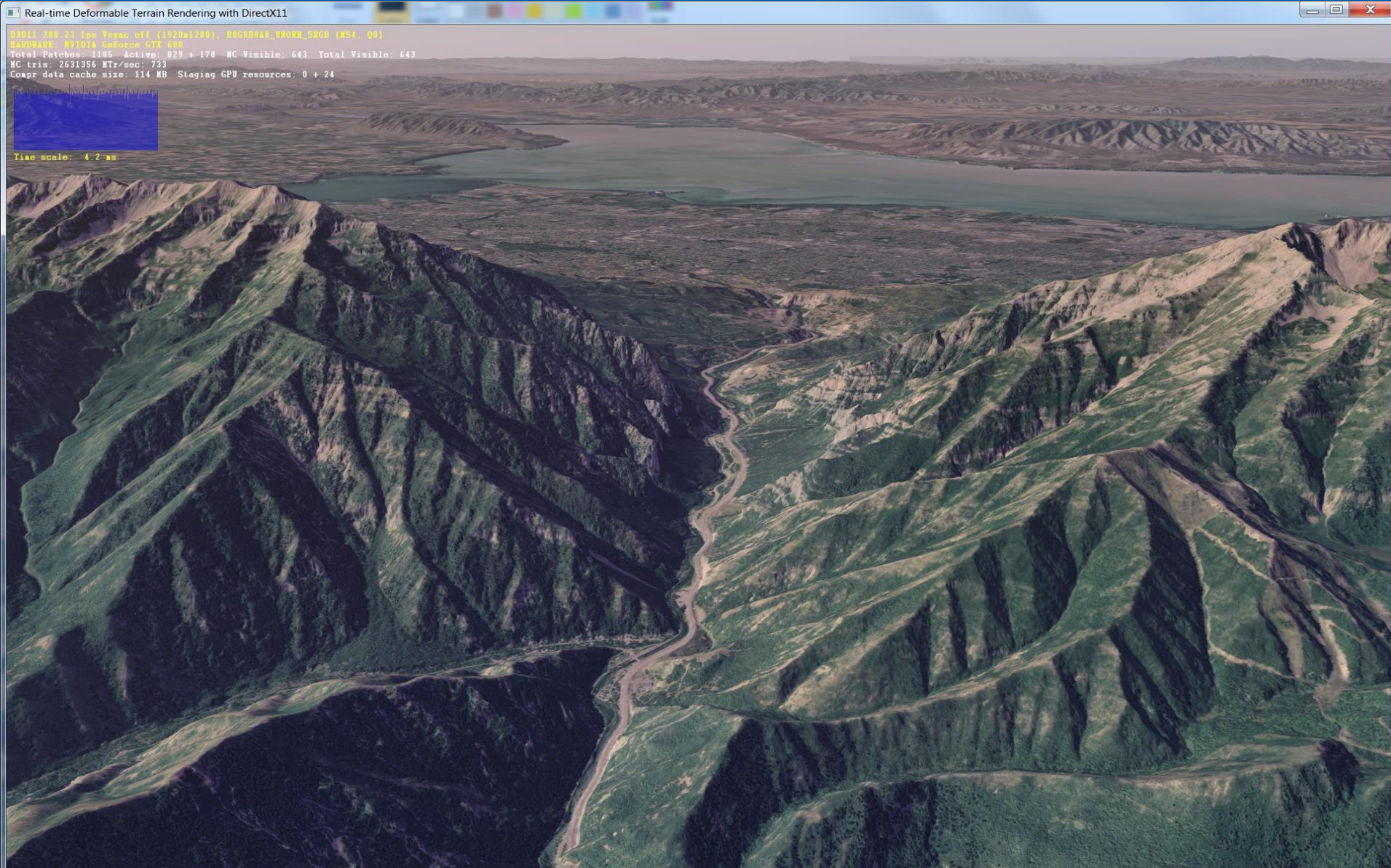
Методы вейвлет-декомпозиции,
сжатия, распаковки и визуализации
рельефа



УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

3D-реконструкция рельефа неограниченного размера в реальном времени с моделированием природных явлений

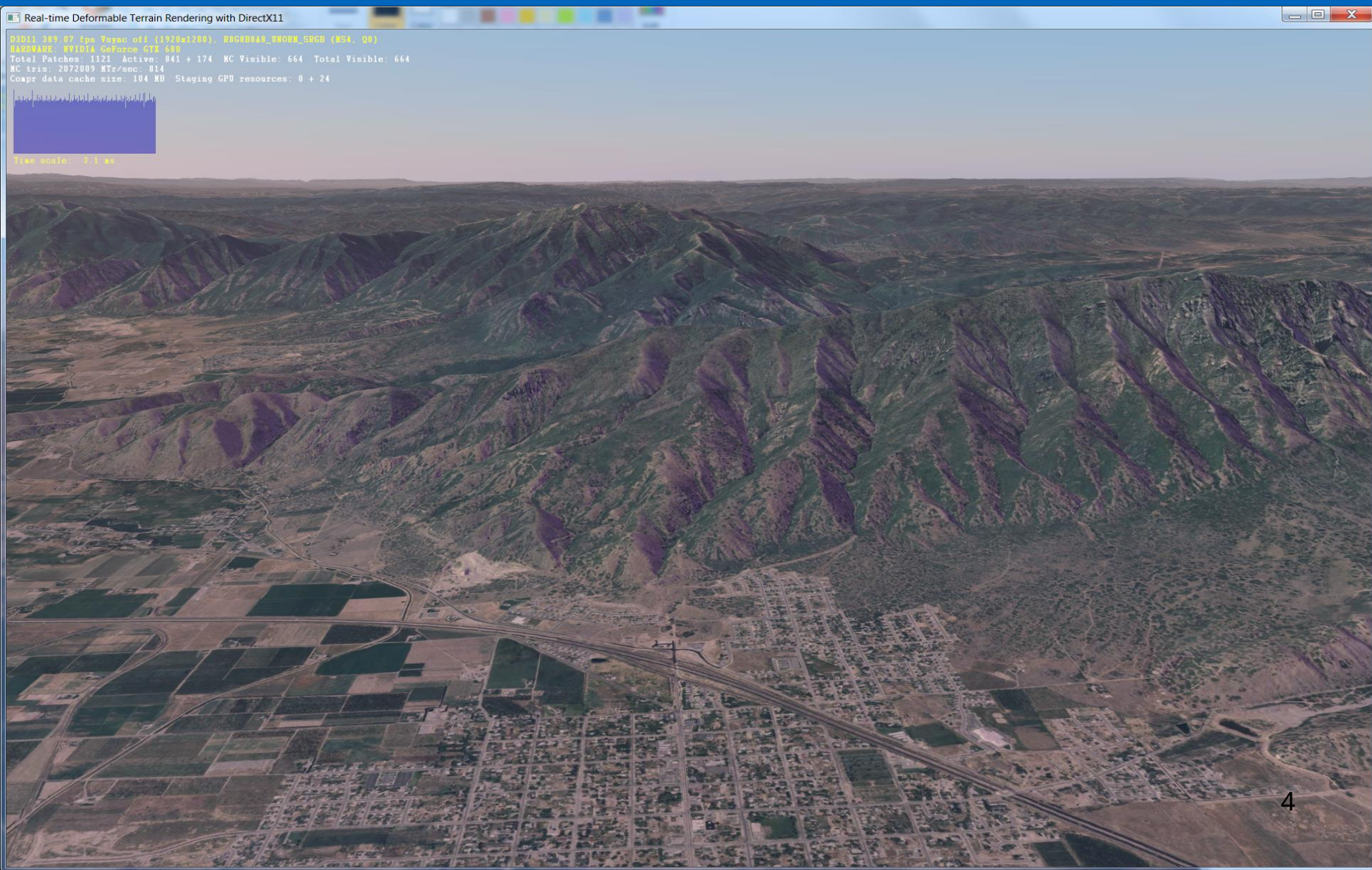




УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

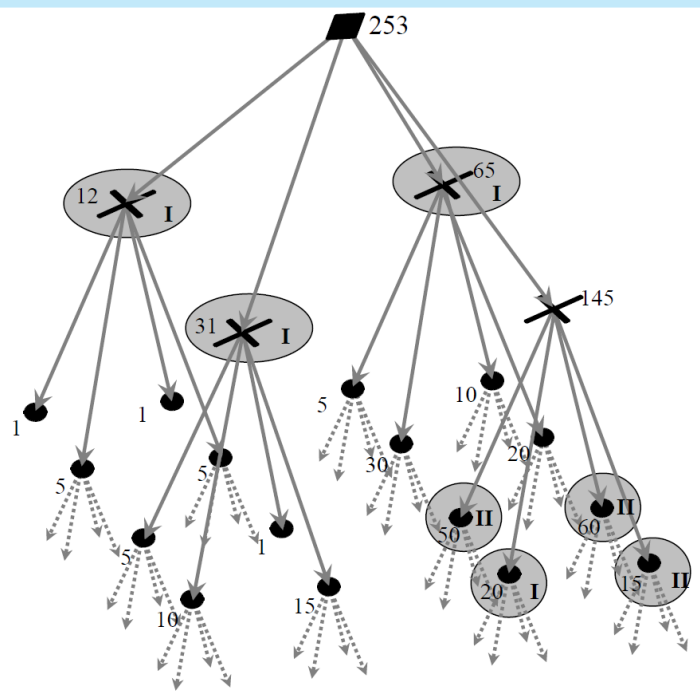
3D-реконструкция рельефа неограниченного размера в реальном времени с моделированием природных явлений





Методы вейвлет-декомпозиции, сжатия, распаковки и визуализации рельефа

Полная вейвлет-декомпозиция конечного двумерного дискретного сигнала (высот рельефа) и ее представление с помощью квадродеревьев.



Пример распределения стартовых узлов между потоками I и II

- EZW (Embedded Zero-tree Wavelet coder, J.M.Shapiro // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1993. V. 41, No 12. P. 345–362): 0-ветви уточнения и быстрые сжатие-распаковка
- активен когерентный срез квадродерева
- восходящий алгоритм оценки трудоемкости и нисходящее сбалансированное планирование потоков
- триангуляция, морфинг детализации
- блочный алгоритм, гладкая сшивка
- генерация текстур
- Direct3D11, тесселяторы



Методы вейвлет-декомпозиции, сжатия, распаковки и визуализации рельефа

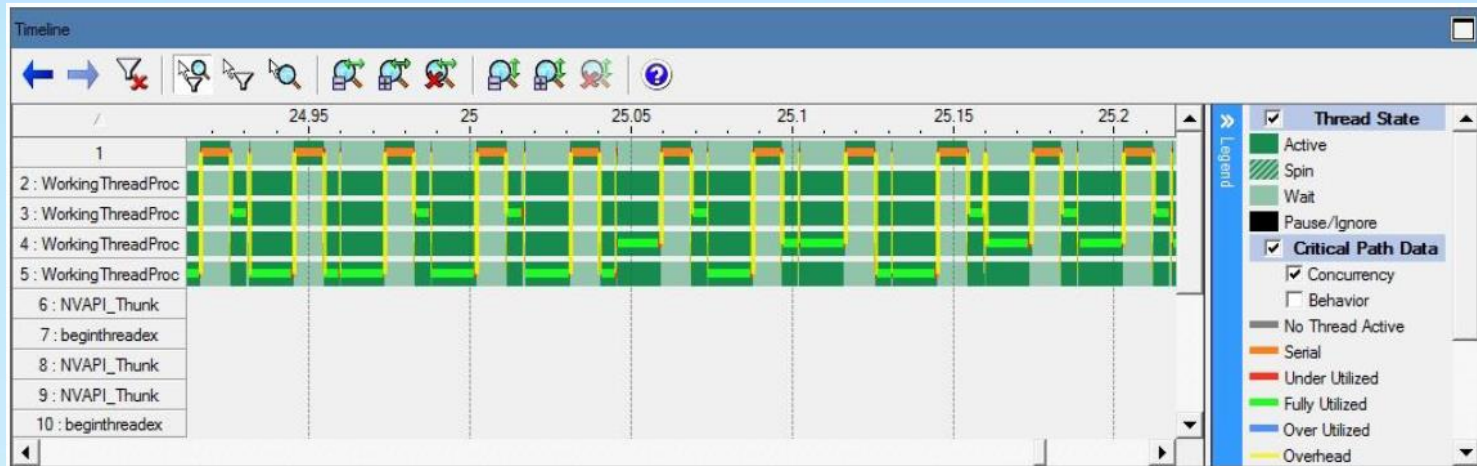
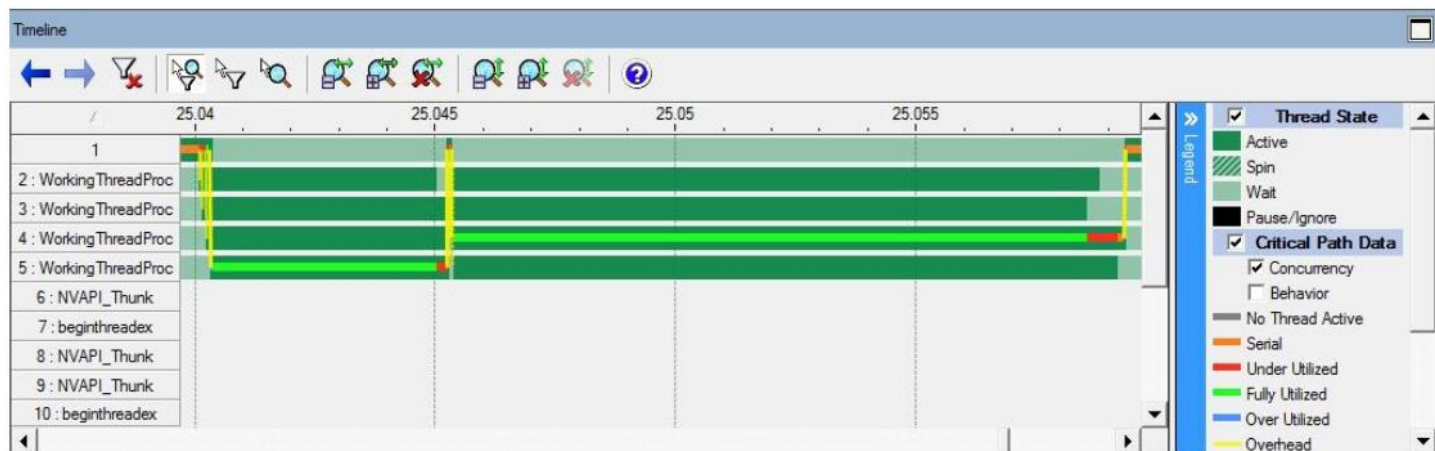


