

# Методы за́краски

Лекция 9

Иванова Юлия Александровна

# Расчет интенсивности отраженного света

Для придания реалистичности изображениям кроме удаления невидимых линий и поверхностей необходимо правильно отразить свет от присутствующих на сцене объектов.

# Расчет интенсивности отраженного света

Свет от поверхности объекта может исходить в двух случаях:

объект его отражает,  
объект свет излучает.

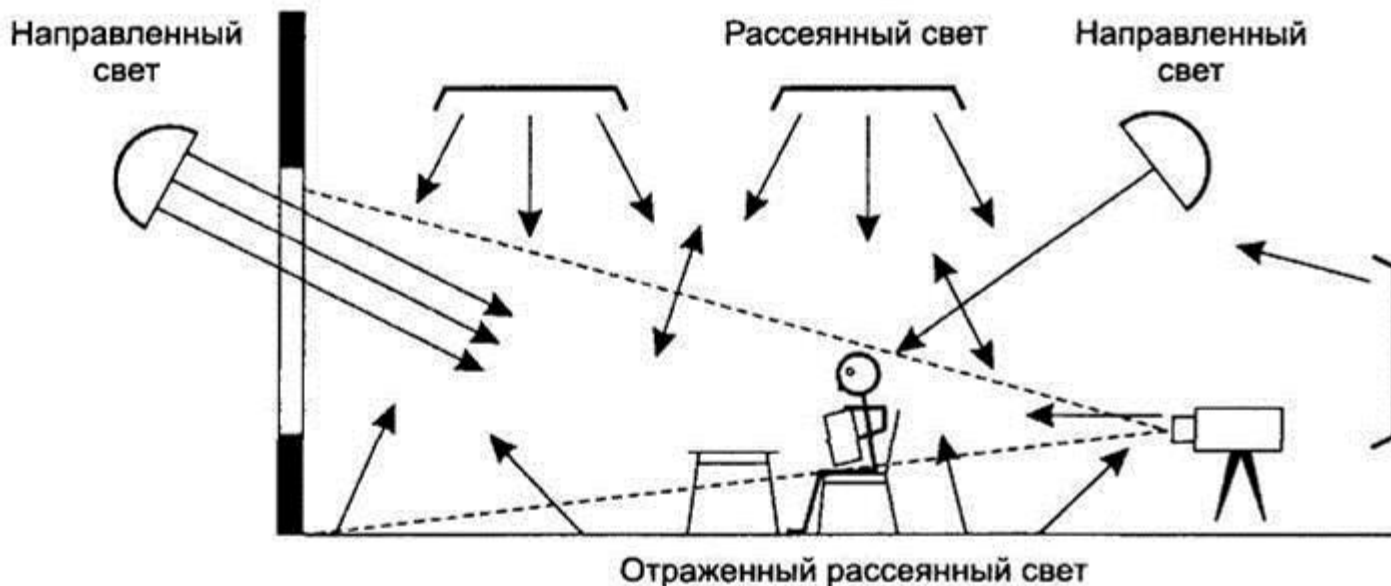
В некоторых случаях источник, излучающий свет, может одновременно отражать свет, падающий на него от других источников освещения.

В большинстве приложений компьютерной графики рассматриваются четыре основных типа источников света:

*фоновое освещение,  
точечное освещение,  
прожекторы и  
удаленные источники света.*

# Фоновое освещение

- Обеспечивается равномерный свет по всему пространству. Примером фоновое освещение является *рассеянный свет*.
- Рассеянный свет формируется в результате многочисленных отражений от различных многочисленных излучающих и отражающих поверхностей. В этом случае каждая точка поверхности объекта освещается одинаково, а функция освещенности каждой точки поверхности характеризуется только заданной интенсивностью освещенности.



# Точечное освещение

Идеальный точечный источник света излучает свет во всех направлениях одинаково. **Освещенность некоторой точки поверхности объекта  $L$  в этом случае обратно пропорциональна квадрату расстояния от этой точки до точечного источника света.**

$$L \sim 1/r^2$$

Изображение объектов, сформированное только с учетом точечных источников света, ***не дает реального представления об объекте***, т.к. получаются слишком контрастными. Реальный осветительный прибор имеет конкретные размеры, что приводит к более плавным переходам от светлых участков к затемненным и наоборот.



# Прожекторы

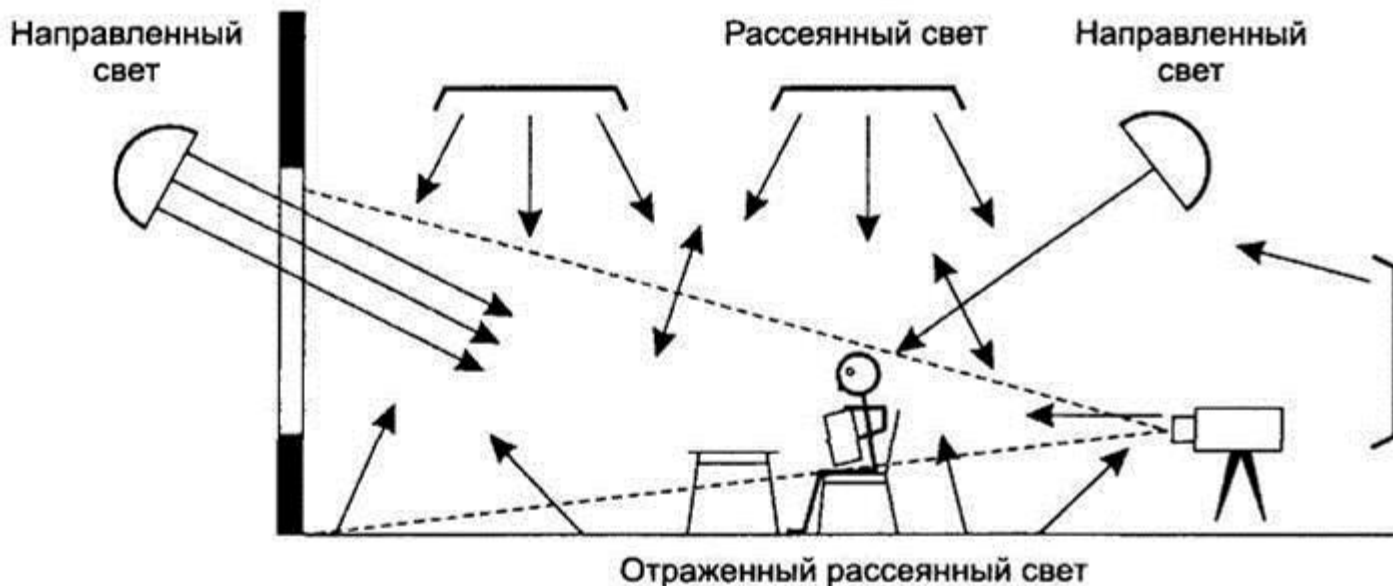
Источник света типа прожектор отличается тем, что излучает свет направленным пучком. Смоделировать прожектор можно с помощью точечного источника света, ограничив для него направление распространения лучей. В этом случае формируется поток света в виде конуса. В реальных условиях интенсивность освещения в конусе излучения является функцией от угла  $\theta$  между осью конуса и конкретным вектором, направленным от прожектора на конкретную точку освещаемой поверхности.



# Удалённый источник

Удаленный источник света характеризуется тем, что все испускаемые им лучи можно считать параллельными. Примером такого источника является солнце.

В графической системе вычисления, связанные с обработкой удаленного источника света, выполняются значительно быстрее, чем обработка точечных источников или прожекторов.



# Модели отраженного света

Рассмотрим, как можно определить степень освещенности (цвет) изображаемой поверхности в соответствии с интенсивностью отраженного света при учете взаимного расположения поверхности, источника света и наблюдателя.



