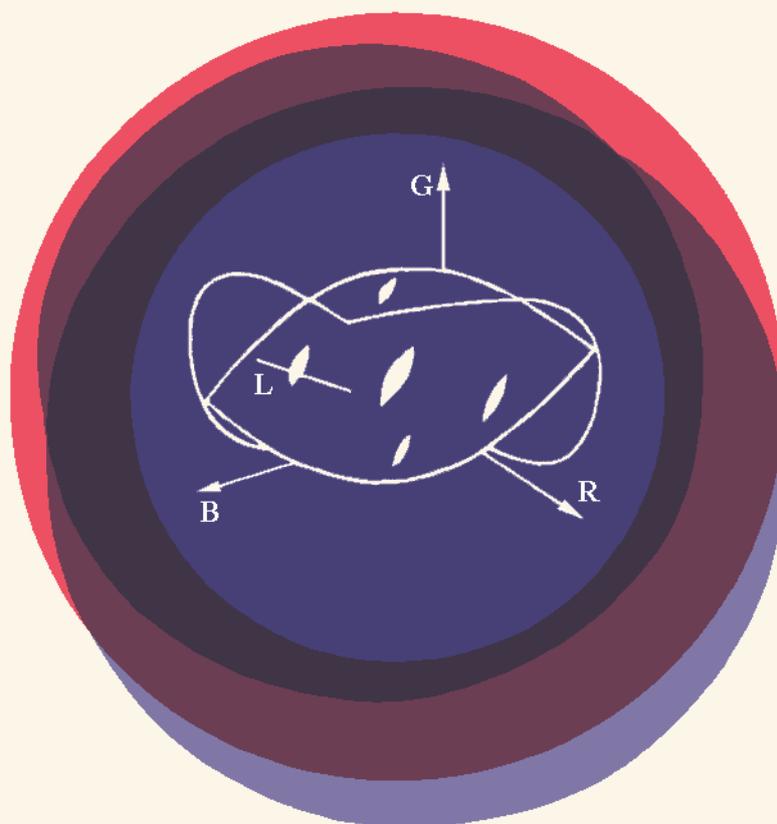


ТРАНСФОРМАЦИЯ ЦВЕТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОСВЕЩЕНИЯ

В. В. МАКСИМОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
· НАУКА ·

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

В. В. МАКСИМОВ

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ЦВЕТА
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ
ОСВЕЩЕНИЯ**

Ответственный редактор
член-корреспондент АН СССР
А.Л. БЫЗОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"
Москва 1984

Максимов В.В. **Трансформация цвета при изменении освещения.** – М.: Наука, 1984.
В книге проводится анализ преобразования цвета излучения, отраженного от окрашенных поверхностей, при изменении спектрального состава освещения. Учет этих преобразований позволяет осуществлять константность восприятия цвета предметов. Возникающая вследствие метамеризма окрасок неоднозначность преобразования ограничивает возможную точность узнавания цвета. Экспериментальные данные показывают, что зрительная система человека и животных способна вводить необходимую "поправку на освещение", компенсирующую эти преобразования цвета.

Для научных работников, занимающихся вопросами переработки зрительной информации и моделирования зрительных функций, а также для специалистов в области светотехники и цветоведения.

Ил. 48. Библиогр. 207 назв.

Рецензенты:

В.И. ГОВАРДОВСКИЙ, А.П. ПЕТРОВ

Вадим Викторович Максимов

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЦВЕТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОСВЕЩЕНИЯ

Утверждено к печати Институтом проблем передачи информации АН СССР

Редактор *Н.Н. Лебедева*. Редактор издательства *А.А. Боровая*
Художник *С.Б. Генкина*. Художественный редактор *Н.А. Фильчагина*
Технический редактор *Л.В. Русская*. Корректоры *О.А. Разуменко, Н.И. Харламова*
Набор выполнен на электронной фотонаборной системе в издательстве "Наука"
ИБ N 27863

Подписано к печати 06.04.84. Т-09608. Формат 60 × 90^{1/16}. Бумага для глубокой печати
Гарнитура "Таймс". Печать офсетная. Усл. печ.л. 10,0. Усл. кр.-отг. 10,2. Уч.-изд.л. 12,1
Тираж 1100 экз. Тип. зак. 1230. Цена 1р. 80к.

Издательство "Наука", 117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

М $\frac{2001040000-212}{042(02)-84}$ 220-84-П

© Издательство "Наука", 1984 г

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга сформировалась под влиянием идей Николая Дмитриевича Ньюберга (1898—1967), который первым заинтересовался тем, как расположены в цветовом пространстве цвета излучений, отраженных от окрашенных поверхностей, и как их расположение связано со спектром освещения. Фактически, книга является развитием статьи Н.Д. Ньюберга 1936 г. "Спектральный состав источника и цвета освещаемых им тел", которую в этом отношении можно считать программной, а ее название вполне могло быть заголовком этой книги. Основой для этих исследований послужили практически забытые работы Н.Д. Ньюберга 50-летней давности. Правда, в то время единственной известной системой цветового зрения была зрительная система человека, и работы Н.Д. Ньюберга относились только к ней. Сейчас, когда мы знаем много примеров разных систем цветового зрения, появилась возможность развить его результаты и приложить их к системам цветового зрения других животных. Николаю Дмитриевичу Ньюбергу удалось привить нам, молодым сотрудникам лаборатории, представление, что самое интересное в зрении — цветовое зрение, а константность цветовосприятия является центральной проблемой в цветовом зрении человека и животных. В этом направлении под его руководством в лаборатории велись и теоретические, и экспериментальные работы.

Так как математизацией биологии занимаются, как правило, не математики и не биологи, а физики, то результат такой работы во многом определяется соответствующим математическим и биологическим окружением. Моим окружением был коллектив биологов и математиков Лаборатории органов чувств ИППИ АН СССР. Особенно в этой связи мне хочется отметить роль двух сотрудников лаборатории. И.С. Лосев в течение продолжительного времени был постоянно в курсе этой работы и самостоятельно доказал некоторые из высказанных в ней утверждений, проверив тем самым их с

математической стороны. Круг моих интересов в области биологии формировался под влиянием совместной работы с О.Ю. Орловым, который является для меня примером классического естествоиспытателя.

Хотя книга посвящена теоретическим вопросам, в ней упоминаются и результаты экспериментальных работ, в которых принимали участие Е.М. Максимова — соавтор большинства электрофизиологических работ и терпеливый испытуемый в психофизических экспериментах, а также Т.А. Подугольникова, Е.И. Родионова, А.М. Диментман и О.Ю. Орлов. Я очень признателен им за помощь. Хочу также выразить благодарность В.И. Говардовскому за предоставленную возможность использовать результаты его микро-спектрофотометрических измерений, проведенных на сетчатках многих видов животных.

А.Л. Бызов, В.И. Говардовский, И.С. Лосев, П.П. Николаев, А.П. Петров и М.С. Смирнов прочитали рукопись и высказали много критических замечаний, что немало способствовало изменению текста. Я весьма благодарен им за этот кропотливый труд.

ВВЕДЕНИЕ

В науке, как и в повседневной жизни, термину "цвет" придают, как правило, так много разных, иногда даже противоречащих друг другу смыслов, что любую работу о цвете принято начинать с разбора или конкретизации этого понятия. Так, инженеры и физики, желая иметь дело с конкретными, формальными понятиями и отдавая себе отчет в том, что наши цветовые ощущения могут определяться только излучениями, попадающими на сетчатку, и ничем больше, однозначно связывают цвет со спектральным составом такого излучения. Начиная с И. Ньютона, разложившего свет в спектр с помощью призмы, именно с этих позиций физиками Т. Юнгом, Дж. Максвеллом, Г. Гельмгольцем создано все цветоведение [12].

В то же время наши интуитивные представления о цвете определяются цветовыми ощущениями, которые вызываются у человека теми или иными излучениями, попадающими в глаз. И тут мы постоянно сталкиваемся с такими ситуациями, которые должны убеждать нас в том, что цветовые ощущения не связаны со спектром излучения однозначно. Одно и то же излучение в разных условиях может вызывать разные цветовые ощущения, и наоборот, разным по спектральному составу и по цвету (в физическом смысле) излучениям могут соответствовать одинаковые цветовые ощущения.

Показательным может быть пример, который по этому поводу любил приводить Н.Д. Ньюберг [35] и который теперь мы можем иллюстрировать результатами непосредственных спектральных измерений. Вспомним, как выглядят желтые цветки одуванчика на зеленом весеннем лугу. В этой обстановке имеется два основных варианта освещения: на открытых местах — прямое солнечное, а в тени — освещение светом чистого весеннего голубого неба, еще не загрязненного летней пылью. Относительные распределения энергии $S(\lambda)$ в спектрах этих источников освещения показаны на рис. 1, I. На рис. 1, II приведены измеренные на спектрофотометре спектральные коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$ цветка одуванчика и его зеленого листа. Спектры отраженных излучений при том или ином освещении могут быть рассчитаны как произведения спектров освещения на соответствующие спектральные функции коэффициента отражения. Такие спектральные распределения интенсивности отраженного излучения $S\rho$ от цветка одуванчика, освещенного светом голубого неба, и

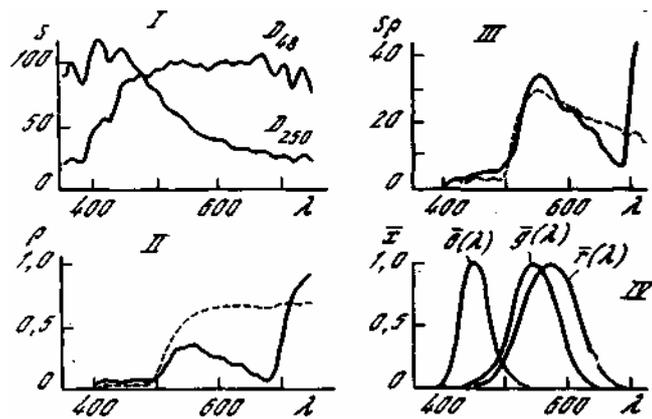


Рис. 1. Спектральные характеристики цветов одуванчика на весеннем лугу

I – спектральные распределения интенсивностей "дневного" освещения [10]: прямое солнечное освещение (D_{48}) и свет голубого неба в апреле-мае (D_{250}); II – спектральные кривые коэффициентов отражения желтого цветка одуванчика (штриховая линия) и зеленой листы (сплошная линия); III – спектры излучений, отраженных от цветка одуванчика, освещенного светом неба (штриховая линия), и от зеленой листы, освещенной солнцем (сплошная линия); IV – кривые спектральной чувствительности приемников глаза человека

зеленой листы (поверхности луга), освещенной солнцем, приведены на рис. 1, III, из которого видно, что они почти не отличаются друг от друга — по крайней мере в видимом диапазоне спектра, где чувствительности приемников человека (рис. 1, IV) отличны от нуля. Однако наши цветовые ощущения в этих случаях резко различны и совсем не соответствуют спектральному составу отраженных излучений. Напротив, излучение, отраженное от цветка одуванчика, освещенного солнцем, будет иметь совершенно иной спектральный состав. Восприниматься же он будет как тот же самый желтый цвет.

Таким образом, цветок одуванчика независимо от освещения (а следовательно, независимо от отраженного им излучения) мы видим желтым, а луг зеленым. Подобных примеров можно привести очень много. Все они показывают, что наши цветовые ощущения коррелируют не со спектральным составом излучения, отраженного от окрашенных предметов, а с окраской (отражательной способностью поверхности) этих предметов.

Такая особенность цветового зрения становится совершенно понятной, если вспомнить, что цель работы зрительной системы состоит не в восприятии световых излучений как таковых, но в узнавании объектов внешнего мира, опираясь на эти излучения. Глаз должен информировать нас не о спектральном составе излучения, отраженного от внешних объектов, а о самих этих объектах. Поскольку именно окраска поверхности является неотъемлемым и относительно стабильным свойством (признаком) объектов, естественно, что наши цветовые ощущения коррелируют именно с окраской. Наша зрительная система воспринимает и запоминает о предмете

только то, что служит признаком этого предмета и не зависит от возможных в природе больших качественных изменений освещения.

Общие представления о том, каким образом зрительной системе удастся узнавать окраску предмета, невзирая на меняющиеся условия освещения, и соответственно отраженного от поверхности предмета излучения, были сформулированы Г. Гельмгольцем более 100 лет назад [101]. Существование таких примеров, когда излучения одинакового цвета (и даже физически тождественные) вызывают разные цветовые ощущения и, наоборот, когда разные излучения вызывают одинаковые ощущения, совсем не означает, что цветовые ощущения вообще не связаны с попадающими в глаз излучениями. Конечно же, информацию об окраске поверхности несет излучение, отраженное от этой поверхности. Но для того, чтобы узнать эту окраску, зрительная система должна также учитывать, при каком освещении это излучение отразилось от поверхности. Способность нашей зрительной системы почти в любой ситуации правильно узнавать характер освещения дает возможность "вводить на него поправку" при узнавании окраски предметов. Благодаря этому при любом естественном освещении мы воспринимаем цвет предмета неизменным. Такая способность зрительной системы правильно узнавать окраску предметов в разнообразных условиях освещения получила название константности цветовосприятия и является, по выражению Э. Геринга, "одним из наиболее достопримечательных и важных фактов в области физиологической оптики" [104, с. 16].

Тот факт, что в зрительной системе существуют специальные механизмы поправки на освещение, часто работающие совершенно автоматически, приводит к тому, что мы совсем не обращаем внимания на постоянно происходящие в нашей жизни изменения освещения. Часто мы просто не представляем себе, насколько эти изменения велики, и сталкиваемся с этим только тогда, когда, например, сделав фотографию при искусственном освещении на фотопленку, Предназначенную для дневного, получаем снимки с сильными искажениями в цветопередаче. К сожалению, четкие представления об удивительной способности нашей зрительной системы к константному восприятию окраски предметов внешнего мира в меняющихся условиях освещения мало распространены даже среди специалистов в области зрения. Более того, все многообразие проявлений нашей способности к константному восприятию окраски, а также конкретные механизмы узнавания характера освещения и введения на него поправки в зрительной системе пока мало изучены. В результате даже в вопросах, связанных с восприятием окрашенных объектов, роль нашей способности к константности цветовосприятия часто искажается, принижается или вообще игнорируется. В частности, одно из распространенных заблуждений (уже давно разобранные [116]) — память на цвета. Считается, что цвет знакомого предмета после изменения освещения остается для нас неизменным просто потому, что мы знаем сам предмет. Крайняя форма такого утверждения выглядит примерно следующим образом: "...лист бумаги вечером при освещении лампами накаливания мы также считаем

белым, хотя действительно его цвет значительно отличается от белого цвета и является желтым" [1, стр. 57]. Тем самым проблема константности как бы выворачивается наизнанку: не по цвету (окраске) предмета мы узнаем сам предмет, а, узнав предмет (например, по его форме, размеру...), зрительная система догадывается о его цвете. На самом деле это явно не так. Конечно же, мы узнаем степень зрелости помидора по его цвету, а не наоборот — узнаем его цвет, только попробовав помидор на вкус.

Представления о том, что в жизни важны сведения именно об окраске видимой поверхности, а не об излучениях, ею отраженных, и что именно эти сведения зрительная система способна получать, относятся не только к цветовому зрению человека. Животным точно так же нужно ориентироваться во внешнем мире, и их зрительная система тоже должна уметь извлекать информацию об окраске поверхности по отраженному излучению. Без способности к константному восприятию окраски предметов внешнего мира цветовое зрение животным было бы мало полезно. И действительно, поведенческие опыты, проведенные на пчелах [24], рыбах [11, 69], жабах [8], птицах [117, 119], показывают, что реакции животных на те или иные окрашенные предметы остаются относительно неизменными при вариациях освещения, приводящих к сильному изменению спектрального состава отраженного от них излучения.

Итак, для того, чтобы противостоять постоянным изменениям освещения, зрительная система должна обладать некоторыми компенсаторными механизмами, позволяющими учитывать происходящие из-за этих изменений преобразования цветов излучений, отраженных от окрашенных предметов. Фактически это означает, что в нервных отделах зрительной системы (на вход которых поступает информация о цветах отраженных излучений) должны производиться преобразования, обратные тем, которые происходят с этими цветами вследствие изменения освещения. При этом как преобразования цветов отраженных излучений, так и обратные им преобразования в зрительной системе определяются характером изменений освещения. В результате, при такой поправке на освещение, сигналы на "выходе" зрительной системы (наши цветовые ощущения) не будут зависеть от освещения.

Такое рассмотрение позволяет сформулировать следующий подход к решению вопроса о том, как связаны цветовые ощущения с цветами излучений, попадающих в глаз. Сначала необходимо исследовать преобразования цветов излучений, отраженных от окрашенных поверхностей, происходящие при изменениях освещения. После этого гипотеза об устройстве компенсаторных механизмов, благодаря которым наши цветовые ощущения об окраске предметов остаются неизменными после изменения освещения, может быть представлена как обратное преобразование (трансформация) цветов.

На подобную трансформацию цвета, происходящую в зрительной системе, психологи обратили внимание давно (см., например, обзор в [116]). При этом часто "трансформация цвета" рассматривается просто как синоним "константности цветовосприятия" [122], но

иногда эти термины противопоставляются [110]. В зависимости от того, в каких терминах экспериментатор описывает предъявляемые стимулы, сама проблема связи цветового ощущения со спектральным составом излучения, отраженного предметом и попадающего в глаз, получает разные названия. Так, когда мы помним о главной цели работы зрительной системы и ее аппарата цветового зрения — узнавании окрасок предметов в меняющихся условиях освещения, проблема, как уже говорилось, получает название константности цветовосприятия или, точнее, константности восприятия окраски поверхности. В этом случае описание соответствующих внешних (экспериментальных) ситуаций идет в терминах окрасок поверхностей и спектрального состава освещения. Когда же, отвлекаясь от цели работы зрительной системы, пытаются описывать стимулы в терминах входных сигналов — цветов посылаемых в глаз излучений, то оказывается, что цветовое ощущение от одного и того же излучения меняется в зависимости от общей зрительной ситуации, от распределения излучений в поле зрения. Цвет излучения претерпевает трансформацию в зрительной системе при изменении условий предъявления. В этом случае говорят о феномене трансформации цвета [122]. К сожалению, такой феноменологический подход, оставляя вне поля зрения цели работы зрительной системы, тем самым априори предполагает, что такая трансформация произвольна. В этой работе мы будем исходить из предположения, что трансформация цвета (точнее, переработка информации о цвете) в зрительной системе человека и животных производится для того, чтобы противостоять изменениям освещения и обеспечивать более или менее константное узнавание окраски видимых поверхностей. Это, как уже говорилось, может быть осуществлено посредством преобразования, обратного тому которое происходит с цветами излучений, отраженных от окрашенных поверхностей. Поэтому для того, чтобы понять механизмы этой трансформации, нужно изучить закономерности преобразований цветов отраженных излучений, происходящих при изменении освещения.

КОНСТАНТНОСТЬ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ

Цветовое зрение

Цветовым зрением называется способность зрительной системы различать излучения по относительному спектральному составу. Для этого в зрительной системе животных имеются два или более приемников светового излучения с разными кривыми спектральной чувствительности. Число таких светочувствительных приемников определяет *размерность* цветового зрения. Системы цветового зрения, основанные на двух светочувствительных приемниках, называют *дихроматическими*, основанные на трех светочувствительных приемниках — *трихроматическими*. В том случае, когда имеется один светочувствительный приемник, любые два излучения можно сделать неотличимыми друг от друга, варьируя только их интенсивности. Естественно, что животные, имеющие всего один светочувствительный приемник, способны отличать излучения только по мощности. В этом случае говорят, что цветовое зрение у животных отсутствует, а таких животных называют *монохроматами* или *ахроматами*.

Наша способность различать цвета выглядит удивительным и не совсем обязательным свойством зрения. Опыт фотографии, кино и (в последнее время) телевидения убеждает нас в том, что зрительная система человека прекрасно разбирается и в изображениях, лишенных цвета. Поэтому еще полвека назад бытовало мнение, что цветовое зрение — последнее достижение эволюции ("подарок природы человеку" [165]). Считалось, что хорошим цветовым зрением обладает только человек, а среди животных лишь на уровне приматов появляются какие-то зачатки цветоразличения. Остальные же животные живут в скучном черно-белом мире. При этом не только у людей в недавнем историческом прошлом (например, у древних египтян), но даже у некоторых современных народов цветовое зрение недостаточно развито*. А в индивидуальном раз-

* В качестве показателя развитости цветового зрения принималось многообразие цветовых терминов, существующих в языке того или иного народа. Примечательно, что Дж. Парсонс в своей книге [165], обращая внимание на отсутствие, например, в японском языке отдельных слов для обозначения синего и зеленого цветов или в некоторых африканских языках — слов для различения коричневого (бурого) и фиолетового, в то же время не замечает, что в его родном английском языке нет специальных названий для различения другой пары цветов: голубого и синего. Вследствие чего ему самому на протяжении всей книги для обозначения синего цвета приходится пользоваться иностранным термином — "индиго".