Рисунок 3.20 – Степень дисбаланса ветвей, масштаб времени 0.3 с



17.11.2015

Рисунок 3.21 – Степень дисбаланса ветвей, масштаб времени 0.02 с



УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

3D-реконструкция рельефа неограниченного размера в реальном времени с моделированием природных явлений



17.11.2015

Н.Новгород, HPC-School'2015

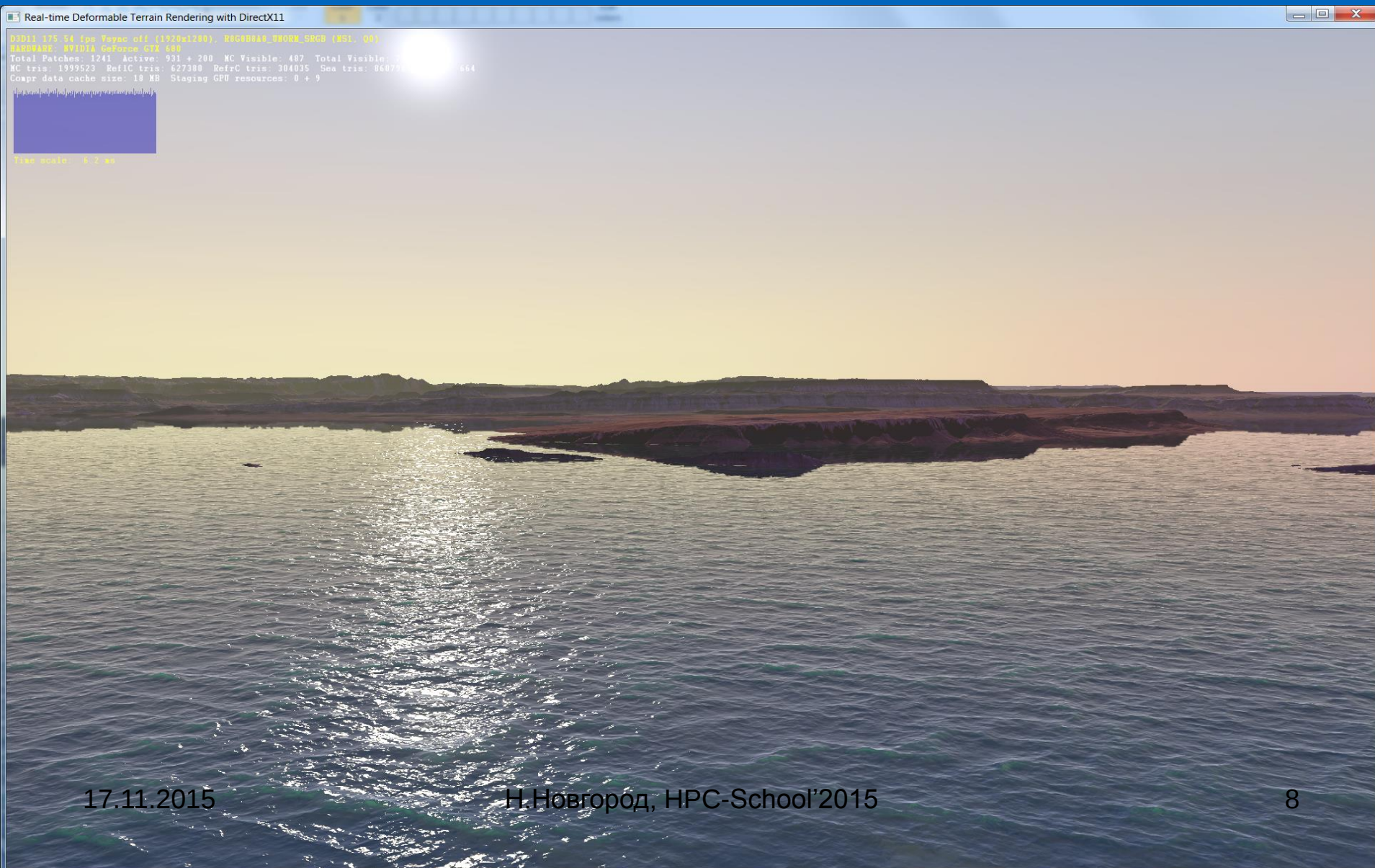
7



УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

3D-реконструкция рельефа неограниченного размера в реальном времени с моделированием природных явлений

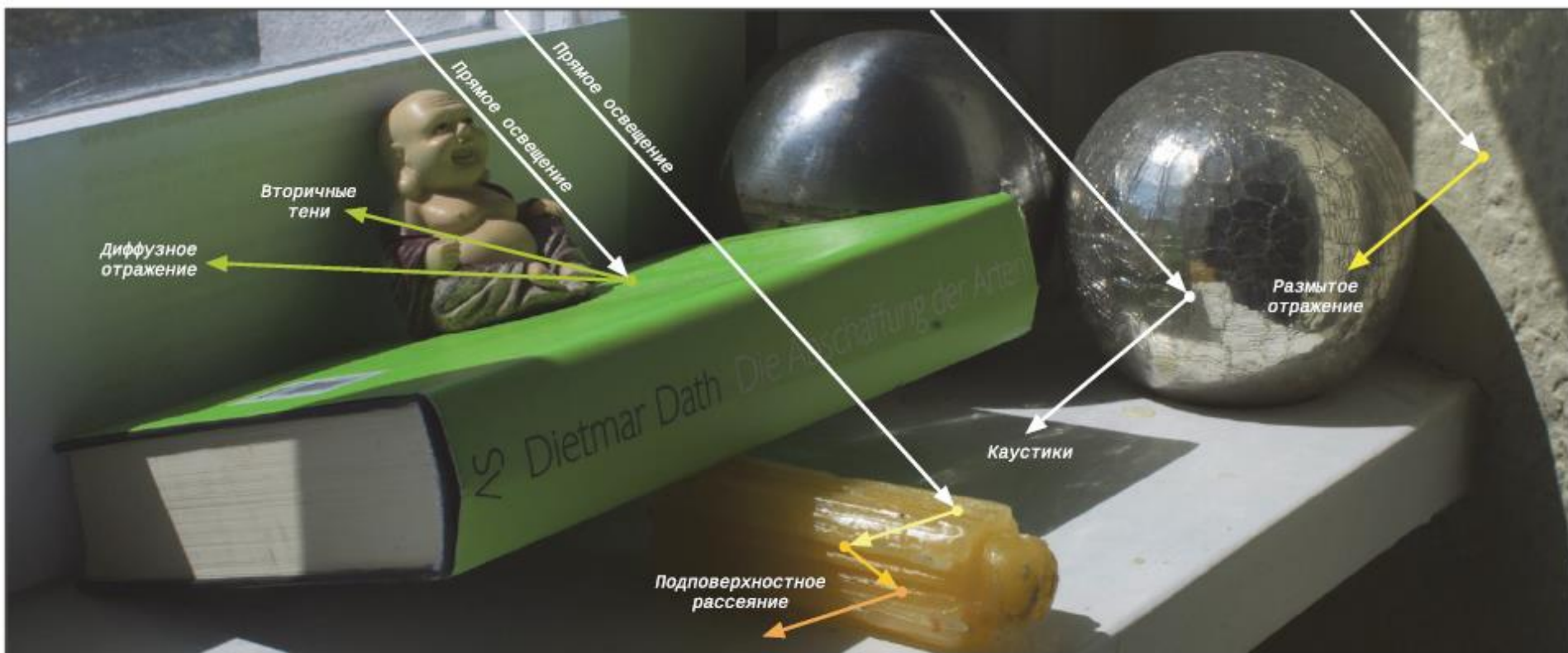




Задача глобального освещения в виртуальной реальности



Прямое и не прямое освещение. Основное уравнение освещенности

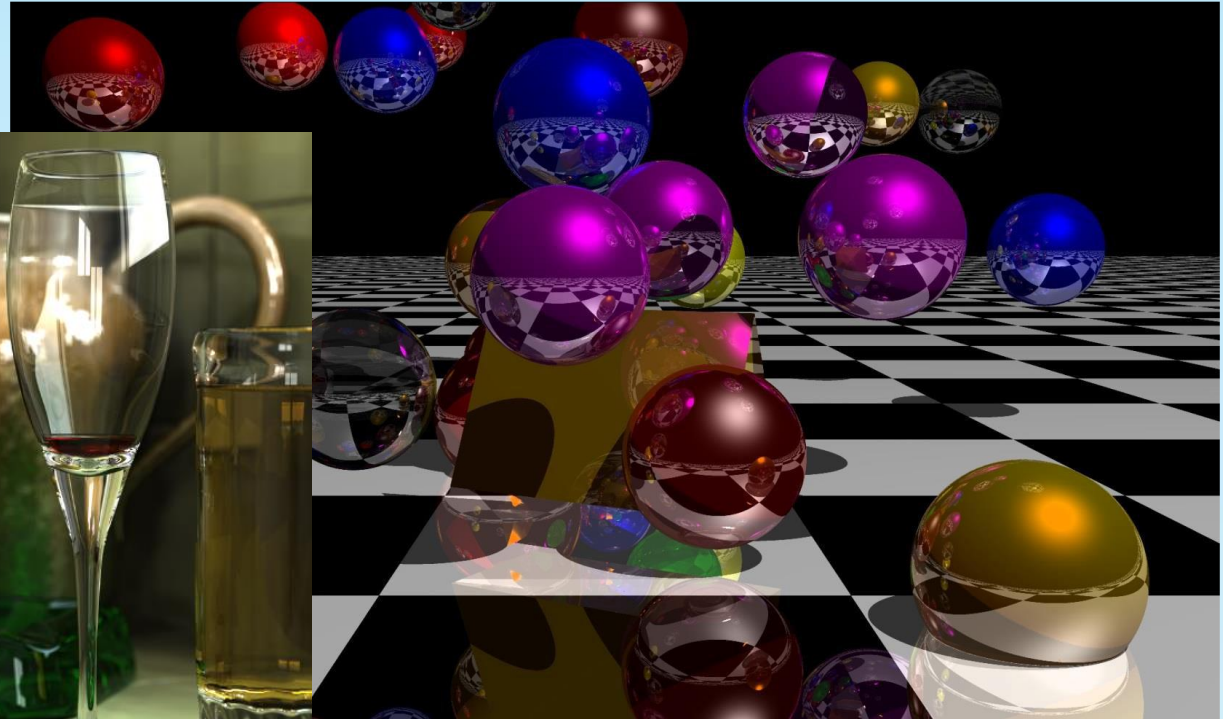


Примеры эффектов глобального освещения из публикации
Ritschel T., Dachsbacher C., Grosch T., Kautz J. The state of the Art in Interactive Global
Illumination // Computer Graphics Forum. – 2012. –February. –Vol.31, no.1. –Pp.160-188

Главной целью алгоритмов **global illumination** является воспроизведение **реального освещения**.



Глобальное освещение и трассировка лучей (Ray Tracing)



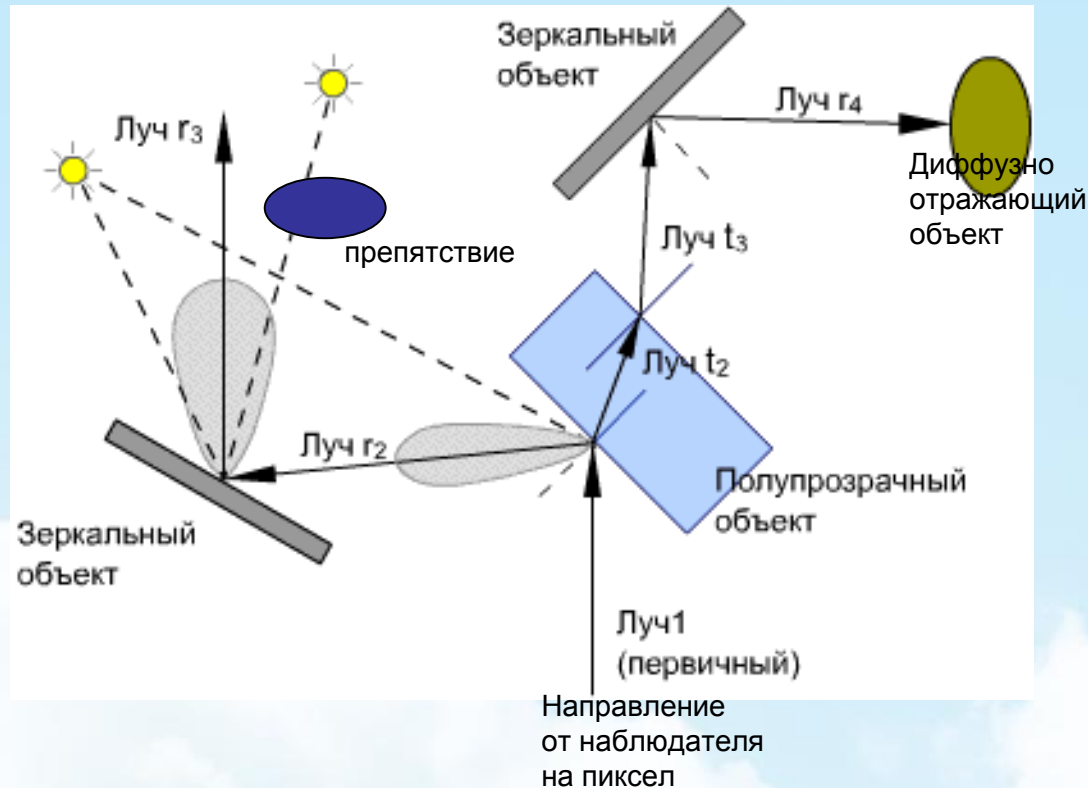
Примеры сцен синтезированных путем трассировки лучей: нет вторичного освещения и световых эффектов.