# Отражение фонового света- рассеянный свет

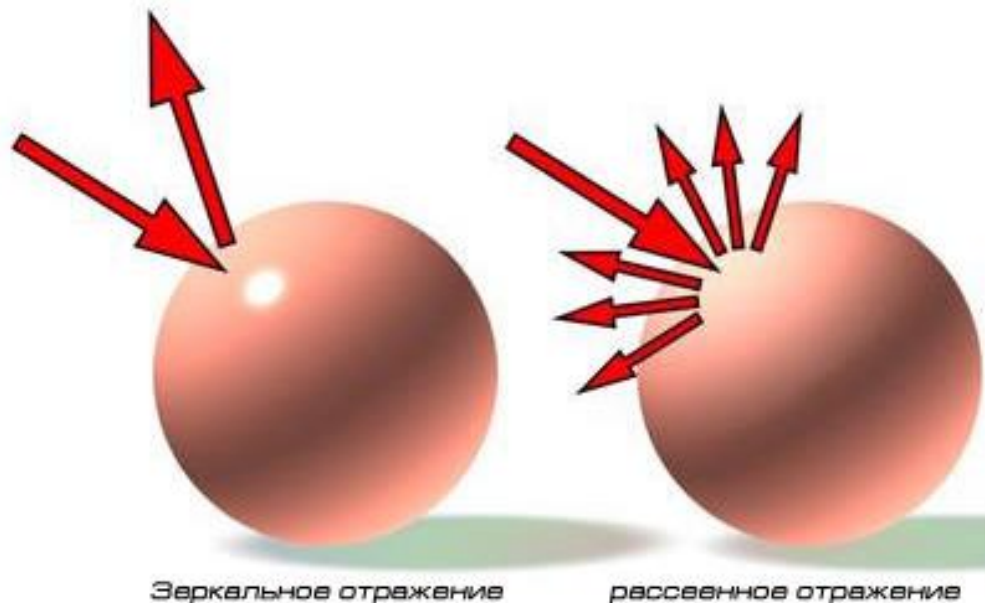
- Интенсивность падающего на поверхность фонового света  $I_{\phi}$  одинакова во всех точках этой поверхности. Частично энергия этого света поглощается материалом поверхности, а частично отражается.
- Поэтому интенсивность отраженного света в этом случае определяется по формуле

$$I_{отр} = K_{\phi} \times I_{\phi},$$

где степень отражения рассеянного света определяется коэффициентом  $K_{\phi}$  ( $0 \leq K_{\phi} \leq 1$ ), а  $I_{\phi}$  – интенсивность рассеянного света.

# Отражение от точечного источника

- Интенсивность отраженного света в данном случае будет зависеть от типа поверхности. Принято различать 2 различных типа поверхностей:
  - Матовая.
  - Глянцевая.



# Отражение от точечного источника.

## Матовые поверхности

- Матовые поверхности обладают свойством **диффузного отражения**, т. е. равномерного по всем направлениям рассеивания света. Поэтому кажется, что поверхности имеют одинаковую яркость независимо от угла обзора.
- Для таких поверхностей справедлив закон косинусов Ламберта. Освещенность вычисляется по формуле:

$$I_d = I_p \times k_d \times \cos \theta.$$

- При этом количество отраженного света не зависит от положения наблюдателя.

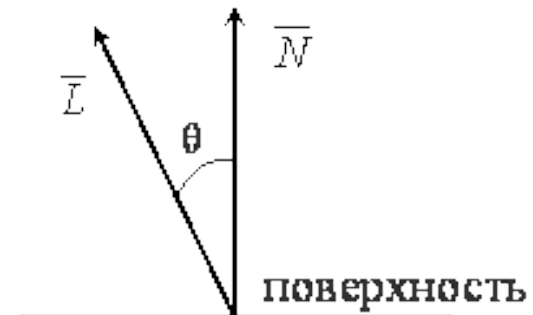


Рис. 1. Падающий свет и нормаль к поверхности

# Отражение от точечного источника.

## Матовые поверхности

- Освещенность рассеянным светом вычисляется по формуле:

$$I_d = I_p \times k_d \times \cos \theta.$$

Значение коэффициента диффузного отражения  $k_d$  является константой в диапазоне (0, 1) и зависит от материала.

Если векторы  $\vec{L}$  и  $\vec{N}$  нормированы, то, используя скалярное произведение, формулу освещенности можно записать так:

$$I_d = I_p \times k_d \times (\vec{L} \times \vec{N}).$$

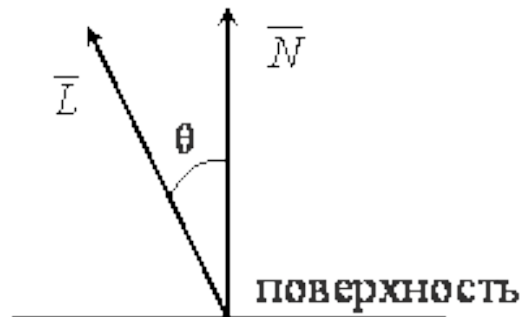


Рис. 1. Падающий свет и нормаль к поверхности

# Учёт расстояния до наблюдателя

Энергия падающего света убывает пропорционально квадрату расстояния ( $R$ ), которое свет проходит от источника до поверхности и обратно к глазу наблюдателя.

$$I_D = \frac{I_d}{R^2}.$$

Когда источник света в бесконечности ( $R \rightarrow \infty$ ), большей реалистичности можно добиться, если заменить  $R^2$  на  $(r+K)$ , где  $K$  – константа, а  $r$  – расстояние от центра проекции до поверхности

$$I_D = \frac{I_d}{(r+K)}.$$

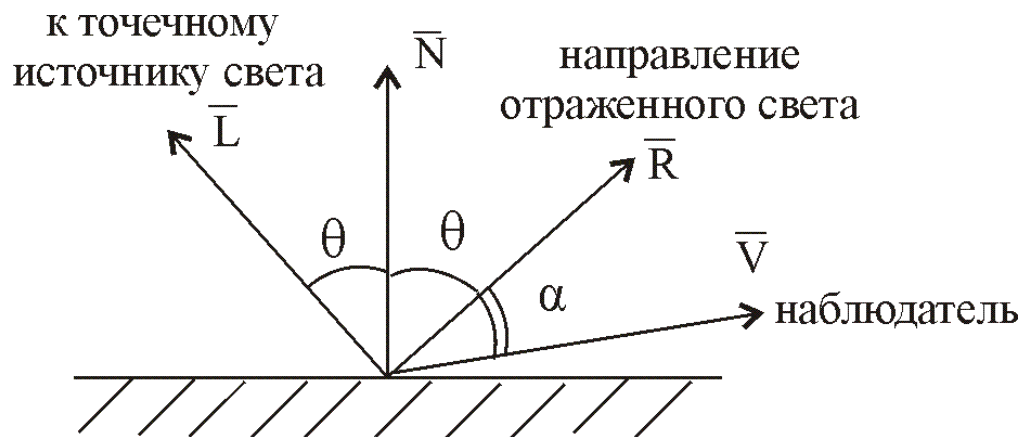
# Отражение от цветных поверхностей

- Для представления диффузионного отображения от цветных поверхностей уравнения записываются отдельно для красного, зеленого и синего цветов. Соответствующие коэффициенты диффузионного отражения  $K_{dk}$ ,  $K_{dz}$ ,  $K_{dc}$ . Для красной компоненты уравнение запишется в следующем виде:

$$I_{DK} = \frac{I_{dk}}{r + K} = I_{ck} K_{dk} \frac{(\bar{L} \cdot \bar{N})}{(r + K)}.$$

# Отражение от точечного источника. Глянцевые поверхности

*Зеркальное отражение* получается от любой блестящей поверхности. Геометрическая модель зеркального отражения представлена на рис. 2.



