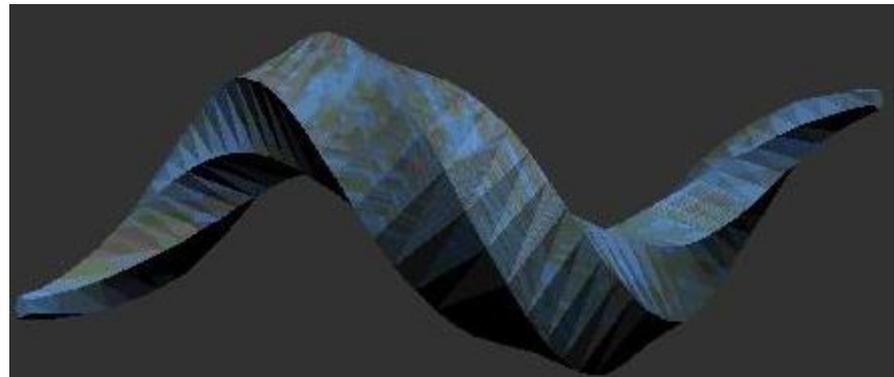
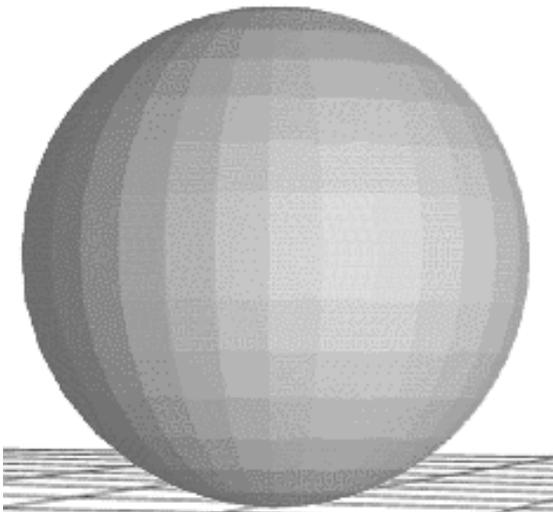


# *Освещение*

При создании реалистичных изображений необходимо закрашивать поверхности.

Модель с плоским закрашиванием заключается в однородном закрашивании каждого треугольника одним цветом (обычная заливка). В результате объект предстает как множество плоских граней.



---

*Равномерная закраска* (flat shading) позволяет получить более реалистичное изображение, чем каркасный или неосвещенный методы визуализации.

При равномерной закраске учитывается освещенность грани. Для каждой грани вычисляется нормаль, которая применяется для вычисления параметров освещенности всей грани. Равномерная закраска требует большего объема вычислений, чем каркасный и неосвещенный методы.

---

Свет, падающий на поверхность от источника света, может быть поглощен, отражен или пропущен.

Свет, отраженный от поверхности, может быть диффузным и зеркальным. Свойства отраженного света зависят от формы и направления источника света, а также от ориентации поверхности и ее свойств.

Для нескольких точечных источников используют эмпирическую формулу косинусов Ламберта

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_{1j}}{d + k} (k_d \cos \phi_j + k_s \cos^p \alpha_j)$$

$I_a k_a$

Первый член в сумме отвечает за фоновое освещение. Оно одинаково для всех точек поверхности.

( $I_a$  - интенсивность рассеянного света,

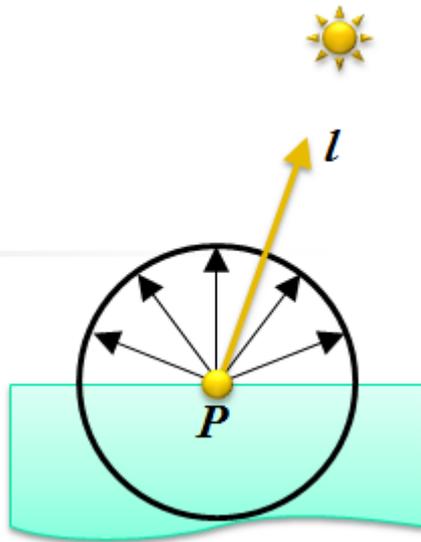
$k_a$  - коэффициент светового отражения, показывающий, какая часть энергии отражается объектом (чем коэффициент меньше, тем объект темнее).