витии человека полноценное цветовое зрение формируется только к 3 годам.

Однако впоследствии выяснилось, "что эти представления отражали скорее отсутствие знаний о способности к цветоразличению у животных, чем отсутствие у них цветового зрения. Развитие методов исследования аппарата цветоразличения в последующие годы показало, что цветовое зрение распространено в мире животных гораздо шире. Способность к цветоразличению есть почти у всех животных, активно пользующихся зрением в своем поведении, и скорее ее отсутствие составляет исключения. Цветовое зрение есть у многих насекомых [23]. Наличие цветового зрения показано в поведенческих экспериментах для нескольких видов рыб [68, 91, 166, 198, 204]. Гораздо больше рыб исследовано морфологами [47, 88, 186] и биохимиками [54] и показано, что их сетчатки содержат необходимые элементы для цветоразличения. Исключения составляют живущие в сплошной темноте глубоководные формы, имеющие чисто палочковую сетчатку [128]. Считалось, что цветнослепы также акулы, в жизни которых зрение, по-видимому, вообще играет меньшую роль, чем у других рыб. Но в последнее время в сетчатке акул среди многочисленных палочек обнаружен также довольно большой процент колбочек [181], что ставит вопрос о наличии цветового зрения и у акул [95]. Среди наземных позвоночных наличие цветового зрения показано для амфибий, рептилий, птиц и ряда семейств млекопитающих [41, 192]. Что касается человека и приматов, то, согласно современным представлениям, по свойствам своего аппарата цветоразличения человеческие расы не отличаются ни друг от друга [92], ни от обезьян [63, 64], а новорожденные младенцы не отличаются от взрослого человека [2] — за исключением малосущественных изменений, вносимых прогрессирующим с возрастом пожелтением хрусталика [171].

Широкое распространение в природе способности к цветоразличению совсем не означает (как это зачастую неявно предполагается), что у всех животных системы цветового зрения (количество светочувствительных приемников и их кривые спектральной чувствительности) одинаковы. Хотя к настоящему времени были проведены только разрозненные и не всегда полные исследования свойств цветового зрения некоторых животных, даже такой ограниченной выборки достаточно, чтобы убедиться в многообразии систем цветового зрения, различающихся как количеством светочувствительных приемников, так и формой и расположением на спектральной оси их кривых спектральной чувствительности.

Светочувствительные приемники глаза

Цветовое зрение обычно связывают со специальным типом фоторецепторов сетчатки, а именно с колбочками, ответственными за дневное (фотопическое) зрение [40]. Способность к цветоразличению обусловлена наличием в сетчатке нескольких типов колбочек (двух, трех, иногда больше), содержащих разные светочувствительные пигменты и имеющих разные спектральные чувствительности.

Рецепторы сумеречного зрения (палочки) обычно представлены одним типом, содержат один пигмент, и поэтому при низкой освещенности цветоразличение отсутствует. В некотором смысле исключение составляет сетчатка амфибий, которая наряду с обычными содержит особый тип палочек — так называемые "зеленые палочки"*; несущие в то же время ряд морфологических [195] и физиологических [62, 84] черт колбочек. Строение наружного сегмента зеленых палочек и большое количество светочувствительного пигмента в нем говорят о том, что они приспособлены к улавливанию малых количеств света. Однако на основании поведенческих работ можно заключить, что зеленые палочки, несомненно, работают при фотопических уровнях яркости и вместе с колбочками участвуют в цветоразличении [13, 152]. В то же время в отличие от обычных палочек они, по-видимому, не работают при очень низких освещенностях [82].

Другое исключение — палочковидные рецепторы ночных ящериц — гекконов, ведущие свое происхождение от колбочек [195]. В сетчатках разных видов гекконов различают до 5 морфологических типов рецепторов [85, 191], а биохимически там обнаруживают по крайней мере два разных светочувствительных пигмента [77], что может служить основой для дихроматического сумеречного зрения. Однако подтверждающих это поведенческих экспериментов по цветоразличению у гекконов пока не известно.

Роль собственно палочек в цветовом зрении пока не ясна. С одной стороны, известно, что в повседневной жизни многообразие воспринимаемых человеком цветов трехмерно и целиком определяется работой трех колбочковых светочувствительных приемников. Но, с другой стороны, показано, что палочки продолжают работать и при фотопических уровнях освещенности, а так как по спектральной чувствительности они отличаются от колбочек, у человека в колориметрических опытах удается зарегистрировать четвертый (палочковый) светочувствительный приемник [4, 189]. Более того, показало, что колбочковые монохроматы, имеющие только синечувствительный колбочковый приемник и палочки, способны к дихроматическому цветовосприятию [61] — при умеренных освещенностях мир для них выглядит окрашенным. Похожие случаи дихроматического восприятия цветов, но основанные на совместной работе длинноволновых колбочек и палочек, могут быть получены с помощью специальных условий освещения и для нормальных трихроматов [142, 148].

О роли палочек в цветоразличении у животных известно еще меньше. В сетчатках ряда животных, например у амфибий и многих видов рыб, палочки содержат тот же светочувствитель-

* Свое название зеленые палочки (так же как и обычные "красные" или "пурпурные") получили по их видимому цвету под микроскопом. Спектральные интервалы, к которым чувствительны эти рецепторы, не соответствуют названиям: пигмент зеленых палочек определяет синечувствительный приемник глаза амфибий, а зрительный пурпур (родопсин), содержащийся в обычных палочках и в одном из типов колбочек, — зеленочувствительный приемник (см. рис. 2, II).

ный пигмент, что и один из типов колбочек. В этом случае, если пренебречь различиями, возникающими из-за разной оптической плотности пигмента в палочках и колбочках (см., например, рис. 2, II), добавление палочек к работе колбочек не изменит размерности цветового зрения. У других животных палочки и колбочки содержат разные светочувствительные пигменты примеры этого представлены на рис. 3 и 4. Здесь размерность дневного цветового зрения определяется тем, участвуют или не участвуют в нем палочки.

Экспериментально сведения о наборе светочувствительных приемников глаза и об их кривых спектральной чувствительности добываются разными методами. В частности, при исследовании экстрактов светочувствительных пигментов фоторецепторов биохимическими методами были получены сведения об их химическом строении и о цепи химических превращений молекулы пигмента, следующих за поглощением ею кванта света [46, 99]. Сходное химическое строение всех исследованных светочувствительных пигментов фоторецепторов как позвоночных, так и беспозвоночных животных приводит к тому, что их кривые поглощения имеют примерно одинаковую колоколообразную форму (со слабо выраженным вторым максимумом поглощения в коротковолновой части спектра) и различаются только своим положением на спектральной оси. В результате каждый светочувствительный пигмент можно практически однозначно характеризовать значением длины волны (λ_{\max}), при котором его поглощение максимально. Предложены номограммы [79, 87, 157] и эмпирические формулы [100, 175], позволяющие по λ_{\max} определить форму кривой поглощения светочувствительного пигмента. Исследование экстрактов пигментов сетчатки удобно для выяснения спектральной чувствительности палочек — обычно наиболее многочисленных и наиболее богатых пигментом рецепторов сетчатки. Но обнаружение пигментов, содержащихся в малых количествах, и разделение смеси пигментов представляет серьезные трудности.

Разработанный в 60-х годах и получивший в настоящее время широкое распространение метод микроспектрофотометрии позволяет измерять спектры поглощения фотопигментов непосредственно в наружных сегментах отдельных рецепторов [126]. Тем самым, с одной стороны, отпадает необходимость в разделении смеси пигментов. С другой стороны, этим методом исследуются спектры поглощения пигмента, встроенного в мембрану наружного сегмента, в его естественном состоянии, не нарушенном биохимическим экстрагированием.

При отведении электрических реакций от различных отделов зрительной системы животных в электрофизиологических экспериментах также удается установить количество светочувствительных приемников и снять их кривые спектральной чувствительности. Тут следует упомянуть разработанный М.М. Бонгардом и М.С. Смирновым специально для решения этого вопроса метод колориметрии замещения на животных [3, 5], метод, основанный на регистрации раннего ре-

цепторного потенциала [9], а также регистрацию электрических реакций непосредственно от рецепторов с помощью микроэлектродов [188].

Следует заметить, что как результаты биохимических исследований экстрактов фотопигментов, так и результаты микроспектрофотометрических или электрофизиологических исследований, проведенных на изолированных рецепторах или на изолированной сетчатке, не всегда дают полное представление о кривых спектральной чувствительности приемников в естественных условиях работы глаза. Дело в том, что эти кривые определяются не только спектром поглощения отдельных молекул соответствующего светочувствительного пигмента, но зависят также от его эффективной оптической плотности в наружном сегменте. Кроме того, на форме кривой спектральной чувствительности сказывается избирательное поглощение света в передних средах глаза: роговице, хрусталике, которые у многих видов животных оказываются более или менее выражено окрашенными [42, 153, 154], и даже в самой сетчатке (например, макулярный пигмент в фовеа человека [194]) или в окрашенных в разные цвета жировых каплях, расположенных на пути света прямо в колбочках у многих видов рептилий и птиц [44, 94, 153].

Поведенческие эксперименты, проводимые на интактных животных, лишены этих недостатков. Однако возможности поведенческих (психологических) экспериментов на животных для определения кривых спектральной чувствительности приемников сильно ограничены их низкой точностью. Такие опыты обычно используются для выяснения начального вопроса о том, обладает ли данный вид животных цветовым зрением (когда еще не ставится задача измерения формы самих кривых спектральной чувствительности [8, 60, 115]), и на последнем этапе исследования — для проверки действительного участия того или иного светочувствительного приемника в цветоразличении [13, 43, 108].

Основные сведения о кривых спектральной чувствительности приемников человека, напротив, получены именно в психологических экспериментах. Микроспектрофотометрические измерения на отдельных колбочках человека [63, 66] с учетом спектрального поглощения глазных сред согласуются с психологическими данными, но точность этих измерений слишком низка, чтобы непосредственно их можно было использовать в цветоведении.

Системы цветового зрения животных

Хотя не исключено, что у некоторых животных цветовое зрение более чем трехмерно [94, 126, 130], сведения о таких системах цветового зрения недостаточны, чтобы на них опираться. Поэтому здесь мы разберем только случаи трихроматии и дихроматии. На рис. 2 приведены кривые относительной спектральной чувствительности $\bar{x}(\lambda)$ приемников человека (данные Н.Д. Ньюберга и Е.Н. Юстовой [38]) и некоторых животных, обладающих трихроматическим зрением. Цветовое зрение обезьян (не только чело-

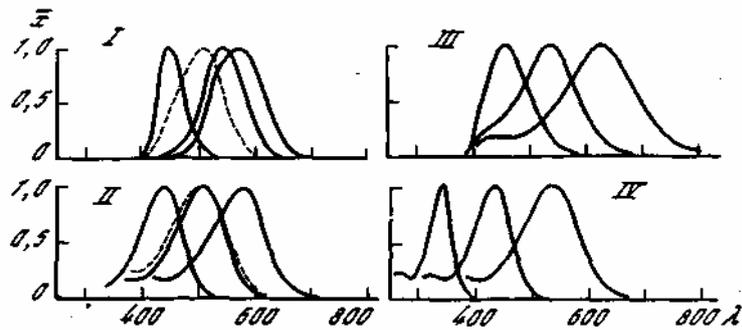


Рис. 2. Примеры трихроматических систем цветового зрения

Сплошные линии — кривые спектральной чувствительности приемников дневного зрения: I — человека, II — амфибий, III — рыб семейства карповых, IV — пчелы и шмеля; пунктирные линии — кривые спектральной чувствительности приемников сумеречного зрения человека и амфибий

векообразных, но и макак, а также некоторых обезьян Нового Света) не отличается от цветового зрения человека и определяется тем же набором светочувствительных пигментов [63, 64, 108].

Из низших позвоночных система цветового зрения бесхвостых амфибий (лягушек и в меньшей степени жаб) исследована лучше других. Спектральные чувствительности их рецепторов измерены микроспектрофотометрически [127] и в электрофизиологических экспериментах [5, 39, 167]. Известны также поглощающие свойства глазных сред [93]. Среди рыб известно несколько видов, обладающих трехмерным цветовым зрением. Из них лучше всего исследована система цветового зрения карповых (карпа [188, 203], карася [164], линя [78, 158], золотой рыбки [70, 100, 139]), у которых, как и у большинства других пресноводных рыб и черепах, диапазоны чувствительности приемников сдвинуты в длинноволновую область спектра по сравнению со светочувствительными приемниками человека и лягушки (рис. 2). Другие примеры трихроматических систем цветового зрения рыб приведены на рис. 3. Насекомые, напротив, отличаются повышенной чувствительностью к ультрафиолетовому свету. На рис. 2, IV приведены кривые спектральной чувствительности приемников пчелы и шмеля [22, 58].

Цветовое зрение, основанное на двух светочувствительных приемниках, обычно для многих видов животных. Однако первые примеры дихроматических систем цветового зрения были изучены у людей, где они встречаются среди разнообразных форм нарушения нормального трихроматического зрения. Дихроматизация у людей возникает в результате "выпадения" одного из трех светочувствительных приемников, а кривые спектральной чувствительности оставшихся двух приемников обычно не отличаются от таковых нормального трихромата (см. рис. 2, I). Соответственно различают три ее формы. Дихроматов, у которых отсутствует длинноволновый красночувствительный приемник, называют протанопами, у которых отсутствует зеленочувствительный приемник, — дейтера-

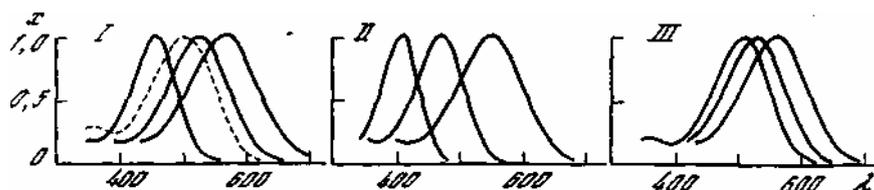


Рис. 3. Кривые спектральной чувствительности рецепторов сетчатки рыб-трихроматов I – *Haplochromis burtoni* из семейства цихлид [90], II – гуппи *Lebistes reticulatus* [125], III – *Crenilabrus melops* из семейства губановых [130]; пунктир – кривая спектральной чувствительности палочек, которые у *Haplochromis burtoni* содержат пигмент, отличный от пигмента зеленочувствительных колбочек

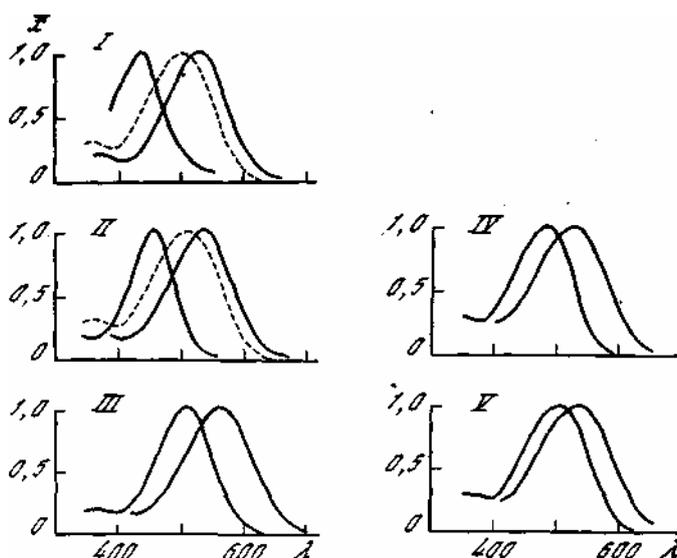


Рис. 4. Кривые спектральной чувствительности рецепторов сетчатки черноморских рыб-дихроматов согласно микроспектрофотометрическим измерениям В. И. Говардовского и Л.В. Зуевой (I – III) и гекконов (IV, V) [134]

I – ставрида *Trachurus mediterraneus ponticus*, II – скорпена *Scorpaena porcus*, III – черноморская сельдь *Alosa kessleri ponlica*, IV – *Gekko gekko* и V – *Aristelliger praesignis*; для рыб сплошные линии – кривые спектральной чувствительности колбочек, штриховые – палочек

нопами, а тех, у которых отсутствует синечувствительный приемник, — тританопами. Последняя форма дихроматизации встречается крайне редко и обычно сопровождается другими серьезными нарушениями зрения. В то же время система цветового зрения тританопа представляет большой теоретический интерес, в частности тем, что из всех известных дихроматических систем максимумы чувствительности приемников тританопа расположены ближе всего друг к другу — кривые спектральной чувствительности максимально перекрываются. Позднее сходные формы нарушения цветового зрения были обнаружены у некоторых популяций белых обезьян (обезьяны Нового Света) [108]. Причем в специаль-

ных микроспектрофотометрических исследованиях показано, что сетчатка обезьяны, которая, судя по поведению, страдала протанопией, содержала только два типа колбочек — синечувствительные и зеленочувствительные — и не содержала красночувствительных [108].

Дихроматические системы цветового зрения широко распространены среди рыб. Здесь часто дихромазия связана с утратой синечувствительного приемника. Этот вывод основан на морфологических и микроспектрофотометрических наблюдениях: в сетчатках таких рыб отсутствуют так называемые короткие (или дополнительные) одиночные колбочки, обычно содержащие синечувствительный пигмент [130]. Как правило, такие рыбы наряду с отсутствием синечувствительных рецепторов в сетчатке имеют окрашенную в желтый цвет роговицу, которая снижает общую чувствительность к синему свету [151]. В качестве примеров рыб-дихроматов можно назвать щуку [21, 164] и окуня [20, 73, 130] (см. рис. 18, а). Из морских рыб можно упомянуть ставриду и скорпену [9], у которых отсутствуют не сине-, а зеленочувствительные одиночные колбочки. Их сетчатки содержат три светочувствительных пигмента, один из которых (родопсин) локализован в палочках, а два других — в колбочках (рис. 4, I и II). В сетчатке черноморской сельди имеются зеленочувствительные колбочки, содержащие тот же пигмент, что и палочки, но нет синечувствительных колбочек (рис. 4, III). Цветовое зрение черноморской сельди представляет собой хороший пример дихроматической системы с сильно перекрывающимися кривыми спектральной чувствительности приемников. Вообще близкое расположение λ_{\max} светочувствительных приемников характерно для многих морских рыб [130, 186]. Среди наземных позвоночных сильное перекрытие кривых спектральной чувствительности встречается у gekkonov [134] (рис. 4, IV и V).

Цветовое зрение млекопитающих (за исключением приматов) изучено хуже. Часть млекопитающих, например некоторые мышевидные грызуны, по-видимому, вообще не имеют цветового зрения. Лучше других изучена система цветового зрения у грызунов семейства беличьих: белок, бурундуков, сурков и сусликов. Животных удается выдрессировать на узнавание цветов (см., например, [118]). Электрофизиологические исследования зрительных отделов их нервной системы показывают, что там имеются цветокодирующие нервные клетки [150, 184]. Сетчатка беличьих содержит два морфологических типа рецепторов [199]. Изучены также поглощающие свойства желтого хрусталика суслика [109] и белки [76]. Считается, что все беличьи имеют примерно одну и ту же дихроматическую систему цветового зрения, определяемую двумя светочувствительными приемниками с максимумами спектральной чувствительности в области 460 и 525 нм [41, 109, 150] (рис. 5). Однако микроспектрофотометрические данные Е. Лозва [129] для серой белки не совсем с этим согласуются. В палочковидных рецепторах им обнаружен пигмент с максимумом поглощения около 500 нм, а в колбочковидных — только более длинновол-

новый пигмент с $\lambda_{\max}=543$ нм. Поиски синечувствительных рецепторов не увенчались успехом.

Кошка, возможно, представляет собой еще один пример дихромата. Электрофизиологическими методами в сетчатке кошки выявлены два фотопических (колбочковых) приемника с максимумами чувствительности в районе 450 и 555 нм и один скотопический приемник, с максимумом чувствительности в зеленой

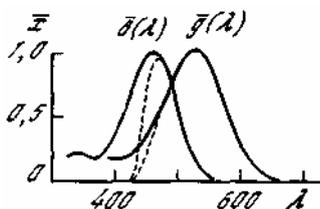


Рис. 5. Предполагаемая система цветового зрения белых животных

Сплошные линии — рассчитанные по номограмме Дартнолла [79] спектральные чувствительности рецепторов, содержащих светочувствительные пигменты с λ_{\max} при 460 и 525 нм, пунктирные — кривые спектральной чувствительности приемников, рассчитанные с учетом поглощающих свойств хрусталика [76]

(500 нм) области спектра [81, 207]. Однако в последнее время появились сообщения о том, что зеленочувствительный приемник кошки определяется не одними палочками, и следует предположить наличие третьего типа колбочек с такой же кривой спектральной чувствительности, что и у палочек [169]. Следовательно, по числу фотопических приемников цветовое зрение кошки может оказаться и не дихроматическим, а трихроматическим. В то же время в поведении кошки обычно проявляется себя как ахромат (цветнослепая) и с трудом дрессируется на цвета [131, 149, 176]. Таким образом, резюмируя настоящий раздел, можно заключить, что системы цветового зрения животных могут различаться размерностью — числом светочувствительных приемников, а также формой и взаимным расположением их кривых спектральной чувствительности. Хотя эти кривые измерены к настоящему моменту только для очень немногих животных, даже приведенный здесь далеко не полный перечень систем цветового зрения иллюстрирует их широкое разнообразие. Естественно, что особенности цветового зрения животного определяются его светочувствительными приемниками. Однако мы не будем привязывать наши последующие рассуждения к той или иной конкретной системе цветового зрения (как это делается, например, в цветоведении и светотехнике, которые всецело ориентированы на цветовое зрение человека и опираются на кривые спектральной чувствительности приемников только человеческого глаза). Разнообразие систем цветового зрения животных дает нам основание рассматривать общий случай, не накладывая априорных ограничений на количество, вид и расположение на спектральной оси кривых спектральной чувствительности приемников. В то же время в иллюстрациях и приложениях будем опираться на конкретные кривые спектральной чувствительности, чтобы показать применимость теории к конкретным системам цветового зрения.