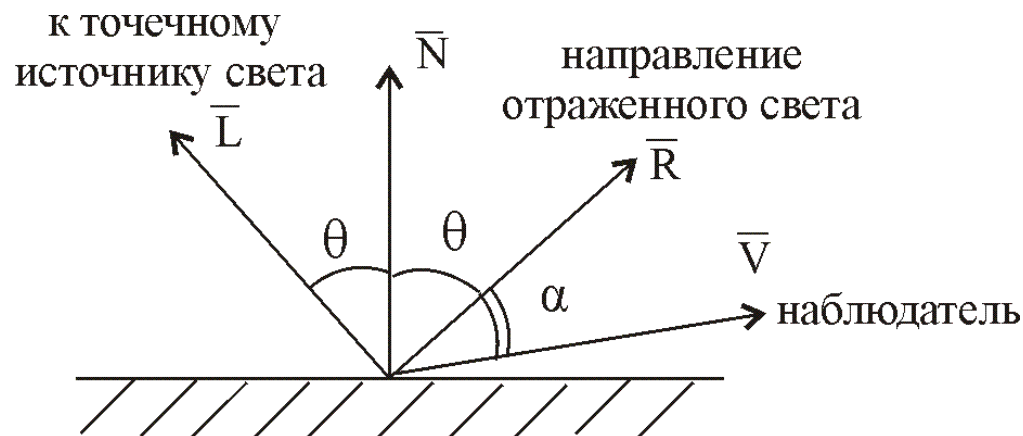
**Рис.2. Зеркальное отражение света**

Из рисунка следует, что в этом случае угол падения светового луча от точечного источника света равен углу отражения. Поверхность считается идеально зеркальной, если на ней отсутствуют какие-либо неровности и шероховатости.

# Отражение от точечного источника. Глянцевые поверхности

Количество падающего света, которое зеркально отражается в случае реальных материалов (имеются незначительные шероховатости) зависит от угла падения  $\theta$ .

$$I_3 = \frac{I_c}{(r + K)} K_3 \cos^n \alpha$$

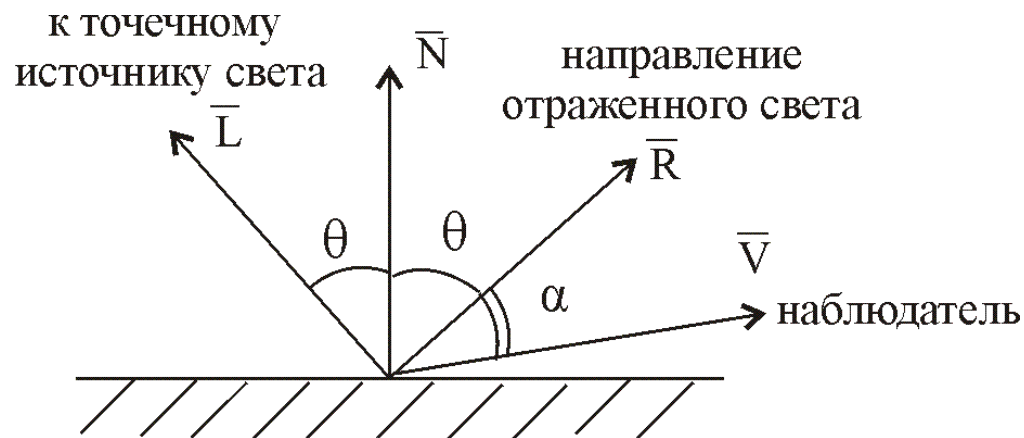




# Отражение от точечного источника. Глянцевые поверхности

Если векторы  $R$  и  $V$  нормированы, то  $\cos\alpha = \bar{R} \times \bar{V}$ .

$$I_3 = \frac{I_3}{(r + K)} \cdot K_3 (\bar{R} \cdot \bar{V})^n.$$



# Имитация реальных изображений

- При создании реалистичных изображений следует учитывать то, что в природе, вероятно, не существует идеально зеркальных или полностью матовых поверхностей. При изображении объектов средствами компьютерной графики обычно моделируют сочетание зеркальности и диффузионного рассеивания в пропорции, характерной для конкретного материала. В этом случае модель отражения записывают в виде суммы диффузионной и зеркальной компоненты:

$$I_{\text{отр}} = I_D + I_z = \frac{I_c}{(r + K)} \cdot [K_d \cdot (\bar{L} \cdot \bar{N}) + K_z (\bar{R} \cdot \bar{V})^n].$$

# Общая формула расчета интенсивности отраженного света

- С учетом рассеянного света формула будет выглядеть:

$$I_{отпр}^* = I_p + I_D + I_z = K_\phi I_\phi + \frac{I_c}{(r + K)} \cdot [K_d (\bar{L} \cdot \bar{N}) + K_z (\bar{R} \cdot \bar{V})^n].$$

При описании цветных поверхностей уравнение для синей поверхности, запишется как

$$I_{отпр.с} = I_{p.с} + \frac{I_{c.с}}{(r + K)} \cdot [K_{d.с} (\bar{L} \cdot \bar{N}) + K_z (\bar{R} \cdot \bar{V})^n].$$

Следует учитывать, что коэффициент  $K_z$  не зависит от цвета поверхности.

# Методы окрашивания поверхностей

# Закрашивание поверхностей

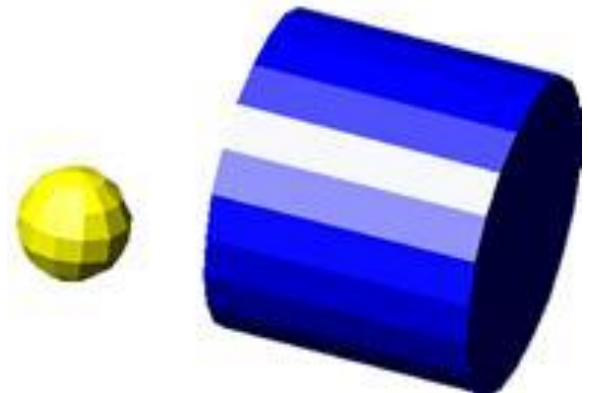
- Существует несколько основных методов закрашивания изображаемых поверхностей. Среди них можно выделить:
  - метод однотонной закрашки;
  - метод, основанный на интерполяции значений интенсивности освещенности поверхности – **метод Гуро**;
  - метод, основанный на интерполяции векторов нормалей к граням многогранника – **метод Фонга**.

# Однотонная закраска

- Для изображаемого объекта вычисляется один уровень интенсивности освещения, который и используется для закраски всего объекта.
- Более сложная модификация методов однотонной закраски заключается в том, что для многогранных объектов вычисляются уровни интенсивности для каждой грани в отдельности и закраска каждой грани соответствует своему уровню интенсивности освещения. Использование однотонной закраски справедливо, если предположить что:
  - источник света в бесконечности, т.е.  $\bar{N} \times \bar{L} = \text{const}$  на всей грани;
  - наблюдатель в бесконечности, т.е.  $\bar{N} \times \bar{V} = \text{const}$  на всей грани.

# Однотонная закраска

- Следует заметить, что, если каждая плоская грань имеет один постоянный цвет, то различные цвета соседних граней очень заметны, и поверхность выглядит как многогранник. Этот эффект можно сгладить, если увеличить число рассматриваемых граней.
- Так как зрение человека имеет способность подчеркивать перепады яркости на границах смежных граней (эффект Маха), для обеспечения иллюзии гладкой поверхности изображения нужно намного увеличить количество таких граней, а это приведет к снижению эффективности всей вычислительной процедуры.



