

Расчёт переноса света в атмосфере в реальном времени, включая рассеяние Рэля и Ми и блокировку света препятствиями, для произвольной позиции наблюдателя

магистрант: Певзнер А.А.  
руководитель: Жидков Е.И. (SimEx)

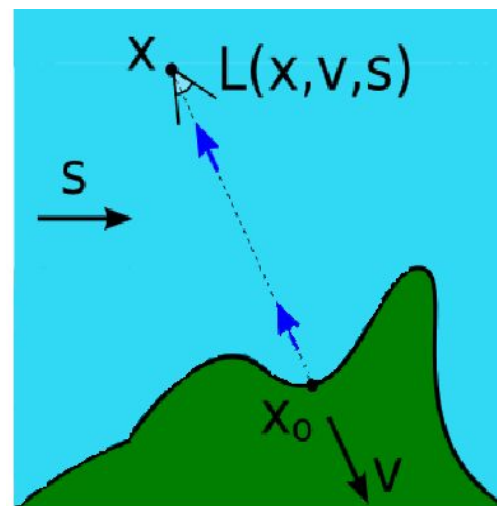
СПб АУ НОЦ ИТ РАН 2013

# Расчет освещенности

- Освещенность каждой точки атмосферы описывается следующей формулой:

$$L(x, v, s) = (L_0 + R[L] + S[L])(x, v, s)$$

$L$  - интенсивность света в точке  $x$ ,  
 $v$  - направление взгляда,  
 $s$  - направление солнечного света,  
 $L_0$  - солнечный свет,  
 $R[L]$  - свет, отраженный от Земли,  
 $S[L]$  - внешнее рассеяние света,  
 $x_0$  - точка на поверхности Земли.

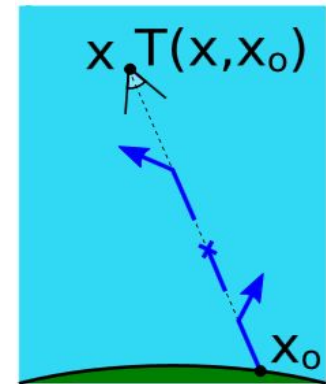


# Рассеяния Рэля и Ми

- Рассеяние Рэля:
  - на малых частицах (молекулы воздуха);
  - рассеивает более короткие длины волн;
  - объясняет голубой цвет неба.
- Рассеяние Ми:
  - на крупных частицах (аэрозоли воздуха);
  - рассеивает все длины волн в равной степени ;
  - объясняет серый цвет небо во время тумана.

- Ослабление света на пути следования

$$T(x, x_0) = \exp\left(-\int_x^{x_0} \sum_{i \in \{R, M\}} \beta_i^e(y) dy\right)$$



# Расчет освещенности

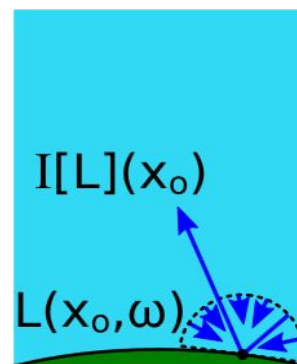
- Составляющая солнечного света:

$$L_0(x, \nu, s) = T(x, x_0) \cdot L_{sun} \text{ или } 0, s \neq \nu$$

- Отражения от Земли:

$$R[L](x, \nu, s) = T(x, x_0) I[L](x_0, s)$$

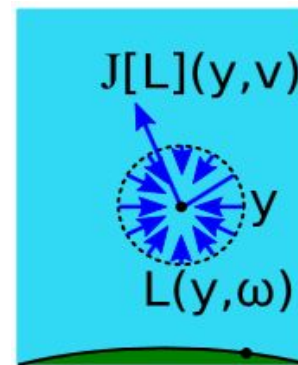
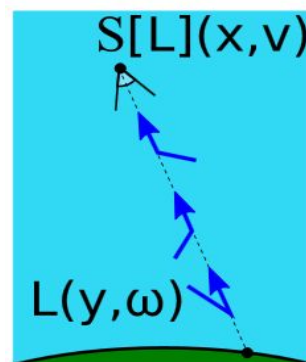
$$I[L](x_0, s) = \frac{\alpha(x_0)}{\pi} \cdot \int_{2\pi} L(x_0, \omega, s) \omega \cdot n(x_0) d\omega, \text{ или } 0$$