Цвет излучения

Излучения, попадающие в глаз животного, становятся видимыми благодаря тому, что они в той или иной степени поглощаются светочувствительными пигментами, содержащимися в рецепторах. Пусть спектральное распределение энергии такого излучения описывается функцией $E(\lambda)$. Тогда эффективность излучения по отношению к данному зрительному пигменту определяется кривой спектральной чувствительности $\bar{x}(\lambda)$ соответствующего приемника и будет пропорциональна следующему интегралу:

$$X = \int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (1.1)$$

Величину этого интеграла принято называть *возбуждением* светочувствительного приемника в ответ на излучение со спектральным составом $E(\lambda)$. Иначе говоря, величина X характеризует интенсивность этого излучения "с точки зрения" данного приемника.

Для того чтобы различать между собой обозначения для кривых спектральной чувствительности $\bar{x}(\lambda)$, а также возбуждений X соответствующих светочувствительных приемников одной системы цветового зрения, будем приписывать к ним нижние индексы $i = 1, 2, \dots, n$, где n — размерность цветового зрения.

Совокупность величин X_i , $i = 1, 2, \dots, n$, задаваемых интегралами вида (1.1), характеризует сигнал о видимом излучении, поступающий на вход зрительной системы животного. Поэтому она способна различать излучения между собой только постольку, поскольку они производят разное действие на те или иные из ее светочувствительных приемников. Любые два излучения $E_1(\lambda)$ и $E_2(\lambda)$, различающиеся по спектральному составу, но вызывающие одинаковые возбуждения каждого из светочувствительных приемников данного животного:

$$\int_0^{\infty} E_1(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)d\lambda = \int_0^{\infty} E_2(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)d\lambda; \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

будут неотличимы для его зрительной системы. О таких излучениях говорят, что они имеют один и тот же *цвет*, а сами излучения принято называть *метамерными* [174].

В соответствии с этим определением цвет любого излучения можно характеризовать точкой n -мерного цветового пространства, в качестве цветовых координат которого можно взять, например, возбуждения X_1, X_2, \dots, X_n светочувствительных приемников. Применительно к цветовому зрению человека система координат X_1, X_2, \dots, X_n получила название *системы координат основных физиологических цветов*. Эта система дает один из возможных, но не единственный способ представления цвета в пространстве. Традиционное определение цвета излучения как совокупности неотличимых для зрительной системы спектральных составов [29, 174] не привязано к конкретной системе координат. Все применяющиеся системы координат можно разделить на две группы. Одну из них (куда входит, в частности, и система координат основных физиологических цветов) составляют системы координат, которые приме-

няют, когда имеют дело с цветом как физической характеристикой излучения. Все эти системы координат могут быть получены одна из другой с помощью линейного преобразования. В соответствующем цветовом пространстве сохраняются векторные (аффинные) свойства цвета, в частности выполняется закон сложения цветов: цвет смеси (суммы) двух излучений равен векторной сумме цветов каждого из этих излучений. Причем в экспериментальных вопросах колориметрии принято использовать цветовые координаты, определяемые непосредственно конструкцией соответствующего измерительного прибора — колориметра [50]. Для удобства сопоставления результатов, полученных на разных приборах, Международная комиссия по освещению (МКО) рекомендовала ряд единых систем координат, в частности известную систему XYZ [98].

Другие координатные системы в большей или меньшей степени ориентированы на психофизические стороны цвета (например, система координат яркости, цветового тона и насыщенности или чистоты цвета) и даже предполагают наличие метрики в цветовом пространстве — разнообразные "равноконтрастные" системы [10, 26]. К сожалению, осмысленность таких систем цветовых координат вызывает сомнения даже применительно к цветовому зрению человека, поскольку наши цветовые ощущения коррелируют не столько с цветом излучения, сколько с окраской поверхности в поле зрения.

Поскольку для нас в этой книге отправной точкой всегда будут служить не измерительные приборы и не цветовые ощущения, а кривые спектральной чувствительности приемников $\bar{x}_i(\lambda)$ того или иного животного и величины X_i , характеризующие возбуждения этих приемников, то мы будем задавать цвета излучений непосредственно в системе координат основных физиологических цветов.

Исторически для кривых спектральной чувствительности приемников человека и для соответствующих цветовых координат закрепились следующие индивидуальные названия: кривую спектральной чувствительности красночувствительного приемника $\bar{x}_i(\lambda)$ обозначают как $\bar{r}(\lambda)$, зеленочувствительного — $\bar{g}(\lambda)$ и синечувствительного — $\bar{b}(\lambda)$. Соответственно координаты X_1 , X_2 и X_3 называют красной (R), зеленой (G) и синей (B) цветовыми координатами. Впоследствии эти обозначения привились и для систем цветового зрения лягушки [43] и карпа [185, 188], несмотря на то что эти животные имеют совершенно иные светочувствительные приемники. Для систем цветового зрения других животных также обычно вводят аналогичные индивидуальные обозначения. Как правило, каждый приемник (и каждая цветовая координата) получают названия и обозначения по "цвету" той области спектра, в которую попадает λ_{\max} этого приемника. Так, кривую спектральной чувствительности коротковолнового приемника пчелы обозначают как $\bar{v}(\lambda)$, поскольку ее λ_{\max} находится в фиолетовой области спектра (см. рис. 2, IV). Однако такой способ обозначения вряд ли стоит считать удачным и удобным. Ему не соответствуют даже обозначения, исконно принятые для цветового зрения человека, так как максимум чувствительности "красночувстви-

тельного" приемника лежит отнюдь не в красной и даже не в оранжевой области спектра, а на границе желтой и зеленой. А у некоторых рыб-трихроматов максимумы чувствительности всех трех светочувствительных приемников оказываются в пределах зеленой области спектра (от 500 до 570 нм) [130] (см. рис. 3). Поэтому в этой книге во всех теоретических построениях мы будем пользоваться удобными своей однородностью обозначениями $x_i(\lambda)$ и X_i , а в иллюстрациях, касающихся конкретных трихроматических систем цветового зрения, использовать обозначения $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ и $\bar{r}(\lambda)$ соответственно для коротковолнового, средневолнового и длинноволнового светочувствительных приемников данного животного, в какой бы области спектра ни находились их λ_{\max} .

Цвет поверхности

Основная масса излучений, попадающих в глаз животного, приходит не от самостоятельно светящихся источников, а представляет собой результат отражения некоторого падающего излучения (освещения) от разнообразных окрашенных поверхностей, расположенных в поле зрения. Спектральный состав таких излучений $E(\lambda)$ зависит как от характера освещения, так и от окраски поверхности предметов. В общем случае эта зависимость может оказаться сложной, но если отвлечься от пространственных характеристик, связанных со взаимным расположением источника, окрашенной поверхности и глаза, и ограничиться только спектральными характеристиками освещения и окраски поверхности, то спектральный состав отраженного от такой поверхности излучения можно представить в виде произведения

$$E(\lambda) = S(\lambda)\rho(\lambda),$$

где $S(\lambda)$ — функция спектрального распределения облученности (энергетической освещенности) поверхности, которую мы в дальнейшем будем называть просто *спектром освещения*, а $\rho(\lambda)$ — функция спектрального распределения коэффициента отражения поверхности. Эту функцию для краткости будем называть *спектральным коэффициентом отражения*, помня, однако, что в разных точках спектра этот коэффициент может принимать разные значения. Для идеального рассеивателя — идеально белой матовой поверхности — обычно полагают $\rho(\lambda) \equiv 1$. Тогда цвет излучения, отраженного от поверхности со спектральным коэффициентом отражения $\rho(\lambda)$, будет определяться интегралами вида

$$X_i = \int_0^{\infty} S(\lambda)\rho(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)d\lambda, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.2)$$

В дальнейшем n -мерный вектор \mathbf{X} с координатами, определяемыми выражением (1.2), будем называть *цветом поверхности* при данном освещении. Как видно из этой формулы, цвет поверхности зависит, с одной стороны, от спектрального коэффициента отражения поверхности, но, с другой стороны, и от характера освещения, вследствие чего при изменении освещения цвет одной и той же поверхности может меняться. Этим наше определение, казалось бы,

противоречит тому, что обычно понимают под цветом поверхности. Объясняется это тем, что этот термин часто употребляют в разных смыслах. Причем различия эти не всегда осознаются. Тут, во-первых, и чисто физическая характеристика поверхности, определяемая ее отражательной способностью и никак не связанная ни с освещением, ни со свойствами цветового зрения наблюдателя. Здесь во избежание путаницы удобнее пользоваться синонимичным термином: *окраска поверхности*. Во-вторых, это — цвет поверхности в том понимании, которое было введено выше. Он характеризует сигналы, поступающие от окрашенной поверхности на вход зрительной системы. И, наконец, в-третьих, термин "цвет поверхности" используют для описания цветовых ощущений, вызываемых той или иной окрашенной поверхностью в поле зрения. В обыденной жизни мы чаще всего употребляем термин "цвет поверхности" именно в этом смысле — например, когда говорим: "поверхность коричневого цвета". При этом, как правило, мы не отдаем себе отчета в том, что наши цветовые ощущения характеризуют совсем не цвет отраженного от этой поверхности излучения, а скорее ее окраску. Как уже говорилось во Введении, наши представления об окраске поверхности остаются более или менее неизменными при вариациях спектрального состава освещения и соответственно отраженного от этой поверхности излучения. Таким образом, "цвет поверхности" в смысле вызываемых этой поверхностью цветовых ощущений является фактически *оценкой окраски поверхности* зрительной системой.

Цветовые ощущения, получаемые от окрашенной поверхности, можно интерпретировать как сигналы, появляющиеся на выходе зрительной системы в результате переработки поступающей на ее вход информации о цветах излучений, отраженных от предметов в ее поле зрения. По крайней мере, именно так представляется оценка окраски поверхности во всех подходах к проблеме константности цветовосприятия [15, 16, 17, 27].

Способность зрительной системы к формированию константного, не зависящего от условий освещения представления об окраске предметов выглядит удивительной, так как входными сигналами для зрительной системы служат только меняющиеся при изменениях освещения цвета излучений, отраженных от данной поверхности, и никаких других сведений о ее окраске зрительная система не получает. На математическом языке правильное узнавание окраски поверхности (точнее, ее спектрального коэффициента отражения) по ее цвету X при данном освещении означает решение системы n уравнений (1.2) относительно ρ^* . Разумеется, в общем случае, когда

* Здесь мы для простоты снова не рассматриваем пространственных характеристик отражательной способности окрашенной поверхности и взаимного расположения источников, поверхности и глаза в пространстве, что позволяет пользоваться наглядным выражением (1.2) для цвета поверхности. Все приведенные здесь рассуждения имеют и более широкую применимость. Учет тех или иных пространственных параметров может привести к усложнению решаемой системы уравнений, однако в принципе всегда можно интерпретировать задачу константности как решение некоторой системы уравнений для цветов излучения, отраженных от окрашенной поверхности, относительно ее отражающей способности.

нет дополнительных сведений о спектре освещения и о спектральном коэффициенте отражения, когда не наложено никаких ограничений на окраску предметов и источники освещения, эта система уравнений содержит слишком много неизвестных. Поэтому невозможно сколь угодно однозначное решение этой системы и, следовательно, невозможно узнавание окраски поверхности по ее цвету, видимому при данном освещении.

Тем не менее в повседневной жизни наша зрительная система удовлетворительно справляется с этой задачей. Это значит, что она использует для узнавания какую-то дополнительную информацию. Это может быть как априорная (не зависящая от конкретной зрительной ситуации) информация о том, какие окраски и какие источники вообще возможны в реальной жизни, так и информация о спектре источника, освещающего окружающие предметы в данный момент. Эту последнюю зрительная система может добыть непосредственно из анализа зрительной ситуации в целом. Изображение видимой "сцены", попадающее на сетчатку глаза, как правило, несет такую информацию о характере освещения — в случае достаточно богатых зрительных ситуаций (каковыми они и являются в реальной жизни). Дело в том, что одновременно на вход зрительной системы поступают не только сигналы о цвете излучения, отраженного от данной поверхности, но также и изображения других предметов. В результате дальнейшей переработки всей этой совокупной информации зрительная система в большинстве случаев может сформировать некоторое представление о характере освещения даже тогда, когда сам источник освещения не попадает в поле зрения. В одном из последующих разделов рассмотрим модели константности, в которых такая задача решалась для определения цвета освещения (правда, при существенных и довольно искусственных ограничениях на его спектральный состав), а также некоторых его пространственных характеристик.

Многообразие окрасок, встречающихся в среде обитания того или иного вида животных, а также многообразие возможных спектров освещения в действительности сильно ограничены. Существуют также ограничения на многообразие зрительных ситуаций — сцен, в которых наблюдаются окрашенные поверхности. Эта априорная информация, а также необходимые сведения о действующем в сцене освещении, получаемые из анализа всей зрительной ситуации, должны определять вид решения системы уравнений (1.2), грубо говоря, формулы или алгоритмы, по которым следует вычислять спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ окраски по ее цвету X при некотором освещении. Таким образом, если известны все эти ограничения, то в принципе можно сформулировать, как в зрительной системе должна быть устроена обработка сигналов, поступающих от некоторой видимой сцены, для того чтобы правильно узнавать (вычислять) окраски предметов. Заметим, что этой дополнительной информации может быть все-таки недостаточно для однозначного решения системы (1.2). Тогда этой системе уравнений будет удовлетворять некоторое множество разных спектральных коэффициентов отражения $\rho(\lambda)$. Это значит, что в таком слишком разнооб-

разном мире возможно только приблизительное узнавание окраски — с некоторой конечной точностью. В таком случае можно построить теоретическую оценку точности узнавания спектрального коэффициента отражения окраски для любого цвета при любом освещении.

Итак, мы свели задачу построения теории константности цветовосприятия к нахождению решения системы уравнений (1.2) — или какой-то аналогичной системы, сложность которой зависит от сложности пространственной организации сцены. Далее мы выделили два источника дополнительной информации о функциях, входящих в решаемую систему уравнений. Во-первых, это — априорная информация в виде ограничений на мир окрасок, источников и видимых сцен. Во-вторых, это — информация о характере действующего освещения, извлекаемая из анализа сетчаточного изображения. В отсутствие априорных (для теории) экспериментальных данных о многообразии окрасок и источников в среде обитания того или иного животного может оказаться продуктивной попытка решить обратную задачу: сформулировать ограничения на мир, исходя из теории. При таком подходе сначала нужно определить, при каких ограничениях на многообразие спектральных коэффициентов отражения и спектров освещения система уравнений (1.2) допускает то или иное точное (или приближенное) решение. Затем уже можно экспериментально проверять, насколько для реальных систем цветового зрения животных их естественное цветное и световое окружение удовлетворяет таким ограничениям.

Прежде чем окончательно сформулировать цель нашей работы, полезно будет рассмотреть уже существующие к настоящему времени представления о механизмах константности цветовосприятия. В этом обзоре рассмотрим сначала вопрос о том, как (по каким формулам) вычислялись оценки окраски поверхности в предположении, что характер действующего в сцене освещения зрительной системе уже известен. Затем в следующих разделах разберем модельные представления о том, как из анализа сетчаточного изображения зрительная система может получать сведения о спектральных характеристиках освещения, а также обо всех необходимых для узнавания окраски параметрах внешней пространственной ситуации.

Поправка на освещение

В общих чертах представления о механизмах константности цветовосприятия были высказаны еще Г. Гельмгольцем [101]. Предполагалось, что зрительная система человека определяет окраску поверхности аналогично тому, как это делается, например, в спектрофотометре. Отражательная способность или спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ поверхности есть отношение отраженного излучения $E(\lambda)$ к падающему излучению $S(\lambda)$ — освещению:

$$\rho(\lambda) = E(\lambda) / S(\lambda).$$

Так и в зрительной системе, согласно Г. Гельмгольцу, окраска тела определяется как "отношение между интенсивностями разноцвет-

ных простых составных частей этого света и интенсивностями соответственных составных частей освещения. Лишь это отношение есть выражение постоянного свойства тела" [7, с. 86]. Часто, для того чтобы оттенить существенную роль учета освещения в механизмах константности, говорят о "введении поправки на освещение" в зрительной системе при узнавании цвета поверхности.

Конечно, в отличие от спектрофотометра такой грубый спектроскопический аппарат, как глаз человека, в действительности позволяет построить оценку коэффициента отражения не для каждой длины волны отдельно, а всего для трех (соответственно количеству светочувствительных приемников у человека) довольно широких областей спектра — трех цветовых каналов. При учете этой особенности нашего аппарата цветового зрения гипотеза Г. Гельмгольца о способе введения поправки на освещение примет следующий вид:

$$\tilde{\rho}_i = \int_0^{\infty} E(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda,$$

где $\tilde{\rho}_i$ есть оценка окраски поверхности, формируемая в зрительной системе. Интеграл в числителе этой формулы есть интенсивность отраженного от окрашенной поверхности излучения $E(\lambda) = S(\lambda)\rho(\lambda)$ с точки зрения i -го светочувствительного приемника — т.е. представляет собой i -ю компоненту цвета \mathbf{X} этой поверхности (1.2) в системе координат основных физиологических цветов. Интеграл в знаменателе есть интенсивность освещения той же поверхности с точки зрения того же приемника, и его по аналогии с интегралом в числителе можно назвать соответствующей компонентой цвета освещения:

$$X_i^0 = \int_0^{\infty} S(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda.$$

Геометрически такой способ введения поправки на освещение означает независимые изменения масштаба каждой цветовой оси в системе координат основных физиологических цветов соответственно освещению. Предполагается, что если в качестве системы координат для изображения цветов поверхностей применять не координаты X_i , а нормированные к цвету освещения координаты $\tilde{\rho}_i$, то в такой системе координат положение цвета одной и той же окрашенной поверхности будет слабо зависеть от освещения. И, следовательно, векторная величина $\tilde{\rho}$, вычисленная с помощью такого *поканального введения поправки на освещение*, может служить оценкой окраски поверхности.

В таком виде представления о способе введения поправки на освещение в зрительной системе человека совпадают со сформулированным еще в начале века И. фон Крисом законом коэффициентов [121], согласно которому в зрительной системе цветовые каналы, связанные с отдельными светочувствительными приемниками, адаптируются к действующему освещению независимо, так, что чувствительность каждого цветового канала обратно пропорциональна действию освещения на соответствующий светочувствительный приемник. Если

обозначить через X_i и X_i^0 возбуждения i -го светочувствительного приемника на отраженное излучение и на освещение соответственно, то возбуждение $\tilde{\rho}_i$ соответствующего адаптированного цветового канала будет определяться отношением:

$$\tilde{\rho}_i = X_i / X_i^0 \quad (1.3)$$

В связи с этой формулой может возникнуть вопрос, откуда зрительная система получает сведения, необходимые для этой адаптации цветовых каналов. В рамках проблемы константности цветовосприятия это действительно важный самостоятельный вопрос, на котором мы остановимся в следующем разделе. Здесь же только утверждается, что при каждом освещении зрительная система находится в определенном, зависящем от этого освещения состоянии адаптации. Закон коэффициентов (1.3) описывает это состояние, но не конкретизирует физиологические процессы, приводящие к нему.