# Эффект Маха

- Ещё в 1865 году австрийский физик Эрнст Мах (Ernst Mach) выдвинул предположение, что за некоторые из обманов зрительного восприятия отвечает так называемое латеральное торможение (lateral inhibition). Фактически оно было открыто и подтверждено много позже — уже в XX веке.

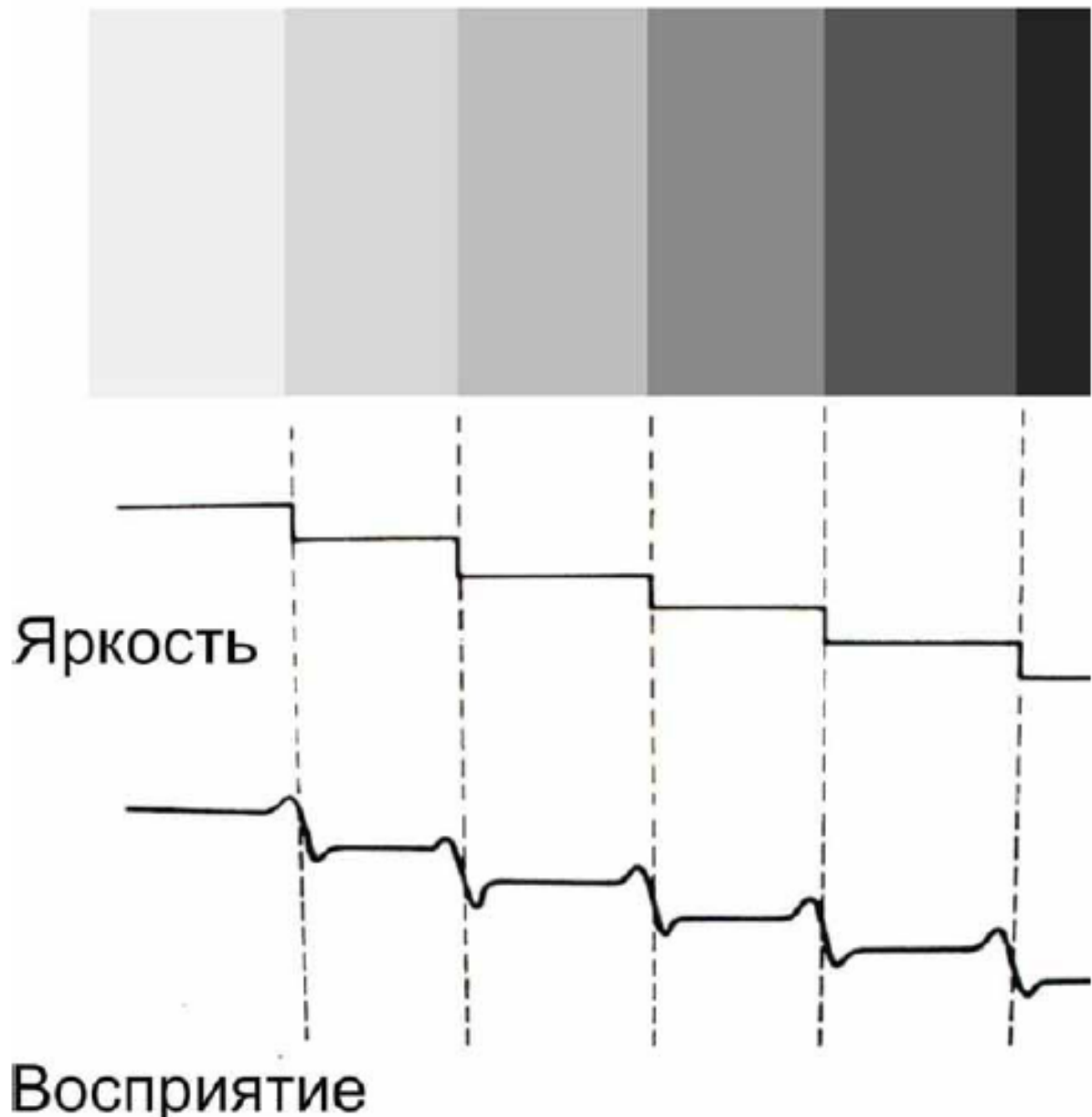
Эффект заключается в следующем: рецептор (палочка), который испытывает наиболее сильный стимул (свет), не только посылает соответствующий сигнал в мозг, но и подавляет реакцию на свет у нескольких соседних клеток (то есть окружает себя зоной торможения).

В результате автоматически повышается контраст наблюдаемого изображения и улучшается восприятие граней и границ предметов, особенно в условиях низкой освещённости. Тот же эффект работает и в случае тактильного восприятия и работы сенсоров в коже.



# Эффект Маха

Полосы Маха - иллюстрация того, что в глазу работает «механизм», усиливающий контраст на границе объекта. Каждый прямоугольник имеет одинаковую по площади яркость, поэтому кривая яркости имеет ступенчатую форму, однако узкая полоска слева от каждой границы кажется более светлой, а справа – более темной.



# Метод Гуро

Метод Гуро основывается на идее закрашивания каждой грани не одним цветом, а плавно изменяющимися оттенками, вычисляемыми путем интерполяции цветов примыкающих граней. Закрашивание граней по методу Гуро осуществляется в четыре этапа.

1. Вычисляются нормали к поверхности;
2. Определяются нормали в вершинах многогранника путем усреднения нормали по всем полигональным граням, которым принадлежит вершина:

$$\bar{N}_v = \frac{\bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{N}_3 + \bar{N}_4}{4}.$$

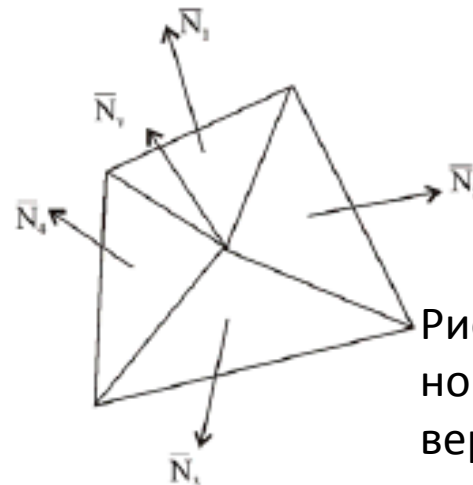


Рис.4. Вычисление нормалей к граням и вершинам.

# Метод Гуро

3. На этом этапе, используя нормали в вершинах и применяя произвольный метод закрашки, вычисляют значения интенсивности освещения в вершинах (рис.5).

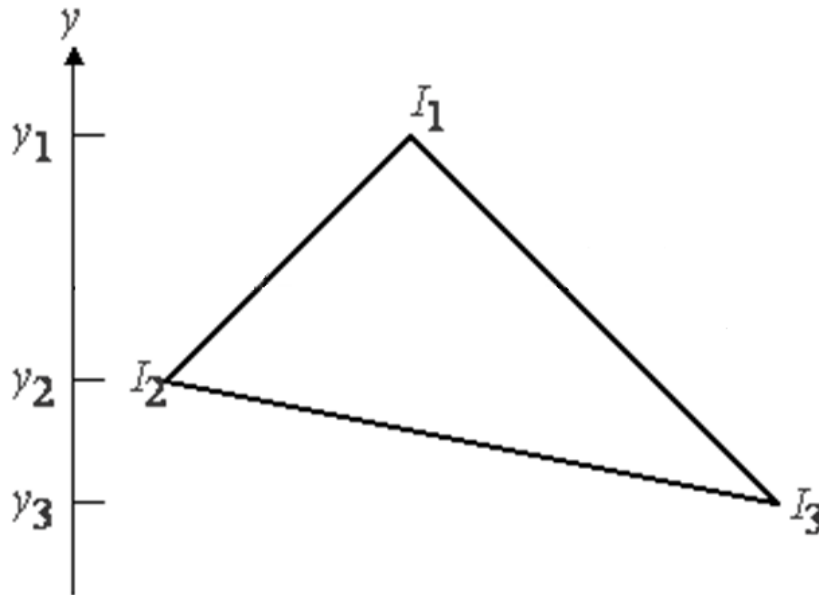


Рис. 5. Расчет интенсивностей в вершинах многоугольника

# Метод Гуро

4. Каждый многоугольник закрашивают путем линейной интерполяции значений интенсивности в вершинах, сначала вдоль каждого ребра, а затем и между ребрами вдоль каждой сканирующей строки (рис.6).

