

**О ЦВЕТОВОМ ТОНЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБЪЕКТОВ  
С ОБЪЕМНЫМ ДИФFUЗНЫМ РАССЕЯНИЕМ СВЕТА**

**О. Л. Головков, Е. И. Чернов**

*Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина, г. Рязань  
E-mail: fanasm@rambler.ru*

Выявлены особенности проявления цветового тона двухслойных объектов с объемным диффузным рассеянием света в зависимости от угла падения света и толщины верхнего слоя объекта.

**Введение.** Естественные и искусственные материалы с объемным диффузным рассеянием излучения, представленные в виде двухслойных структур, имеют особенности в проявлении цветовых характеристик. Знать эти особенности важно, например, при художественной реставрации зубов [1, 2]. Известно, что яркость объектов с объемным диффузным рассеянием света зависит от угла падения и расходимости падающего на поверхность объекта излучения. Современные методы измерения цвета объектов с объемным рассеянием света, применяемые в стоматологии, не позволяют точно передать все нюансы цвета зубов – типичных представителей двухслойных объектов с объемным рассеянием света. В связи с чем исследование цвета двухслойных объектов с объемным диффузным рассеянием света в зависимости от угла падения света и толщины верхнего слоя актуально и является целью предлагаемой работы.

**Результаты экспериментальных исследований.** Проведено исследование зависимости цветового тона двухслойных объектов (эмаль плюс опак) от угла падения слабосходящегося света и толщины верхнего слоя. В качестве слоев использовались керамические материалы фирмы “Vita” (Германия) (применяемые стоматологами для реставрации зубов) в виде однородных плоскопараллельных пластин толщиной 2 мм. Верхний слой представлял собой полупрозрачную светлую керамику – эмаль (№ 530, № 559 и № 545), а нижний слой – темную, сильно рассеивающую свет керамику – опак (№ 677, № 567 и № 564). В процессе экспериментальных исследований толщина верхнего слоя изменялась путем стачивания с последующей шлифовкой поверхности абразивной бумагой № 0. Для предотвращения влияния рассеяния света от поверхностей керамических пластин на результаты измерений поверхности пластин смачивались. Съемка объектов производилась с

расстояния 500 мм цифровой фотокамерой при их освещении белым светодиодом яркостью 20 кд под углами 0, 15, 30 и 45° к оси оптической фотокамеры.

Полученные результаты обрабатывались в редакторе MatLab 7.0, где была осуществлена нормировка спектра каждого кадра, вызванная спектральными свойствами излучения светодиода и спектральной чувствительностью матрицы фотоаппарата, относительно белого фона, снятого в отсутствие объекта. Затем была произведена нормировка кадра по яркости относительно белого фона, на котором были сняты объекты. Далее был проведен пиксельный RGB-анализ, исходя из которого определялся цветовой тон исследуемых объектов [3].

Изменение цветового тона поверхности двухслойного объекта показано на рис. 1. В результате исследований установлено, что:

- если верхний слой не поглощает, а только диффузно рассеивает свет в своем объеме (белая эмаль), то цветовой тон двухслойного объекта равен цветовому тону нижнего слоя (цвету опака) независимо от углов падения света, коэффициента объемного рассеяния света верхним слоем и толщины этого слоя;

- если эмаль имеет высокий коэффициент объемного рассеяния света и поглощает свет (яркая цветная эмаль), то цветовой тон поверхности объекта располагается между цветовыми тонами эмали и опака;

- если эмаль имеет низкий коэффициент объемного рассеяния света и поглощает свет (серая эмаль), то цветовой тон поверхности объекта может достигать значений, которые ниже как цветового тона эмали, так и цветового тона опака.

**Результаты теоретических исследований.** Для теоретических исследований использовалась математическая модель [4], которая была доработана для анализа двухслойных объектов с объемным диффузным рассеянием света.

Верхний слой объекта – плоскопараллельная стекловидная пластина толщиной  $t$  с показателем рассеяния света  $k$  и показателями спектрального поглощения света  $c_i$ , где  $i$  соответствует трем длинам волн в RGB-анализе. Нижний слой – подложка, которая оптически прилегает к верхней пластине, полностью рассеивает падающий на нее свет и имеет спектральные показате-

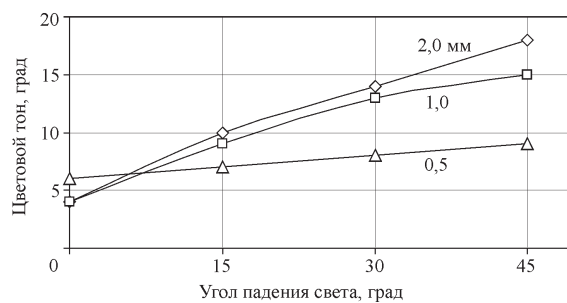


Рис. 1. Изменение цветового тона двухслойного объекта, у которого верхний слой – эмаль № 559 (цветовой тон 17°), нижний слой (подложка) – опак № 564 (цветовой тон 20°), в зависимости от угла падения света на поверхность при различной толщине эмали