Следует отметить, что закон коэффициентов, с одной стороны, понимался вслед за самим фон Крисом как закон цветовой адаптации в узком смысле — как изменение чувствительности цветовых каналов. При этом вопрос о функциональном смысле такого преобразования цветовых координат в зрительной системе даже не ставился. Для проверки законов цветовой адаптации были проведены многочисленные психологические исследования (см. обзоры [59, 187, 193]) и показано, что закон коэффициентов фон Криса есть только приближение, поскольку обнаружены условия, в которых закономерности адаптации от него отличаются [137, 196]. С другой стороны, в работах, связанных с вопросами восприятия цвета окрашенных поверхностей, адаптация всегда понималась в более широком смысле [71, 187] — как такая подстройка зрительной системы к действующему освещению, которая обеспечивает нам относительно неизменные представления об окраске одних и тех же предметов при изменяющихся спектральных составах освещения. Как правило, во всех подобных работах принимали в качестве постулата преобразования цветовых координат типа закона коэффициентов фон Криса [31, 53, 112, 124, 106], хотя авторы могли существенно расходиться во мнении о том, какую роль в этом процессе играет собственно цветовая адаптация участков сетчатки к падающему на них излучению. Таким образом, хотя и существовали расхождения в представлениях о физиологических механизмах введения поправки на освещение, сам тип преобразования цветовых координат, необходимых для правильного узнавания окраски поверхностей, не подвергался сомнению.

В качестве первого приближения такой взгляд на алгоритмы введения поправки на освещение для правильного узнавания окраски поверхностей был совершенно оправдан. Действительно, цвет $\tilde{\rho}$ некоторой окраски в нормированных (посредством поканальной поправки на освещение) координатах лучше соответствует нашим цветовым ощущениям, чем просто цвет X отраженного от нее излучения — вообще без поправки на освещение. Все это представлялось настолько самоочевидным, что даже обнаруживаемые расхождения между цветами, предсказанными с помощью преобразований фон

Криса и измеренными в психологических экспериментах по цветовосприятию в разных условиях освещения, объясняли отклонениями истинных кривых спектральной чувствительности приемников человека от принятых в расчетах. Поводом к этому послужил, в частности, тот факт, что в одной из первых работ в этом направлении [53] была принята заведомо неподходящая система цветовых координат — преобразования делались непосредственно в координатах XYZ , а не в системе координат основных физиологических цветов. Это обстоятельство в какой-то степени стимулировало проведение более точных измерений кривых спектральной чувствительности приемников человека (см. дискуссию Д. Джадда к докладу Д. Никерсон [159]). До этого вопрос о светочувствительных приемниках человека мало интересовал колориметристов, которые, занимаясь сравнением цветов излучений, а не цветовых ощущений, могли обходиться произвольным базисом в цветовом пространстве [29, 33].

Простота и интуитивная очевидность поканального введения поправки на освещение в соответствии с законом коэффициентов фон Криса повлекли за собой экспериментальные проверки применимости этого закона к зрительной системе человека [103, 144], но оставили вне поля зрения ряд важных (чисто теоретических) вопросов. Так, осталось невыясненным, насколько оценка окраски $\tilde{\rho}$, вычисленная по формуле (1.3), остается неизменной при изменении освещения. Более того, не было доказано и не проверялось, что поканальная поправка — наилучший способ введения поправки на освещение. В действительности вполне вероятно, что, пользуясь той же информацией о цвете отраженного излучения и о цвете освещения, можно другим способом (по другой формуле) получить более константную оценку окраски поверхности. Для ответа на эти вопросы следовало бы установить соответствие между окрасками, характеризуемыми спектральными коэффициентами отражения $\rho(\lambda)$, и оценками окраски $\tilde{\rho}$ и определить, будет ли это соответствие изменяться (и если будет, то по какому закону) при изменении освещения. К сожалению, оценка окраски, полученная с помощью того или иного алгоритма введения поправки на освещение, и сама окраска как физическая характеристика отражательной способности поверхности — трудно сравнимые вещи, поскольку оценка окраски, как это видно на примере поканальной поправки, представляет собой трехмерный вектор (для трехмерного цветового зрения человека), а окраска характеризуется произвольной функцией от длины волны $\rho(\lambda)$.

Ситуация проясняется, если многообразие окрасок ограничено трехпараметрическим множеством. Тогда система трех уравнений (1.2) с тремя неизвестными параметрами окраски (при условии, что известен спектр освещения) будет иметь решение. Поэтому в работах по константности цветовосприятия, как правило, для определенности ограничиваются трехпараметрическим множеством функций $\rho(\lambda)$.

Естественно, что вид решения системы уравнений (1.2) зависит от вида этих ограничений. В одних случаях решение будет совпадать с оценкой (1.3), в других нет. Предполагалось несколько вариантов

трехпараметрических множеств окрасок [27, 37, 45, 65, 173]. Здесь мы остановимся на простейшем из них — так называемой "зональной модели" цветового зрения, поскольку почти все модели константности цветовосприятия, рассмотренные далее в этой главе, формулировались в терминах такого представления.

Свое название *зональная модель* цветового зрения получила по одной из своих интерпретаций, согласно которой весь спектр разбит на n неперекрывающихся зон, в пределах которых функции, определяющие как спектры освещения, так и спектральные коэффициенты отражения, принимают постоянные значения, но могут меняться от зоны к зоне. Каждый из приемников обладает некоторой, обычно "принимаемой за единицу, чувствительностью только в пределах "своей" зоны и нечувствителен к излучению в других зонах*. В этом случае спектр освещения задается n параметрами и однозначно характеризуется его цветом \mathbf{X}^0 . Окраска также задается n параметрами — коэффициентами отражения ρ_i в пределах каждой из зон. А система интегральных уравнений (1.2) существенно упрощается и приобретает вид

$$\{X_i = \rho_i X_i^0, i = 1, 2, \dots, n.$$

При известном цвете освещения \mathbf{X}^0 из этих уравнений по цвету отраженного излучения \mathbf{X} однозначно определяются параметры окраски. Легко видеть, что оценка окраски, вычисленная по формуле (1.3) путем введения по каналной поправки, в случае зонального приближения является точным решением системы уравнений.

Зональная модель цветового зрения (и ее модификации) благодаря своей простоте и наглядности служит "пробным камнем" для многих моделей константности, и мы к ней неоднократно будем возвращаться. Здесь необходимо обратить внимание только на следующее. Во-первых, в зональном приближении получилось, что введение поканальной поправки на освещение обеспечивает точное узнавание окраски поверхности. Во-вторых, для такого узнавания достаточно знать цвет освещения (просто потому, что в такой модели цвет освещения однозначно характеризует его спектр). Однако оба этих утверждения верны только в пределах зональной модели с неперекрывающимися кривыми спектральной чувствительности приемников и не обязательно верны в случае, когда кривые приемников, спектральные коэффициенты

* Примечательно, что зональная модель цветового зрения наилучшим образом согласуется с представлениями М.В. Ломоносова [14] о цвете: размерность цветового зрения определяется самой природой света. Предполагалось, что в свете представлены "коловратные движения частиц эфира трех родов" (а не непрерывный спектр частиц разной энергии). Поэтому любое излучение можно было однозначно характеризовать трехмерным вектором интенсивности. Окрашенные поверхности избирательно "притупляли коловратное движение эфира" того или иного рода. Таким образом, окраску поверхности можно было однозначно характеризовать трехмерным коэффициентом отражения. А когда отраженный свет попадает в глаз, каждый из родов коловращений эфира побуждает в коловратное движение один из трех типов материй в оптических нервах.

Если бы свет действительно обладал такими свойствами, то проблема константности оказалась бы намного более простой и нашу книгу можно было бы кончить на этом месте. К сожалению, факты, противоречащие таким представлениям о свете, были известны еще до Ломоносова [12].

отражения и спектры источников имеют незональный вид (а именно таковы они на самом деле). Так, перекрытие приемников приводит к тому, что поканальная поправка по формуле (1.3) уже не будет давать константной оценки окраски поверхности. А во второй и пятой главах мы покажем, что узнавание окраски поверхности в незональном случае может потребовать больших сведений о спектре освещения, чем только его цвет.

Признаки освещения

Как видно из формулы (1.3), в пределах зонального приближения для узнавания окраски поверхности, кроме цвета X отраженного от нее излучения, необходимо также знать цвет освещения X^0 . Определение характера освещения — довольно сложная задача даже в тех редких случаях, когда виден сам источник, т.е. когда его изображение попадает на какой-то участок глаза животного. Но когда источник не виден, зрительная система может аналогично спектрофотометру определить цвет освещения по излучению, отраженному от белой поверхности. В спектрофотометре это специальная эталонная поверхность, а для зрительной системы показателем освещения могут служить случайно попадающие в поле зрения белые поверхности, находящиеся заведомо в тех же условиях освещения, что и поверхность, окраску которой необходимо определить.

На важную роль близлежащих белых поверхностей для узнавания окраски обратил внимание еще Г. Гельмгольц [7, 101]. Затем это было подтверждено Д. Кацем [116] в специальных психофизических экспериментах. Позднее в работах Н.Д. Ньюберга и соавторов [36, 37] было показано, что для извлечения информации об освещении из сетчаточного изображения совершенно не обязательно иметь в поле зрения именно белый предмет — поверхность, отражающую практически все падающее на нее излучение в любой области спектра. Достаточно для каждой области спектра иметь хотя бы по одной поверхности, которая отражает весь падающий на нее свет именно в этой области спектра. Не требуется, чтобы эти свойства были локализованы в одной и той же точке — информация о цвете источника может быть рассредоточена по сетчатке. Иными словами, достаточно иметь в поле зрения ярко-красный (отражающий практически весь падающий свет в красной области спектра), аналогично ярко-зеленый и ярко-синий объекты для того, чтобы восстановить характер освещения ровно в той же степени, в которой это позволяет сделать наличие белого объекта в поле зрения.

Высказывались также другие предположения о том, какие параметры зрительной ситуации могут служить показателями освещения. Мы не будем здесь подробно на них останавливаться, укажем только в качестве примеров такие, как излучение, отраженное от знакомых (не обязательно белых) предметов [35, 104]; среднее излучение, идущее от сцены в целом [34, 102, 143]; излучение, рассеянное в атмосфере [67] или внутри глаза [51, 52, 168]; среднее излучение, попадающее на данное место сетчатки за продолжительный промежуток времени (адаптация).

Некоторые из этих предположений были проверены в специальных психофизических экспериментах и подтверждены или опровергнуты.

Следует заметить, что способ введения поправки на освещение путем по канальной адаптации даже в случае зональной модели применим только к таким экспериментальным ситуациям, в которых все точки совершенно матовой поверхности находятся в одинаковых условиях: не только освещены одним и тем же источником, но также находятся от него на одинаковом расстоянии и ориентированы по отношению к нему под одним и тем же углом. Этому удовлетворяет плоская цветная аппликация — ситуация, наиболее часто употребляемая в психофизических опытах [36, 123, 141], а также в поведенческих [11, 24] и электрофизиологических [19] экспериментах на животных. Однако реальные зрительные ситуации, как правило, содержат раскрашенные объемные предметы, каждая точка поверхности которых может находиться в разных условиях освещения. Источник освещения также редко бывает единым для всех предметов сцены. Например, это могут быть солнце и небо, а также локальные цветные рефлексы от близлежащих ярко освещенных предметов. Естественно, что для зрительной системы животных требуется узнавать окраски именно для таких объемных сцен, а не в искусственных экспериментальных условиях раскрашенных плоскостей.

При переходе от аппликации к объемным матовым поверхностям ситуация осложняется тем, что, кроме информации о спектре источника для каждого участка поверхности предмета, требуется также знать его расположение относительно источника, так как освещенность поверхности зависит от ее ориентации относительно направления на источник и от расстояния до него, если этот источник — точечный, или от апертуры источника, если он — диффузный. Теоретически такая задача рассмотрена в работах Б. Хорна [106] и П.П. Николаева с соавторами [15, 17, 27] для случая, когда каждый участок поверхности освещен преимущественно одним источником (хотя в сцене в целом разные предметы могут быть освещены разными источниками) и отсутствуют сильные рефлексы от близлежащих окрашенных поверхностей. Пользуясь той особенностью объемных сцен, что от точки к точке поверхности интенсивность освещения обычно меняется плавно, удается построить алгоритм, который учитывает распределение интенсивности освещения на предметах (вводит поправку на объемную форму) и тем самым сводит задачу к плоской цветной аппликации.

Разбирался также другой крайний случай [27, 37], когда объемная сцена в целом освещена единым источником, но конфигурация поверхности такова, что в освещение отдельных ее точек существенный вклад вносят рефлексы от других участков той же поверхности — гофрированная, складчатая поверхность. Именно благодаря возникающим в результате таких рефлексов насыщенным цветам в глубине складок цветной поверхности мы легко отличаем красную скатерть, освещенную белым светом, от белой скатерти, освещенной красным светом. Таким образом, в случае гофрированных поверхностей более сложная организация сцены дает новые признаки освещения (в результате чего зрительной системе удастся оценить характер освещения,

как это видно на примере красной скатерти, даже в отсутствие белого предмета в поле зрения). Однако сведения в спектральном составе освещения здесь могут быть получены лишь на основе сопоставления цветов излучений, приходящих от разных мест поля зрения. В приведенном выше примере такими информативными (для оценки цвета освещения) участками были изображения выпуклых (освещенных прямым светом источника) и вогнутых, теневых (освещенных только внутренними рефlekсами) мест складок скатерти. Это приводит к существенному усложнению алгоритмов переработки сигналов о цвете, необходимых для константного восприятия окраски.

Информативные участки сетчаточного изображения

В предыдущем разделе на ряде последовательных примеров мы показали, что усложнение внешней пространственной ситуации может потребовать больших сведений о характере освещения, необходимых для введения поправки. Более того, усложнение сцены усложняет саму процедуру вычисления параметров освещения по входному сетчаточному изображению. В этом разделе проиллюстрируем случаи, когда при дальнейшем усложнении внешней пространственной ситуации, кроме сведений о действующем в сцене освещении, для узнавания, о краске поверхности нужно уметь извлекать из сетчаточного изображения также 1) дополнительные сведения об отражаемых данной поверхностью излучениях и 2) некоторые сведения об оптических свойствах окружающей среды, в которую погружены видимые предметы.

Когда поверхности в поле зрения не являются совершенно матовыми, т.е. рассеивающими свет во все стороны одинаково, их отражательная способность зависит не только от длины волны, но также от угла падения, угла отражения и т.п. Примером этого может служить "золотистый" цвет поверхности. Мы отличаем "золотистый" от "желто-оранжевого" не столько по спектральным свойствам окраски, сколько по наличию зеркальной составляющей в отраженном излучении. В этом случае количество и спектральные характеристики попадающего в глаз отраженного света определяются не только тем, как поверхность ориентирована по отношению к источнику, но также и тем, как та же поверхность ориентирована относительно наблюдателя. Поэтому здесь нельзя составить представление об окраске поверхности, используя только локальные характеристики отраженного от нее излучения, как это было в случае матовых поверхностей.

Случай, когда отражательная способность поверхностей в поле зрения представима в виде совокупности идеально диффузной и чисто зеркальной, неселективной составляющих, разобран в пределах зонального приближения в работе П.П. Николаева [27]. Здесь представление об окраске поверхности может быть выработано только на основе анализа цветов излучений: 1) рассеянного диффузно, приходящего от тех мест однородно окрашенной поверхности, расположение которых относительно источника и глаза наблюдателя не дает зеркального блика, и 2) отраженного зеркально от другого места той же поверхности. Это, в свою очередь, требует предварительного выделения на сетчаточном изображении соответствующих участков, несущих порознь

информацию о диффузной и зеркальной характеристиках отражательной способности поверхности.

Наконец, следует упомянуть еще об одной попытке расширить многообразие рассматриваемых зрительных ситуаций, в которых возможно узнавание окраски поверхностей. На этот раз не за счет увеличения числа одновременно действующих источников, усложнения формы предметов или отражающих свойств их поверхности, а за счет изменения свойств среды, в которую погружены эти предметы. Речь идет о задаче узнавания окраски предметов в мутной среде [16]. Дело в том, что в отличие от практически прозрачного воздуха, поглощающая и рассеивающая водная среда ставит перед зрительной системой водных животных дополнительные трудности в узнавании окраски предметов внешнего мира. В то же время в условиях водной среды быстро и эффективно работающие механизмы константности цветовосприятия особенно важны, так как здесь условия освещения меняются очень сильно [135, 154]. Как показано экспериментально [11, 69], рыбы действительно способны правильно узнавать окраску при изменении освещения в широких пределах.

В работе [16] были разобраны особенности сетчаточного изображения, формируемого предметами внешнего мира в такой среде, и показано, что узнавание окраски видимых предметов по их изображению требует выяснения, кроме характера освещения, еще дополнительных параметров внешней пространственной ситуации (таких, как условия наблюдения данного предмета, характеристик поглощения и рассеяния света в среде) и последующего введения на них поправки. Необходимые для этого сведения могут быть получены из некоторых *информативных участков* самого сетчаточного изображения. В частности, показано, что наряду с изображениями белых предметов, дающих информацию о цвете освещения, существенную роль здесь играют также изображения черных (практически не отражающих света) поверхностей. Воспринимаемый цвет черных предметов несет непосредственную информацию об интенсивности мутной завесы между предметами и глазом. Таким образом, тот факт, что в случае мутной среды приходится вводить поправку на большее число параметров внешней пространственной ситуации, заставляет использовать для этого, как правило, не один, а несколько информативных участков сетчаточного изображения. В результате зрительная система должна вырабатывать суждения об окраске поверхности, проецирующейся в некоторую точку сетчатки, на основе сопоставления информации о цветах излучения, собираемой с большого числа близлежащих точек сетчаточного изображения.

Механизмы константности

Рассмотренные нами модели константности цветовосприятия не только могут дать общее представление о проблеме, продемонстрировать ее сложность и многоплановость, но в то же время и показывают, что решения (в виде алгоритмов переработки информации, поступающей на вход зрительной системы) получены пока только для част-

ных, далеких от реальности случаев. Основной недостаток этих моделей — постулирование слишком жестких и явно неадекватных ограничений на спектры источников, спектральные коэффициенты отражения окрасок и кривые спектральной чувствительности приемников. Тем не менее уже в простейших моделях константности цветовосприятия присутствуют основные элементы процедуры введения поправки на освещение, которые фактически содержат любой алгоритм константности. Коротко их перечислим.

Для того чтобы оценить окраску поверхности, требуется, во-первых, определить параметры излучений, отраженных от данной поверхности в поле зрения. Какие это параметры, зависит от сложности организации сцены. Вообще говоря, никаких других характеристик отраженного излучения, кроме его цвета, воспринимаемого рецепторами в каждой точке сетчаточного изображения, зрительная система не получает. Поэтому возможные различия между алгоритмами константности цветовосприятия определяются только тем, достаточно ли при данной организации сцены рассматривать каждую точку изображения окрашенной поверхности локально или необходима совокупная обработка информации от всех точек, куда проецируется поверхность одной окраски. Для случаев плоской цветной аппликации или даже объемных, но матовых поверхностей (когда спектральный коэффициент отражения однозначно характеризует отражательную способность поверхности) с единственным (по спектральному составу) источником освещения в сцене для узнавания окраски достаточно локальных характеристик отраженного от нее излучения — значений n координат цвета в каждой точке. В случае бликующих объемных поверхностей и при большем числе одновременно действующих источников освещения под характеристиками отраженного излучения следует понимать всю совокупность цветов излучений, отраженных от всех точек однородно окрашенного участка поверхности.

Во-вторых, для введения поправки зрительной системе требуется найти места в поле зрения, которые несут информацию о характере освещения и, в более общем случае, о других необходимых параметрах внешней пространственной ситуации. В-третьих, на основе цветов излучений, приходящих на соответствующие информативные участки сетчатого изображения, нужно вычислить параметры освещения. Уже было показано, что для зональной модели цветового зрения применительно к плоской цветной аппликации освещение однозначно характеризуется его цветом. В случае матовых объемных сцен к этому могут добавиться локальные характеристики освещения, зависящие от формы и положения в пространстве данного участка поверхности относительно источника. Однако, какие параметры освещения нужно знать в случае, когда кривые спектральной чувствительности приемников, спектры освещения и спектральные коэффициенты отражения окрасок представляют собой произвольные функции длины волны, заранее не известно. И, наконец, в-четвертых, зрительная система должна, используя параметры отраженного излучения и параметры освещения, вычислить параметры окраски поверхности в данном участке поля зрения.

Схематически такая процедура введения поправки на освещение показана на рис. 6, I. Конечно, такая общая схема механизмов константно-

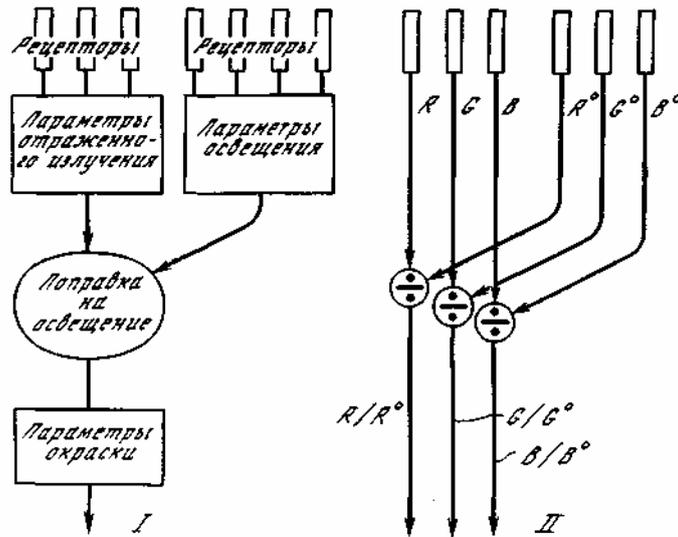


Рис. 6. Общая схема механизмов константности цветовосприятия (I) и ее конкретизация для зональной модели цветового зрения (II)

ти цветовосприятия еще далека от детального алгоритма работы зрительной системы, и задача построения теории константности состоит в том, чтобы каждый из пунктов этой схемы наполнить содержанием. При этом второй этап — поиск участков сетчаточного изображения, несущих информацию о параметрах среды, выделяется в самостоятельный и явно второстепенный вопрос. Решением его можно заняться только после того, как будет известно, какие именно сведения об освещении необходимы для введения на него поправки. Поэтому мы здесь сосредоточим основное внимание на выявлении существенных параметров освещения, отраженного излучения и окраски, в терминах которых нужно будет сформулировать алгоритмы константности цветовосприятия.