$$I_a = I_1 \frac{y_s - y_2}{y_1 - y_2} + I_2 \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_2},$$

$$I_b = I_1 \frac{y_s - y_3}{y_1 - y_3} + I_3 \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_3},$$

$$I_p = I_a \frac{x_b - x_p}{x_b - x_a} + I_b \frac{x_p - x_a}{x_b - x_a}.$$

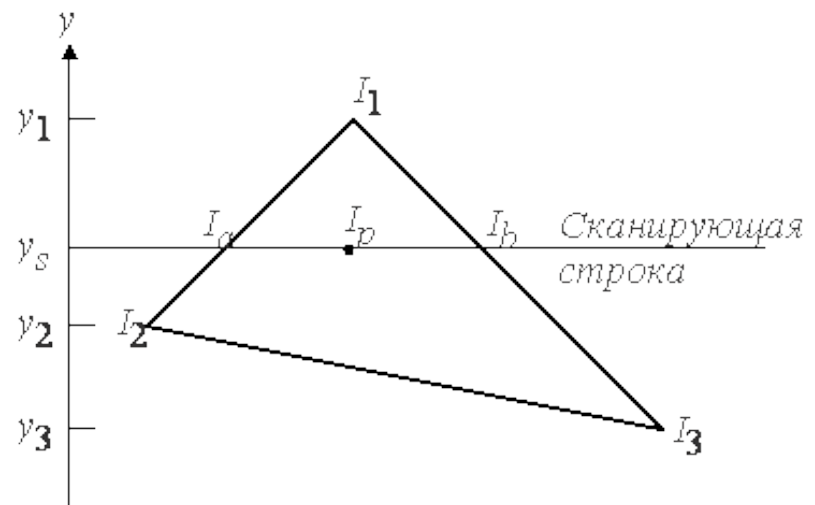
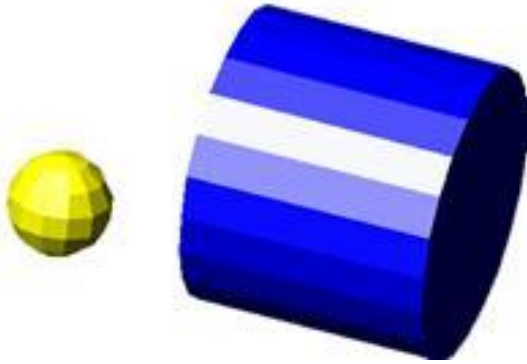


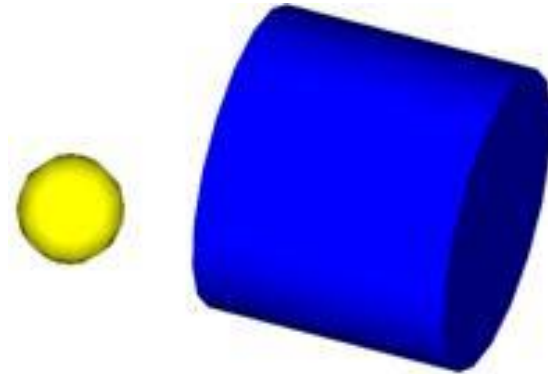
Рис. 6. Интерполяция интенсивностей

Для цветных объектов отдельно интерполируется каждая из компонент цвета.

# Метод Гуро



Пример однотонной закраски



Пример закраски методом Гуро

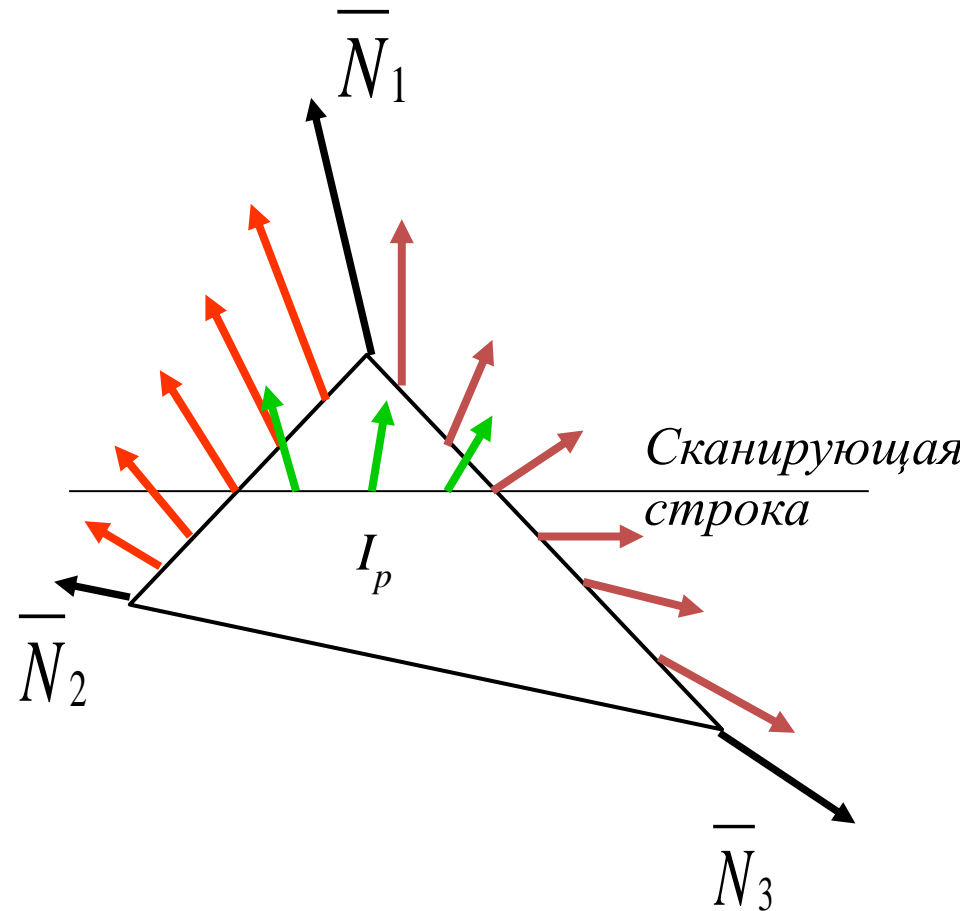
# Метод Фонга

В методе закраски, разработанном Фонгом, используется **интерполяция вектора нормали** к поверхности вдоль видимого интервала на сканирующей строке внутри многоугольника,  
**а не интерполяция интенсивности.**

Интерполяция выполняется между начальной и конечной нормалью, которые сами тоже являются результатами интерполяции вдоль ребер многоугольника между нормалью в вершинах. Нормали в вершинах, в свою очередь, вычисляются так же, как в методе закраски, построенном на основе интерполяции интенсивности.

# Метод Фонга

1. Определяются нормали к граням.
2. По нормальям к граням определяются нормали в вершинах (в каждой точке окрашиваемой грани определяется интерполированный вектор нормали)
3. По направлению векторов нормали определяется цвет точек грани в соответствии с выбранной моделью отражения света.



# Пример различных методов закраски

Метод Фонга сложнее, чем метод Гуро.

