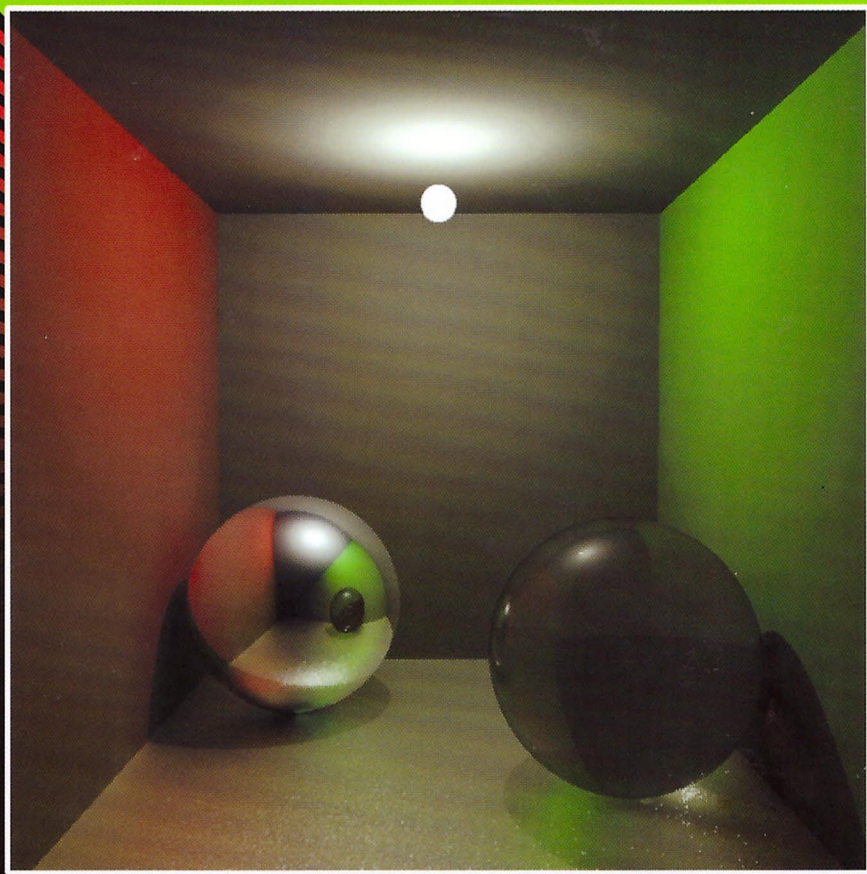


А. В. Калютов

ВВЕДЕНИЕ
В
ФОТОРЕАЛИСТИЧЕСКУЮ
ГРАФИКУ



ПОЛИТЕХНИКА

Электронный аналог печатного издания: Калютов, А. В. Введение в фотореалистическую графику. — СПб. : Политехника, 2006. — 118 с. : ил.

УДК 681.3
ББК 32.97
К17



ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Санкт-Петербург 2015

www.polytechnics.ru

Калютов А. В.

К17 Введение в фотореалистическую графику. — СПб.: Политехника, 2015. — 118 с.: ил.

ISBN 5-7325-0404-4

В книге изложены важнейшие понятия и особенности современной фотореалистической компьютерной графики, рассматривается специфика этой дисциплины. Детально описываются модели физических явлений, лежащих в основе фотореалистической графики, рассматриваются наиболее подходящие программные структуры. Все формулы и математические соотношения подробно комментируются, большое количество рисунков облегчает усвоение материала. Математическое приложение освобождает читателя от необходимости обращаться к справочникам по математике.

Книга рассчитана на достаточно широкий круг технических специалистов: программистов, занимающихся разработкой мультимедийных приложений, студентов и аспирантов соответствующих специальностей, всех, кто интересуется концепциями физически корректной компьютерной графики.