Модель Уиттеда (Whitted) для цвета точки: $I(\lambda) = k_a L_a(\lambda) \cdot C(\lambda) + k_d L_d(\lambda) \cdot C(\lambda) + k_s L_s(\lambda) + k_r L_r(\lambda) + k_t L_t(\lambda)$



Метод обратной трассировки лучей (от точки наблюдения)

Обратная трассировка. Метод разработан в 80-х годах в публикациях Уиттеда (T. Whitted, 1980) и Кея (T. Kay, 1986).

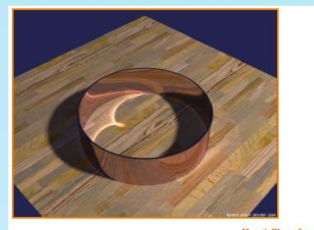
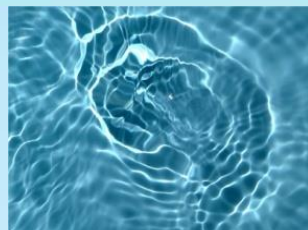


Пояснение:
Луч t – преломленный;
Луч r – отраженный;



Световые эффекты. Проблемы моделирования. Глобальное освещение

Каустики и
godrays



Воздух, заполненный каплями воды, пылью или дымом, представляет собой объемную среду, с которой свет активно взаимодействует:

Рассеивание
света



Радуга:
рефракция
и полное
внутреннее
отражение
в капле

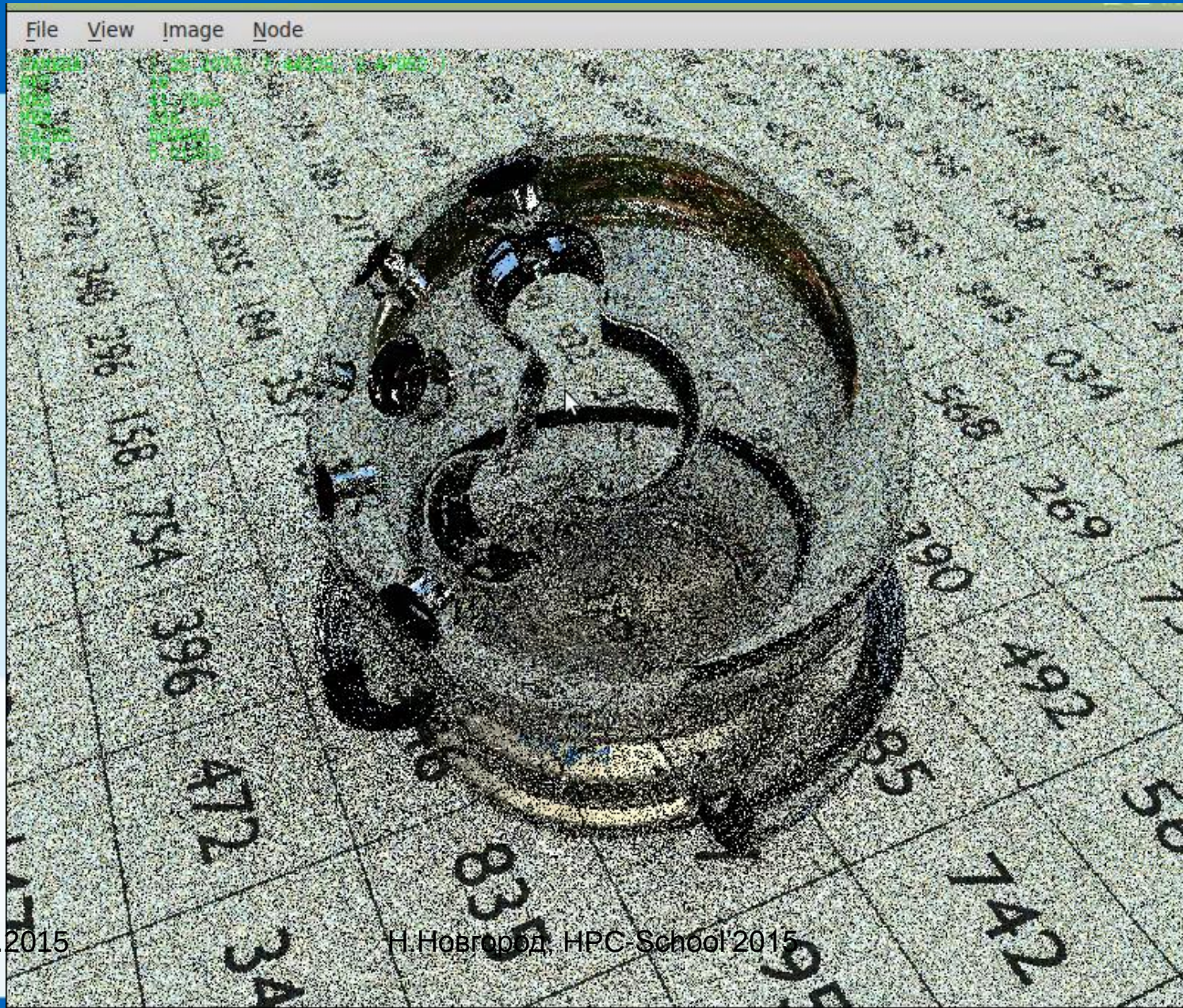


Освещение
отраженным
светом
(непрямое,
radiosity)



HDR







Основное уравнение освещенности. Основы вывода BRDF элемента поверхности

(Chris Wynn, NVIDIA Corporation)

Функция двунаправленного отражения (**Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF**), задающая свойства элемента поверхности:

$$f_r(x, x', x'') = \frac{L(x', x'')}{L(x', x) \cos \theta d\omega}$$

уходящая яркость и принимаемая из телесного угла

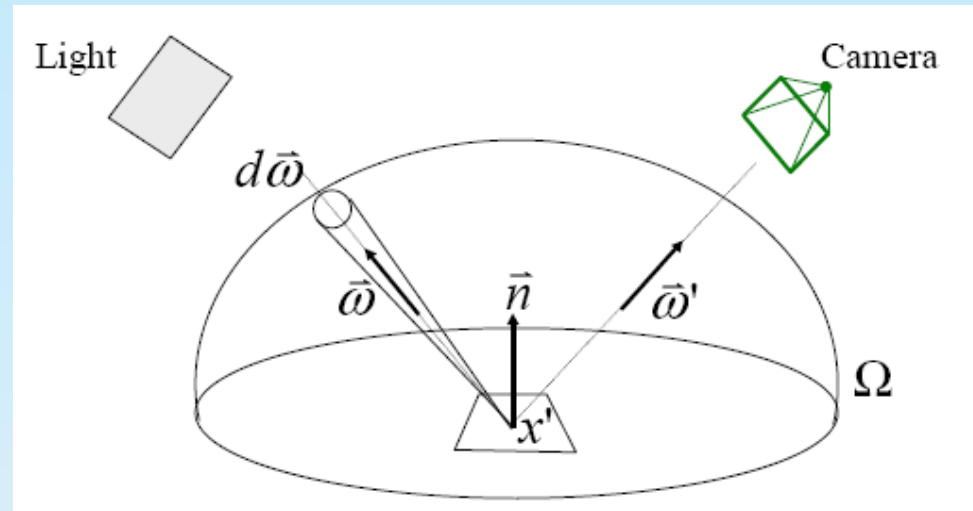
Модель освещения по Phong-у:

$$L_{\omega'} = L_{\omega} (k_d (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n)$$

$$L_{\omega'} = L_{\omega} \cdot \text{Refl}(\omega, \omega')$$

$$L_{\omega'} = \frac{\cos \theta_{\omega'} d\omega'}{\cos \theta_{\omega} d\omega} \text{Refl}(\omega, \omega') L_{\omega}$$

$$L_{\omega'} = \frac{\text{Refl}(\omega, \omega')}{\cos \theta_{\omega} d\omega} L_{\omega} \cos \theta_{\omega'} d\omega'$$



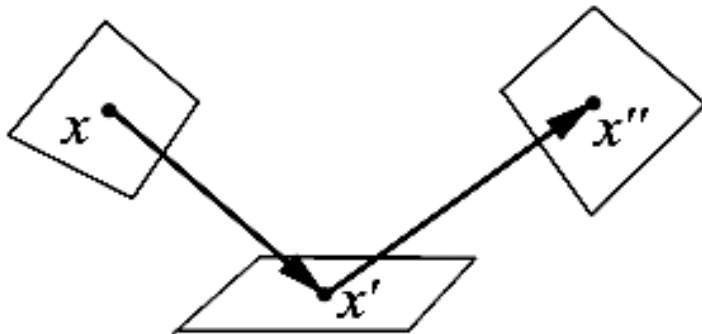
Thomas Funkhouser
Princeton University,
COS 526, Fall 2002



Прямое и не прямое освещение. Основное уравнение освещенности

Световая энергия, которая излучается в точке x' в направлении другой точки x'' - это сумма отраженной энергии и энергии излучаемой точкой самостоятельно. Должны быть учтены все лучи, которые пришли в эту точку от всех точек $x \rightarrow$ интеграл:

$$L(x' \rightarrow x'') = E(x' \rightarrow x'') + \int_x f_r(x, x', x'') L(x \rightarrow x') V(x, x') G(x, x') dx$$



В этом уравнении функция L стоит как в правой, так и в левой части уравнения, причем в правой части под интегралом. Уравнения такого вида называются уравнениями Фредгольма второго рода, они не имеют аналитического решения (решаются численно).



Основное уравнение освещенности

$$f_r(x, x', x'') = \frac{L(x', x'')}{L(x', x) \cos \theta d\omega}$$

-функция двунаправленного отражения (**Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF**), - доля световой энергии, пришедшей из x в направлении, задаваемом точкой x' , уходит затем в направлении, точки x'' [1/стерадиан]. Удовлетворяет условию симметричности (принцип Гельмгольца): **$BRDF(x, x'') = BRDF(x'', x)$** .

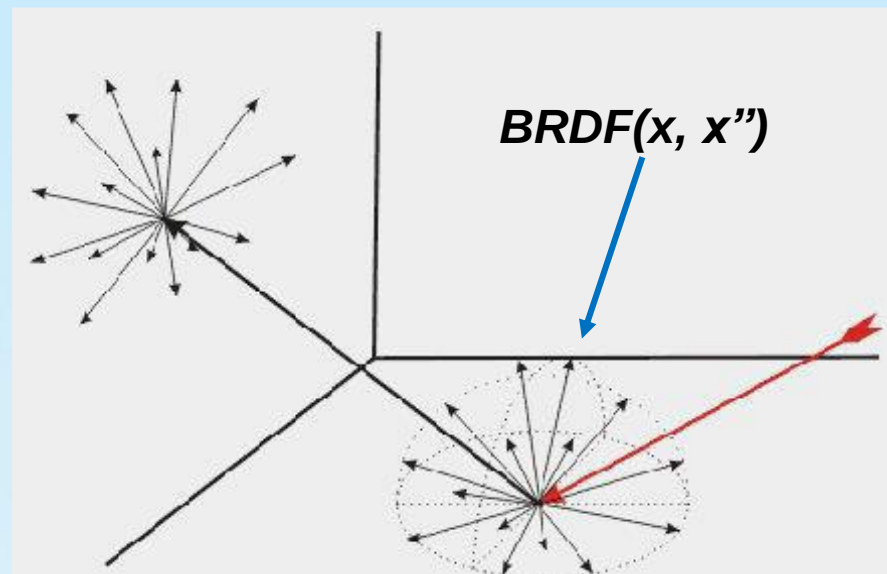
$V(x, x') = 0$, если луч из точки x в точку x' будет перегороден поверхностью, и 1 иначе.

$G(x, x')$ -форм-фактор (функция, учитывающая взаимное расположение поверхностей, которым принадлежат точки x и x').