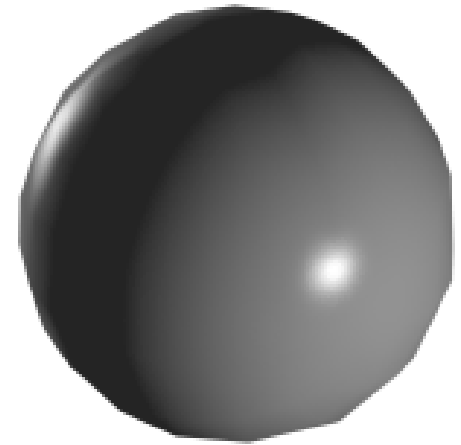
Для каждой точки (пиксела) поверхности необходимо выполнять намного больше вычислительных операций. Тем не менее он дает значительно лучшие результаты, в особенности при имитации зеркальных поверхностей.



Однотонная закраска



метод Гуро



метод Фонга



Тени

# Тени

Алгоритмы затенения в случае точечных источников света идентичны алгоритмам удаления скрытых поверхностей.

В алгоритме удаления скрытых поверхностей определяются поверхности, которые можно увидеть из точки зрения, а в алгоритме затенения выделяются поверхности, которые можно «увидеть» из источника света.

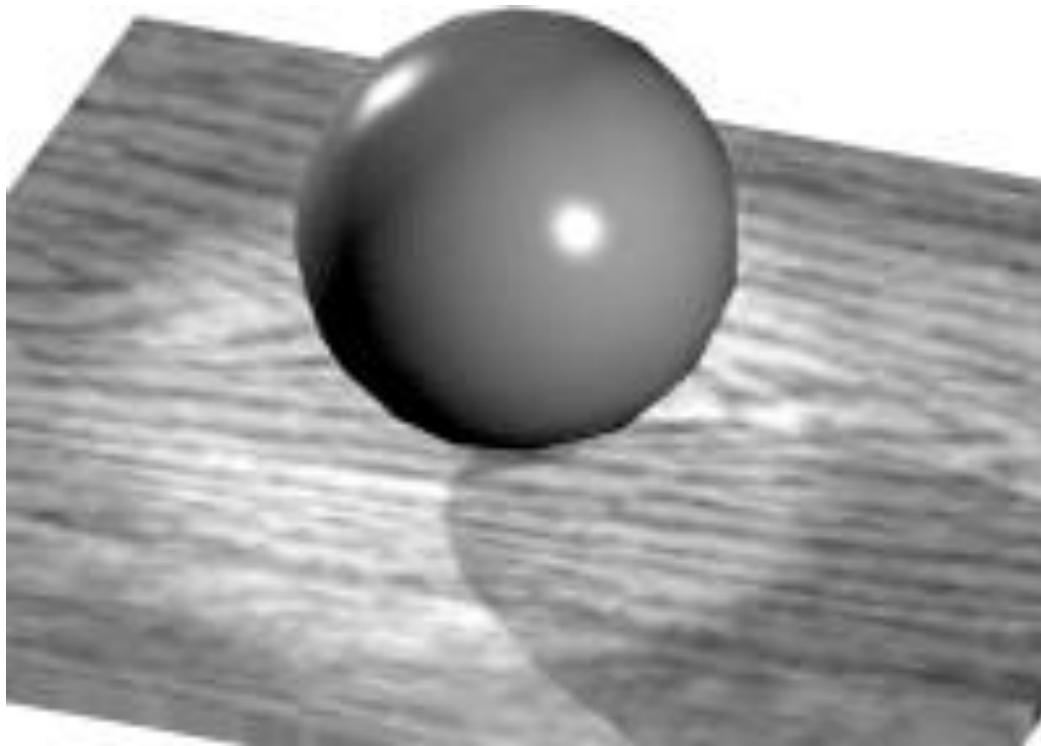
Поверхности, видимые как из точки зрения, так и из источника света, не лежат в тени.

Поверхности, видимые из точки зрения, но невидимые из источника света, находятся в тени.

Эти рассуждения можно легко распространить на случай нескольких источников света.

Используя такой подход, нельзя смоделировать тени от распределенных источников света потребуются вычислять как тени, так и полутени.

# Тени



# Преломление света

# Модель идеального преломления

Согласно этой модели луч отклоняется на границе двух сред, причем падающий луч, преломленный луч и нормаль лежат в одной плоскости (в этой же плоскости лежит и зеркально отраженный луч).

Обозначим угол между падающим лучом и нормалью как  $\alpha_1$ , а угол между нормалью и преломленным лучом как  $\alpha_2$ . Для этих углов известен закон Снеллиуса, согласно которому

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2,$$

Где  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления соответствующих сред.

# Модель идеального преломления

На рис. 7 изображен пример отклонения луча при преломлении. В данном случае границами раздела сред являются две параллельные плоскости, например, при прохождении луча через толстое стекло. Очевидно, что угол  $\alpha_1$  равен углу  $\alpha_4$ , а угол  $\alpha_2$  равен углу  $\alpha_3$ .

Иными словами, после прохождения сквозь стекло луч параллельно смещается. Это смещение зависит от толщины стекла и соотношения показателей преломления сред.

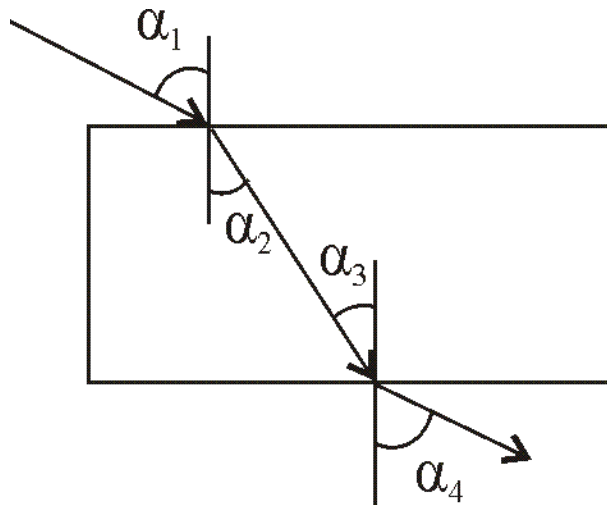


Рис. 7. Преломление лучей

# Модель диффузного преломления

- Кроме идеального преломления в компьютерной графике (хотя и значительно реже, вследствие сложности реализации) используется *диффузное преломление*. Согласно этой модели падающий луч преломляется во все стороны. Примером может служить молочное стекло, обледеневшее стекло.

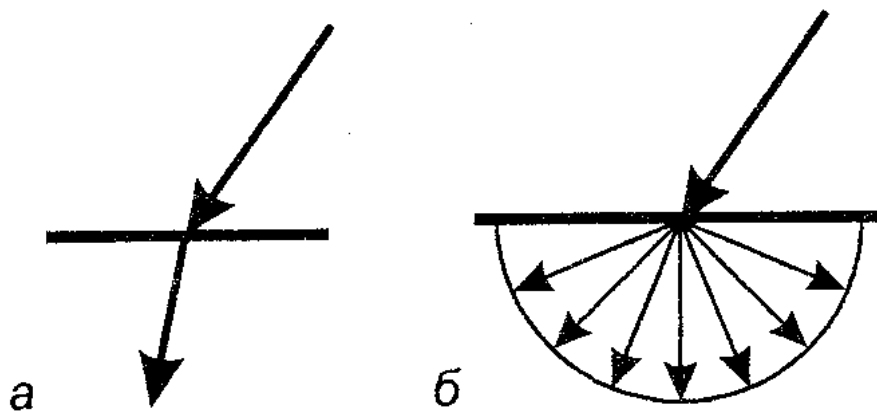


Рис. 8. Преломление: а — идеальное, б — диффузное

# Детализация поверхностей



# Детализация поверхностей

Существуют два способа детализации поверхности:  
**цветом и фактурой.**

В результате применения к гладкой поверхности детализации цветом форма поверхности не изменяется, если же производится детализация фактурой – поверхность становится шероховатой.