При переходе от зонального приближения к рассмотрению произвольных кривых, описывающих чувствительности приемников, спектры освещения и спектральные коэффициенты отражения окрасок, естественно ожидать новых трудностей в плане спектральных, но не пространственных характеристик. Какой бы сложной в пространственном отношении ни предполагалась организация сцены, задача узнавания окраски поверхностей наряду со специфическими трудностями, связанными с пространственными характеристиками отражательной способности поверхностей и со взаимным расположением поверхностей и источников в сцене, всегда будет содержать и элемент узнавания "цвета" в его спектральном проявлении, который в чистом виде уже присутствует в ситуации однородно освещенной плоской цветной аппликации. Поэтому в дальнейшем в этой книге для простоты вообще откажемся от рассмотрения пространственных характеристик и будем решать задачу константности цветовосприятия применительно к простейшей пространственной ситуации — плоской цветной аппликации.

Для случая зональной модели цветового зрения схема механизмов константности цветовосприятия приобретает совсем простой вид (рис. 6, II). Константными параметрами окраски, которые зрительная система должна вычислять, здесь являются ее коэффициенты отражения в каждой из зон спектра, а необходимыми (и достаточными) для этого вычисления параметрами источника являются его координаты цвета R^0 , G^0 , и B^0 . Поиск этих параметров не составляет труда, поскольку это — единственные параметры, полностью характеризующие освещение и окраску и входящие в выражения для ее цвета (R , G , B). Сложнее обстоит дело, когда мы в общем случае хотим понять, какие из параметров спектрального коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ следует вычислять и какие параметры спектрального распределения интенсивности освещения $S(\lambda)$ для этого необходимы. Помочь это выяснить может следующее рассмотрение. В качестве параметров окраски можно, например, взять координаты ее цвета при некотором стандартном освещении. Так, в цветоведении принято окраску характеризовать ее цветом при стандартном дневном освещении D_{65} [10]. Для цветового зрения животных в качестве такого исходного освещения естественно принять наиболее типичное для каждого вида животных световое окружение. Разным окраскам при исходном освещении будут соответствовать отдельные точки цветового пространства. При изменении освещения цвета окрасок будут изменяться. Эти изменения можно рассматривать как преобразования точек цветового пространства. Тогда введение поправки на освещение можно сформулировать как обратное преобразование цветового пространства, позволяющее по цвету окраски при новом освещении вычислить интересные нас параметры окраски, т.е. предсказать, как выглядела бы эта окраска при исходном освещении. При этом параметры освещения, от которых зависит характер преобразования цветового пространства, и будут теми необходимыми параметрами, которые зрительная система должна уметь вычислять для введения поправки на освещение.

Таким образом, в проблеме константности цветовосприятия мы выделили первоочередную задачу, которая состоит в исследовании преобразования точек цветового пространства, соответствующих цветам окрашенных поверхностей, при изменении освещения. Решение этой задачи и будет главной целью нашей работы.

Ограничения на многообразии внешних условий

Как уже говорилось, задача константного восприятия цвета предметов при меняющихся условиях освещения не может быть успешно решена в случае неограниченных вариаций освещения и при совершенно произвольных свойствах окрасок встречающихся в мире поверхностей. Механизмы константности у разных животных формировались во вполне определенном мире, для определенных внешних условий, источников освещения, для ограниченного и вполне определенного набора окрасок поверхностей. Естественно, что от характера этих ограничений должны существенно зависеть алгоритмы переработки сигналов о цвете в зрительной системе, обеспечивающие константность цветовосприятия. А попытка разобраться в их устройстве будет тем более успешной, чем точнее будут сформулированы эти ограничения. Таким образом, сама

постановка задачи заставляет ввести какие-то, по возможности наиболее близкие к реальным, ограничения на окраски и спектры освещения.

В принципе к выбору этих ограничений можно подойти и с другой стороны. Введение тех или иных ограничений на многообразие спектров источников и на окраски поверхностей может привести к существенному упрощению алгоритмов константности, к повышению точности узнавания окрасок и т.п. В результате ограничения на внешний мир могут быть введены (в качестве гипотезы о многообразии реальных внешних условий, существующих в среде обитания данного животного) ради удобства самой теории. Тем самым такая теория формулирует экспериментальную задачу проверки соответствия введенных ограничений реальному миру.

В данной работе фактически использовали оба подхода. Несколько утрируя ситуацию, логику нашего исследования можно представить следующим образом. Сначала, опираясь на конкретные кривые спектральной чувствительности приемников тех или иных животных и используя в качестве спектров освещения спектральные кривые, которые представляются нам наиболее близкими к естественному освещению в среде обитания данного животного, мы рассчитывали преобразования цветов окрашенных поверхностей при изменениях освещения. Обнаружив на этих примерах те или иные особенности преобразования цветового пространства, переходили от конкретных примеров к определенным общим случаям, при которых эти особенности преобразования проявляются. Для этих случаев формулировали аналитически соответствующие ограничения на мир источников и окрасок. После этого мы пытались выяснить, насколько эти, полученные теоретически ограничения соответствуют реальной среде обитания животных. К сожалению, сенсорная экология в настоящее время только оформляется как самостоятельная Наука [177]. Поэтому недостаточность данных по зрительной экологии не всегда позволяла в таком рассмотрении выйти за рамки только постановки экспериментальных вопросов.

Интересующие нас особенности цветового окружения в реальной среде обитания животных исследованы меньше всего. Поэтому для мира окрасок ограничимся только естественным предположением, что поверхности всех предметов — несамосветящиеся и нелюминесцирующие, т.е. отражают в любой области спектра света не больше, чем на них падает. Это ограничение — явно не полное, так как физически возможны далеко не любые спектральные коэффициенты отражения. Вероятно, специальное исследование реальных красителей позволило бы дополнить его более жесткими ограничениями — например, что их спектральные коэффициенты отражения представляют собой функции, медленно меняющиеся по спектру. Однако и без этого введенное нами ограничение оказалось достаточно продуктивным.

Многообразие источников освещения

На многообразии естественных источников остановимся подробнее, хотя и здесь имеющихся сведений явно недостаточно. С уверенностью можно сказать, что источники освещения с линейчатыми спек-

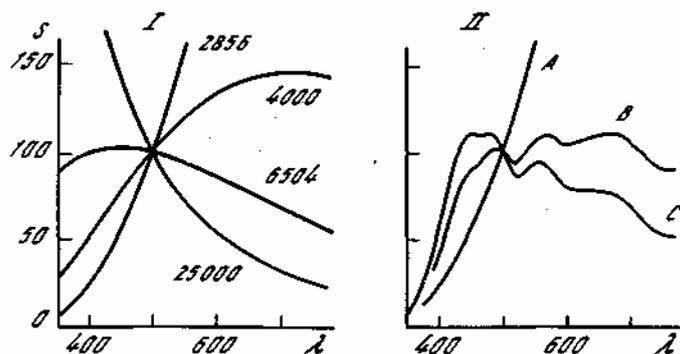


Рис. 7. Относительные спектральные распределения энергии излучения планковских источников (I) и стандартных источников *A*, *B* и *C*, рекомендованных МКО в 1931 г. (II)

трами появились в нашей жизни сравнительно недавно. Большие ошибки в узнавании цвета предметов, освещенных люминесцентными лампами, известные каждому из опыта общения с "лампами дневного света", показывают, что наша зрительная система не приспособлена к работе при таких источниках.

В цветоведении существенное место занимают так называемые "температурные", или "планковские", источники [98], спектр излучения которых описывается формулой Планка для излучения черного тела. Относительные спектральные распределения интенсивности излучения планковских источников для четырех разных температур (цифры рядом с кривыми — в градусах Кельвина) приведены на рис. 7, I. К сожалению, температурные источники не совсем соответствуют естественным и далеко не исчерпывают реального многообразия спектров освещения. Так, во-первых, они дают всего двухпараметрическое многообразие спектров: задаваемое интенсивностью (эти вариации на рисунке не показаны, так как спектры источников нормированы по интенсивности излучения при 500 нм) и цветовой температурой. В естественных условиях вариации спектров освещения, по-видимому, шире. Во-вторых, за исключением лампы накаливания и вышедшей из употребления свечи спектры других источников существенно отличаются от планковских.

Хотя лампу накаливания также нельзя считать естественным источником освещения (по крайней мере, несомненно, что зрительная система человека и животных формировалась не для работы при таком освещении), для человека он стал очень привычным. Существенную часть жизни мы проводим при таком освещении, привыкли постоянно оценивать цвета поверхностей при этом освещении и даже производим при нем (лабораторные) цветовые измерения. Более того, существенная часть опытов по цветовому зрению животных также ставится при освещении лампами накаливания. По этой причине будем использовать спектр лампы накаливания в наших иллюстрациях как пример крайне красного источника освещения.

В 1931 г. Международная комиссия по освещению (МКО) стандарти-

зовала и рекомендовала к использованию в цветовых измерениях [98] спектры трех источников: источника *A*, соответствующего лампе накаливания с цветовой температурой 2856 К, источника *B*, соответствующего прямому солнечному освещению ($T = 4870$ К), и источника *C*, соответствующего среднему дневному освещению ($T = 6770$ К) — свету пасмурного неба (рис. 7, II). Позднее более точные спектрометрические измерения дневного света показали, что источники *B* и *C* не совсем точно воспроизводят дневное освещение, в особенности в коротковолновом конце спектра. Эти измерения, кроме того, выявили широкую изменчивость освещения в зависимости от погодных условий и времени суток. При этом оказалось, что вариации относительного спектрального состава дневного освещения определяются главным образом соотношением вкладов солнечного света и света голубого неба в суммарный спектр дневного освещения. В результате многообразия спектров дневного освещения, так же как и семейство планковских излучений, удалось свести к двухпараметрическому семейству: характеризовать интенсивностью и так называемой коррелированной цветовой температурой. На основе многочисленных измерений, проведенных в США, Канаде и Англии в разное время и в разных условиях, было предложено [113] вместо спектров стандартных источников *B* и *C* использовать семейство спектров дневного излучения *D*, соответствующего различным фазам дневного света. Необходимые таблицы и формулы, позволяющие рассчитать распределение любого дневного освещения по спектру через каждые 10 нм, можно найти, например, в книге Д. Джадда и Г. Вышецкого [10]. Один из этих источников (*D₆₅*) рекомендован МКО в качестве стандартного излучения дневного света с коррелированной цветовой температурой порядка 6500 К, поскольку его спектр хорошо согласуется со значениями распределения суммарного излучения неба и солнца в дневное время. Спектр этого излучения, а также спектры излучений, соответствующие крайним вариантам дневного освещения из этого семейства — свету ясного весеннего неба *D₂₅₀* и прямому солнечному освещению *D₄₀* при низком положении солнца над горизонтом, показаны на рис. 8, I. Другие примеры можно найти на рис. 1, I, рис. 18, в и рис. 23, I. Более поздние спектрометрические измерения, проведенные в других местах земного шара (Южная Африка [202], Индия [172], Австралия [83]), дали близкие, хотя и несколько отличающиеся от описанных спектры дневного освещения.

Известна также попытка решить вопрос о спектрах естественного дневного освещения (правда, только для случая ясного неба) теоретически — составить программу для ЭВМ, позволяющую рассчитывать спектральный состав дневного освещения для различных наземных экологических сред в зависимости от таких параметров, как календарное время и время суток, высота над уровнем моря, состояние атмосферы, спектральный коэффициент отражения земной поверхности и т.п. [145]. Хотя совпадение расчетных спектров с результатами ряда спектрометрических измерений показывает, что в этой теории правильно учтены факторы, сказывающиеся на спектральном составе дневного освещения, многообразие трудно поддающихся учету па-

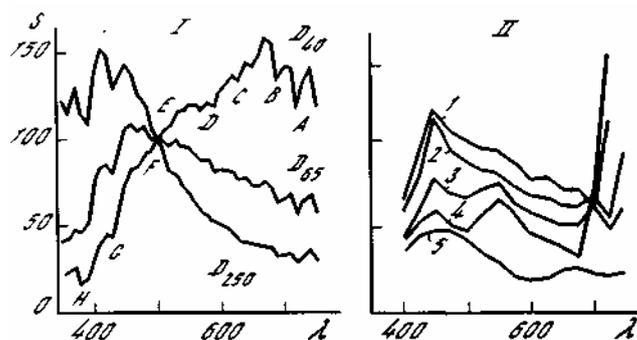


Рис. 8. Спектры дневного освещения

I – относительные спектральные распределения энергии дневных излучений, соответствующие трем фазам дневного освещения: A – H – основные фраунгоферовы линии поглощения в спектре солнца; II – спектры освещения (распределения спектральной плотности облученности горизонтальной поверхности), измеренные Дж. Хэйлменом [97] в лесах Америки: 1 – на открытом пространстве в лиственном лесу, 2 – в сосновом лесу, 3 – в смешанном лесу, 4 – под пологом двухъярусного тропического леса, 5 – освещение в хвойном лесу на закате

раметров (таких, как количество водяных паров или количество частиц аэрозоля в толще атмосферы, средний спектральный коэффициент отражения поверхности, подстилающей атмосферу в данном месте, и т.п.) делают эту теорию практически неприменимой, так как значения большинства из этих параметров в каждом конкретном случае, как правило, неизвестны. Еще меньше можно сказать о вариациях значений этих параметров, что совершенно необходимо для оценки изменений спектрального состава освещения в среде обитания, характерной для того или иного вида животных.

Рекомендованные МКО спектры дневного излучения имеют то преимущество перед другими, что они характеризуют (по крайней мере, в некоторых условиях) естественное световое окружение. По этой причине они часто будут использоваться в наших последующих рассмотрениях. К сожалению, это все-таки очень ограниченная совокупность естественных излучений. Возможно, они хорошо отражают спектр суммарного дневного освещения, попадающего на горизонтальную площадку на открытых пространствах и в незагрязненной атмосфере (где нет избирательного поглощения). Но даже в этих условиях освещение, попадающее на поверхность, ориентированную наклонно (когда велик вклад в освещение рефлексов от поверхности земли и окружающих предметов), может существенно отличаться по спектральному составу. И совершенно иной будет световая обстановка под пологом леса. Действительно, с одной стороны, в лесу преобладает диффузное освещение, в котором усредняется вклад солнца и голубого неба. Поэтому в гуще леса не должно быть таких резких цветовых контрастов в освещении, которые возможны на открытых пространствах, например, между прямым солнечным освещением и освещением голубым небом в тени. С другой стороны, поглощение света, проходящего сквозь листву, и отражение от нее существенно искажат спектральный состав излучения, падающего сверху на лес.

Сведения о спектральном распределении освещенности под пологом леса нужны не только для исследований по цветовому зрению животных, но и, например, ботаникам — в частности, для оценок фотопродуктивности растительных сообществ в разных ярусах тропического леса [89]. Правда, в то время как ботаники обращают основное внимание на абсолютную величину освещенности в разное время суток, нам важны (с точки зрения механизмов константности цветовосприятия) относительные изменения спектрального состава — изменения освещения по цветности. Тем не менее к настоящему времени имеются только немногочисленные разрозненные измерения спектрального состава освещения в лесах, которые не могут дать полного представления о всей широте его вариаций.

В этом отношении наиболее информативны данные Дж. Хэйлмена [97] который по единой методике (что позволяет проводить сопоставления) измерял распределение спектральной интенсивности освещения в летнее время в различных хвойных, смешанных и лиственных лесах умеренной зоны, а также в многоярусных тропических лесах. Наряду с замерами, проводимыми в гуще леса, для выяснения спектральных искажений, которые вносит лес в спектральный состав освещения, Дж. Хэйлмен всегда, где это было возможно, старался параллельно проводить измерения спектрального состава освещения на соседних открытых участках. Спектры освещения, полученные для открытых участков (например, кривая 1 на рис. 8, II), мало отличаются от спектра дневного освещения D_{65} , рекомендованного МКО. Сопоставления результатов спектральных измерений, проведенных в лесах в течение дня, позволили сделать ряд интересных выводов. Например, оказалось, что хвойный лес практически не искажает относительного спектрального состава освещения, а действует как нейтральный фильтр, ослабляющий интенсивность освещения на порядок и более (кривая 2 на рис. 8, II). В отличие от темной хвои, обладающей малоселективным отражением, в лиственных лесах (в особенности в широколиственных) светлые и относительно прозрачные зеленые листья работают как цветные светофильтры. В результате спектр освещения в лиственном лесу (кривые 3 и 4 на рис. 8, II) приобретает свойственные хлорофиллу подъемы в зеленой и далекой красной областях спектра (см. для сравнения рис. 1, II, где приведена кривая спектрального коэффициента отражения зеленого листа). Еще одна интересная особенность хвойных лесов состоит в их стабилизирующем влиянии на яркость освещения. В то время как интенсивность дневного освещения, падающего сверху на лес, меняется в течение дня, под пологом хвойного леса освещение практически не зависит от уровня солнца над горизонтом вплоть до очень низкого его положения. И только на закате и на рассвете яркость освещения и его относительный спектральный состав существенно искажаются (кривая 5 на рис. 8, II). Конечно, такая приблизительная неизменность интенсивности освещения в течение дня сохраняется только в одном и том же месте леса. От места к месту яркость освещения может меняться в пределах двух порядков.

Водная среда представляет собой еще один пример среды обитания, богатой вариациями характера освещения. Благодаря поглощающим

и рассеивающим свойствам среды спектральный состав освещения под водой может существенно меняться при изменении глубины погружения в пределах метров. Поэтому для узнавания окраски предметов под водой учет этих изменений освещения совершенно необходим водным животным, и в первую очередь рыбам, активно пользующимся зрением в своем поведении [16, 135, 155]. Из позвоночных животных именно рыбы (отчасти потому, что класс костистых рыб представляет собой наиболее многочисленный по количеству видов класс, а также из-за большей популярности рыб как объекта исследования по сравнению, например, с птицами) дают нам наибольшее разнообразие систем цветового зрения. В частности, на рыб приходится основная масса известных достоверно дихроматических систем. Все это делает сведения о световой обстановке под водой чрезвычайно ценными. Поскольку оптические свойства воды и характер освещения под водой интересуют многих, в этом направлении давно ведутся работы (см., например, [86, 111]), в том числе и исследования световой обстановки под водой в связи со зрением рыб [133, 146, 156]. К сожалению, разнообразие естественных вод настолько велико и так много факторов влияет на световую обстановку, что это заставляет подходить к вопросу об условиях освещения под водой с большой осторожностью. Один частный пример, иллюстрирующий изменения спектрального состава освещения с глубиной в водоеме, будет разобран в следующей главе.

Таким образом, на основании всего сказанного относительно источников освещения можно заключить, что спектры реальных источников меняются в широких пределах. Причем механизмы переработки информации о цвете в зрительной системе у каждого из видов животных подгонялись в процессе эволюции к совершенно определенным, свойственным биологии этого вида условиям освещения. Однако, к сожалению, все многообразие спектров источников освещения ни в одном случае нам не известно. Поэтому в этой книге в отношении спектров источников будем придерживаться следующих принципов. Теоретический анализ возможных механизмов введения поправки на освещение будем проводить, не накладывая исходно специальных ограничений на спектры источников. Тем не менее все количественные и качественные выводы о том, насколько существенны для биологии те или иные теоретические результаты, могут быть сделаны только на основании конкретных расчетов и оценок, использующих конкретные спектральные кривые. Поэтому в таких оценках, а также во всех расчетах для иллюстраций в качестве спектров источников освещения использовались спектральные функции, наиболее близкие к тому, что ожидается для естественного светового окружения данных животных.

ЦВЕТОВОЕ ТЕЛО

Размерность цветового зрения

Рассмотрим совокупность n светочувствительных приемников, чувствительность которых задана функциями $\bar{x}_i(\lambda)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Кривые спектральной чувствительности $\bar{x}_i(\lambda)$ приемников обычно имеют простую колоколообразную форму, что позволяет характеризовать их положение на спектре длиной волны λ_{\max} , при которой чувствительность приемника максимальна. Для определенности будем нумеровать приемники индексами i от 1 до n в порядке убывания их λ_{\max} — от "красночувствительных" до "синечувствительных" (рис. 9). При такой нумерации задание цветов точками в правой системе прямоугольных декартовых координат основных физиологических цветов $X_1 X_2 \dots X_n$ будет соответствовать общепринятому (для системы цветового зрения человека) представлению цветов в пространстве RGB .