Для площадной формы основного уравнения

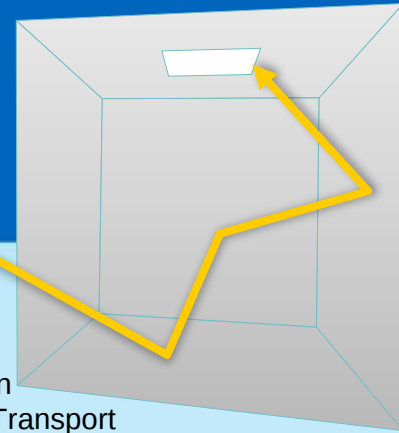
$$G(x, x') = \frac{\cos \theta \cdot \cos \theta'}{\|x - x'\|^2}$$

Для телесно-угловой формы $G(x, x') = \cos \theta'$

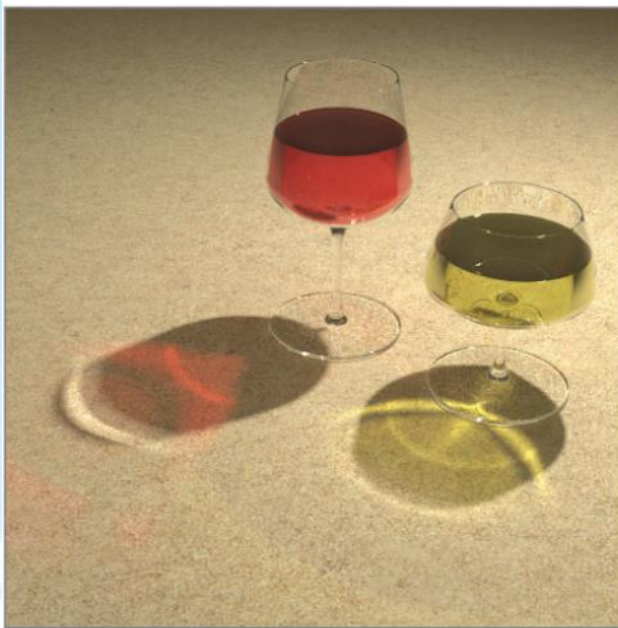




Трассировка света LT (Light Transport)



Course: Recent Advances in Light Transport Simulation
Jaroslav Křivánek - Path Integral Formulation of Light Transport



Результат
суммирования



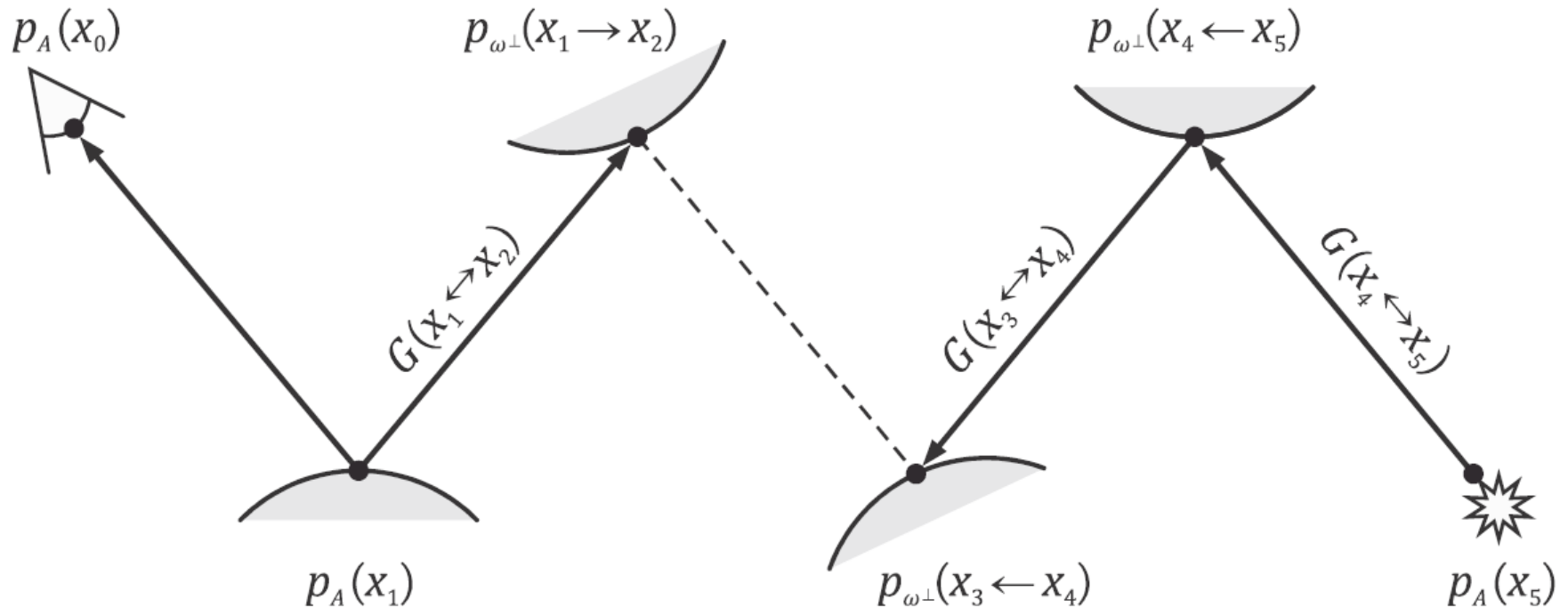
Результат прямой
трассировки света



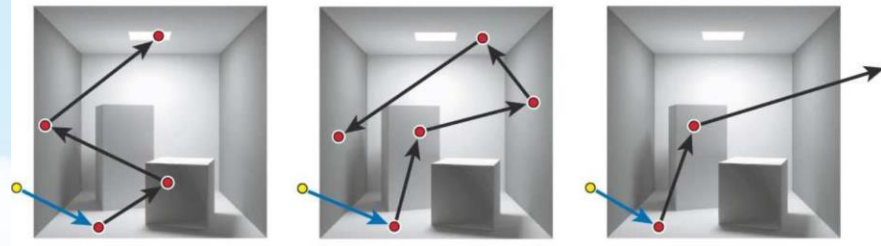
Результат трассировки
пути от камеры



Трассировка путей. Двунаправленная трассировка путей (BDPT)



Пути в реальной сцене:





Probability density function (PDF)

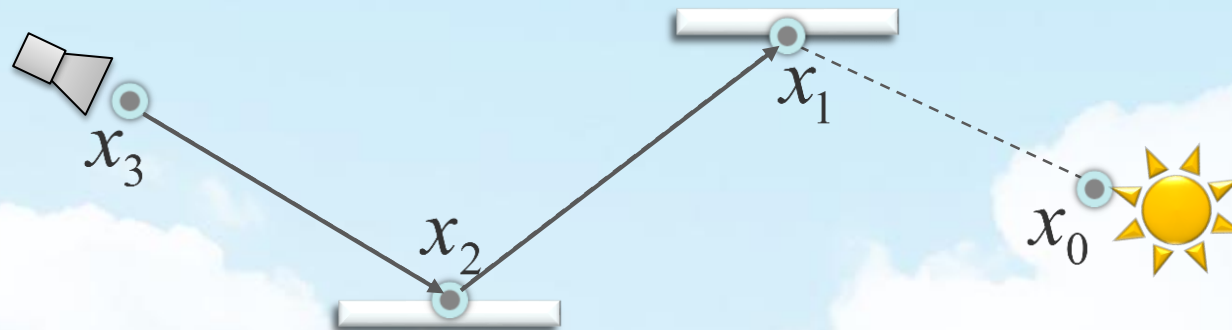
path PDF

$$\underline{p(\bar{x})} = \underline{p(x_0, \dots, x_k)} = p(x_3) \left. \begin{array}{l} p(x_2 | x_3) \\ p(x_1 | x_2) \\ p(x_0) \end{array} \right\}$$

joint PDF of path vertices

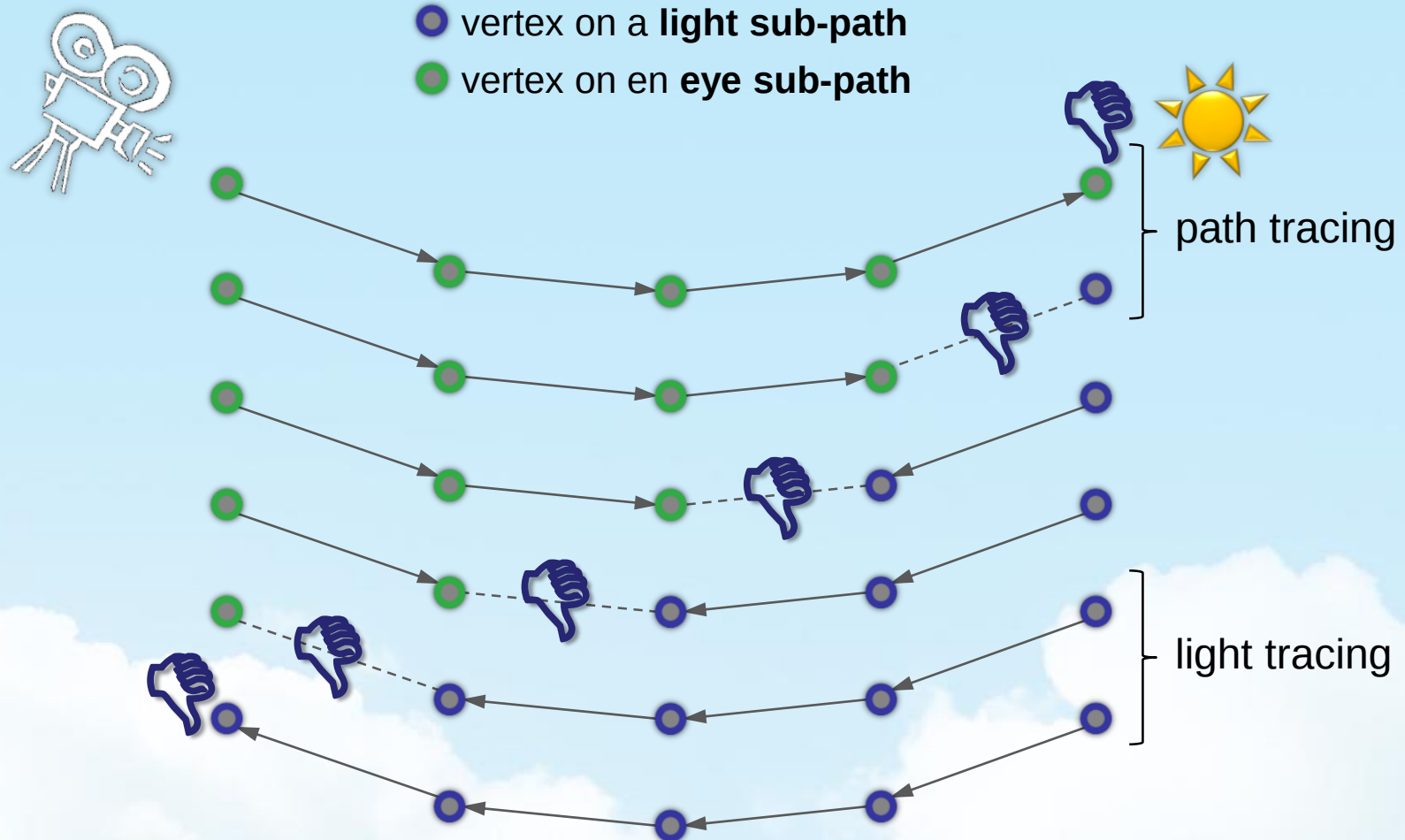
product
of (conditional)
vertex PDFs

Path tracing example:





All possible bidirectional techniques





Монте-Карло оценка интеграла по пути

Path integral

$$I_j = \int_{\Omega} f_j(\bar{x}) \, d\mu(\bar{x})$$

Monte Carlo estimator

$$\langle I_j \rangle = \frac{f_j(\bar{x})}{p(\bar{x})}$$

- Sample path $\bar{x}$
- Evaluate the probability density $p(\bar{x})$
- Evaluate the integrand $f_j(\bar{x})$

Algorithms = different path sampling techniques
Same general form of estimator



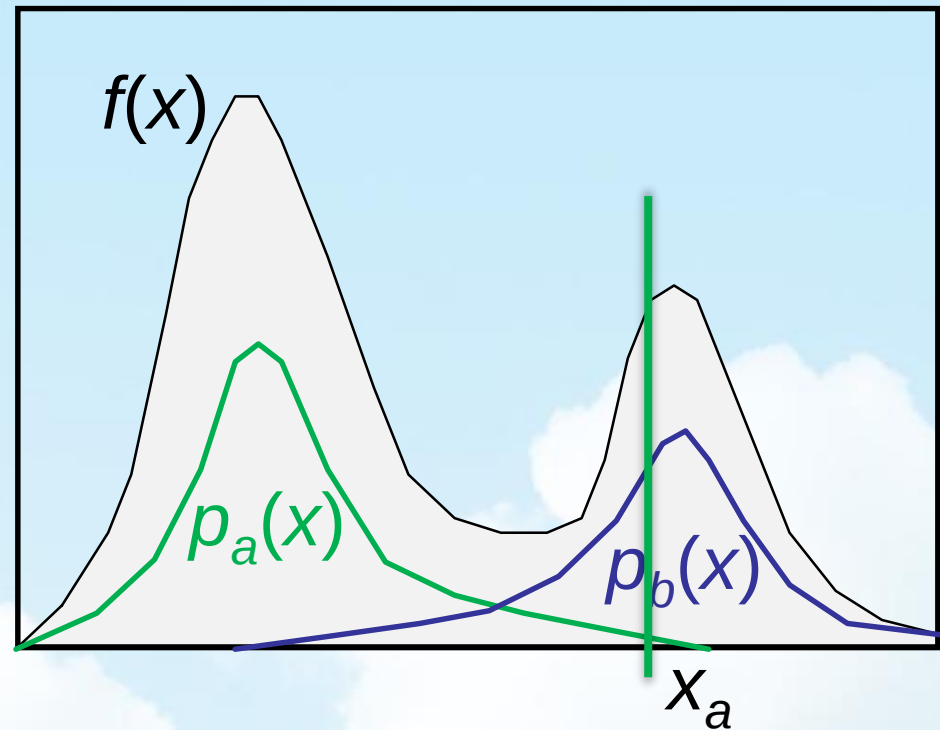
Множественная выборка по значимости

Multiple Importance Sampling (MIS)

Combined estimator:

$$\langle I \rangle = \frac{f(x)}{[p_a(x) + p_b(x)]/2}$$

[Veach & Guibas, 95]