- Множественное рассеяние:

$$S[L](x, \nu, s) = \int_x^{x_0} T(x, y) J[L](y, \nu, s) dy$$

$$J[L](y, \nu, s) = \int \sum_{4\pi i \in \{R, M\}} \beta_i^s(y) P_i(\nu, \omega) L(y, \omega, s) d\omega$$



# Актуальность

- В отрасли аэрокосмической визуализации востребовано единое решение представления и визуализации атмосферы вне зависимости от позиции наблюдателя и высоты над уровнем моря.
- Корректные расчеты с учетом множественного рассеяния ресурсоемки по времени.
- Достаточная мощность процессоров и видеокарт появилась только в последнее время.

# Цель

Визуализация реалистичной модели атмосферы вне зависимости от позиции наблюдателя в режиме реального времени:

- естественная освещенность купола неба в зависимости от географического положения;
- натуральное отображение восхода и заката;
- наличие тумана и дымки на удаленных объектах;
- учет параметров атмосферы (влажность, загрязненность);
- не менее 60 fps на стандартном компьютере.

# Задачи

- Изучить имеющиеся методы визуализации, их недостатки.
- Выбрать метод визуализации, позволяющий получить реалистичность при расчетах в режиме реального времени.
- Разработать модуль, реализующий выбранный метод.

# Технические требования

- Входные данные:
  - параметры атмосферы (влажность, загрязненность),
  - карта высот,
  - описание характеристик поверхностей (цвет, отражательная способность).
- Требования:
  - режим реального времени (не менее 60 fps),
  - возможность обзора с произвольной позиции,
  - изменение цвета неба и видимость удаленных объектов в зависимости от географического положения,
  - работа на стандартном компьютере (CPU 2.1ГГц, RAM 3ГБ, GPU core 750МГц).



# Предыдущие методы

## визуализации

- Методы реального времени, игнорирующие множественное рассеяние света:
  - константная плотность атмосферы<sup>1</sup>;
  - без рассеяния Ми<sup>2</sup>;
- Расчет двукратного рассеяния<sup>3</sup>.
- Расчет множественного рассеяния - далек от режима реального времени<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> - Haber J., Magnor M., Seidel H.: "Physically-based simulation of twilight phenomena", 2005

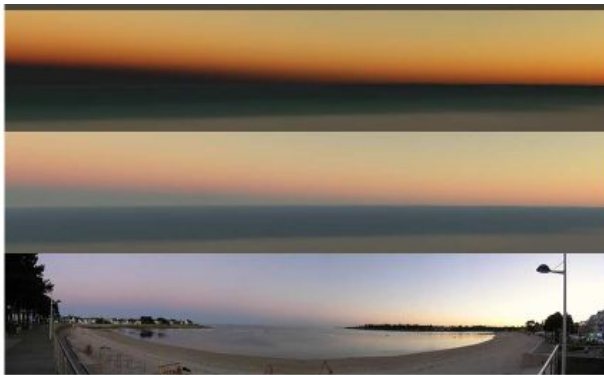
<sup>2</sup> - Riley K., Ebert D., Kraus M., Tessendorf J., Hansen C.: "Efficient rendering of atmospheric phenomena", 2004

<sup>3</sup> - Preetham A., Shirley P., Smit S.: "A practical analytic model for daylight", 1999

<sup>4</sup> - Nishita T., Dobashi Y., Kaneda K., Ya-Mashita H.: "Display method of the sky color taking into account multiple scattering", 1993

# Проблемы предыдущих методов

- Игнорирование множественного рассеяния света:
  - не дает реалистичность, например, в вечернее время суток.
- Расчет двукратного рассеяния:
  - подходит только для случая, когда наблюдатель на Земле.
- Решение физически-точного уравнения освещенности точки в пространстве:
  - не подходит для приложений реального времени.