УДК 681.3

ББК 32.97

ISBN 5-7325-0404-4

© Политехника, 2015

| | |
|--|----|
| <i>Предисловие</i> | 5 |
| Часть I. БАЗОВАЯ СИСТЕМА ФОТОРЕАЛИСТИЧЕСКОГО РЕНДЕРИНГА | 7 |
| Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ | — |
| Свет и его характеристики | — |
| Оптические свойства материалов | 9 |
| Глава 2. ЦВЕТ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ | 17 |
| Глава 3. УРАВНЕНИЕ РЕНДЕРИНГА | 24 |
| Глава 4. МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО | 25 |
| Глава 5. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РЕНДЕРИНГА | 30 |
| Точечный изотропный источник света | 33 |
| Протяженный источник света | 34 |
| Зеркальная поверхность | 35 |
| Диффузная поверхность | 36 |
| Глянцевая поверхность | — |
| Поверхность смешанного типа | 38 |
| Глава 6. ВЫВОД ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ЭКРАН | — |
| Аппроксимационные функции | 42 |
| Метод оптимизации кривой воспроизведения тонов | — |
| Часть II. ОПТИМИЗАЦИИ И РАСШИРЕНИЯ СИСТЕМЫ | 46 |
| Глава 7. ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СЕТИ | — |
| Глава 8. МЕТОД ФОТОННЫХ КАРТ | 51 |
| Глава 9. МЕТОД ГРАДИЕНТА ОСВЕЩЕННОСТИ | 59 |
| Глава 10. ПЛОСКИЕ, РЕЛЬЕФНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТЕКСТУРЫ | 63 |
| Глава 11. РЕНДЕРИНГ ОПТИЧЕСКИ МУТНЫХ СРЕД | 67 |
| Глава 12. АТМОСФЕРА И АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ | 74 |
| Глава 13. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И ФОТОРЕАЛИСТИЧЕСКАЯ ГРАФИКА | 79 |
| Модельный пример: дым [27] | 86 |
| <i>Приложения</i> | 93 |
| А. Системы координат. Глобальные и локальные координаты | — |

| | |
|---|-----|
| В. Некоторые сведения из векторного анализа | 94 |
| С. Поворот вектора | 96 |
| D. 3D примитивы | 98 |
| Е. Вращательный и трансляционный градиенты | 101 |
| Ф. Субсэмплинг | 104 |
| Г. Генерирование рельефных текстур | 105 |
| Н. Метод Рунге—Кутта (четвертого порядка точности) | 106 |
| І. Метод последовательной верхней релаксации | 107 |
| Ј. Цветовая адаптация | 110 |
| К. Преобразование цветовых координат | 112 |
| Л. Трилинейная и параболическая интерполяция | 113 |
| М. Изоповерхности и метод пограничного кубика | 114 |
| <i>Литература</i> | 117 |

Глава **1** **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В фотореалистической компьютерной графике моделируются реальные физические процессы распространения и взаимодействия света с веществом, поэтому для описания оптических свойств материалов, различных характеристик света естественно использовать соответствующие понятия из геометрической оптики, фотометрии, радиометрии. Ниже приведены некоторые определения физических величин и основные понятия, которые необходимы для понимания физической подоплеку фотореалистической графики.

Свет
и его характеристики

Видимый свет представляет собой электромагнитное излучение с диапазоном длин волн от 380 до 780 нм. Из-за малости длины волны эффекты, обусловленные волновой природой света — дифракция, интерференция, — в мире макрообъектов проявляются довольно слабо. Поэтому при описании оптических явлений можно ограничиться приближением геометрической оптики, рассматривая распространение света как распространение *световых лучей*. Луч является чисто геометрическим понятием и определяет лишь направление распространения света. Математически это направление задается единичным вектором Ψ . В сферической системе координат этот вектор определяется двумя координатами — θ и φ (третья координата $r \equiv 1$, т. е. конец Ψ лежит на единичной сфере); в декартовой системе координат $\Psi = (x, y, z)$, причем $\|\Psi\| = 1$. С направлением распространения света связывают бесконечно малый (дифференциальный) телесный угол $d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ (рис. 1.1). С энергетической точки зрения любое электромагнитное излучение характеризуют такими величинами, как лучистый поток, интенсивность (плотность) лучистого потока.