# Детализация цветом

- Детализация цветом (двери, окна и надписи) на основном многоугольнике (например, на стене здания). Многоугольники детализации поверхности лежат в одной плоскости с основными многоугольниками и так помечены в структуре данных, чтобы алгоритм удаления скрытых поверхностей мог присвоить им более высокие приоритеты, чем основным многоугольникам.

# Детализация фактурой

Идея детализации фактурой состоит в отображении массива узора, представляющего собой оцифрованное изображение, на плоскую или криволинейную поверхность. Значения из массива узора используются для масштабирования диффузной компоненты интенсивности.

Один пиксель на экране может покрывать несколько элементов массива узора. Чтобы избежать проблем, связанных с лестничным эффектом, необходимо учитывать все затрагивающие пиксель элементы.

Для этого определяются четыре точки в массиве узора, которые соответствуют четырем углам пикселя. Эти точки в массиве узора образуют четырехугольник. Значения попадающих в него элементов взвешиваются с учетом доли каждого элемента, а затем суммируются.

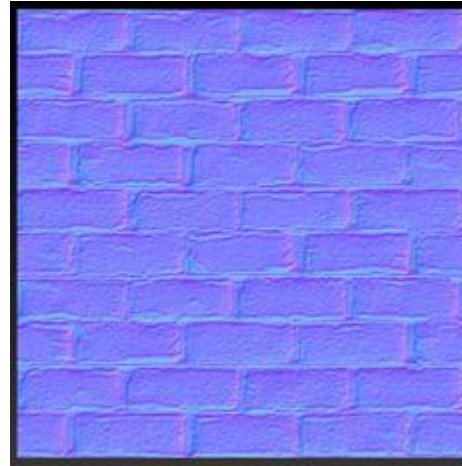
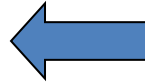
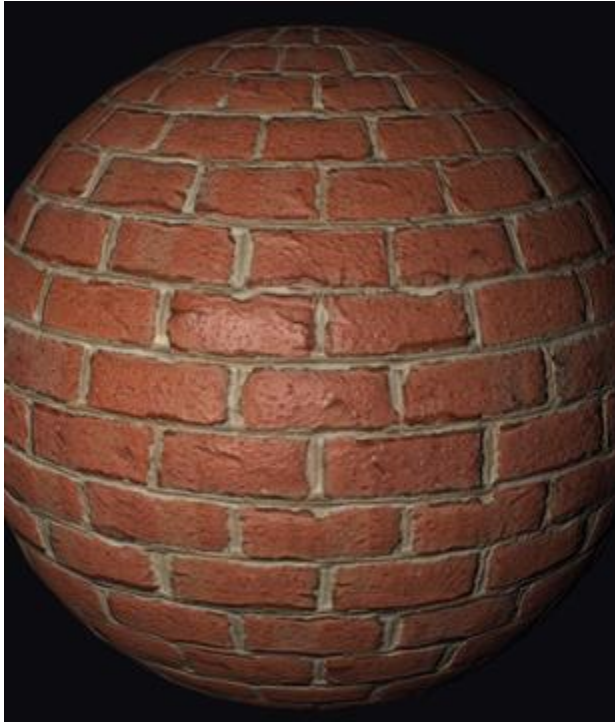
# Детализация фактурой

Отображение массива узора влияет на расцветку поверхности, однако поверхность продолжает казаться геометрически гладкой.

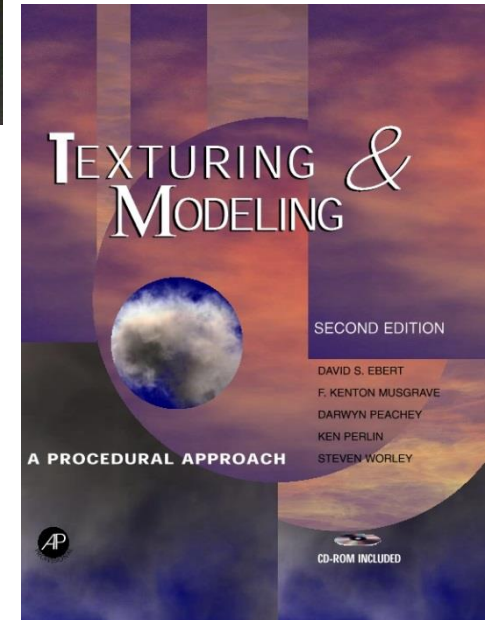
Существует два способа нанесения на поверхность **деталей фактуры**.

1. Непосредственное геометрическое моделирование фактуры не производится, а вносится возмущение в нормаль к поверхности до ее использования в модели закраски. Эти возмущения моделируют небольшие неровности на поверхности.
2. Использование вероятностных фрактальных поверхностей.

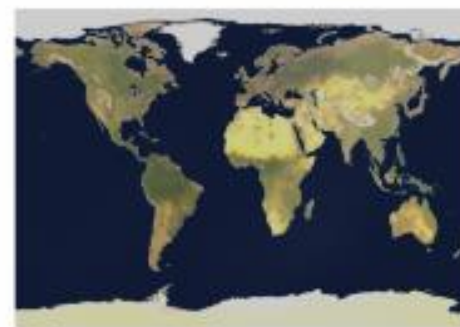
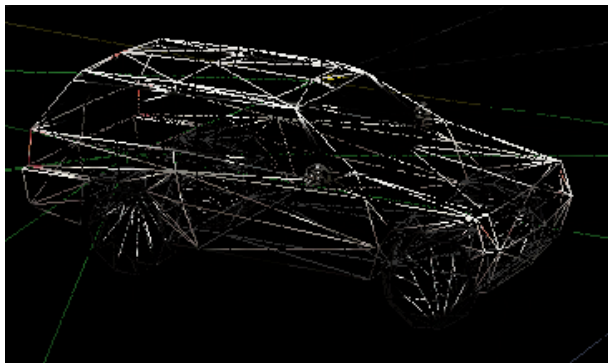
# Текстурирование