В реальных сценах обычно нет полностью затемненных объектов. Следует учитывать фоновую подсветку, освещение рассеянным (ambient) светом, отраженным от других объектов.

$$\sum_{j=1}^m \frac{I_{1j}}{d + k} k_d \cos \phi_j$$

Первый множитель во второй сумме отвечает за диффузное отражение.

( $I_1$  – интенсивность точечного источника;  $d$  – расстояние от объекта до источника освещения;  $k$  – произвольная постоянная (для большей естественности) ;  $k_d$  – коэффициент диффузного отражения ( $k_d = \text{const}$ ,  $[0-1]$ ,  $\theta$  – угол между направлением на источник света и нормалью к поверхности.)



Этот вид отражения присущ матовым поверхностям. Матовой можно считать такую поверхность, размер шероховатостей которой уже настолько велик, что падающий луч рассеивается равномерно во все стороны. Такой тип отражения характерен, например, для гипса, песка, бумаги. Диффузное отражение описывается **законом Ламберта**: интенсивность отраженного света пропорциональна косинусу угла между направлением на точечный источник света и нормалью к поверхности

$$\sum_{j=1}^m \frac{I_{1j}}{d + k} k_s \cos^p \alpha_j$$

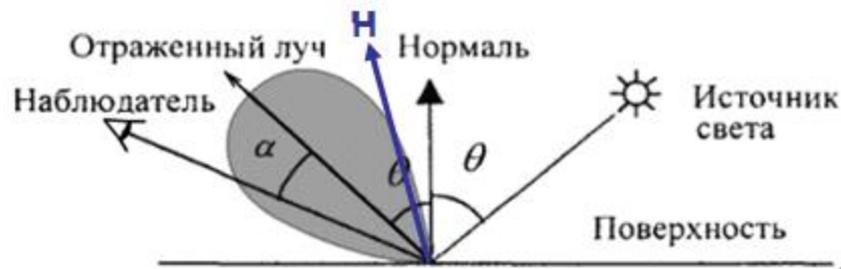
Второй сомножитель отвечает за зеркальное отражение

$k_s$  – экспериментальная постоянная,

$\alpha$  – угол между отраженным лучом и вектором наблюдения.

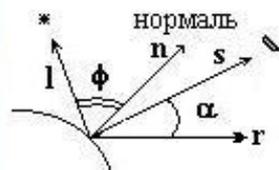
$p$  – степень, аппроксимирующая пространственное распределение света. Называется глянецность (glossiness), зависит от качества полировки. Его малые значения ( $<100$ ) соответствуют наиболее распространенным материалам с обычными оптическими свойствами, а значения в диапазоне от 100 до 500 соответствуют отражению от большинства металлических поверхностей.

Поверхность считается *идеально зеркальной*, если глубина ее шероховатостей  $h \ll \lambda$  (длины волны отражаемого света  $\cong 0.5$  мкм). Световая энергия падающего луча отражается только по линии отраженного луча (рассеивание отсутствует).



Если  $h$  порядка  $\lambda$ , то чем больше длина волны, тем лучше отражение. При наличии существенных шероховатостей имеется зона рассеивания, форма которой, как правило, симметрична относительно линии зеркально отраженного луча.

Эта модель отражения называется эмпирической моделью Фонга.



$\alpha$  - угол между отраженным лучом и вектором наблюдения,

$\theta$  - угол между направлением на источник света и нормалью к поверхности

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^m \frac{I_{l_j}}{d + k} (k_d \cos \phi_j + k_s \cos^p \alpha_j)$$

Для расчетов, формула слишком сложна, и ее так или иначе упрощают или сводят расчет для всей поверхности к расчету по небольшому набору точек и интерполяции цвета поверхности на их основе.

