

**А.П. Балмаков**  
УО «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»,  
Гомель, Беларусь

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНОГО ЦВЕТООБРАЗОВАНИЯ ПЕРЬЕВ ПТИЦ**

Фотонные кристаллы, которые естественным образом встречаются в перьях некоторых видов птиц со структурным типом окраски, исследуются в работе в целях выявления возможных оптических приложений. Разнообразие цветов природных систем обусловлено двумя основными оптическими механизмами, известными как пигментное и структурное цветообразование [1]. Широко распространенный пигментный тип цветообразования обусловлен отражением и рассеянием света объектом, содержащим пигмент, который поглощает свет в ограниченном диапазоне длин волн, в то время как излучение, не соответствующее этому диапазону, слабо взаимодействует с пигментом. Совершенно иная картина наблюдается при структурном типе цветообразования, при котором цвета формируются как следствие интерференции света и его когерентного рассеяния на субмикрометровых структурах с периодически изменяющимися показателями преломления [2]. В природе оба эти механизма цветообразования часто реализуются одновременно в одном и том же объекте.

Структурный тип цветообразования распространен в перьях некоторых птиц связан с особой структурой перьев, обуславливающей образование фотонных кристаллов. Можно выделить два основных подтипа структур, результатом взаимодействия излучения с которыми является цветообразование в птичьих перьях: губчатые структуры перьев и упорядоченные решетки меланосом [3]. Только для нескольких видов птиц хорошо известны детали механизма структурного цветообразования. Например, окрас перьев голубей может быть хорошо описан с применением теории тонких пленок [4]. В перьях райских птиц содержатся слоистые стопки заполненных меланином цилиндрических структур с субмикрометровыми размерами (меланосомами), встроенных в кератиновый кортекс, которые действуют как многослойные

отражатели [5, 6]. Структура с трехмерным расположением меланосом с воздушными каналами в кератиновом кортексе наблюдается в павлиньих перьях и действует как трехмерный фотонный кристалл [7].

Перья со структурным типом цветообразования подразделяют на два подтипа: перья с радужным окрасом и перья с отсутствием радужного окраса (рисунок 1).



Рисунок 1 – Классификация цветообразования перьев птиц

Для перьев индюков характерно довольно сложное расположение полых меланосом, а именно: перья с полыми, заполненными воздухом меланосомами, плотно упакованные в гексагональную решетку, находятся в кератиновом кортексе, образуя двумерный фотонный кристалл [8]. На рисунке 2 приведены фотографии, иллюстрирующие радужный окрас перьев индюка, являющийся следствием структурного цветообразования. Различия цветов, имеющие место у птицы для перьев разных типов (рисунок 2(b,c)), обусловлены отличиями в геометрических размерах фотонных кристаллов, но не в структуре фотонного кристалла, и его материальных параметрах. Стоит также заметить, что цвет перьев меняется в зависимости от угла наблюдения, поэтому в соответствии с классификацией, приведенной на рисунке 1, их можно отнести к типу «структурные» и подтипу «с радужным окрасом». При отражении света под большим углом проявляются фиолетовый оттенок в окрасе хвостового пера и четко выраженный зеленый цвет – в окрасе покровного пера (рисунок 2(d,e)).

Рисунок 2 – Фото перьев индюка, обладающих структурным типом

цветообразования. (a) – общий вид птицы, (b) – хвостовое перо, (c) – покровное перо, (d, e) – те же перья, что в (b,c) соответственно, но наблюдаемые при отражении под большим углом

На рисунке 3 иллюстрирован механизм появления радужного окраса птичьих перьев, которым характерен структурный тип цветообразования. Радужный окрас перьев имеет место, если спектр отражения пера зависит от угла отражения излучения от его поверхности (рисунок 3(a)). В этом случае меланосомы имеют форму цилиндрических блоков и упакованы рядами, как показано на рисунке 3(a). Если оттенок перьев остается одинаковым вне зависимости от того, под каким углом наблюдатель регистрирует спектр отражения, то имеет место структурное цветообразование без радужного окраса. В этом случае как правило в структуре перьев птиц имеются воздушные полости сферической формы, которые специфическим образом рассеивают падающий свет без образования радужного окраса. Голубой цвет перьев у птиц со структурным типом цветообразования, как правило, обусловлен рассеянием.



Рисунок 3 – Пояснение механизмов структурного цветообразования: (a) – с радужным окрасом; (б) – без радужного окраса

В целях исследования характерных особенностей спектров отражения перьев индюка (со структурным типом цветообразования и радужным окрасом) от важнейших геометрических параметров фотонного кристалла автором статьи проведена разработка и параметризация компьютерной модели фотонного кристалла, предназначенной для описания

спектров отражения. Параметризация осуществлялась по следующим ключевым параметрам фотонного кристалла: количеству слоев меланосом, интервалу между этими слоями, внешнему диаметру меланосом и диаметру воздушных полостей внутри них, типу пространственной структуры фотонного кристалла (кубическая, гексагональная решетки). Исследована зависимость спектров отражения от угла падения излучения на поверхность фотонного кристалла, а также от типа поляризации падающего излучения.

В работе были получены также экспериментальные спектры отражения перьев индюка для фотонных структур двух типов и произведено их сравнение со спектрами, полученными в результате моделирования. В диапазоне длин волн от 400 до 1600 нм спектры, полученные зондовым методом, очень хорошо соответствуют полученным в результате численного моделирования. Однако при регистрации спектров микроспектрофотометрическим методом в диапазоне от 400 до 1000 нм обнаружены осцилляции, характер которых сильно зависит от выбора конкретного микрометрического участка пера, выбранного для исследования, что объясняется естественной неоднородностью микроскопической структуры пера. Указанные осцилляции имеют интерференционную природу и могут быть описаны в рамках теории интерференции света в тонких пленках. Спектры, полученные с применением фотометрического шара Ульбрихта, в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм имеют сглаженный, ровный характер (осцилляций нет) и очень хорошо соответствуют численно моделируемым спектрам.

### Литература

1. Fox, H.M. The nature of animal colours / H.M. Fox, G. Ververs. – London: Sidgwick and Jackson, 1960. – 246 P.
2. Kinoshita, S. Structural colors in the realm of nature / S. Kinoshita. – World Scientific, 2008. – 368 p.
3. Prum, R.O. Anatomy, Physics, and Evolution of Structural Colors // Bird coloration volume 1: mechanisms and measurements / ed. G.E. Hill, K.J. McGraw; Harvard University Press, 2006. – 640 p.

4. Yoshioka, S. Origin of two-color iridescence in rock dove's feather  
/ S.Yoshioka, E.Nakamura, S.Kinoshita // J. Phys. Soc. Japan. – 2007. – Vol. 76, № 1. – P. 013801 (4 pages).
5. Sparkling feather reflections of a bird-of-paradise explained by finite-difference time-domain modeling / B.D. Wilts [et al.] // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. –2014. –Vol. 111, № 12. – P. 4363–4368.
6. High refractive index of melanin in shiny occipital feathers of a bird of paradise / D.G.Stavenga [et al.] // Light Sci. Appl. – 2015. – Vol. 4, № 1. – P. e243.
7. Coloration strategies in peacock feathers / J. Zi [et al.] // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. – 2003. –Vol. 100, № 22. – P. 12576–12578.
8. Eliason, C.M. How hollow melanosomes affect iridescent colour production in birds / C.M. Eliason, P.-P. Bitton, M.D.Shawkey // Proc. Biol. Sci. – 2013. – Vol. 280, № 1767. – P. 20131505.