тели поглощения света  $s_i$ . На объект падает в соответствии с параметром  $i$  плоскопараллельный монохроматический пучок света под углом  $\alpha$  к нормали поверхности, который, преломляясь в среде, распространяется под углом  $\beta$  к нормали поверхности объекта. Прием света осуществляется фотоприемником, ось диаграммы направленности которого не превышает  $1^\circ$  и перпендикулярна поверхности исследуемого объекта, что соответствует наблюдению глазом. При распространении света в слоях исследуемого объекта отдельно учитывается влияние 0, 1, 2 и 3-го порядков рассеяния на цветовые параметры объекта. Для удобства исследования этого влияния предположим, что диаграмма направленности рассеяния света при однократном рассеянии на частицах среды равномерна во всех направлениях.

Для 0-го порядка рассеяния, когда свет распространяется в среде прямолинейно и происходит его потеря за счет рассеяния и поглощения в верхнем слое среды и рассеяния со спектральным коэффициентом отражения  $s_i$  от нижней подложки объекта, интенсивность света имеет вид

$$I_{1i} = I_0 s_i e^{-(k+c_i)\left(t + \frac{t}{\cos\beta}\right)}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность света, падающего на объект.

Для 1-го порядка рассеяния света, в случае если свет распространяется в среде, не взаимодействуя с подложкой, справедливо выражение

$$I_{2i} = I_0 g k \int_0^{t \operatorname{tg} \beta} e^{-(k+c_i)\left(\frac{L}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{L}{\sin \beta}\right)} dL, \quad (2)$$

где  $g$  – фактор рассеяния света в среде (для однородной среды постоянная величина), характеризующий эффективность и диаграмму рассеяния света на частицах среды при однократном рассеянии;  $L$  – расстояние от точки падения луча света на поверхность среды до точки пересечения оси диаграммы направленности фотоприемника с поверхностью объекта. Пределы интегрирования по  $L$  определены минимальным и максимальным расстояниями от точки падения луча света на поверхность среды до точки пересечения оси диаграммы направленности фотоприемника, при котором возможно пересечение луча света с диаграммой направленности фотоприемника.

Для 2-го порядка рассеяния света, в случае если свет распространяется в среде, не взаимодействуя с подложкой, справедливо выражение

$$I_{3i} = I_0 (kg)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{t/\cos\beta} \int_A^B e^{-(k+c_i)\left[l(1+\cos\beta) + \sqrt{(x-l\sin\beta)^2 + y^2} \frac{1-\sin\gamma}{\cos\gamma}\right]} d\gamma dl dx dy, \quad (3)$$

где

$$B = \operatorname{arctg} \left[ \frac{l \cos \beta}{\sqrt{(x - l \sin \beta)^2 + y^2}} \right];$$

$$A = -\operatorname{arctg} \left[ \frac{t - l \cos \beta}{\sqrt{(x - l \sin \beta)^2 + y^2}} \right];$$

$x$  и  $y$  – координаты падения луча света относительно точки пересечения диаграммы направленности фотоприемника с поверхностью объекта;  $l$  – длина пути света до учета первого акта рассеяния,  $\gamma$  – угол первого акта рассеяния света. Пределы интегрирования: по  $l$  определены минимальной и максимальной длинами пути луча света в среде до первого акта рассеяния, по  $\gamma$  – минимальным и максимальным углами рассеяния света после первого акта рассеяния.

Для 2-го порядка рассеяния света, в случае если свет распространяется в среде, взаимодействуя с подложкой, справедливы два выражения:

$$I_{4i} = I_0 s_i k g \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^C e^{-\left(k + c_i\right) \left[ \frac{t}{\cos \alpha} + t + \frac{\sqrt{y^2 - (x - t \operatorname{tg} \alpha)^2}}{\cos \beta} (1 - \sin \beta) \right]} d\beta dx dy, \quad (4)$$

$$C = \operatorname{arctg} \left[ \frac{t}{\sqrt{y^2 + (x - t \operatorname{tg} \alpha)^2 + y^2}} \right],$$

$$I_{5i} = I_0 s_i k g \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{t/\cos \alpha} e^{-(k + c_i)(l + t + \sqrt{y^2 + (x - l \sin \alpha)^2 + (t - l \cos \alpha)^2})} dl dx dy. \quad (5)$$

Интенсивность света, измеренная фотоприемником, для 2-го порядка рассеяния равна сумме интенсивностей  $I_{3i}$ ,  $I_{4i}$  и  $I_{5i}$ .