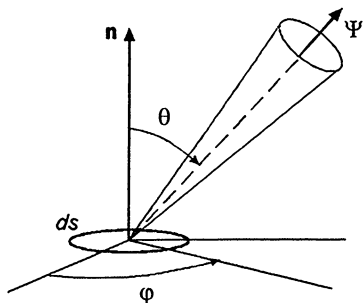


Рис. 1.1

Таблица 1.1
Энергетические характеристики света

| Характеристика | Обозначение | Единицы измерения |
|--------------------------------|-------------|-----------------------|
| Лучистый поток | Φ | Вт |
| Интенсивность лучистого потока | L | Вт/м ² ·ст |
| Энергетическая освещенность | E | Вт/м ² |
| Излучательность | B | Вт/м ² |

Лучистый поток Φ — это просто величина энергии, переносимая излучением в единицу времени через произвольно выбранную поверхность. *Интенсивность излучения* в заданном направлении определяется как величина лучистого потока через площадку ds_{\perp} , перпендикулярную лучу, в пределах телесного угла $d\omega$ (рис. 1.1) [1]:

$$L(x, \Psi) = \frac{d\Phi}{ds_{\perp} d\omega}, \quad (1.1)$$

где $ds_{\perp} = ds \cos \theta$; ds — площадка на поверхности; θ — угол между нормалью n этой площадки и направлением луча Ψ .

Единицы измерения и обозначения энергетических характеристик света указаны в табл. 1.1. Для практических оценок лучистого потока, излучаемого реальными источниками света (обычно лампами), можно воспользоваться следующим рецептом: *электрическую* мощность лампы ум-

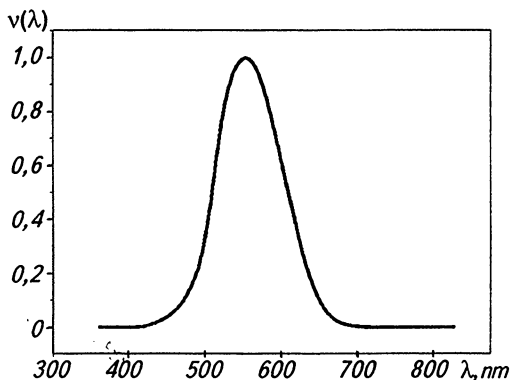


Рис. 1.2

Таблица 1.2

Фотометрические характеристики света

| Характеристика | Обозначение | Единицы измерения |
|----------------|--------------------|-------------------------------|
| Световой поток | $\Phi_{\text{св}}$ | Люмен (лм) Вт |
| Сила света | I | Кандела (кд) = лм/ст |
| Освещенность | E | Люкс (лк) = лм/м ² |
| Яркость | B | кд/м ² |

ножить на ее КПД (~0,03 для ламп накаливания, ~0,15–0,35 для люминесцентных ламп).

Чтобы перейти от радиометрических характеристик света к фотометрическим, необходимо учесть неодинаковую чувствительность глаза к излучению с различной длиной волны. Эта чувствительность характеризуется так называемой *кривой видности* $v(\lambda)$ (рис. 1.2). Соотношение между величиной лучистого потока и величиной соответствующего ему светового потока определяется формулой:

$$\Phi_{\text{св}} = 683 \text{ лм / Вт } v(\lambda) \Phi. \quad (1.2)$$

Поскольку все фотометрические величины можно определить через световой поток, фотометрические эквиваленты радиометрических характеристик легко находятся путем умножения на коэффициент $683v(\lambda)$. Единицы измерения и обозначения энергетических характеристик света указаны в табл. 1.2.

Оптические свойства материалов

При моделировании взаимодействия света с объектами прежде всего следует определиться относительно способа описания их геометрии. В подавляющем большинстве случаев исчерпывающее геометрическое описание 3D-объектов эквивалентно описанию их *поверхности*. Свет может отражаться, преломляться или излучаться этой поверхностью. Вне объектов или внутри них свет распространяется прямолинейно, без взаимодействия со средой (за исключением особого случая оптически мутных сред, рассмотрение которого мы оставим до гл. 11).

Для того чтобы наиболее полно охарактеризовать отражательные свойства поверхности, была введена специаль-

ная функция — BRDF (от англ. Bidirectional Reflectance Distributive Function — двунаправленная функция отражательной способности). Она определяет, какая доля излучения, пришедшего в точку x с направления Ψ_i отразится в направлении Ψ_r :

$$f_r(x, \Psi_i, \Psi_r) = \frac{dL(x, \Psi_r)}{L(x, \Psi_i) \cos \theta_i d\omega_i}, \quad (1.3)$$

где $d\omega_i = \sin \theta d\theta d\phi$ — небольшой телесный угол в направлении Ψ_i .