В процедурах закрасивания по Гуро и по Фонгу цвет интерполируется относительно границ треугольника, что приводит к более реалистичной и непрерывной закраске объекта.

---

## *Закраска методом Гуро (Gouraud shading)*

Наиболее простым является метод **Гуро**, который основывается на определении освещенности грани в ее вершинах с последующей билинейной интерполяцией найденных величин на всю грань.

Это приводит к сглаживанию изображения сеток, и отдельные грани становятся неразличимыми.

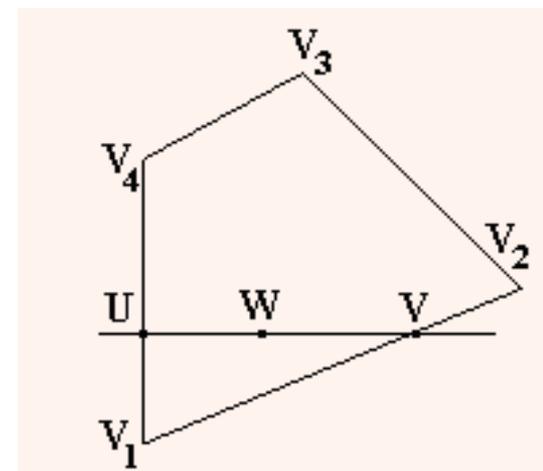
---

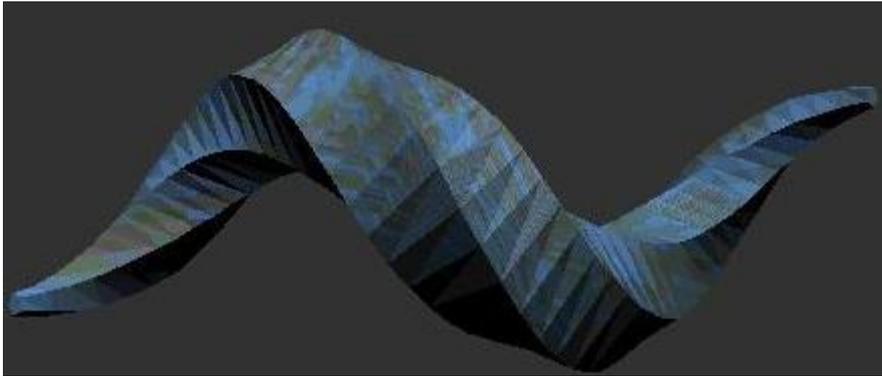
Рассмотрим четырехточечную грань. Пусть интенсивности в ее вершинах известны и равны  $I_{v1}$ ,  $I_{v2}$ ,  $I_{v3}$ ,  $I_{v4}$ . Пусть  $W$  – произвольная точка грани. Проведем через нее горизонтальную прямую.

$$I_W = (1-t) I_U + t I_V, \text{ где } t = \frac{|UW|}{|UV|}, 0 \leq t \leq 1.$$

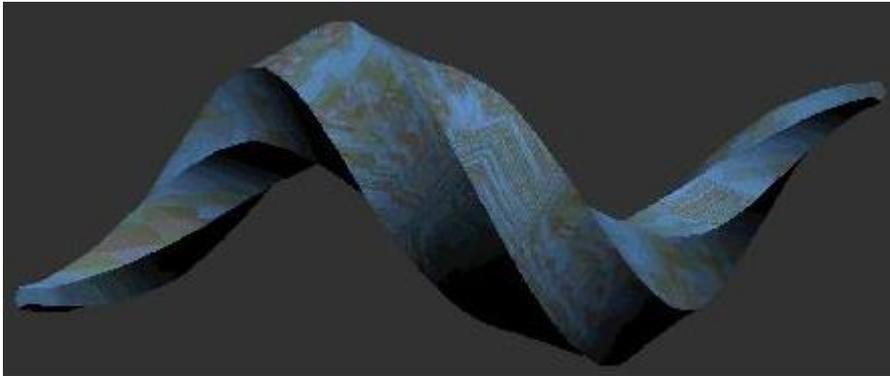
$$I_U = (1-U) I_{v4} + U I_{v1}, \text{ где } U = \frac{|V_4 U|}{|V_4 V_1|}, 0 \leq U \leq 1.$$

$$I_V = (1-V) I_{v1} + V I_{v2}, \text{ где } V = \frac{|V_1 V|}{|V_1 V_2|}, 0 \leq V \leq 1.$$





*Изображение, полученное методом равномерной закраски*



*Закраска по методу Гуро*

Закраска методом Гуро позволяет получить реалистичные изображения, но может сделать объекты неотчетливыми и смутными.