- *Без учета множественного рассеяния.*
- *С учетом множественного рассеяния.*
- *Фотография.*

# Используемый метод

Bruneton E., Neyret F.

"Precomputed Atmospheric Scattering" 2008:

- визуализация атмосферы в режиме реального времени;
- учет множественного рассеяния Рэля и Ми;
- расчет из любой точки поверхности Земли и из открытого космоса;
- предварительный расчет в течение нескольких секунд;
- отсутствие открытой реализации.

# Идея используемого метода

- Выделение коэффициентов уравнения освещенности для предварительного расчета.
- Расчет коэффициентов рассеяния с определенным числом разбиений отрезка интегрирования.
- Сохранение вычислений в таблицы определенного размера для их повторного использования во время визуализации.

# Предварительные вычисления

Без учета рельефа местности

-для всех позиций наблюдателя и положения солнца

-для трех длин волн  $rgb$ :

-расчет ослабления света;

-расчет коэффициентов рассеяния для Рэлея и Ми;

-расчет однократно отраженного/рассеянного прямого солнечного света;

-расчет для  $i$  от 2 до 4:

-  $i$ -кратно отраженного света;

-  $i$ -кратно рассеянного света.

# Результаты вычислительной части

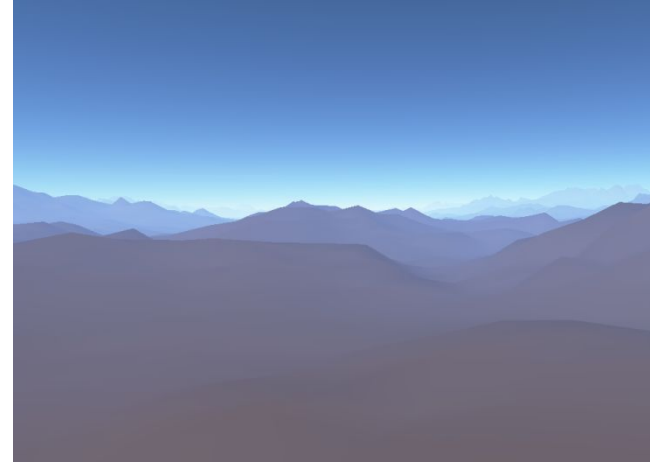
- Реализация предварительных расчетов на GPU:
  - автоматическое распараллеливание;
  - расчет для конечного числа точек;
  - время предварительных расчетов: 3..20 секунды (в зависимости от мощности видеокарты).
  
- Сохранение расчетов в текстуры:
  - интерполяция (GPU);
  - быстрая выборка (GPU);
  - фильтрация результатов (GPU);
  - объем памяти ~10MB (GPU).

# Общие результаты

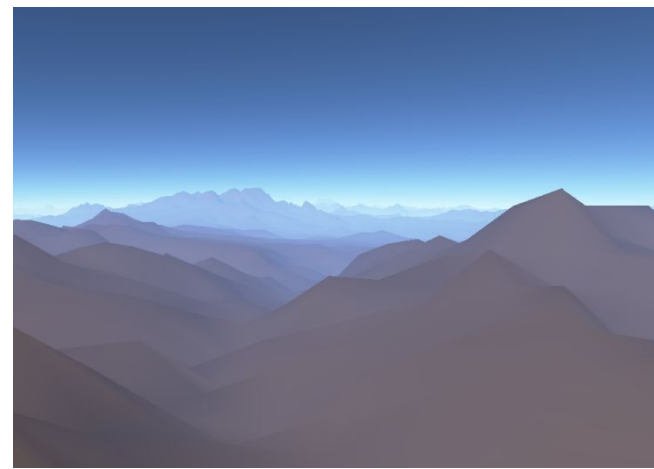
- Трехмерная визуализация атмосферы в режиме реального времени. Более 60 fps (в зависимости от мощности видео карты).
- Навигация наблюдателя в пространстве.
- Отображение рельефа, теней.
- Изменение цвета неба и видимости объектов в зависимости от географического положения наблюдателя.
- Возможность изменения свойств среды (влажность, загрязненность, туман).
- Перерасчет коэффициентов рассеяния при изменении параметров атмосферы.
- Интеграция системы расчетов в тренажер гражданской авиации