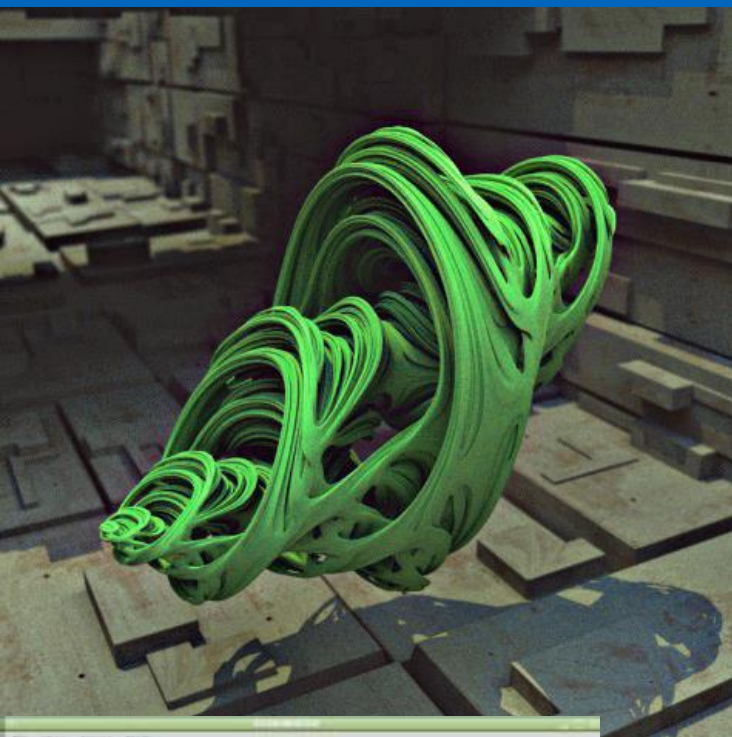


УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Впервые построена full-GPU интерактивная система виртуальной реальности

Обеспечивает физически корректное
глобальное освещение
с рекордной производительностью



17.11.2015

Н.Новгород, HPC-School'2015

24



УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Интерактивная full-GPU система виртуальной реальности

Физически корректное глобальное освещение.
10.5 (до 30) млн. треугольников



17.11.2015

Н.Новгород, HPC-School'2015

25



Материалы: золото, медь, алюминий, стекло, пластик, жемчуг



Производительность

Crytek Sponza.
262K triangles, 1.8fps



Sibenik Cathedral.
75K triangles, 2.1fps



GPU NVIDIA GeForce 560, Ubuntu Linux 10.10 and CUDA Toolkit 4.0.

Метод: стохастическая трассировка пути с глубиной 30.

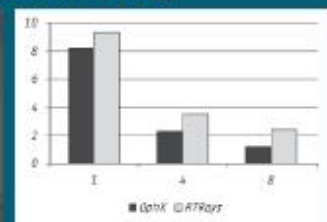
Разрешение: 1024 x 768. Усреднение: 500 кадров



San-Miguel
(Upper Floor),
10500K,
2.5-6 fps

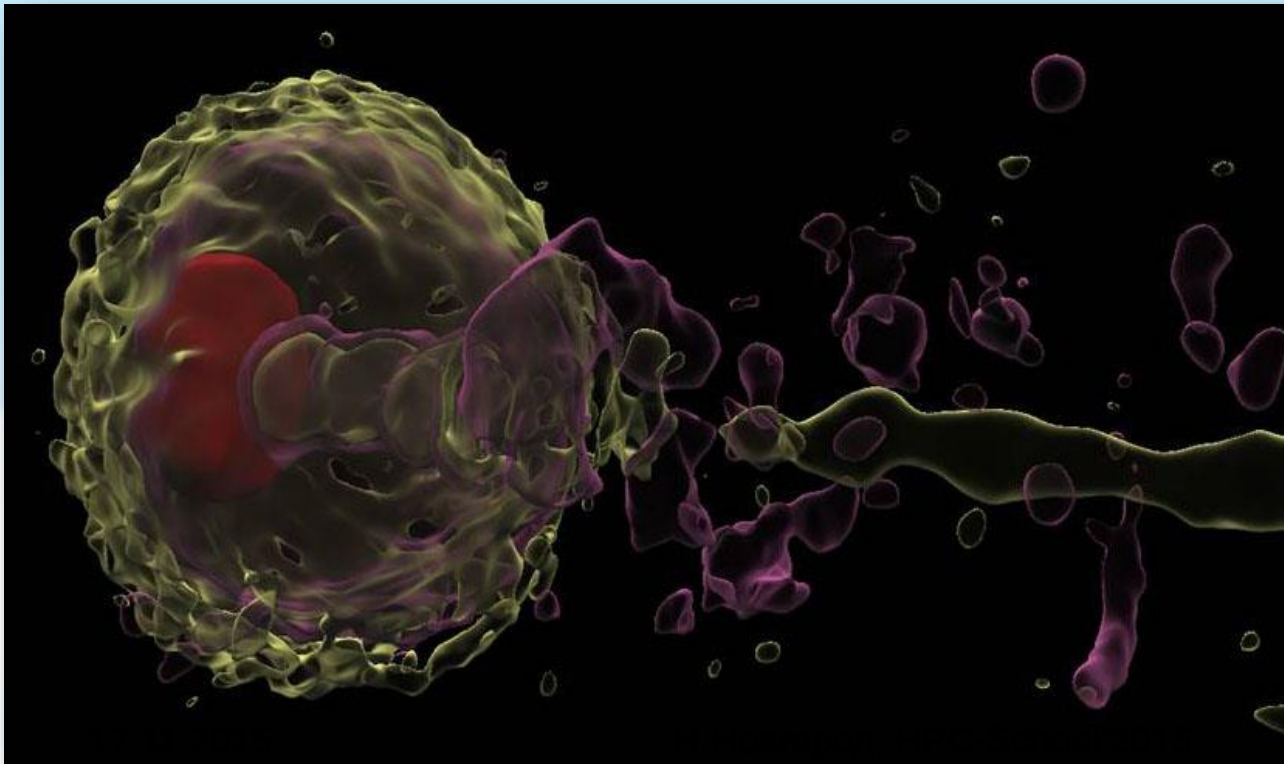
GPU NVIDIA
GeForce 580
Ubuntu Linux 10.10

Сравнение производительности с аналогами: NVIDIA OptiX
NVIDIA GeForce GTX 680 4 Гб, Ubuntu Linux 12.





Научная и медицинская 3D визуализация. Лучевые методы



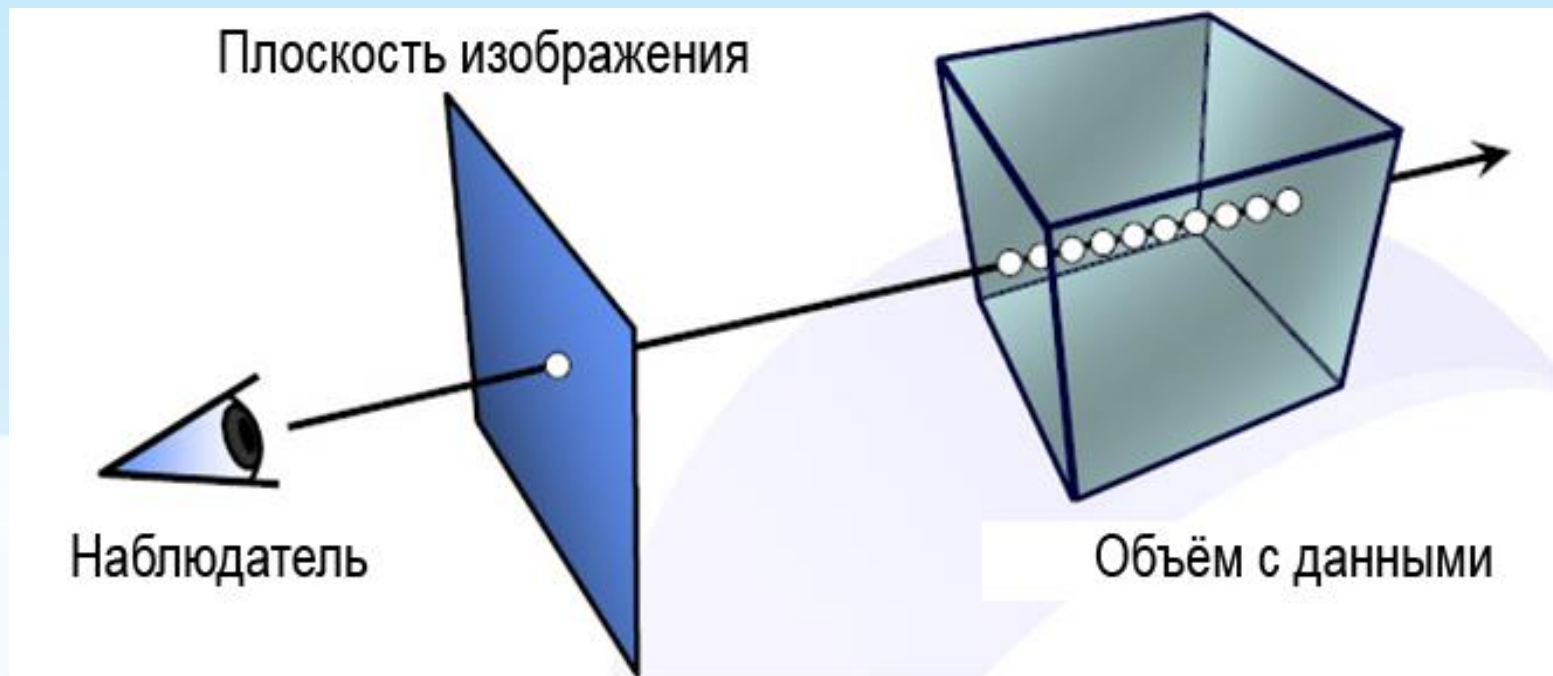
Фемтосекундный
лазерный
импульс в плазме



Метод объёмного рендеринга

- **Метод трассировки лучей (Ray Casting)**

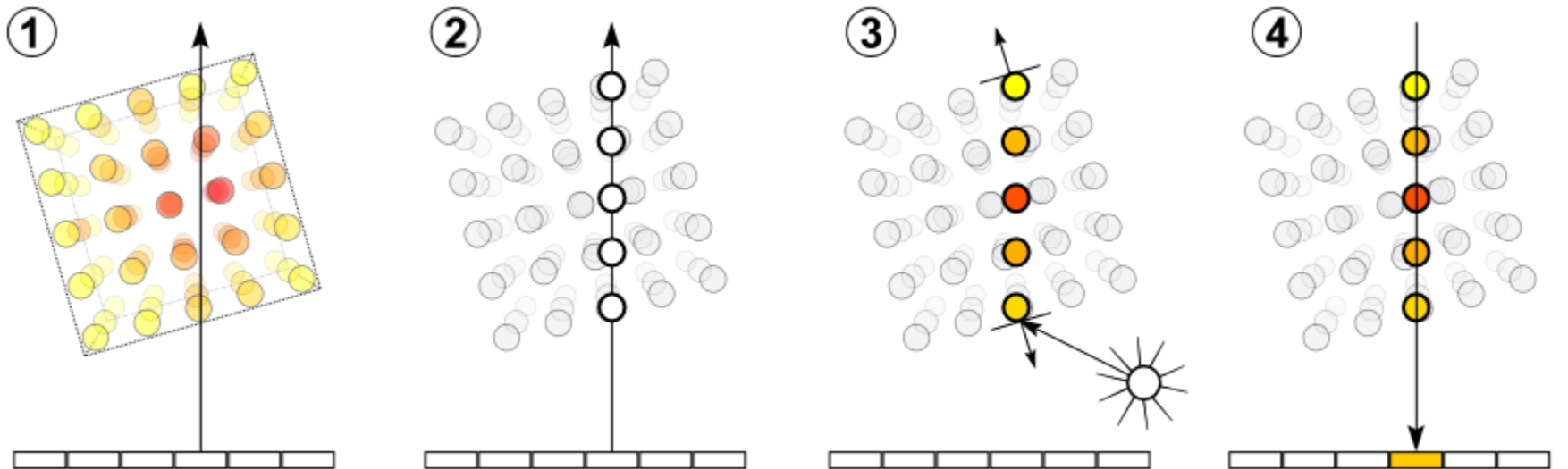
- качество
- параллельность вычислений





Трассировка луча через регулярную сетку

1. Генерация луча для каждого пикселя окна экрана
2. Конечное число шагов вдоль луча, интерполяция в отсчетах
3. Моделирование цвета и освещенности
4. Интегрирование цвета и непрозрачности вдоль луча

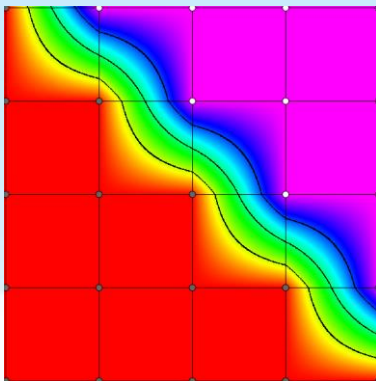




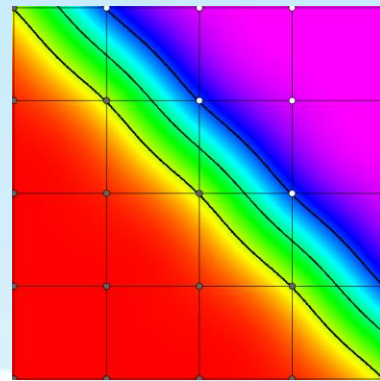
Процесс визуализации объёмных данных всегда включает в себя этапы *интерполяции* и *классификации*