Выражения для 3-го порядка рассеяния света громоздки и в данной работе не приводятся, так как если свет распространяется в среде, не взаимодействуя с подложкой, то справедливо выражение, приведенное в [4]. А для расчета интенсивности, связанной с 3-м порядком рассеяния света, в случае

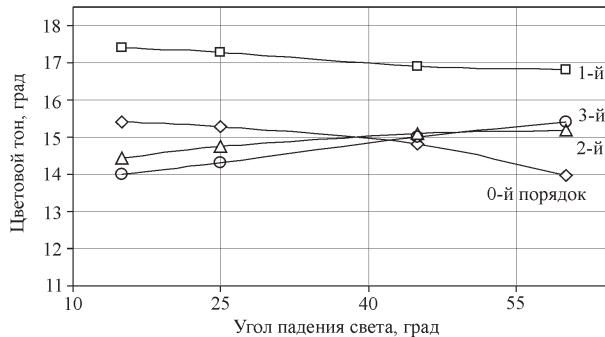


Рис. 2. Изменение цветового тона двухслойного объекта в зависимости от угла падения света для разных порядков рассеяния

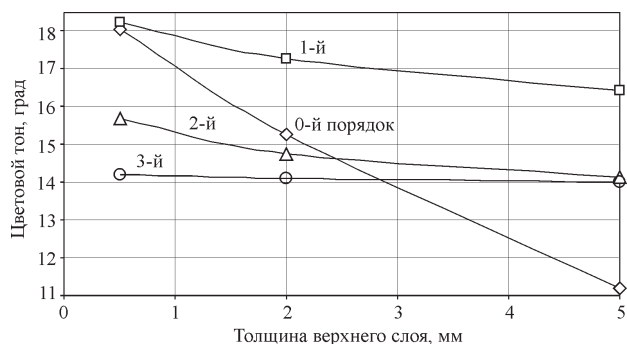


Рис. 3. Изменение цветового тона двухслойного объекта в зависимости от толщины верхнего слоя для разных порядков рассеяния

если свет распространяется в среде, взаимодействуя с подложкой, справедливы подходы, используемые для вывода выражений (4) и (5).

Для анализа двухслойных объектов были использованы уравнения (1)–(5) при разных значениях  $k$ ,  $g$ ,  $t$ ,  $c_i$ ,  $s_i$  и  $\alpha$ , которые решались с помощью математического редактора MathCad 2000.

На рис. 2 представлено изменение цветового тона двухслойного объекта в зависимости от угла падения света для разных порядков рассеяния при следующих условиях:  $g = 0,05$ ,  $k = 0,3$ ,  $c_R = 0$ ,  $c_G = 0,5$ ,  $c_B = 0,75$ , что соответствует цветовому тону верхнего слоя  $16^\circ$ ;  $s_R = 0,2$ ,  $s_G = 0,1$ ,  $s_B = 0,05$ , что соответствует цветовому тону подложки  $19,1^\circ$ ; толщина верхнего слоя 1,5 мм.

На рис. 3 показано изменение цветового тона двухслойного объекта в зависимости от толщины верхнего слоя для разных порядков рассеяния при следующих условиях:  $g = 0,05$ ,  $k = 0,3$ ,  $c_R = 0$ ,  $c_G = 0,5$ ,  $c_B = 0,75$ , что соответствует цветовому тону верхнего слоя  $16^\circ$ ;  $s_R = 0,2$ ,  $s_G = 0,1$ ,  $s_B = 0,05$ , что соответствует цветовому тону подложки  $19,1^\circ$ ; угол падения света  $\beta = 25^\circ$ .

Из рис. 2, 3 видно, что максимальное влияние на изменение цветового тона оказывает 0-й порядок рассеяния. Величина его влияния на цветовые характеристики объектов зависит от показателя рассеяния, показателя поглощения и толщины верхнего слоя и не зависит от формы рассеивающих свет частиц. Поэтому влияние на цветовой тон максимально проявляется, когда верхний слой тонкий. При этом общий цветовой тон двухслойного объекта может быть ниже, чем цветовой тон верхнего и нижнего слоев, что подтверждается экспериментальными данными (см. рис. 1). В связи с тем что с уменьшением толщины верхнего слоя влияние 0-го порядка рассеяния ослабевает, зависимость цветового тона объекта от угла падения света уменьшается согласно рис. 1.

**Заключение.** При использовании материалов с объемным диффузным рассеянием излучения для создания двухслойных объектов (например, искусственных зубов) с заданными цветовыми характеристиками необходимо учитывать описанные в данной работе особенности проявления цветового тона указанных объектов, а именно зависимость цветового тона от условий освещения (углов падения световых потоков или расходимости излучения) и толщины верхнего слоя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хегенбарт Э.** Восстановление цвета в керамике: практическое руководство. Берлин: Квинтэссенция, 1988.
2. **Лебеденко И. Ю., Перегудов А. Б., Глебова Т. Э.** Определение цвета зубов. М.: МГМСУ, 2004.
3. **Синяк М. А.** Спектрофотометр: взгляд изнутри // Publish. 2000. № 2.
4. **Головков О. Л., Чернов Е. И.** О яркости объектов с объемным диффузным рассеянием излучения // Автометрия. 2006. 42, № 6. С. 70.

*Поступила в редакцию 6 февраля 2007 г.*

---