# Определение точности расчетов

5сек:



23сек:

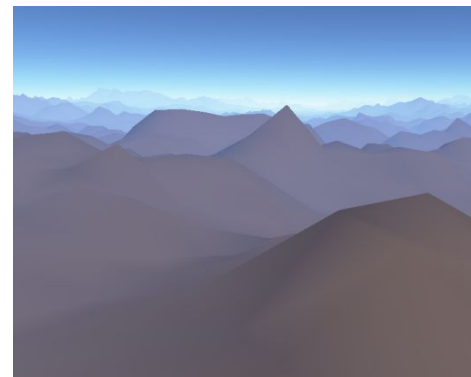
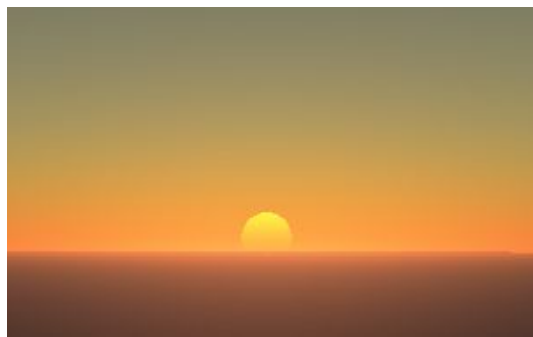




## Фотографии:



## Результаты:



www.fraps.com



Спасибо за внимание



# Рассеяния Рэлея и Ми

- Рассеяние Рэлея:

- на малых частицах (молекулы воздуха);
- рассеивает более короткие длины волн;
- объясняет голубой цвет неба.

$$\beta_R^s(h, \lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)}{3N\lambda^4} \cdot e^{-\frac{h}{H_R}} \quad P_R(\mu) = \frac{3}{4} \cdot (1 + \mu^2), \quad \text{где } \mu = \cos\theta$$

- Рассеяние Ми:

- на крупных частицах (аэрозоли воздуха);
- рассеивает все длины волн в равной степени ;
- объясняет серый цвет небо во время тумана;

$$\beta_M^s(h, \lambda) = \beta_M^s(0, \lambda) \cdot e^{-\frac{h}{H_M}} \quad P_M(\mu) = \frac{3}{8\pi} \cdot \frac{(1 - g^2)(1 + \mu^2)}{(2 + g^2)(1 + g^2 + 2g\mu)^{\frac{3}{2}}}, \quad \text{где } \mu = \cos\theta$$

# Используемые оптимизации

- Параметризация вычисляемых коэффициентов:  
 $r = ||x||$ ,  $\mu = v \cdot x / r$ ,  $\mu S = s \cdot x / r$ ,  $\eta = v \cdot s$   
 $r$  - расстояние до наблюдателя,  
 $\mu$  - косинус угла обзора,  
 $\mu S$  - косинус угла между направлением на наблюдателя и солнцем,  
 $\eta$  - косинус угла между направлением взгляда и солнцем.
- Численное интегрирование с константным числом разбиений для каждого коэффициента.
- Сохранение коэффициентов в текстуры определенных размеров.
- Хранение только красной компоненты для рассеяния Ми.

# Схема алгоритма вычислений

Визуализация (с учетом рельефа местности):

- расчет солнечной составляющей
- расчет однократного отражения от Земли, суммирование с многократными
- получение множественного рассеяния из соответствующей текстуры
- вывод итогового значения, являющегося суммой рассчитанных