1. Интерполяция

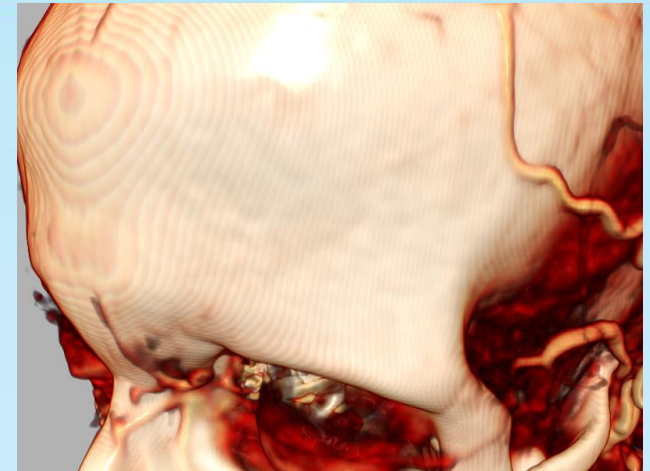
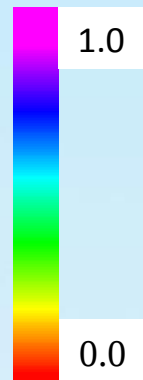
Ступенчатые дефекты визуализации, возникающие на данном этапе, можно значительно уменьшить с помощью трикубической интерполяции



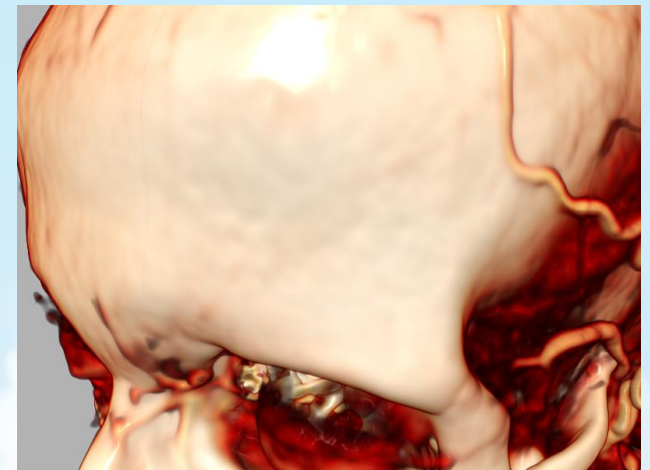
Билинейная
интерполяция



Бикубическая
интерполяция



Трилинейная интерполяция

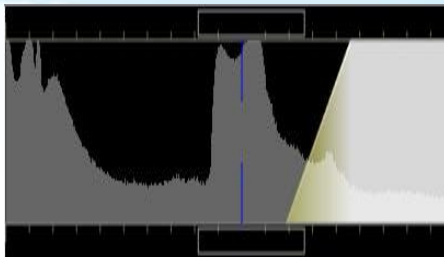
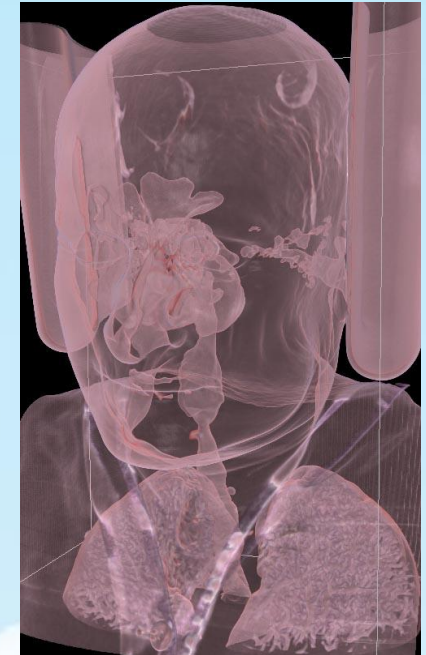
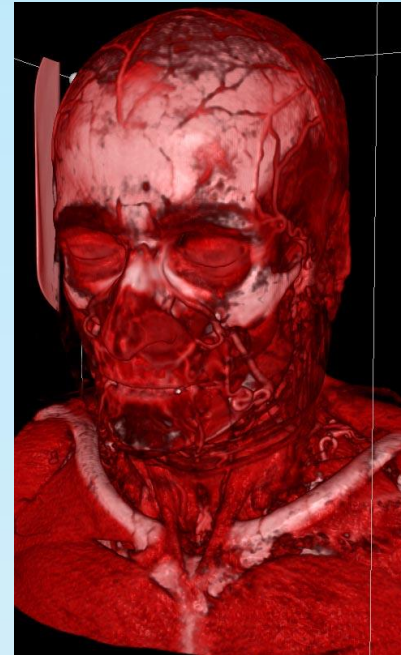


Трикубическая интерполяция

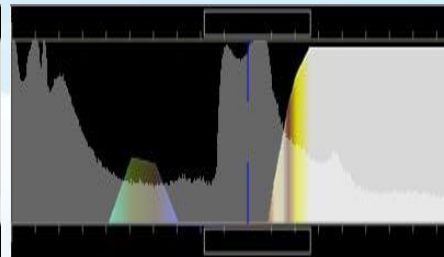


Процесс визуализации объёмных данных всегда включает в себя этапы *интерполяции* и *классификации*

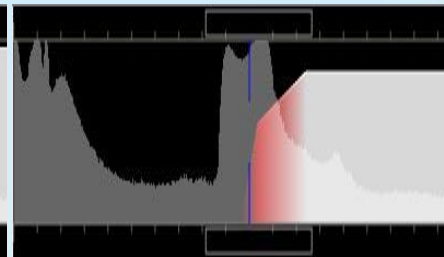
2. Классификация преобразует значения (s) в цвет через *Transfer Function*



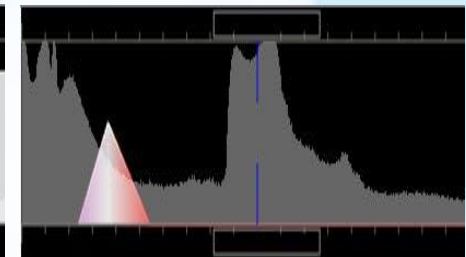
(1)



(2)



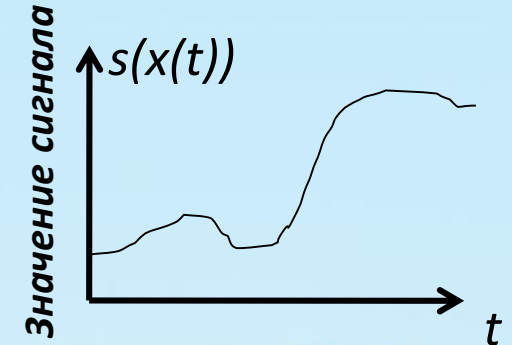
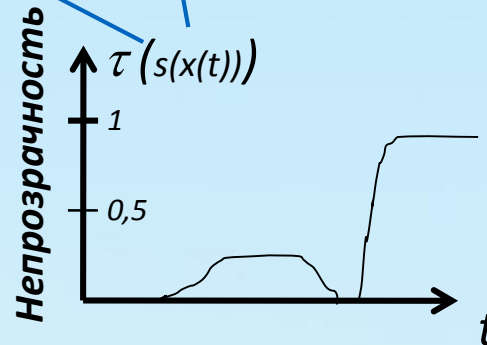
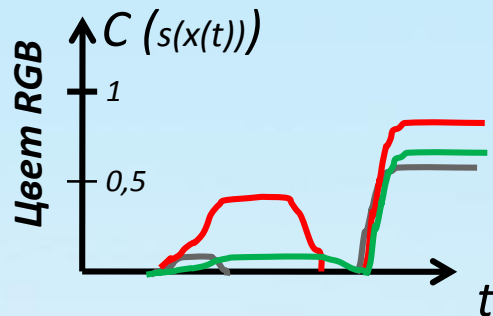
(3)



(4)

Математическая модель трассировки луча: интеграл объемного рендеринга

$$I = \int_0^{t_E} C(s(\mathbf{x}(t))) \times \tau(s(\mathbf{x}(t))) \times \exp\left(-\int_0^t \tau(s(\mathbf{x}(t'))) dt'\right) dt$$

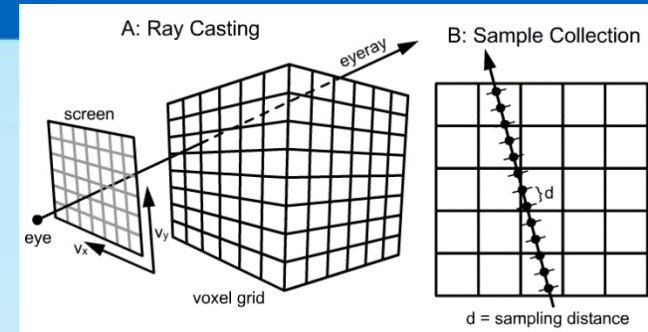


Пример зависимостей различных величин в подынтегральной функции

$C(s(\mathbf{x}))$ – постклассифицированный цвет для значения поля s в точке $\mathbf{x}$

$\tau(s(\mathbf{x}))$ – постклассифицированная непрозрачность для значения поля s в точке $\mathbf{x}$

Интеграл описывает процесс накопления (интегрирования) цвета вдоль луча $\mathbf{x}(t)$ с учетом его затухания в зависимости от расстояния t до точки наблюдения





Отрезок интегрирования разбивается на n элементарных отрезков равной длины $d = D / n$

$$\exp\left(-\int_0^t \tau(s(\mathbf{x}(t'))))dt'\right) \approx \exp\left(-\sum_{i=0}^{t/d} \tau(s(\mathbf{x}(id)))d\right) \quad (1)$$

$$= \prod_{i=0}^{t/d} \exp(-\tau(s(\mathbf{x}(id)))d) \approx \prod_{i=0}^{t/d} (1 - \alpha_i)$$

$$\alpha_i = 1 - \exp(-\tau(s(\mathbf{x}(id)))d) \approx \tau(s(\mathbf{x}(id)))d \quad (2)$$

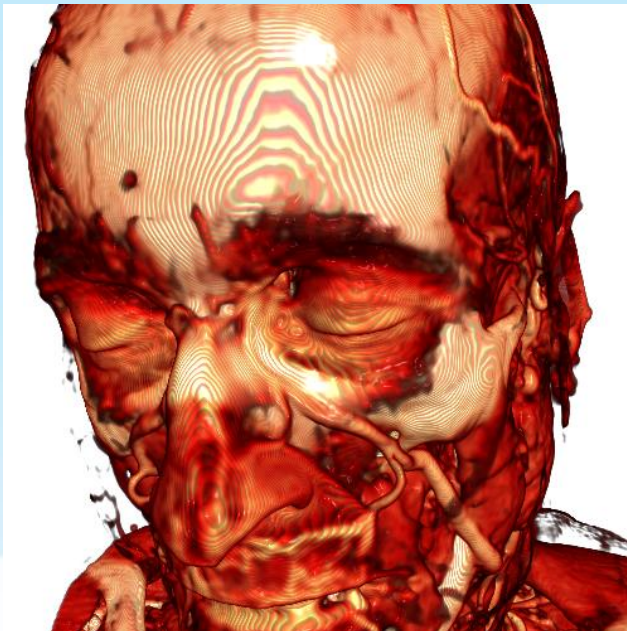
$$I \approx \sum_{i=0}^n C_i \cdot \alpha_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha_j) \quad (3)$$

C_i α_i – цвет и непрозрачность i -ого сегмента луча; n – число шагов луча

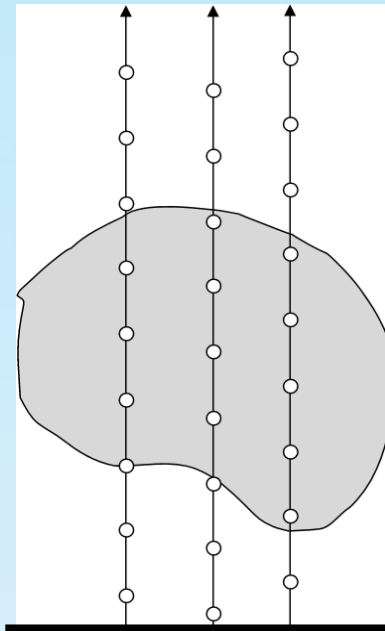


Случайный сдвиг (*jittering*) стартовых позиций лучей для устранения регулярности дефектов постклассификации

Цвет каждого пикселя изображения рассматривается, как случайная величина.