Функции моделирования текстур

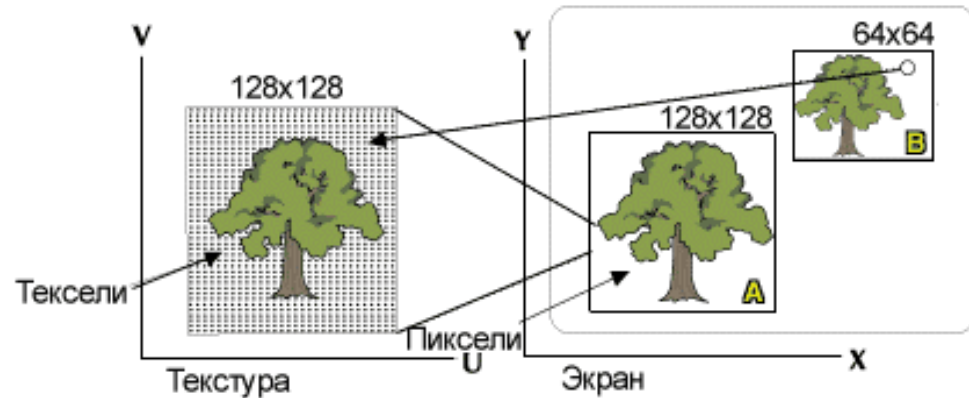


# Текстурирование

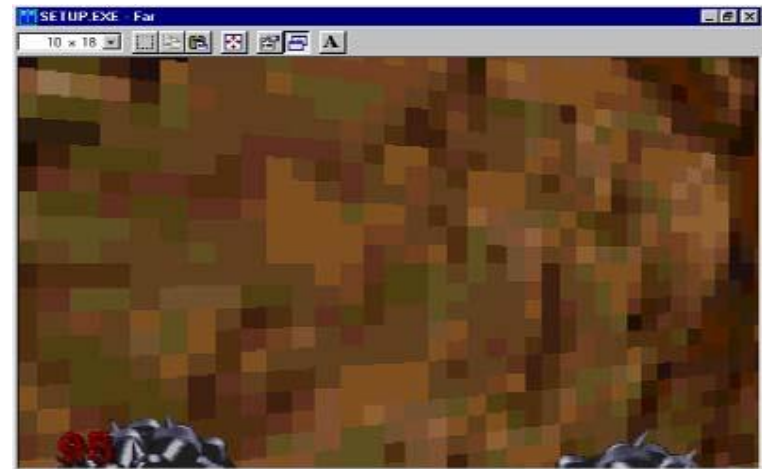


# Текстурирование. Сэмплинг и его артефакты

**Сэмплинг** (point-sampling) – простейший метод текстурирования, в котором текстелы непосредственно переносятся в пиксели изображения с учетом масштаба. Методу присущ серьезный артефакт: когда наблюдатель приближается вплотную к текстурированной поверхности, происходит пикселизация. Для избежания этого артефакта используют методы текстурирования, основанные на фильтрации текстур.



A: однозначное соответствие между текстелами и пикселими  
B: pixel 0:texel 0; pixel 1:texel 2; pixel 2:texel 4...



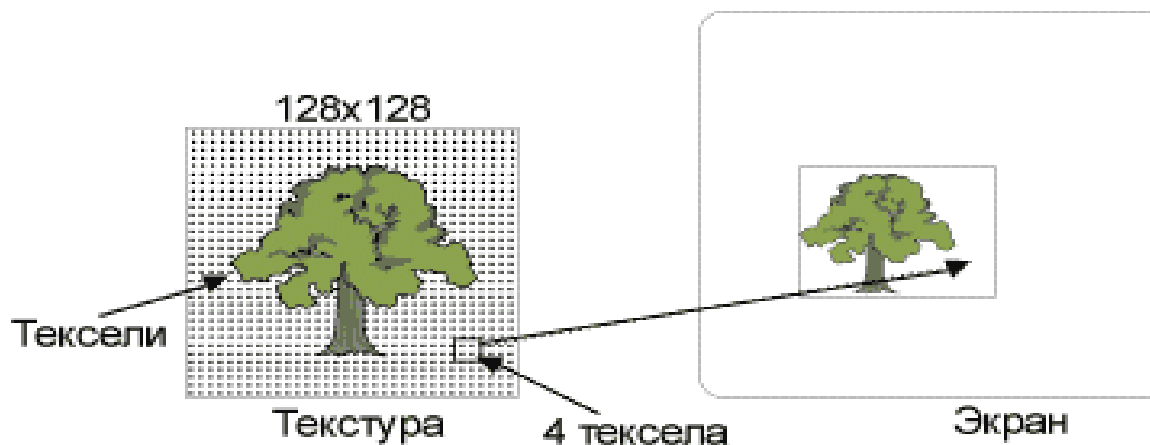


# Артефакты и билинейная фильтрация

**Bi-linear filtering** - это техника устранения искажений изображения (фильтрация), таких, как "блочность" текстур при их увеличении. При медленном вращении или приближении/ удалении объекта могут быть заметны "перескакивания" пикселей с одного места на другое, т.е. появляется блочность.

Во избежании этого эффекта применяют билинейную фильтрацию, при использовании которой в качестве цвета каждого пиксела берется взвешенное среднее значение (линейная интерполяция) цвета четырех смежных текселов (верхний рис.).

Результирующий цвет пиксела определяется в результате трех операций смешивания: сначала смешиваются цвета двух пар текселов по x, а потом смешиваются два полученных цвета по y.





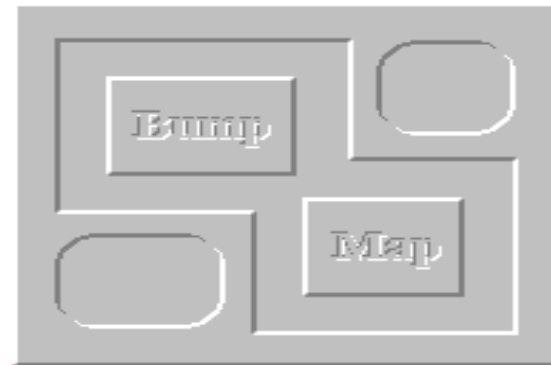
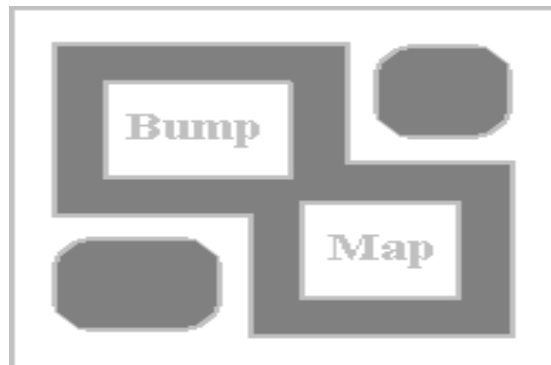
# Наложение рельефа (bump-mapping)

Чтобы подчеркнуть рельеф с помощью светотени, надо затемнить либо осветлить стенки бугорков и впадин.

Другой метод состоит в симуляции рельефности, глянцевой или зеркальной поверхности, отражением окружающей среды.

Рельефное текстурирование напоминает обычный процесс наложения текстуры на полигон, но текстуры (на рис. слева), предназначенной для придания плоскому полигону зрительного ощущения рельефа и объемности. Эта техника может добавить детализацию сцене без создания дополнительных полигонов.

Сам полигон остается плоским.



# Техника выдавливания (embossing)

Техника выдавливания (embossing) использует карту высот для затенения и осветления определенных участков поверхности.

**Способ преобразования информации о высоте неровностей на карте высот в информацию о величине подстройки вектора нормали**

1. Для каждого пиксела по высотам карты (bump map) рассчитывается вектор, указывающий направление уклона поверхности, т.е. вектор градиента:

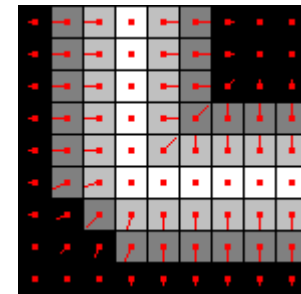
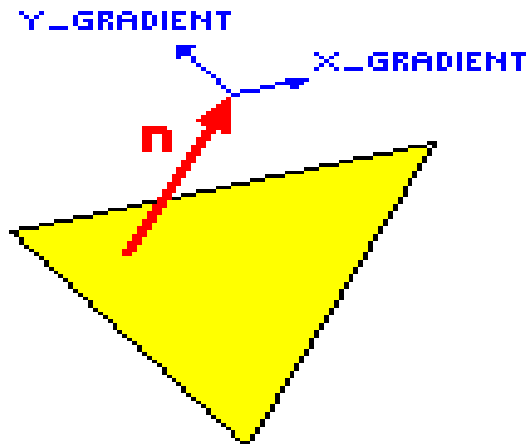
$$x\_gradient = pixel(x-1, y) - pixel(x+1, y), y\_gradient = pixel(x, y-1) - pixel(x, y+1),$$

где  $x$  и  $y$  -- координаты соответствующего пиксела

2. Вектор нормали к поверхности корректируется для каждого пиксела на величину градиента

$$New\_Normal = Normal + (U * x\_gradient) + (V * y\_gradient)$$

Получив новый вектор нормали, мы можете просчитать яркость данного пикселя.



Красные векторы указывают на уменьшение высоты.

# Наложение рельефа (Bump Mapping)