Светочувствительные приемники считаются *линейно независимыми*, если существует такой набор n разных значений длин волн $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$, что определитель Δ матрицы

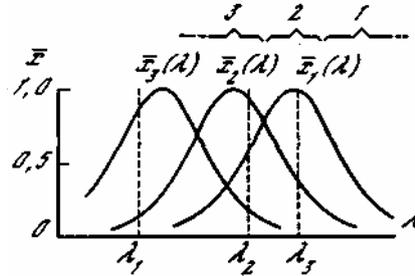
$$\begin{vmatrix} \bar{x}_1(\lambda_1) & \bar{x}_1(\lambda_2) & \dots & \bar{x}_1(\lambda_n) \\ \bar{x}_2(\lambda_1) & \bar{x}_2(\lambda_2) & \dots & \bar{x}_2(\lambda_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{x}_n(\lambda_1) & \bar{x}_n(\lambda_2) & \dots & \bar{x}_n(\lambda_n) \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

отличен от 0. В этом случае будем говорить об *n -мерном цветовом зрении*. Если ни при каких наборах λ_j , $j = 1, 2, \dots, n$, из некоторого спектрального интервала этот определитель не обращается в 0, имеем *линейную независимость приемников* на этом интервале. Можно показать, что в случае линейной независимости приемников во всем диапазоне видимого спектра при выбранной нумерации \bar{x}_i и λ_j определитель Δ матрицы (2.1) принимает только положительные значения. Если же оказывается, что для некоторого набора разных точек спектра λ_j , $j = 1, 2, \dots, n$, определитель Δ равен 0, то о них будем говорить как о *линейно зависимых точках спектра*. Линейно зависимые точки спектра могут группироваться в целые интервалы, так что любой набор точек из этого интервала оказывается линейно зависимым. Размерность цветового зрения в пределах этих интервалов определяется рангом матриц вида (2.1). Спектральный интервал будем называть *t -мерным участком спектра* в общем случае n -мерного ($n > t$) цветового зрения, если для любых наборов длин волн $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$ в пределах этого интервала ранг этих матриц равен t .

Наличие участков спектра меньшей размерности, чем размерность цветового зрения животного, обусловлено особенностями кривых поглощения светочувствительных пигментов, локализованных в рецепторах сетчатки. Как правило, у всех этих пигментов кривые поглощения имеют одинаковый экспоненциальный спад в длинноволновом конце спектра. В результате получается, что далекий крас-

ный конец спектра, где все кривые поглощения пропорциональны, одномерен. По мере перемещения в более коротковолновую область, где кривая спектральной чувствительности красночувствительного приемника начинает отличаться от этой экспоненты, а все другие еще пропорциональны друг другу, появляется дихроматический участок спектра и т.д. (рис. 9). Так, у человека дальний конец спектра

Рис. 9. Взаимное расположение кривых спектральной чувствительности приемников и расположение на спектральной оси одномерного, двумерного и трехмерного участков спектра (фигурные скобки)



(далее 665 нм) считается одномерным, диапазон от 545 до 665 нм — двумерным. Поведение кривых спектральной чувствительности в синем конце спектра более сложно. Спектры поглощения родопсина и аналогичных светочувствительных пигментов в этой области имеют слабо выраженный второй максимум (см. рис. 4). На вытекающих из этого эффектах мы остановимся ниже.

Цветовой конус

Цвета монохроматических излучений $E(\lambda) = E_0\delta(\lambda - \lambda_0)$ принято называть *спектральными цветами*:

$$X_i = \int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)d\lambda = E_0\bar{x}_i(\lambda_0), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

При изменении интенсивности E_0 монохроматического излучения (без изменения длины волны) цвет его перемещается в цветовом пространстве вдоль луча, проходящего через начало координат. Вследствие этого многообразие спектральных цветов представляет собой двумерную коническую поверхность с вершиной в начале координат. Эта поверхность в принятой нами системе координат основных физиологических цветов лежит целиком в области положительных значений X_i . При этом все спектральные цвета из одномерного участка спектра будут коллинеарны, т.е. лежат на одном и том же луче. Спектральные цвета из двумерной области спектра — компланарны, т.е. образуют плоский участок поверхности спектральных цветов.

Многообразие *реальных цветов*, т.е. цветов излучений с произвольным, но положительным спектральным распределением энергии, занимает область цветового пространства, называемую *цветовым конусом*. Поскольку любое излучение можно представить в виде суммы спектральных, многообразие реальных цветов заполняет выпуклую оболочку, натянутую на поверхность спектральных цветов.

Различия между двумерной поверхностью спектральных цветов и $(n-1)$ -мерной границей цветового конуса при $n \neq 3$ очевидны. В слу-

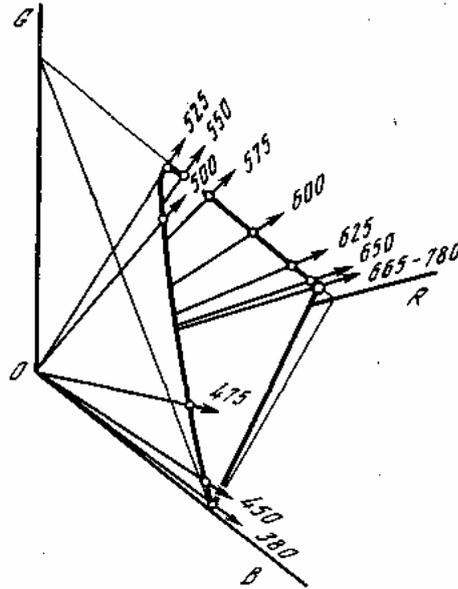
чае трихроматического зрения на различиях в этих понятиях следует остановиться подробнее. И дело здесь не только в том, что поверхность спектральных цветов разомкнута и ее следует "дополнить" пурпурными цветами (смесями спектральных синих и красных излучений), чтобы образовать замкнутую -поверхность цветового конуса. Геометрически поверхность цветового конуса будет отличаться от поверхности спектральных цветов также в тех участках спектра, где поверхность спектральных цветов вогнута. Индикатором вогнутости или выпуклости различных участков поверхности спектральных цветов может служить знак детерминанта матрицы (2.1). Для выпуклых участков он положителен, для вогнутых — отрицателен. Кроме того, на отдельные участки поверхности цветового конуса наряду со спектральными цветами могут попадать также цвета некоторых немонахроматических излучений.

Особенности излучений, цвета которых попадают на поверхность цветового конуса, рассмотрим на примере цветового зрения человека (рис. 10). Здесь эту поверхность образуют, во-первых, чистые спектральные цвета, расположенные в трехмерной области спектра в диапазоне от 465 до 545 нм. Во-вторых, в двумерной области (от 545 до 665 нм) наряду с чистыми спектральными цветами, образующими в цветовом пространстве плоский участок поверхности цветового конуса, на его поверхность попадают также цвета всевозможных излучений, вся мощность которых целиком сосредоточена в этом спектральном интервале. В-третьих, на образующую цветового конуса, соответствующую одномерному спектральному интервалу (длиннее 665 нм), попадают любые, а не только спектральные излучения из этого участка спектра. В-четвертых, так называемые пурпурные цвета — смеси спектральных синих из коротковолнового конца спектра и красных излучений из длинноволнового одномерного участка спектра — образуют второй плоский участок поверхности цветового конуса. И, наконец, в-пятых, коротковолновая часть спектра (короче 465 нм) раньше также считалась двумерной, а дальний ее конец — даже одномерным [49]. Это определяло третий плоский участок поверхности цветового конуса аналогично дихроматическому участку в красном конце спектра. Однако параметры цветового зрения так называемого "стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г." (которые суммируют обширные экспериментальные данные, полученные на большом числе испытуемых, и затабулированы с большим числом знаков [98]) показывают, что в области 435—455 нм находится даже слабая вогнутость на поверхности спектральных цветов. На самом деле особенности поведения спектров поглощения реальных светочувствительных пигментов в коротковолновой части спектра могут привести к вогнутости поверхности спектральных цветов. Но прямое экспериментальное определение параметров цветового зрения человека для этой области спектра сталкивается с серьезными методическими трудностями. И, например, параметры "дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г." такой вогнутости не выявляют.

Мы потому так подробно остановились на описании свойств по-

Рис. 10. Цветовой конус в цветовом пространстве человека

Стрелки – образующие конической поверхности; цифры – длины волн в нм соответствующих спектральных цветов; жирная линия – направляющая конической поверхности – "цветовой треугольник"



верхностей спектральных цветов и цветового конуса, что наличие спектральных интервалов меньшей размерности, чем размерность цветового зрения животного, а также вогнутых участков поверхности спектральных цветов затрудняет как сам анализ, так и изложение результатов. Обычно каждый из таких спектральных интервалов требует своего специального исследования. Правда, в конкретном случае цветового зрения человека такие

участки не доставляют особых хлопот. Возможно, именно поэтому в цветоведении на соответствующие трудности просто не обращали внимания. Однако системы цветового зрения животных дают нам примеры того, когда с этим приходится считаться. Изложение становится более единообразным, когда такие мешающие участки вообще отсутствуют, а поверхность спектральных цветов строго выпукла. Поэтому впоследствии нам будет удобно сначала излагать результаты в этом упрощающем предположении, что потребует введения специальных ограничений на кривые спектральной чувствительности приемников. Затем уже отдельно будем разбирать случаи, когда эти ограничения не выполняются.

Цвета несамосветящихся поверхностей

На протяжении всей этой книги нас будут интересовать не цвета произвольных излучений $E(\lambda)$, а в основном цвета излучений, отраженных от окрашенных поверхностей предметов, освещенных некоторым источником. Будем рассматривать только идеально матовые (рассеивающие падающее на них излучение во все стороны одинаково) несамосветящиеся и нелюминесцирующие поверхности. В этом случае, как уже говорилось в первой главе, освещение можно однозначно характеризовать его спектром $S(\lambda)$, а окраску поверхности — спектральным коэффициентом отражения, который удовлетворяет следующим ограничениям:

$$0 \leq \rho(\lambda) \leq 1. \quad (2.2)$$

В дальнейшем такие окраски будем просто называть *несамосветящимися окрасками*.

Из ограничений (2.2) следуют ограничения для значений цветых координат X_j цветов несамосветящихся окрасок:

$$0 \leq X_i \leq X_i^0$$

где X_i^0 — координаты цвета освещения. В результате все мыслимое многообразие цветов таких поверхностей при данном освещении занимает только некоторую ограниченную область внутри цветового конуса.

Область цветового пространства, заключающую в себя цвета всех отражающих свет несамосветящихся окрасок в условиях данного освещения, будем называть *цветовым телом*.

В таком смысле понятие цветового тела было введено Р. Лютером (употребившим для него излишне громоздкий термин — Pigmentfarbengeizkörper) для трехмерного цветового зрения человека в 1927 г. [132]. Геометрические свойства цветового тела (Farbenkörper) были подробно исследованы Н.Д. Ньюбергом и опубликованы им в следующем году в немецком журнале Zeitschrift für Physik [160] и на русском языке — в статье [28]. Наиболее полное изложение свойств цветового тела дано Н.Д. Ньюбергом [30] в приложении к книге Н.Т. Федорова "Современное состояние колориметрии" [49]. Цветовое тело упоминается также в большой обзорной статье З. Рёша [170], где излагаются основы цветоведения применительно к минералогии. И, наконец, в 1935 г. Д. Мак-Адам нанес на диаграмме цветности проекции плоских сечений цветового тела, соответствующие разным значениям светлоты стимулов [136]. В результате при описании соответствующего круга вопросов в немецкой литературе принят термин "цветовое тело Рёша", а в английской — "границы Мак-Адама" [205].

Термин "цветовое тело" сохраним и для общего случая n -мерного цветового зрения, хотя формально в случае, например, дихроматического зрения эта область двумерного цветового пространства представляет собой плоскую фигуру. Вообще следует заметить, что вся цветовая терминология формировалась на примере трехмерного цветового зрения человека и многие названия просто отражают соответствующие геометрические представления в трехмерном пространстве. В случае цветового зрения другого числа измерений эти названия часто становятся неадекватными. Такое геометрическое несоответствие цветовых терминов читатель может постоянно ощущать при чтении этой книги, где основное место уделяется разбору вариантов двумерного цветового зрения. В особенности это относится к иллюстрациям — двумерное цветовое пространство легче изобразить на чертеже, чем трехмерное. Тем не менее представляется нерациональным только по этой причине видоизменять старые термины или вводить новые для вполне устоявшихся и привычных цветовых понятий.

Многообразие цветов поверхностей и, следовательно, форма цветового тела, образуемого этими цветами в цветовом пространстве, зависит от спектра освещения. Кроме того, форма цветового тела, естественно, зависит от количества, вида и взаимного расположения кривых спектральной чувствительности приемников данного живот-

ного. Ниже разберем свойства цветов, составляющих цветное тело. В соответствии с определением цветного тела будем говорить, что некоторая точка (X_1, X_2, \dots, X_n) цветного пространства принадлежит цветному телу (в условиях данного освещения), если возможна такая окраска, которая при действующем освещении имеет этот цвет (\mathbf{X}), причем ее спектральный коэффициент отражения удовлетворяет ограничениям (2.2).

Что касается свойств цветного тела человека, то наше последующее изложение практически не будет содержать новых результатов по сравнению с тем, что еще 50 лет назад было известно Н.Д. Ньюбергу, но, к сожалению, почти никому не известно теперь. Однако попытка обобщить полученные им для цветного зрения человека результаты на случай произвольного n -мерного цветного зрения заставляет нас ввести единообразную терминологию и сформулировать нигде ранее явно не оговоренные условия (ограничения на кривые спектральной чувствительности приемников и спектры источников), определяющие те или иные свойства отдельных участков поверхности цветного тела.

Взаимное расположение цветов поверхностей в цветном пространстве

Идеально белая совершенно матовая поверхность, для которой $\rho(\lambda) \equiv 1$, вследствие того что она полностью отражает весь падающий на нее свет, не изменяет спектрального состава освещения. Цвет излучения, отраженного от такой поверхности, мы будем называть *цветом освещения* или цветом источника. Его координаты:

$$X_i^0 = \int_0^{\infty} S(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda, \quad i=1,2,\dots,n.$$

Естественно, что при данном освещении никакая другая поверхность не может отразить больше света. Это ограничивает сверху значения цветных координат цветов поверхностей при данном освещении.

Пусть заданы цвет освещения \mathbf{X}^0 и некоторый цвет, характеризующийся вектором \mathbf{X} . Будем называть *дополнительным цветом* такой цвет \mathbf{X}^* , который в сумме с данным дает цвет освещения:

$$X_i^* + X_i = X_i^0.$$

Это определение дополнительных цветов отличается от общепринятого тем, что в явном виде включает цвет освещения, в то время как в психофизике обычно этого стараются избегать, но при этом накладывают дополнительные, не очень определенные ограничения на источник — требуется, чтобы освещение было "белым" по цветности [25].

Простые геометрические построения, приведенные на рис. 11, иллюстрируют тот факт, что дополнительные цвета \mathbf{X} и \mathbf{X}^* , в цветном пространстве всегда расположены симметрично относительно точки с координатами $(\frac{1}{2}X_1^0, \frac{1}{2}X_2^0, \dots, \frac{1}{2}X_n^0)$. Такой цвет (соответствующий центру симметрии дополнительных цветов) при данном освеще-

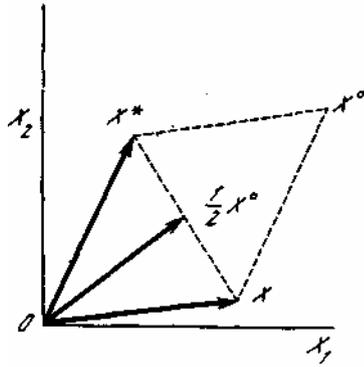


Рис. 11. Взаимное расположение дополнительных цветов в цветовом пространстве

нии будет, в частности, у 50%-ной серой окраски, т.е. окраски, отражающей по всему спектру ровно половину падающего на нее света. Будем называть парой *дополнительных окрасок* такие окраски, спектральные коэффициенты отражения которых $\rho(\lambda)$ и $\rho^*(\lambda)$ связаны следующим соотношением:

$$\rho(\lambda) + \rho^*(\lambda) = 1.$$

Очевидно, что цвета дополнительных окрасок будут дополнительными при любом освещении. Легко видеть, что если исходная окраска несамосветящаяся, т.е. $\rho(\lambda)$ удовлетворяет ограничениям (2.2), то и дополнительная ей окраска будет удовлетворять тем же ограничениям. Это свойство дополнительных окрасок сразу приводит нас к выводу, что пары дополнительных цветов либо одновременно принадлежат цветовому телу, либо одновременно не принадлежат ему. Вкупе с приведенным выше утверждением о симметричном расположении дополнительных цветов относительно точки $(\frac{1}{2}X_1^0, \frac{1}{2}X_2^0, \dots, \frac{1}{2}X_n^0)$ цветового пространства это позволяет заключить, что цветовое тело представляет собой центрально-симметричную фигуру с центром симметрии, соответствующим при данном освещении цвету 50%-ной серой окраски.

Свойство центральной симметричности позволяет также в общих чертах составить представление о внешнем виде цветового тела. Поскольку цвета всех несамосветящихся поверхностей при данном освещении составляют подмножество множества реальных цветов, цветовое тело должно быть вписано в цветовой конус. Таким образом, нам известна граница, за пределы которой не выходит цветовое тело. Но свойство центральной симметричности дает возможность построить аналогичную границу, симметричную первой, с вершиной в точке с координатами $(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0)$ соответствующей цвету освещения. Построенный таким способом "двойной конус" [160] уже дает грубое представление о форме цветового тела в условиях освещения источником, имеющим цвет X^0 . При этом для любых источников освещения такого цвета (но, возможно, различающихся по спектральному составу) соответствующие цветовые тела будут заключены внутри этого двойного конуса. Пример такого двойного конуса для системы цветового зрения человека и для освещения, цвет (R^0, G^0, B^0) которого равен цвету стандартного дневного излучения D_{65} , приведен на рис. 12 в той же проекции, что и цветовой конус на рис. 10.

Пусть заданы две окраски с коэффициентами отражения $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$. Будем называть аддитивной смесью путем усреднения окраску, коэффициент отражения которой задается выражением

$$k\rho_1(\lambda) + (1-k)\rho_2(\lambda), \quad \text{где } 0 \leq k \leq 1.$$

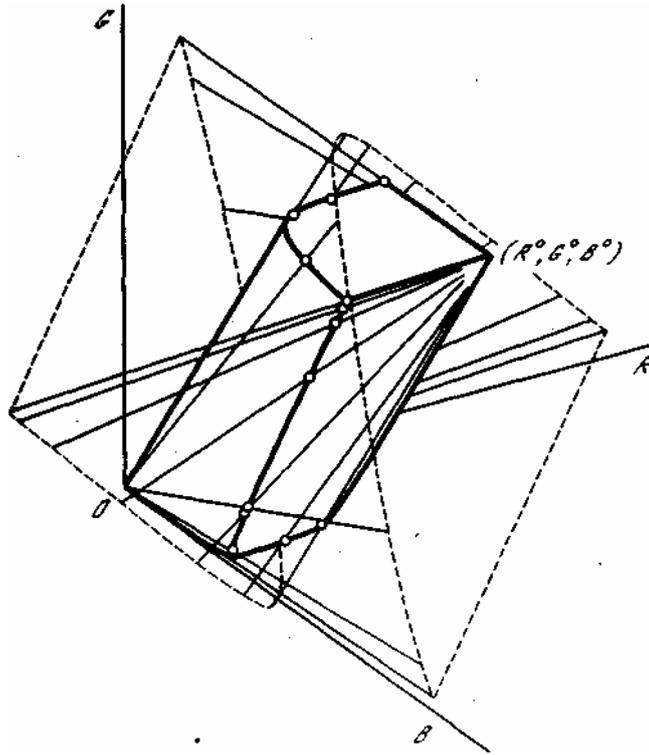


Рис. 12. Двойной конус в цветовом пространстве человека

Физически процедура аддитивного смешения красок путем усреднения осуществляется с помощью так называемой "вертушки Максвелла", которая представляет собой вращающийся с большой скоростью диск, разделенный на два сектора. Один из секторов занимает образец одной окраски, а на оставшейся части диска (второй сектор) помещен образец другой окраски. Изменяя величины этих секторов, изменяют относительный вклад каждого из компонентов смеси окрасок. Вертушка Максвелла служила и служит до сих пор одним из основных инструментов для измерения цвета. Для нас же в пределах этой книги процедура аддитивного смешения — лишь удобная умозрительная операция, способствующая наглядному описанию взаимного расположения цветов окрашенных предметов в цветовом пространстве. Нам интересны следующие особенности аддитивных смесей окрасок. Во-первых, легко видеть, что цвета таких аддитивных смесей в цветовом пространстве будут расположены на прямолинейном отрезке, соединяющем цвета окрасок $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$. Во-вторых, если исходные окраски несамосветящиеся, т.е. $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$ удовлетворяют ограничениям (2.2), то любая их аддитивная смесь будет удовлетворять этим ограничениям. Иными словами, если некоторые два цвета

4. Зак. 1230

принадлежат цветовому телу, то и весь отрезок прямой, соединяющий эти точки в цветовом пространстве, также будет принадлежать цветовому телу. Поскольку таким свойством обладают только выпуклые фигуры, отсюда следует, что цветовое тело выпукло.