Поскольку используются нормали к вершинам и усредненные значения для грани, метод Гуро требует большего объема вычислений, чем равномерная закраска.

## *Закраска методом Фонга (Phong shading)*

Закраска по *методу Фонга* является усовершенствованием метода Гуро. Подобно методу Гуро.

В этом методе интерполируются значения вектора внешней нормали, которое затем используется для вычисления интенсивности пиксела. Поэтому закрапка *Фонга* требует заметно большего объема вычислений. Но изображение получается более близким к реалистичному.

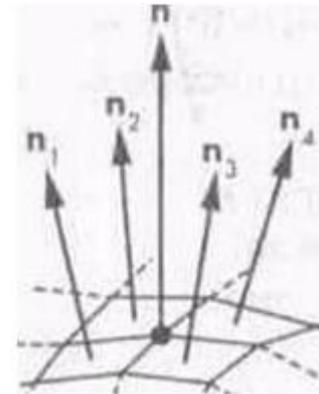
## Схема интерполяции, аналогична интерполяции в закраске Гуро.

Для определения вектора нормали  $n_W$  в точке  $W$  проводим через эту точку горизонтальную прямую и используя значения векторов  $n_U$  и  $n_V$  в точке пересечения  $U$  и  $V$  с ребром грани получаем

$$n_W = \frac{(1-t)n_U + tn_V}{|(1-t)n_U + tn_V|}, \quad \text{где } t = \frac{|UW|}{|UV|}, \quad 0 \leq t \leq 1.$$

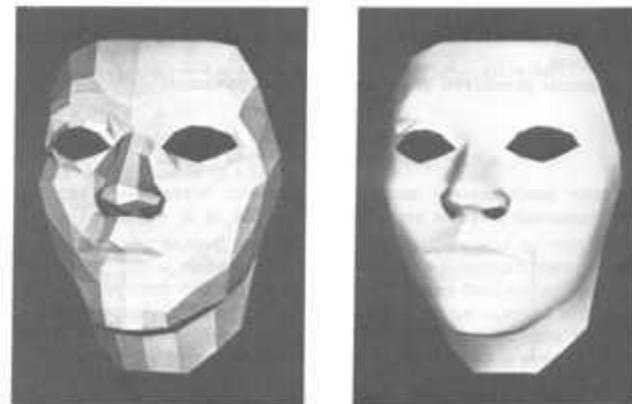
$$n_U = (1-U)n_{v4} + Un_{v1}, \quad \text{где } U = \frac{|V_4U|}{|V_4V_1|}, \quad 0 \leq U \leq 1.$$

$$n_V = (1-V)n_{v1} + Vn_{v2}, \quad \text{где } V = \frac{|V_1V|}{|V_1V_2|}, \quad 0 \leq V \leq 1.$$



Метод Гуро обеспечивает непрерывное изменение интенсивности при переходе от одной грани к другой без разрывов и скачков.