Все поверхности по характеру отражения от них света можно условно разделить на три основных типа.

1. Зеркальные поверхности. Свет отражается от такой поверхности строго по закону отражения: угол падения равен углу отражения. Векторы Ψ_i и Ψ_r связаны между собой соотношением

$$\Psi_r = 2(\Psi_i \mathbf{n})\mathbf{n} - \Psi_i, \quad (1.4)$$

где \mathbf{n} — нормаль к поверхности в точке отражения луча (рис. 1.3). Зеркальной является всякая поверхность (вне зависимости от материала), у которой величина неровностей меньше длины волны.

2. Диффузные поверхности. Падающий свет рассеивается во всех направлениях в пределах телесного угла 2π с полярной осью вдоль нормали к поверхности (рис. 1.4). Классический пример диффузной поверхности — поверхность грубой, нелощеной бумаги.

3. Глянцевые поверхности. Большая часть отраженных лучей концентрируется в пределах довольно небольшого телесного угла $\Delta\Omega$ вдоль направления зеркального отражения (рис. 1.5). Глянцевой поверхностью обладают, например, линолеум, тонкая керамика с однородной мелкозернистой структурой (фарфор, керметы) и другие материалы.

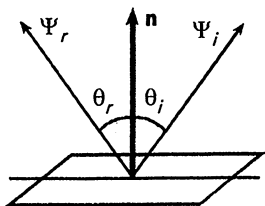


Рис. 1.3

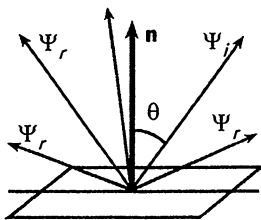


Рис. 1.4

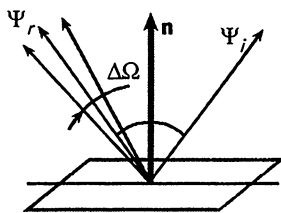


Рис. 1.5

Наиболее простой вид имеет функция BRDF диффузной поверхности:

$$f_r^d(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) = \frac{\rho_d}{\pi}, \quad (1.5)$$

где ρ_d — коэффициент диффузного отражения, $0 \leq \rho_d \leq 1$.

Для зеркальных поверхностей BRDF равна нулю везде, кроме одного направления, которое соответствует зеркально отраженному лучу. Для практических приложений BRDF зеркальных поверхностей удобнее записывать в интегральной форме*:

$$f_r^s(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) = \begin{cases} \frac{\rho_s}{|\cos \theta_i|}, & \text{если } \Psi_r = \Psi_{mirror}; \\ 0, & \text{если } \Psi_r \neq \Psi_{mirror}, \end{cases} \quad (1.6)$$

где $\Psi_{mirror} = 2(\Psi_i \mathbf{n}) \mathbf{n} - \Psi_i$; ρ_s — коэффициент зеркального отражения, $0 \leq \rho_s \leq 1$.

Коэффициент зеркального отражения в общем случае зависит от угла θ . Эта зависимость достаточно сложна и описывается формулами Френеля [1]. В компьютерной графике вместо них используют различные аппроксимации. Например, аппроксимация Шлика [2] имеет вид:

$$\rho_s(\theta) = \rho_s(0) + (1 - \rho_s(0))(1 - \cos \theta)^5, \quad (1.7)$$

где $\rho_s(0)$ — коэффициент отражения при нормальном падении луча (т. е. перпендикулярно поверхности).

Для описания процесса отражения света от глянцевых поверхностей за последние четверть века было разработано множество разнообразных математических моделей. Наиболее популярной (и наиболее простой) является модифицированная модель Фонга:

$$f_r^g(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) = \begin{cases} \frac{\rho_s}{2\pi} (e + 2) \cos^e \delta, & \text{если } \cos \delta > 0; \\ 0, & \text{если } \cos \delta < 0, \end{cases} \quad (1.8)$$

* Интегральная BRDF определяется как

$$f_r^{\text{int}}(\mathbf{x}, \Psi_r) = \int_{2\pi} f_r(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) d\omega_i.$$

В дифференциальной форме BRDF зеркальной поверхности выражается через β -функцию и удобна только для аналитических выкладок.