Итак, цветовое тело представляет собой выпуклую центрально-симметричную фигуру. Для того чтобы определить его форму и выяснить, как она связана со спектром освещения, полезно рассмотреть свойства окрасок, цвета которых попадают на его поверхность. Цветовое пространство разделяется поверхностью цветового тела на две области. Цветам вне этой поверхности по определению не соответствует ни одной несамосветящейся окраски. Напротив, можно показать, что любому цвету внутри цветового тела соответствует много несамосветящихся окрасок с разными спектральными коэффициентами отражения. А среди точек, составляющих саму поверхность цветового тела, возможны как такие, которым соответствует единственная несамосветящаяся окраска, так в принципе и такие, которым соответствует много разных несамосветящихся окрасок.

Процедура аддитивного смешения окрасок позволяет показать, что на поверхность цветового тела попадают цвета окрасок, спектральный коэффициент отражения которых в каждой точке спектра равен либо 0, либо 1. Действительно, предположим, что цвет некоторой окраски лежит на поверхности цветового тела и при этом ее спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ в некотором малом участке спектра вблизи длины волны λ_0 принимает промежуточное значение между 0 и 1. Тогда, уменьшая его до 0 или увеличивая до 1, получим семейство окрасок, которые можно представить как различные аддитивные смеси двух окрасок, спектральные коэффициенты отражения которых совпадают с $\rho(\lambda)$ данной окраски везде вне этого малого интервала, а в этом интервале у одной окраски $\rho(\lambda)=0$, а у другой $\rho(\lambda)=1$. Так как все эти аддитивные смеси удовлетворяют условиям (2.2), в цветовом пространстве отрезок, на котором расположены их цвета, должны целиком принадлежать цветовому телу. Но по условию цвет данной окраски, расположенный внутри этого отрезка, лежит на поверхности цветового тела. А поскольку цветовое тело — фигура выпуклая, такое возможно, только если и концы этого отрезка, для которых $\rho(\lambda_0)=0$ или $\rho(\lambda_0)=1$, также попадают на поверхность цветового тела.

Если спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ данной окраски отличается от 0 или 1 в нескольких (малых) участках спектра, то приведенное выше рассмотрение следует провести для каждого из этих участков спектра. В результате получим, что, во-первых, данная окраска (цвет которой по условию лежит на поверхности цветового тела) представима в виде аддитивной смеси нескольких окрасок, спектральные коэффициенты отражения которых нигде не принимают промежуточных значений между 0 и 1. Во-вторых, цвета всех этих окрасок (вместе с данной) лежат на поверхности цветового тела.

Дополнительные ограничения

Таким образом, показано, что в общем случае поверхность цветного тела образуется цветами окрасок, спектральные коэффициенты отражения которых в разных участках спектра принимают значения 0 или 1, а также, возможно, цветами аддитивных смесей этих окрасок. Пока это довольно слабый результат, так как он определяет только необходимые условия того, что цвета окрасок попадают на поверхность цветного тела. Однако задача существенно упростится, если ввести дополнительные ограничения на спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников.

В дальнейшем, за исключением специально оговоренных случаев, будем предполагать, что мощность освещения нигде в пределах видимого диапазона спектра не равна 0. Этому ограничению удовлетворяют все естественные источники освещения. Исключаются из рассмотрения чисто линейчатые спектры типа света ртутной лампы. Будем также считать, что $S(\lambda)$ и $\bar{x}(\lambda)$ являются непрерывными, ограниченными функциями. Относительно кривых спектральной чувствительности приемников будем считать, что они линейно независимы по всему спектру — определитель матрицы (2.1) везде строго больше нуля.

Не всегда и не все эти ограничения будут необходимы. Тем не менее они существенно упрощают изложение материала, так как позволяют избежать постоянных оговорок (связанных, например, с раскрытием неопределенностей, проистекающих из равенства нулю или бесконечности некоторого спектрального распределения, или линейной зависимости функций спектральной чувствительности), не жертвуя математической строгостью.

Как уже говорилось, для естественных светочувствительных пигментов требование линейной независимости кривых спектральной чувствительности во всех точках спектра, как правило, не выполняется. Однако линейно зависимые точки (и даже отдельные участки) спектра возможны только на концах видимого диапазона спектра, где чувствительность приемников мала, и вследствие этого их наличие обычно мало сказывается на результатах. Поэтому вначале будем вести изложение в предположении, что линейная независимость светочувствительных приемников сохраняется по всему спектру, а затем отдельно на конкретных примерах разберем, какие изменения в полученные результаты следует внести, когда это требование не выполняется.

В случае, если выполняются приведенные ограничения, можно показать, что цветное тело является строго выпуклой фигурой т.е. такой фигурой, у которой для любой пары точек, ей принадлежащих, все внутренние точки отрезка, соединяющего эти точки, не лежат на границе. Далее можно показать, что каждой точке поверхности этого цветного тела соответствует только одна окраска, причем такая, что ее спектральный коэффициент отражения в разных точках спектра можно принимать только одно из двух значений: 0 или 1.

Ступенчатые окраски

Будем называть *m*-ступенчатой окраской такую окраску, спектральный коэффициент отражения которой представляет собой ступенчатую кривую, принимающую значения либо 0, либо 1 и имеющую по спектру ровно *m* переходов от 0 к 1 и от 1 к 0. Число *m* будем называть *порядком* ступенчатой окраски. Примеры ступенчатых окрасок приведены на рис. 13 ($m = 0 \div 3$).

Множество *m*-ступенчатых окрасок (для каждого *m*) естественно разбивается на два подмножества, например, по такому критерию; одни окраски (окраски первого типа) начинаются в далеком коротковолновом конце спектра с коэффициента отражения, равного нулю (рис. 13, I), другие — единице (рис. 13, II). При этом если некоторая *m*-ступенчатая окраска принадлежит одному из этих подмножеств, то дополнительная ей окраска всегда принадлежит другому. Поэтому эти подмножества можно называть *взаимно дополнительными подмножествами m-ступенчатых окрасок*.

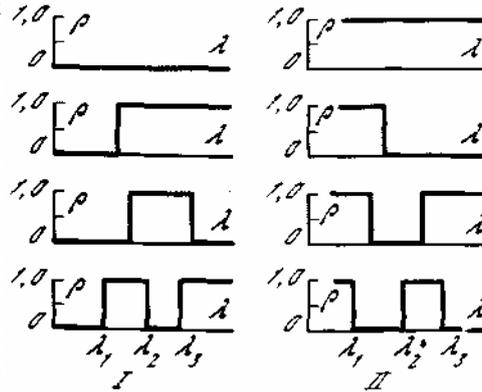
В каждом подмножестве *m*-ступенчатые окраски удобно характеризовать *m* параметрами — значениями длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, в которых кривая отражения претерпевает скачки. Таким образом, имеются всего две 0-ступенчатые окраски: идеально черная, у которой $\rho(\lambda) \equiv 0$, и дополнительная ей идеально белая, у которой $\rho(\lambda) \equiv 1$. Существуют два однопараметрических семейства одноступенчатых окрасок (характеризующихся положением ступеньки на спектре), два двухпараметрических семейства двухступенчатых окрасок и т.д.

Поскольку наибольший интерес для нас (по крайней мере, в пределах этой главы) будут представлять одно- и двухступенчатые окраски, разным взаимно дополнительным подмножествам этих окрасок полезно дать индивидуальные содержательные названия. Одноступенчатые окраски первого типа, отражающие в длинноволновом конце спектра, будем в дальнейшем называть *желтыми ступенчатыми окрасками*, одноступенчатые окраски второго типа — *голубыми ступенчатыми окрасками*. Двухступенчатые окраски, отражающие свет только в средней части спектра, будем называть *зелеными ступенчатыми окрасками*, а отражающие свет только по концам спектра — *пурпурными ступенчатыми окрасками*.

Ступенчатые окраски представляют собой предельные по физическим свойствам, практически нереализуемые окраски. Так, нельзя добиться полного поглощения или полного отражения света. Даже хорошие черные поверхности отражают около 1% падающего на них света. Поверхности, окраску которых мы признаем белой, обычно отражают только 80—90% света. Для цветных поверхностей к тому же трудно осуществимыми оказываются "ступеньки" — резкие изменения величины коэффициента отражения по спектру. Наиболее близки к одноступенчатым только некоторые желтые, оранжевые и красные естественные красители, спектральные коэффициенты отражения которых имеют быстрые переходы от большого поглощения в коротковолновом конце спектра к большому отражению в длинноволновом. Добиться та-

Рис. 13. Примеры спектральных коэффициентов отражения ступенчатых окрасок

кого же быстрого изменения спектрального коэффициента отражения в обратную сторону не удастся. Поэтому реальные голубые окраски далеки от ступенчатых. Еще меньше похожи на естественные окраски ступенчатые окраски более высоких порядков. Так, спектральные коэффициенты отражения живого зеленого листа и двух цветных бумажек,



приведенные на рис. 1, II и рис. 31, III, по-видимому, дают наилучшее из реально возможных приближение к трехступенчатым окраскам.

Несмотря на то что в природе настоящие ступенчатые окраски не встречаются, введенное нами понятие ступенчатых окрасок оказывается очень полезным. Рассмотрение цветов этих окрасок позволяет выяснить форму поверхности цветного тела, а также упрощает анализ преобразования цветов, соответствующих внутренним точкам цветного тела, при изменении освещения. Большинство приводимых в этой книге утверждений удалось доказать благодаря использованию понятия ступенчатых окрасок. Как правило, чтобы не загромождать изложение, мы не приводим самих доказательств. Поэтому здесь на свойствах цветов, формирующих поверхность цветного тела, остановимся подробнее и постараемся дать для них если не строгий математический вывод, то по крайней мере очертить использующийся в дальнейшем математический аппарат и дать пример его применения.

Обозначим через $p(\mu, \lambda)$ спектральный коэффициент отражения одноступенчатой окраски первого типа, претерпевающей скачок коэффициента отражения в точке μ :

$$p(\mu, \lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } \mu < \lambda \\ 1 & \text{при } \mu \geq \lambda \end{cases}$$

Тогда спектральные коэффициенты отражения всех прочих m -ступенчатых окрасок первого типа могут быть представлены в виде следующей комбинации таких одноступенчатых окрасок:

$$\sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} p(\lambda_k, \lambda),$$

а m -ступенчатых окрасок второго типа — в виде

$$1 - \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} p(\lambda_k, \lambda).$$

Такое представление спектрального коэффициента отражения m -ступенчатой окраски оказывается удобным, когда нужно определить ее

цвет. Действительно, для того чтобы вычислить цвет некоторой m -ступенчатой окраски, необходимо проинтегрировать функцию $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$ по всем участкам спектра, где $\rho(\lambda) = 1$, что приводит к довольно громоздким выражениям. Но если вместо спектрального коэффициента отражения m -ступенчатой окраски подставить полученное выражение в виде комбинации одноступенчатых окрасок, то выражение для цвета m -ступенчатой окраски, например, первого типа, задаваемой m параметрами $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ примет вид

$$\begin{aligned} X_i(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) &= \int_0^{\infty} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}_i d\lambda = \\ &= \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} \int_0^{\infty} S(\lambda) p(\lambda_k, \lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda = \\ &= \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} \int_{\lambda_k}^{\infty} S(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

Если при этом ввести специальное обозначение для цвета одноступенчатой окраски со спектральным коэффициентом отражения $p(\mu, \lambda)$:

$$F_i(\mu) = \int_0^{\infty} S(\lambda) p(\mu, \lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_\mu}^{\infty} S(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

то цвет m -ступенчатой окраски выразится через цвета одноступенчатых окрасок следующим образом:

$$X_i(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} F_i(\lambda_k) \quad (2.4)$$

Аналогичная формула может быть написана для цветов n -ступенчатых окрасок второго типа.

Таким образом, свойства цветов любых ступенчатых окрасок всецело определяются видом n функций $F_i(\mu)$; $i = 1, 2, \dots, n$, где n — размерность цветового зрения. Такое представление цветов ступенчатых окрасок оказывается очень полезным для вычисления. А с математической точки зрения удобным оказываются следующие свойства функций $F_i(\mu)$, вытекающие из принятых выше ограничений на спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников: при этих ограничениях функции $F_i(\mu)$ являются дифференцируемыми монотонно убывающими функциями, так что производная от $F_i(\mu)$ всюду меньше нуля. Преимущества, получаемые от этого, проиллюстрируем следующими примерами. Свойство монотонности и линейной независимости этих функций позволяет, в частности, легко доказать, что любой цвет X (из возможных при данном освещении и не попадающих на границу цветового тела) могут иметь две и только две разные n -ступенчатые окраски. Для этого нужно рассматривать выражения для цвета ступенчатой окраски (2.4), где m принято равным n , как систему уравнений относительно параметров $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ при заданном цвете X . При монотонных функциях $F_i(\lambda)$ такая система имеет единственное решение (если оно вообще существует). Это значит, что такой цвет может иметь только одна n -ступенчатая окраска первого типа. Аналогичная система уравнений для n -ступенчатых окрасок вто-

рого типа даст нам другую n -ступенчатую окраску (из дополнительного подмножества) того же цвета.

Дифференцируемость функций $F_i(\mu)$ существенно облегчает решение экстремальных задач, в том числе и задачи поиска формы поверхности цветового тела, которая может быть поставлена как задача отыскания максимума или минимума некоторой цветовой координаты при фиксированных значениях других координат. Причем это не обязательно должны быть координаты основных физиологических цветов. Так, поверхность цветового тела для системы цветового зрения человека определялась первоначально как геометрическое место цветов, максимально ярких при данной цветности или максимально насыщенных при фиксированной яркости [160, 173]. За такие их свойства цвета двухступенчатых окрасок, формирующих поверхность цветового тела, были названы "оптимальными цветами". В дальнейшем и в общем случае цветового зрения произвольной размерности цвета, попадающие на поверхность цветового тела, будем называть *оптимальными цветами*, а соответствующие им окраски — *оптимальными окрасками*.

Свойства поверхности цветового тела

В случае n -мерного цветового зрения цветное тело ограничено $(n-1)$ -мерной "поверхностью". Можно показать, что при принятых ограничениях на этой поверхности расположены цвета m -ступенчатых окрасок, где $m < n$, т.е. $m=0, 1, \dots, n-1$. Более того, на поверхность цветового тела попадают цвета всех таких m -ступенчатых окрасок (с любым набором значений параметров $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$), и только таких окрасок, причем разные m -ступенчатые окраски имеют разные цвета, т.е. каждой такой окраске на поверхности цветового тела соответствует своя точка.

Два взаимно дополнительных подмножества $(n-1)$ -ступенчатых окрасок образуют две гладкие $(n-1)$ -мерные "поверхности", расположенные симметрично друг относительно друга. При этом $n-1$ параметр этих окрасок $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}$ можно считать криволинейными гауссовыми координатами на этой поверхности. Ступенчатым окраскам более низкого порядка соответствуют в цветовом пространстве многообразия меньшей размерности, которые представляют собой особые точки, линии и т.д. на поверхности цветового тела. Естественно, что каждое такое многообразие также представлено в двух экземплярах (соответственно двум взаимно дополнительным подмножествам m -ступенчатых окрасок), расположенных симметрично друг относительно друга в цветовом пространстве.

Проиллюстрируем эти особенности поверхности цветового тела конкретными примерами для различных систем дихроматического и трихроматического зрения. В двумерном случае цветное тело представляет собой фигуру, близкую по форме к параллелограмму с двумя скругленными углами. Его граница образована двумя линиями цветов одноступенчатых окрасок, расположенными симметрично относительно центра цветового тела. Эти линии сходятся в двух острых вер-

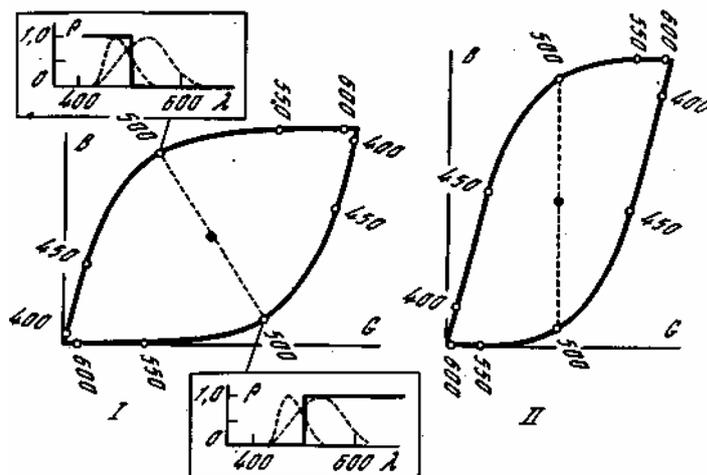


Рис. 14. Цветовые тела для случая дихроматического зрения суслика при освещении прямым солнечным светом (I) и светом голубого неба (II)

Цифры — длина волн в нм, при которых спектральный коэффициент отражения одноступенчатых окрасок, образующих поверхность цветового тела, претерпевает скачок

шинах цветового тела, соответствующих идеально черной и идеально белой O -ступенчатым окраскам. На рис. 14 показаны два цветовых тела, рассчитанных для системы цветового зрения суслика (кривые приемников суслика приведены на рис. 5) при двух разных вариантах освещения: а) прямым солнечным светом — источник D_{48} и б) светом весеннего голубого неба — источник D_{250} . Спектры этих источников приведены на рис. 1. На вставках к рис. 14 приведены кривые отражения ρ (и их расположение относительно кривых спектральной чувствительности приемников суслика) двух взаимно дополнительных одноступенчатых окрасок, лежащих на границе цветового тела. Цифры рядом с отдельными точками границы цветового тела представляют собой значения параметра соответствующих одноступенчатых окрасок — длин волн, при которых коэффициент отражения претерпевает скачок.

В трехмерном случае цветовое тело напоминает параллелепипед, углы которого более или менее скруглены. Как и в двумерном случае, острыми остаются только два угла в черной и белой вершинах цветового тела. Поверхность цветового тела состоит из двух гладких поверхностей, образованных цветами двух подмножеств двухступенчатых окрасок. Эти поверхности соединены друг с другом наподобие двустворчатой раковины вдоль ребер, соответствующих одноступенчатым окраскам. На этих ребрах всюду гладкая поверхность цветового тела претерпевает излом.

Линии, вдоль которых расположены в трехмерном цветовом пространстве цвета $X(X_i, \lambda)$ двухпараметрических окрасок, такие, что один из параметров X_i фиксирован, а другой пробегает всевозможные значения, задают на поверхности цветового тела сетку криволиней-

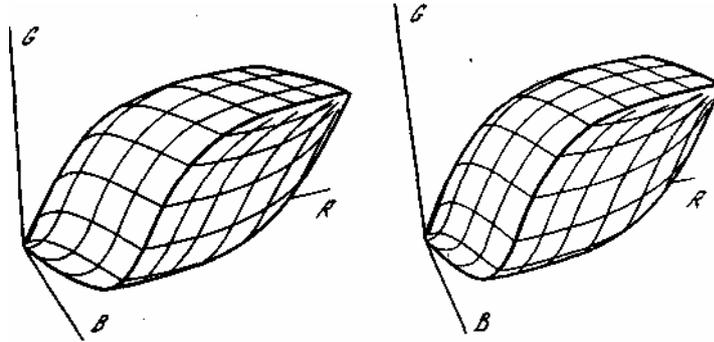


Рис. 15. Стереопара для цветового тела лягушки при дневном освещении D_{65}

ных гауссовых координат. Замечательная особенность определенного таким способом семейства координатных линий на поверхности цветового тела состоит в том [30], что эти линии получаются одна из другой простым параллельным переносом в пространстве. Действительно, рассмотрим на поверхности цветов зеленых двухступенчатых окрасок две координатные линии, соответствующие двум разным значениям $\lambda_2' \leq \lambda_2''$ второго (фиксированного) параметра. Для цветов этих окрасок $X(\lambda_1, \lambda_2')$ и $X(\lambda_1, \lambda_2'')$ справедливо следующее соотношение:

$$X(\lambda_1, \lambda_2'') = X(\lambda_1, \lambda_2') + X(\lambda_2', \lambda_2'').$$

Так как второй член этой суммы не зависит от переменного параметра λ_1 , то это выражение фактически и означает, что в пространстве одна "координатная линия отличается от другой сдвигом на постоянный вектор $X(\lambda_2', \lambda_2'')$ ". Поскольку все координатные линии этого семейства проходят через начало координат, этот вывод можно сформулировать следующим образом: любая координатная линия этого семейства может быть получена из какой-то исходной параллельным переносом в пространстве так, чтобы она проходила через начало координат. В частности, в качестве исходной можно взять линию, для которой $\lambda_2'' = \infty$, что фактически соответствует цветам желтых ступенчатых окрасок, расположенным на одном из ребер цветового тела.