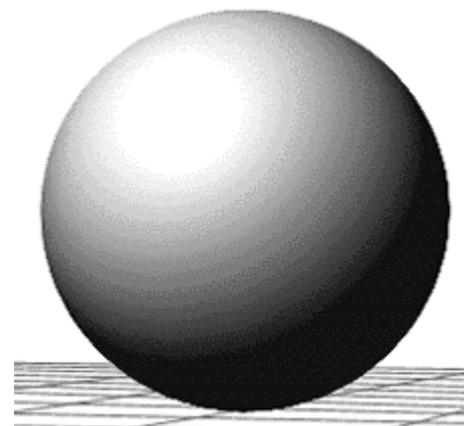
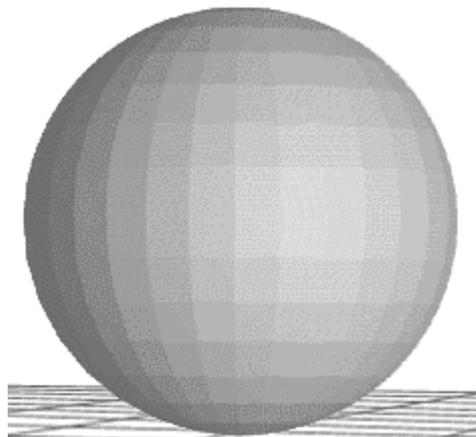
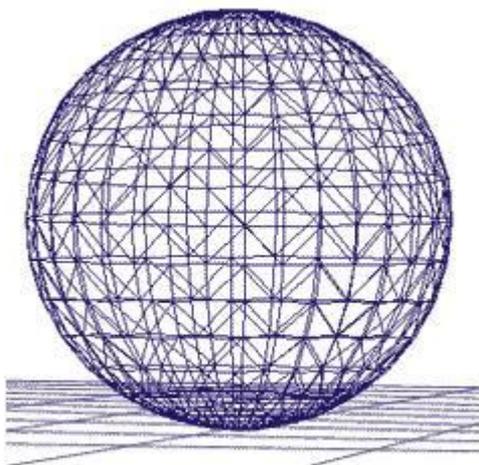
Слева - однотонная закраска,  
справа - закраска Гуро.



Закраска Фонга требует заметно большего объема вычислений. Но изображение получается более близким к реалистичному.

Слева - однотонная закраска,  
в центре - закраска Гуро,  
справа - закраска Фонга.





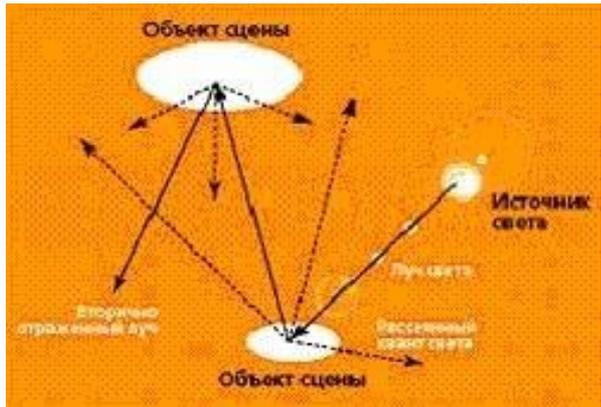
*Сфера с окрашиванием по Фонгу*

## *Трассировка лучей (ray-tracing)*

Одним из недостатков традиционного подхода при формировании трехмерных изображений является весьма приближенная модель освещения. Упрощенная модель принципиально не позволяет получить многих эффектов, необходимых для реалистичного с точки зрения освещения изображения сцены. В первую очередь — так называемого вторичного освещения, когда некоторые затененные части сцены слегка освещены отраженным светом. Преломления и отражения лучей света, распространение света в среде и другие световые эффекты тоже не рассчитываются.

Одним из наиболее распространенных и наглядных методов построения реалистичных изображений является **метод трассировки лучей** (RayTracing, рэйтрейсинг), позволяющий строить фотореалистичные изображения сложных сцен с учетом таких эффектов как отражение и преломление.

*Трассировка лучей* позволяет получить наиболее реалистичное изображение по сравнению с любым другим методом визуализации.



Рассмотрим каким путем возникает реальное изображение. Выпустим из каждого источника света пучок лучей во все стороны и мысленно проследим за ним. При попадании луча на границу объекта выпускаем из точки попадания отраженный и преломленный лучи и отслеживаем их и все порожденные ими лучи.

Описанный процесс называется *прямой трассировкой лучей*.

Метод прямой трассировки полностью универсален благодаря приближенной к реальности модели освещения.