где $\cos \delta = \Psi_{mirror} \Psi_r$; $\Psi_{mirror} = 2(\Psi_i \mathbf{n}) \mathbf{n} - \Psi_i$; ρ_s — коэффициент зеркального отражения, $0 \leq \rho_s \leq 1$; e — целое число, характеризующее степень угловой анизотропности отражения (предел $e = 0$ соответствует диффузной поверхности, $e \rightarrow \infty$ — зеркальной), $e = 8 \dots 20$.

Другая модель, предложенная Уордом [3], базируется на более детальном рассмотрении процесса отражения света от реальных поверхностей. В некотором приближении любая поверхность может быть заменена совокупностью большого числа микроскопических зеркально отражающих площадок (фасеточное представление поверхности). Если все площадки ориентированы одинаково, то поверхность будет отражать свет как зеркало; в противном случае часть света будет рассеиваться и в других направлениях. Если среднее отклонение в ориентировке площадок равно α , то BRDF такой поверхности будет иметь вид:

$$f_r^g(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) = \frac{\rho_s}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \frac{\exp(-\tan^2 \delta / \alpha^2)}{4\pi\alpha^2}, \quad (1.9)$$

где ρ_s — коэффициент зеркального отражения, $0 \leq \rho_s \leq 1$; δ — угол между \mathbf{n} и \mathbf{h} (рис. 1.6), т. е. полярный угол вектора \mathbf{h} в локальной системе координат; \mathbf{n} — нормальный вектор в точке падения луча; \mathbf{h} — *срединный* вектор.

Модель Уорда достаточно легко обобщить для случая так называемого анизотропного отражения, когда отраженные лучи формируют не круговой, а эллиптический конус (рис. 1.7). BRDF такой поверхности имеет вид [3]:

$$f_r^g(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) = \frac{\rho_s}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \frac{\exp\left(-\tan^2 \delta \left(\cos^2 \varphi / \alpha_x^2 + \sin^2 \varphi / \alpha_y^2\right)\right)}{4\pi\alpha_x\alpha_y}, \quad (1.10)$$

где φ — азимутальный угол срединного вектора \mathbf{h} (в локальной системе координат).

Для прозрачных или полупрозрачных материалов наряду с BRDF используют функцию BTDF (от англ. Bidirectional Transparency Distributive Function — двунаправленная функция пропускающей способности), определяя ее аналогично (1.3), но для излучения $dL(\mathbf{x}, \Psi_t)$, прошедшего через поверх-

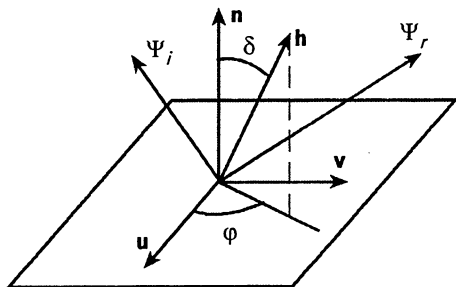


Рис. 1.6

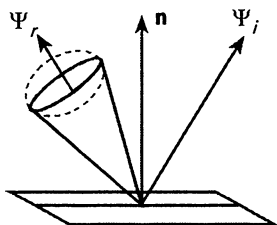


Рис. 1.7

ность. После преломления на поверхности свет распространяется вдоль направления Ψ_{trans} , которое вычисляется по формуле:

$$\Psi_{trans} = c_2 \mathbf{n}_d \mp c_1 \mathbf{n}, \quad (1.11)$$

где

$$\mathbf{n}_d = (\Psi_i \mathbf{n}) \mathbf{n} - \Psi_i; \quad c_2 = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{1 - (\mathbf{n} \Psi_i)^2}; \quad c_1 = \sqrt{1 - c_2^2}, \quad (1.12)$$

где n_1, n_2 — показатели преломления соответственно первой и второй сред; \mathbf{n} — нормаль в точке излома луча.

Знак минус в (1.11) берется в том случае, когда $\mathbf{n} \Psi_i > 0$. Следует отметить, что при $n_1 > n_2$ для некоторых направлений Ψ_i коэффициент $c_2 > 1$, и формулы (1.12) становятся неприменимыми. В этом случае имеет место явление так называемого полного внутреннего отражения: весь свет отражается обратно в первую среду, поэтому для этих направлений значение функции BTDF равно нулю.