Старт лучей с общей плоскости (точки)



Случайный сдвиг луча в пределах шага (*jittering*)

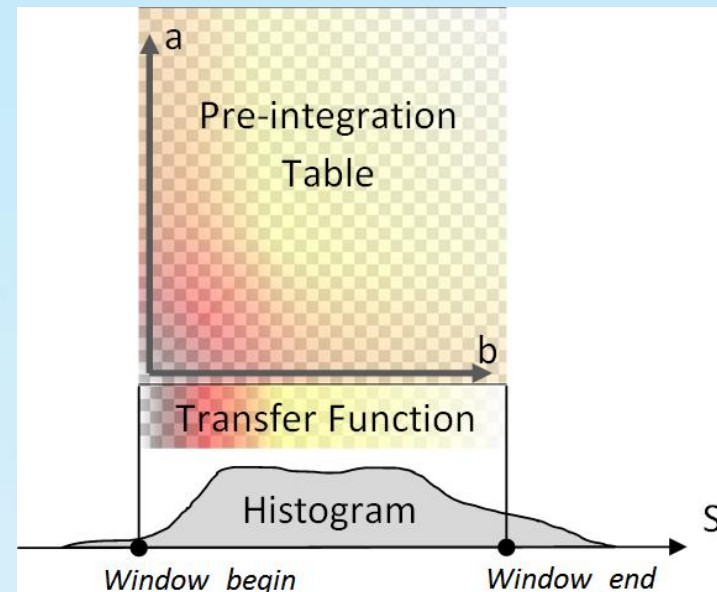
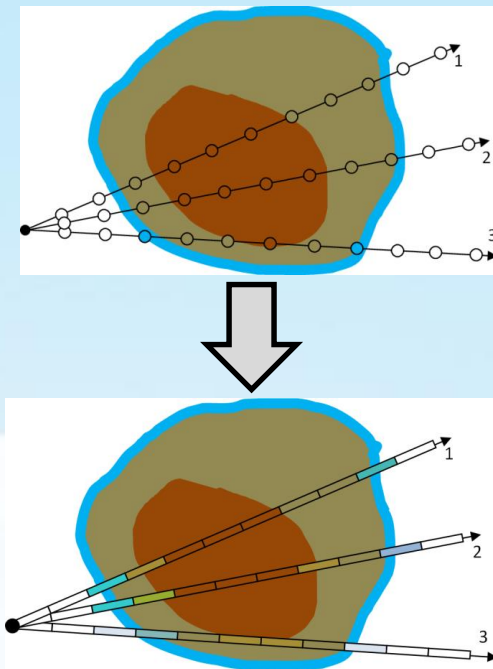


Старт со случайным сдвигом



Интегрирование с использованием таблиц. Предынтегрированный объёмный рендеринг (PDVR)

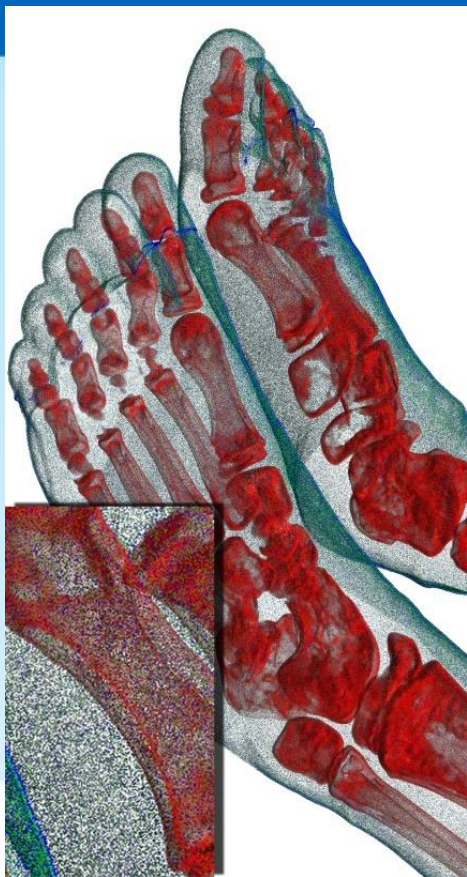
1. Любой отрезок по s характеризуется двумя значениями данных – выборки на его концах.
2. Цвета отрезков хранят в предынтегрированной таблице, вычисленной заранее на CPU (декомпозиция интегрирования - взятие интеграла по частям)
3. При классификации PDVR использует цвета отрезков по s , а не точек (предынтегрированная классификация)



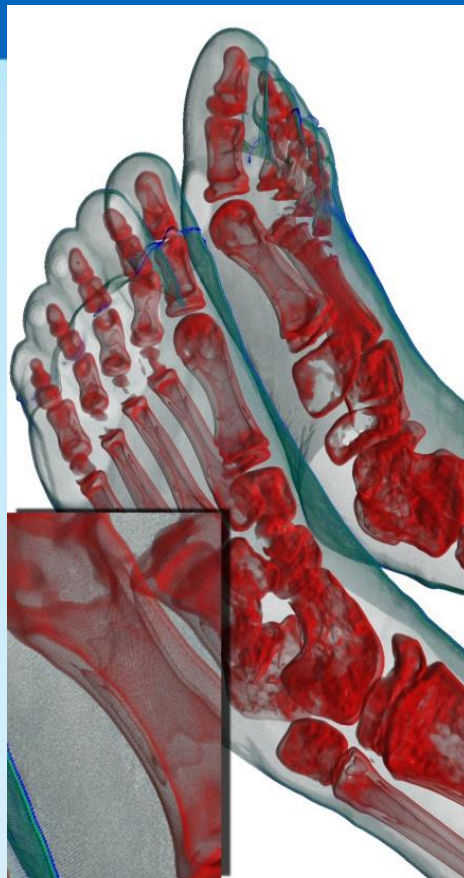
Transfer Function и соответствующая ей
предынтегрированная таблица



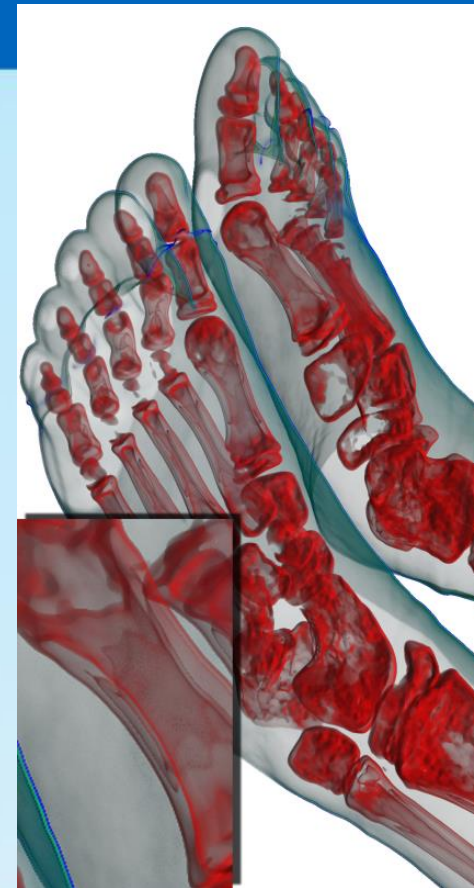
Улучшение качества при использовании PDVR



один кадр обычного
рендеринга (UDVR)
 $PSNR=12dB$



усреднение 60 кадров
обычного рендеринга
 $PSNR=27dB$

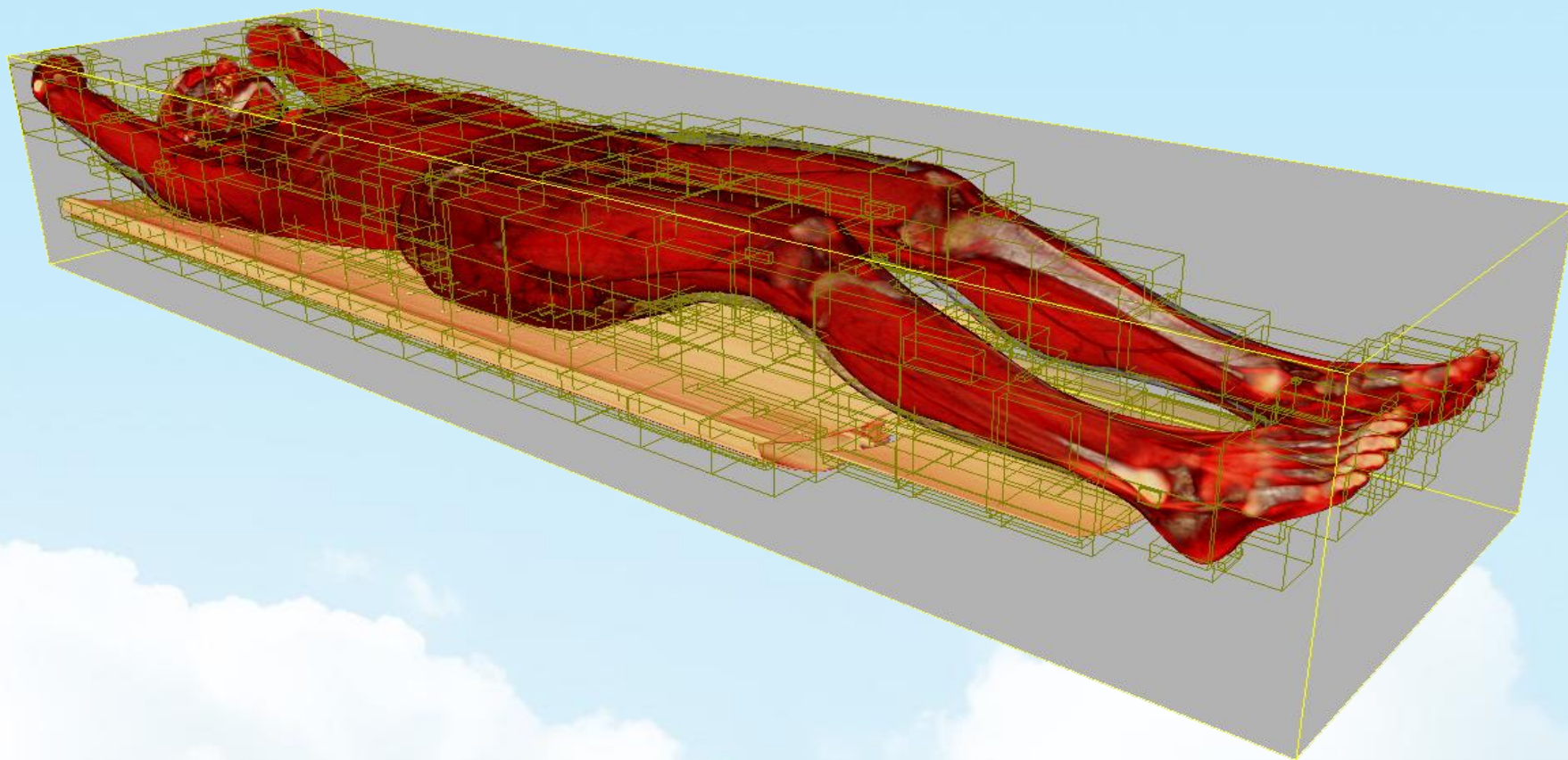


предынтегрированный
рендеринг (PDVR)
 $PSNR=36dB$

Частота выборки: 2

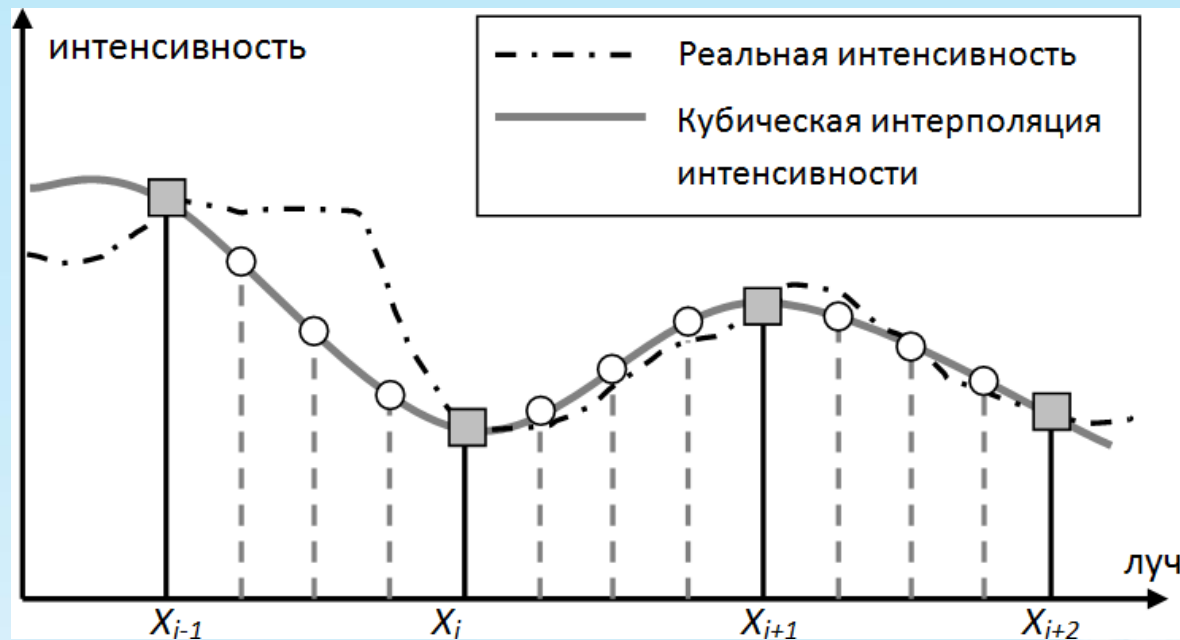


Блочный метод, правило обхода и перекрытие блоков





Метод виртуальных выборок с предынтегрированием



Известный метод виртуальных выборок дополнен заменой постклассификации на предынтегрированную классификацию



Количественная оценка качества визуализации

- 1) Исследованы оценки качества (дефектов) изображения, принятые в теории сигналов, 2D и 3D сжатии, в оценке качества видео (PSNR, SNR, SSIM)
- 2) Для задачи количественной оценки дефектов постклассификации в объёмной визуализации предлагается использовать логарифмическую оценку, подобную PSNR

Дисперсия цвета пикселя:

$$D(C(i,j)) = M|C(i,j) - M(C(i,j))|^2 \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} D(I(i,j)) \quad (2)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

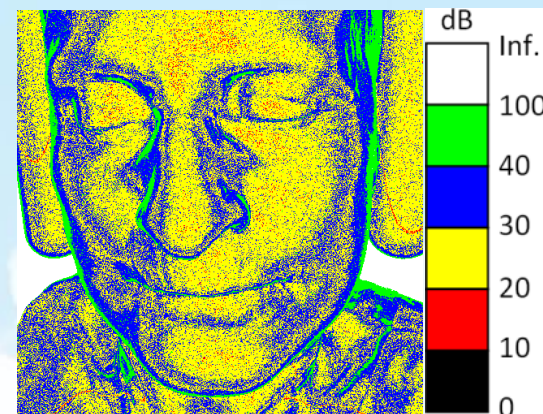
MSE – средняя квадратичная ошибка пикселя