Однако, требуются огромные вычислительные затраты. Для получения одного изображения могут потребоваться часы и даже дни.

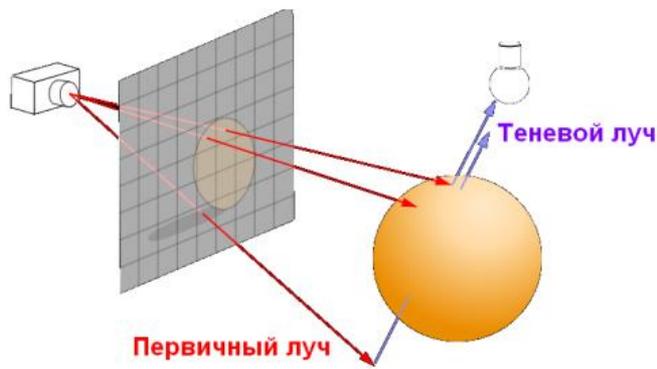
---

Основным недостатком такого способа является то, что большая часть рассматриваемых лучей не попадает в глаз.

Поэтому чаще используется модификация метода, называемая *обратной трассировкой лучей*. Суть его в том, что лучи света рассчитываются и трассируются в обратном направлении — как бы из глаза наблюдателя. Рассмотрим только те лучи, которые попадают в глаз.

Для этого проследим путь, который мог бы пройти луч света.

---

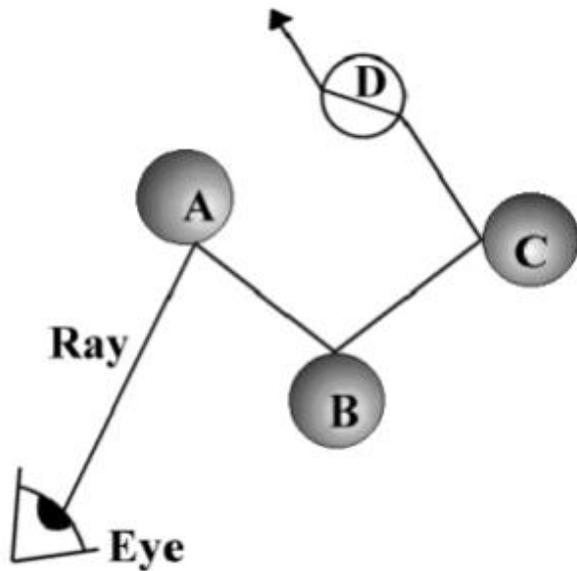


Будем идти вдоль этого луча от глаза до точки ближайшего пересечения с каким-либо объектом сцены. Цвет соответствующей точки будет определяться долей световой энергии, попадающей в эту точку и покидающей ее в направлении глаза.

Представьте экран, через каждый пиксел которого в направлении от наблюдателя проводится луч и трассируется до пересечения с объектом сцены.

Далее рассчитывается отраженный луч (в направлении на источник света), чтобы учесть световую энергию, которая может быть принесена в направлении наблюдателя.

Отраженный луч, то есть, на самом деле, луч, который отразился и попал в глаз наблюдателя, анализируется аналогично. И далее рекурсивным образом. Так можно рассчитывать вторичное освещение, отражение и преломление света.



Глубина рекурсии характеризует качество аппроксимации освещения — чем больше отраженных лучей проанализировано, тем выше качество и дольше процесс вычислений.

Обратную трассировку лучей можно использовать для реалистичной компьютерной визуализации. Она нашла широкое применение в пакетах трехмерного компьютерного моделирования, таких как Discreet 3ds max, Lightwave и т.п. Причем в этом случае расчет производится силами только центрального процессора компьютера (или нескольких процессоров в многопроцессорных системах), без привлечения трехмерных OpenGL - возможностей графических ускорителей.





Метод трассировки лучей более ориентирован на физическое моделирование, но благодаря высокой реалистичности используется в профессиональных задачах — спецэффектах в кино, телевизионных роликах, мультфильмах, при моделировании проектируемых объектов (автомобили, интерьеры, здания)