Типология поверхностей по характеру прохождения через них света аналогична изложенной выше классификации поверхностей по характеру их отражательной способности, а функции BRDF и BTDF для поверхностей одного типа имеют сходный вид. Например, BTDF зеркальных поверхностей в интегральной форме записывается как

$$f_t^s(x, \Psi_i, \Psi_t) = \begin{cases} \frac{\rho_t}{|\cos \theta_i|}, & \text{если } \Psi_t = \Psi_{trans}; \\ 0, & \text{если } \Psi_t \neq \Psi_{trans}, \end{cases} \quad (1.13)$$

где ρ_t — коэффициент пропускания.

Зависимость ρ_t от θ_i аппроксимируется выражением

$$\rho_t(\theta) = \rho_t(0) \left(1 - (1 - \cos \theta)^5\right),$$

где $\rho_t(0)$ — коэффициент пропускания при нормальном падении луча, $0 \leq \rho_t \leq 1$, причем $\rho_s + \rho_t \leq 1$.

В наиболее общем случае поверхность относится к *смешанному типу* — часть света отражается в зеркальном направлении, часть рассеивается по другим направлениям, а часть проходит через поверхность. Такую поверхность можно описать следующей функцией

$$f(\mathbf{x}, \Psi_i, \Psi_r) = f_r^s + f_r^d + f_r^g + f_t^s + f_t^d + f_t^g,$$

где функции с индексом r являются функциями BRDF, а с индексом t — BTDF.

В заключение рассмотрим структуры (в синтаксисе C++), удобные для описания основных объектов компьютерной графики.

В трехмерном пространстве вектор описывается тремя вещественными числами (в любой системе координат). Структура для этой величины в декартовой прямоугольной системе координат очевидна:

```
typedef struct{
    float x,y,z;
}VECTOR3;
```

В некоторых случаях более практичным является другое определение:

```
typedef float VECTOR3[3];
```

Во всех примерах этой книги будет использоваться именно такое определение вектора. Для доступа к компонентам можно ввести величины X , Y , Z :

```
# define X 0
# define Y 1
# define Z 2
```

Тогда макроопределение, например, для векторного произведения двух векторов $\mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$ (см. Приложение В) будет иметь вид:

```

inline void VVECTOR3(VECTOR3 c, VECTOR3 a, VECTOR3 b)
{
    c[X] = a[Y]*b[Z]-a[Z]*b[Y];
    c[Y] = a[Z]*b[X]-a[X]*b[Z];
    c[Z] = a[X]*b[Y]-a[Y]*b[X];
}

```

Скалярное произведение векторов $c = a \cdot b$ задается макроопределением:

```

inline float SVECTOR3(VECTOR3 a, VECTOR3 b)
{
    return a[X]*b[X]+a[Y]*b[Y]+ a[Z]*b[Z];
}

```

Описание точки пересечения луча с объектами можно оформить в виде следующей структуры:

```

typedef struct pp{
    VECTOR3 u,v,n, \ \ векторы локальной системы координат
    cross_point, \ \ текущая точка пересечения
    in,out; \ \ «входящее» и «выходящее» направления
    bool bin,bout;
    float r_dist; \ \ расстояние до точки пересечения
    RADIANCE intensity; \ \ интенсивность излучения
    class COBJECT* IntersectObj; \ \ объект, которому принадлежит точка cross_point
    struct pp *nextpoint;
} PATHPOINT;

```

Для описания интенсивности излучения здесь используется переменная `intensity` типа `RADIANCE`:

```

typedef float RADIANCE;

```

Очевидно, что при таком описании можно получить лишь монохромное (черно-белое) изображение; вопросы, связанные с цветом, мы рассмотрим в следующей главе.

Векторы `in` и `out` соответствуют векторам Ψ_i и Ψ_r на рис. 1.3.

Логические переменные `bin` и `bout` определяют ориентацию поверхности: `bin=TRUE`, если вектор `in` образует острый угол с вектором нормали `n`, иначе `bin=FALSE`. Булевский тип `bool` определяется как