N – число пикселей, не принадлежащих фону;

m, n – размеры окна вывода;



Результат рендеринга



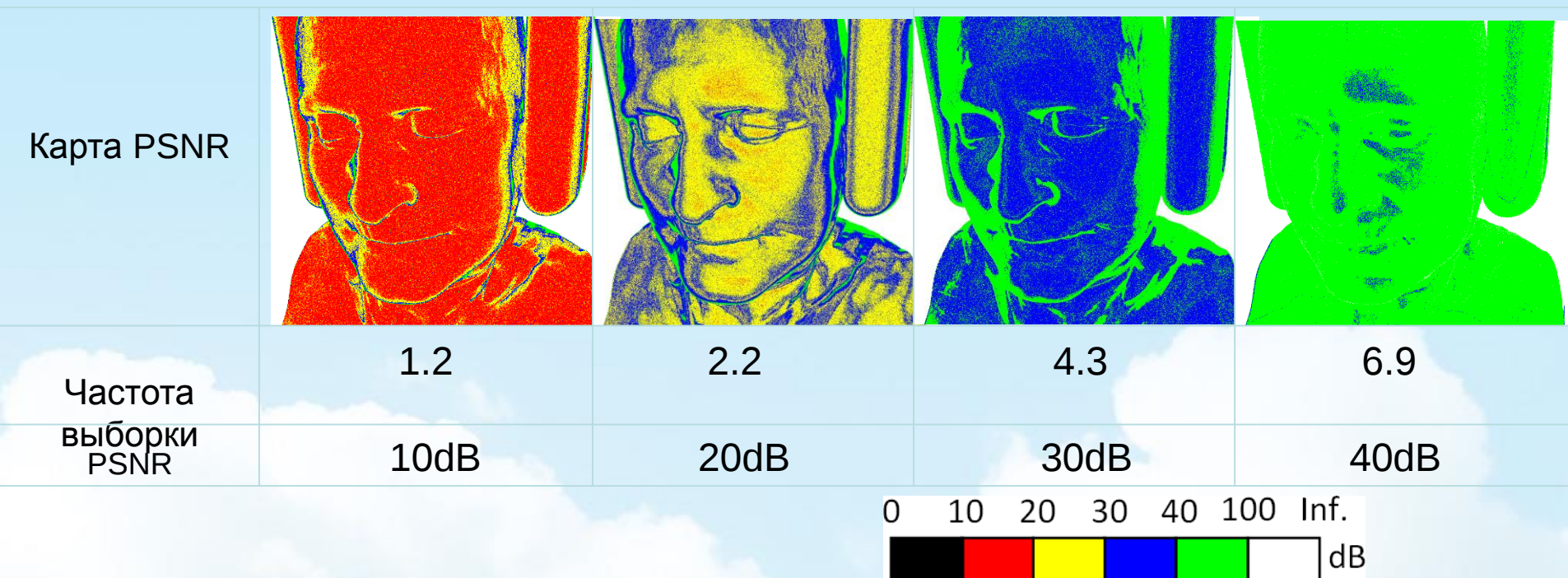
Карта PSNR



Качество рендеринга при различных частотах выборки. PSNR как мера качества

Вне зависимости от метода рендеринга значение PSNR характеризует качество рендеринга:

- 1) PSNR $\in [30\text{dB}, 40\text{dB}]$ – приемлемое качество
- 2) PSNR $> 40\text{dB}$ – улучшение качества практически незаметно
- 3) PSNR $< 30\text{dB}$ – шум сильно заметен



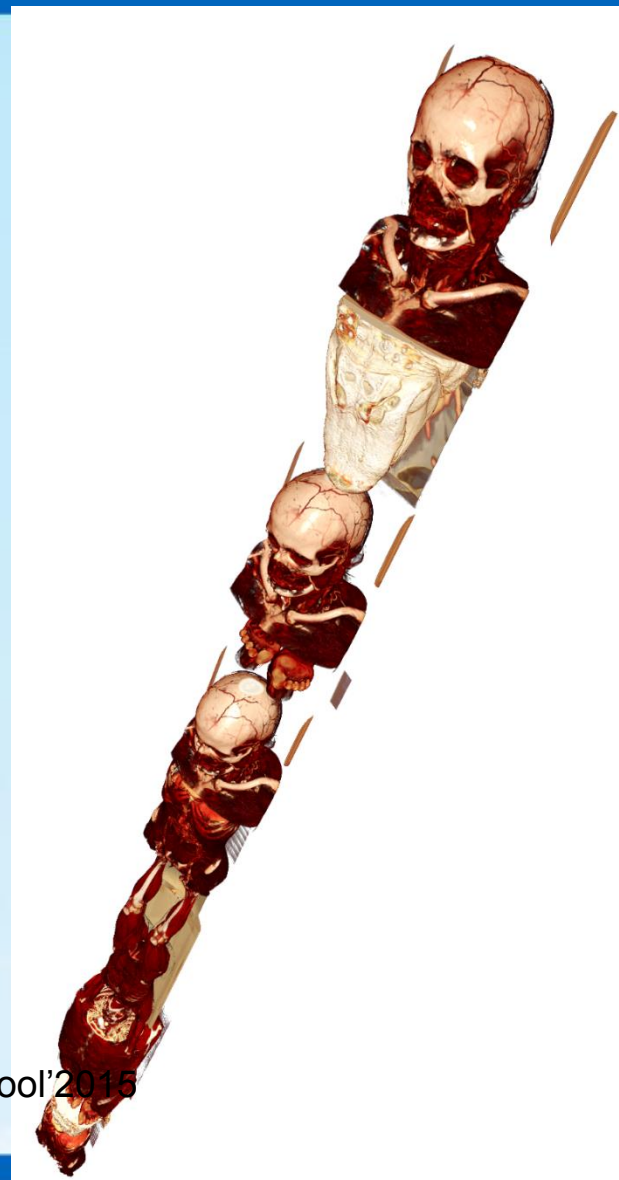
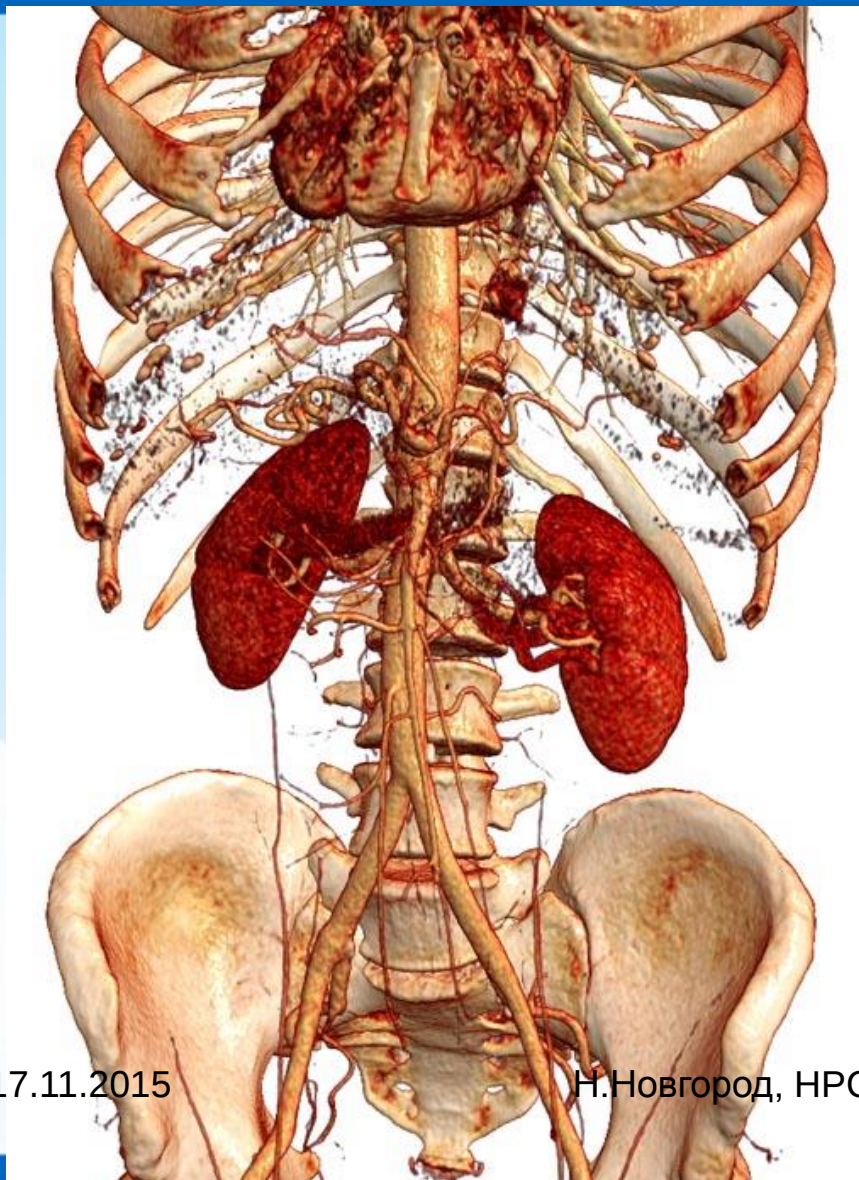


УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Медицинская 3D визуализация

Рекордная производительность и качество



17.11.2015

Н.Новгород, НРС-School'2015

41

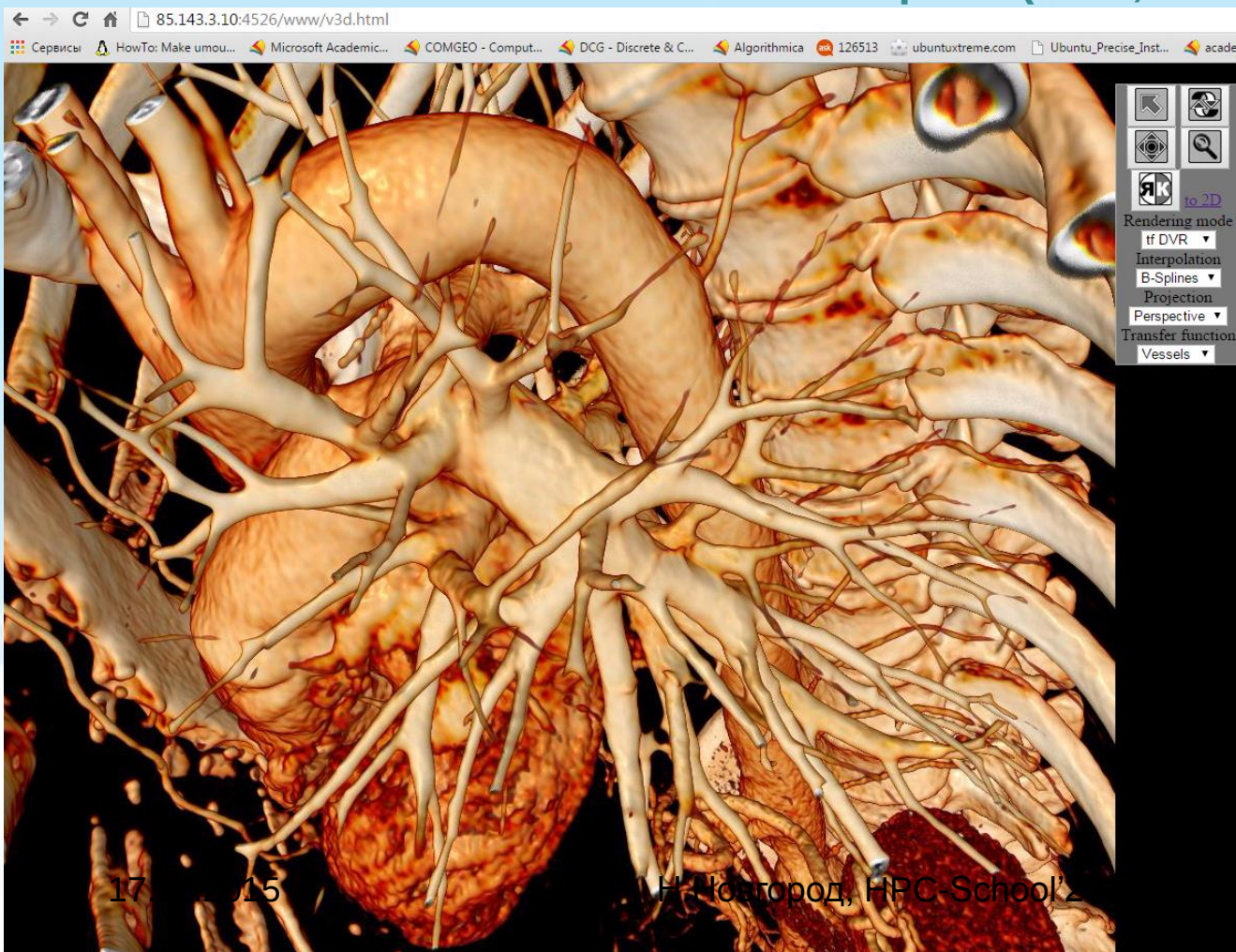


УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Перспективы 3D биомедицины на суперкомпьютерах

Персональные кабинеты и виртуальные анатомические столы как облачный сервис (UNN, 2013)



Основа цифровой медицины будущего

Действующий макет
<http://85.143.3.10:4526>

Международные аналоги
не имеют облачного
сервиса



Virtual anatomical
Anatomage Table
(USA, 2011)
www.anatomage.com



SECTRA table
(Sweden, 2012)

www.sectra.com/medical/visualization_table