Аналогичные рассуждения можно провести для второго семейства координатных линий, где фиксирован первый параметр λ_1 , а переменным является второй, а также для сетки координат на поверхности цветов пурпурных ступенчатых окрасок. Эти рассмотрения, а также свойство симметрии цветового тела относительно его центра позволяют сделать вывод, что форма цветового тела в трихроматическом случае однозначно задается формой его ребра. С помощью преобразований центральной симметрии и параллельных переносов ребра в пространстве можно построить всю поверхность цветового тела.

Пример цветового тела для случая трихроматического зрения приведен на рис. 15, где изображено цветное тело, подсчитанное для системы цветового зрения лягушки при стандартном дневном освеще-

нии D_{65} . Двумерный рисунок плохо передает пространственные взаимоотношения. Колориметристы не раз пытались изобразить трехмерное цветное тело (для системы цветового зрения человека) на рисунке [49, 160, 170, 10], но нам не известно удачных решений. Именно поэтому строили объемные проволочные модели цветного тела [49, 132]. Описанные выше свойства координатных линий на поверхности цветного тела существенно упрощают такую задачу, так как позволяют собрать все цветное тело из совершенно одинаковых проволочек, изогнутых по единому шаблону [30]. К сожалению, на фотографиях этих моделей, являющихся двумерной проекцией такого трехмерного цветного тела, снова теряются все пространственные взаимоотношения [50]. Между тем существует (и используется; см., например, [105, 114]) метод, позволяющий передавать трехмерные соотношения посредством обычных типографских иллюстраций. Для этого нужно изобразить (и соответствующим образом рассматривать) стереопару: две разные плоские проекции объемного тела отдельно для каждого глаза.

Читатель, привычный к рассматриванию стереограмм, легко увидит объемную форму цветного тела на рис. 15. Читатель, встретившийся с таким рисунком впервые, может попытаться, глядя левым глазом на левое изображение, а правым — на правое, добиться "слития" их в целостное пространственное представление. Рисунок при этом должен быть расположен без перекосов на расстоянии, удобном для чтения. При этом полезно бывает поставить между глазами и рисунком вертикальную перегородку из плотной бумаги, отделяющую левую половину рисунка от правой. И, наконец, те, кто не сможет этого добиться, могут считать левую и правую половинки рис. 15 просто плоскими изображениями одного и того же цветного тела в разных ракурсах.

На рисунке цветное тело повернуто к зрителю тем своим ребром, на которое попадают цвета голубых ступенчатых окрасок. Верхняя его "створка" образована цветами зеленых ступенчатых окрасок, а нижняя — пурпурных. На поверхности цветного тела нанесена сетка криволинейных гауссовых координат для значений параметров через каждые 20 нм.

Связь формы цветного тела с кривыми спектральной чувствительности

Форма цветного тела существенно зависит от взаимного расположения кривых спектральной чувствительности приемников. Так, если эти кривые разнесены по спектру и почти не перекрываются, то посредством излучения, отраженного от соответствующим образом подобранных ступенчатых окрасок, можно почти изолированно возбуждать тот или иной светочувствительный приемник, вследствие чего (в случае дихроматического зрения) форма цветного тела приближается к прямоугольнику. Напротив, если кривые спектральной чувствительности сильно перекрываются, как это иногда встречается, например, в системах цветового зрения некоторых морских рыб или гекконов, то никакими излучениями не удастся существенно активи-

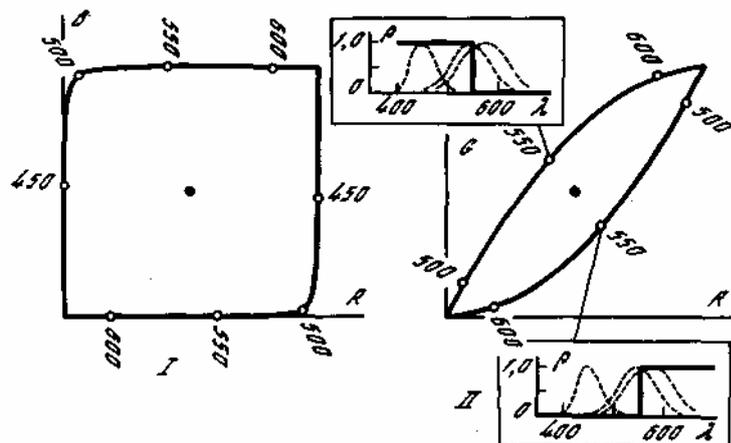


Рис. 16. Цветовые тела для дейтеранопии (I) и тританопии (II) при дневном освещении D_{65}

ровать один светочувствительный приемник, не затронув при этом и другой. Вследствие этого цветовое тело принимает узкую ланцетовидную форму.

Наиболее выразительные примеры и того и другого вариантов перекрытия светочувствительных приемников дают разные случаи дихромазий человека. Красночувствительный и синечувствительный приемники человека далеко отставлены друг от друга (см. рис. 2, I), поэтому при выпадении лежащего между ними зеленочувствительного приемника будем иметь пример дихроматической системы зрения (дейтеранопия) с мало перекрывающимися кривыми приемников. Красночувствительный и зеленочувствительный приемники, наоборот, расположены очень близко, поэтому случаи выпадения синечувствительного приемника (тританопия) дают пример дихроматической системы с сильно перекрывающимися кривыми спектральной чувствительности. Цветовые тела для дейтеранопии и тританопии при стандартном дневном освещении D_{65} приведены на рис. 16. Другие примеры цветовых тел, построенных для дихроматических систем зрения, можно найти на рисунках следующей главы.

Двумерное цветовое тело, построенное для той или иной формы дихромазий цветового зрения человека, является проекцией трехмерного цветового тела (для цветового зрения нормального трихромата) на соответствующую координатную плоскость: на плоскость RB — для дейтеранопии и на плоскость RG — для тританопии. По этим проекциям уже можно составить некоторое представление о форме трехмерного цветового тела для нормального трихромата. В частности, вытянутая форма его проекции на плоскость RG (рис. 16, II) говорит о том, что цветовое тело человека имеет упрощенную форму. На стереопаре рис. 17 приведено трехмерное цветовое тело для нормального трихромата при стандартном дневном освещении D_{65} .

Отличая формы цветовых тел для человека и лягушки (см. рис. 15)

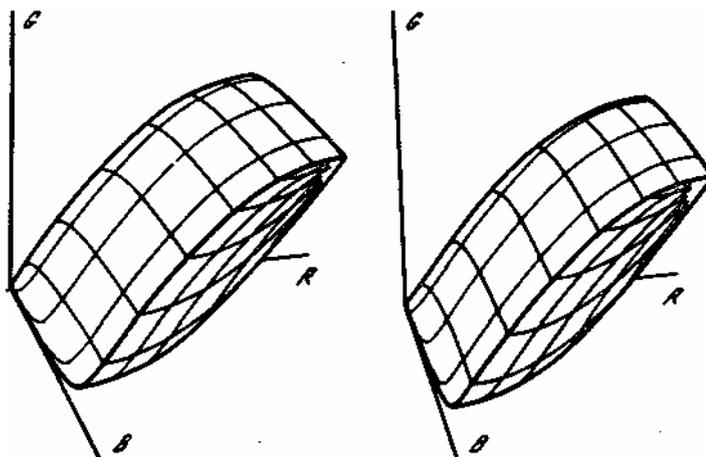


Рис. 17. Стереопара для цветового тела человека при дневном освещении D_{65}

обусловлены различиями во взаимном расположении кривых спектральной чувствительности приемников. Кривые красночувствительных и синечувствительных приемников лягушки и человека примерно одинаковы (рис. 2, I, и II). Главное различие этих систем цветового зрения состоит в положении кривых спектральной чувствительности зеленочувствительного приемника: в то время как у лягушки все кривые спектральной чувствительности разнесены по спектру примерно равномерно, в системе цветового зрения человека зеленочувствительный приемник существенно сдвинут в длинноволновую область. В результате он меньше перекрывается с синечувствительным приемником, но сильнее перекрывается с красночувствительным.

Роль принятых ограничений

Итак, показано, что если кривые спектральной чувствительности приемников линейно независимы по всему спектру (при этом поверхность спектральных цветов всюду строго выпукла, т.е. не имеет вогнутых и плоских участков), то цветовое тело для любых источников с непрерывным спектром также всюду строго выпукло и на его поверхность попадают цвета только m -ступенчатых ($m < n$) окрасок. В этом разделе мы рассмотрим, как изменится форма цветового тела, и цвета каких окрасок будут оптимальными, если те или иные из принятых нами ограничений не выполняются. Отдельно рассмотрим случаи: 1) когда совокупность приемников такова, что существуют участки спектра с размерностью цветового зрения, меньшей n , т.е. когда для любых наборов значений $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$ из этого спектрального интервала $\Delta = 0$, и 2) когда на поверхности спектральных цветов имеются вогнутые участки, т.е. когда при некоторых $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$ имеем $\Delta < 0$. Кроме того, рассмотрим, какую форму имеет цветовое тело в случае линейчатых спектров источников.

Существует определенная связь между формой цветового конуса

и цветами, формирующими его поверхность, с одной стороны, и формой цветового тела и цветами окрасок, попадающими на его поверхность, — с другой. Как уже говорилось, наличие спектральных интервалов меньшей размерности, чем размерность цветового зрения животного, приводит к тому, что на поверхности цветового конуса появляются плоские участки, куда попадают наряду с чистыми спектральными цветами из этих интервалов также и их смеси. На поверхности цветового тела в этом случае тоже появляются соответствующие плоские (и линейчатые) участки, которые вследствие свойства центральной симметричности цветового тела существуют в двух экземплярах. Поскольку обычно спектральные интервалы меньшей размерности приурочены к концам спектра, такие участки поверхности цветового тела примыкают к его вершинам. Для случаев дихроматического зрения примеры прямолинейных участков границы цветового тела можно увидеть на рис. 14 и 16. Протяженность их зависит от спектра освещения и от размеров одномерных областей спектра (от степени перекрытия кривых спектральной чувствительности приемников). В случае трехмерного цветового зрения человека наличие одномерных интервалов по концам спектра приводит к тому, что, во-первых, на ребрах цветового тела вблизи его вершин образуются маленькие прямолинейные участки, одни из которых обусловлены одномерностью длинноволнового конца спектра, другие — коротковолнового. Во-вторых, створки цветового тела оказываются окантованными примыкающими к ребрам узкими полосками, которые геометрически представляют собой линейчатые поверхности. На них проецируются цвета двухступенчатых окрасок, по крайней мере с одной ступенькой в одномерной области спектра. А наличие дихроматического интервала в длинноволновой части спектра приводит к появлению плоских участков поверхности цветового тела, примыкающих к его вершинам. На рисунке цветового тела человека (рис. 17) можно увидеть почти прямолинейные участки ребер у вершин цветового тела и линейчатые канты вдоль ребер. Однако из-за того, что действительно одномерные (в колориметрическом смысле) интервалы спектра находятся там, где чувствительность приемников слишком мала, обусловленные этими интервалами области на поверхности цветового тела на самом деле настолько малы, что их трудно было изобразить в этом масштабе рисунка. Два плоских участка, обусловленных дихроматическим спектральным интервалом, напротив, занимают ощутимую часть поверхности цветового тела. Так, больше половины видимой части пурпурной створки цветового тела человека на рис. 17 (обращенной к зрителю вертикальной ее стенки) занимает такой плоский участок.

В отличие от строго выпуклых участков поверхности цветового тела, где каждому оптимальному цвету соответствует одна-единственная ступенчатая окраска, на линейчатые и плоские участки его поверхности попадают цвета многих разных окрасок. Поскольку в одномерном участке спектра зрительная система не способна различать излучения одно от другого иначе, как по интенсивности, совершенно безразлично, какой вид имеет там спектральный коэффициент отражения — ступенчатый или неступенчатый. Это значит, что для линейных

участков ребер цветового тела оптимальными будут наряду с одноступенчатыми (со ступенькой в одномерной области спектра), также окраски, имеющие произвольные распределения спектрального коэффициента отражения в этой области. Приведенные выше рассуждения приложимы не только к одноступенчатым, но также и к двухступенчатым окраскам, имеющим хотя бы одну ступеньку в пределах одномерного участка спектра. Поэтому на линейчатые канти вдоль ребер цветового тела попадают, кроме цветов таких двухступенчатых окрасок, также и цвета окрасок, спектральный коэффициент отражения которых вне одномерного интервала совпадает с данной ступенчатой окраской, а в пределах одномерного интервала произволен. На плоские участки поверхности цветового тела, обусловленные дихроматическим спектральным интервалом, проецируются наряду с двухступенчатыми окрасками, имеющими обе ступеньки в пределах этого интервала, также окраски с произвольным распределением спектрального коэффициента отражения в пределах этого интервала. Всюду вне этого интервала спектральный коэффициент отражения должен быть либо равен 0 (цвета таких окрасок будут попадать на зеленую створку поверхности цветового тела), либо 1 (этим окраскам соответствует плоский участок пурпурной створки цветового тела).

Таким образом, наличие спектральных интервалов меньшей размерности, чем размерность цветового зрения животного, сильно усложняет картину: цветовое тело перестает быть строго выпуклой фигурой — на его поверхности появляются прямолинейные, линейчатые, плоские и т.п. участки. На этих участках пропадает удобное с аналитической точки зрения взаимно однозначное соответствие между цветом и спектральным коэффициентом отражения окраски, имеющей этот цвет. Тем не менее с вычислительной точки зрения, когда ставится задача нахождения формы цветового тела для некоторой системы цветового зрения и некоторого освещения, новых трудностей не возникает, так как m -ступенчатые окраски, где $m < n$, по-прежнему попадают только на поверхность цветового тела.

Иначе дело обстоит, если поверхность спектральных цветов имеет не только плоские, но и вогнутые участки, т.е. когда при некоторых значениях λ_i , детерминант матрицы (2.1) меняет знак. В этом случае цвета уже не всех m -ступенчатых ($m < n$) окрасок попадают на поверхность цветового тела. Некоторые из них оказываются внутри, а спектральные коэффициенты отражения оптимальных окрасок (цвета которых образуют соответствующие участки поверхности цветового тела) будут иметь иной вид. Конечно, это по-прежнему будут ступенчатые окраски, только с большим числом ступенек. Хотя все это и существенно усложняет картину, можно показать, что вид спектральных коэффициентов отражения таких оптимальных окрасок (как это было и раньше) не зависит от спектра освещения. Иными словами, значения длин волн λ_i , в которых спектральный коэффициент отражения оптимальных окрасок претерпевает скачок, могут быть найдены только на основании свойств кривых спектральной чувствительности приемников. При любом

освещении цвета этих окрасок будут попадать на поверхность соответствующего цветового тела.

Особенности спектральных коэффициентов отражения оптимальных окрасок разберем на конкретном примере цветового зрения окуня. В дихроматическом случае анализ упрощается. Знак детерминанта Δ матрицы (2.1) здесь однозначно определяется отношением спектральных чувствительностей приемников. При этом, если это отношение представляет собой монотонную функцию длины волны, Δ не будет менять знак ни при каких значениях λ_1 и λ_2 . Наличие подъема чувствительности приемников в коротковолновом конце спектра, обусловленного вторым максимумом поглощения, обычным для соответствующих светочувствительных пигментов, приводит к тому, что отношение чувствительностей любых двух приемников оказывается немонотонной функцией длины волны. Для системы цветового зрения окуня чувствительности красночувствительных $\bar{r}(\lambda)$ и зеленочувствительных $\bar{g}(\lambda)$ колбочек с λ_{\max} соответственно при 615 и 535 нм (рассчитанные по формуле Ф. Хароши [100] для светочувствительных пигментов, характерных для пресноводных рыб) показаны сплошными линиями на рис. 18,а. Как видно из рис. 18,з, отношение этих чувствительностей представляет собой немонотонную функцию.

Немонотонность отношения чувствительностей колбочек приводит к тому, что для некоторых пар длин волн Δ становится отрицательным. Вследствие этого на некоторые участки поверхности цветового тела попадают не одноступенчатые окраски (как это было в случае монотонного отношения чувствительностей приемников), но также некоторые двухступенчатые окраски. Понятно, что это не могут быть любые двухступенчатые окраски — цвета основной массы двухступенчатых окрасок не будут оптимальными. Действительно, двухступенчатые окраски определяют двухпараметрическое семейство цветов, а граница цветового тела в дихроматическом случае представляет собой линию и должна задаваться однопараметрическим семейством. Поэтому оптимальными здесь будут только те двухступенчатые окраски, у которых значения параметров λ_1 и λ_2 (где их спектральные коэффициенты отражения претерпевают скачок) связаны между собой некоторым условием. Можно показать, что таким условием в разбираемом нами случае будет обращение в нуль детерминанта Δ матрицы (2.1). Множество таких двухступенчатых окрасок является однопараметрическим: задав λ_1 , однозначно находим λ_2 . Раскрывая выражение $\Delta = 0$, получим, что λ_1 и λ_2 для таких двухступенчатых окрасок связаны соотношением

$$\bar{g}(\lambda_1)/r(\lambda_1) = \bar{g}(\lambda_2)/r(\lambda_2).$$

Пример пары таких точек λ_1 и λ_2 на спектре для рассматриваемого случая цветового зрения окуня показан на рис. 18,з. Из рисунка, в частности, следует, что для системы цветового зрения окуня на поверхность цветового тела будут попадать цвета только таких одноступенчатых окрасок, спектральный коэффициент отражения которых претерпевает скачок при длинах волн, больших 565 нм.

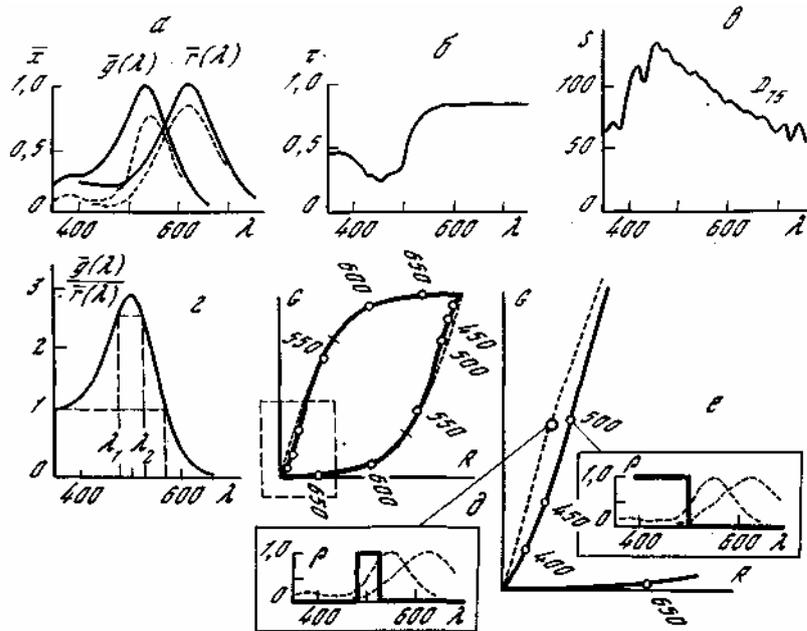


Рис. 18. Отклонения цветов одноступенчатых окрасок от поверхности цветового тела для системы дихроматического зрения окуня

a – кривые спектральной чувствительности колбочек окуня (сплошные линии) и рассчитанные по ним кривые спектральной чувствительности приемников (\bar{Q} и \bar{R}) с учетом поглощения в роговице (штриховые линии); *b* – спектр пропускания роговицы окуня; *в* – спектральное распределение интенсивности дневного освещения D_{75} ; *г* – отношение чувствительностей приемников; *д* – поверхность цветового тела (штриховая линия) и линия цветов одноступенчатых окрасок (сплошная линия); *е* – увеличенное изображение участка того же цветового тела вблизи начала координат (здесь же изображены спектральные коэффициенты отражения одно- и двухступенчатой окрасок, цвета которых попадают соответственно внутрь и на поверхность цветового тела)

Остальная поверхность цветового тела задается цветами двухступенчатых окрасок.

В качестве источника освещения для расчета формы цветового тела окуня выбрано полуденное освещение (световая обстановка под водой при косом падении лучей на поверхность воды менее определена, так как она существенно зависит от характера волнения этой поверхности). Спектр стандартного дневного излучения D_{75} , которое, согласно рекомендациям [75, 113], больше соответствует освещению в полдень, чем стандартное дневное излучение D_{65} , показан на рис. 18, *в*. Построенное для такого освещения цветное тело приведено на рис. 18, *д*. Различия между цветами одноступенчатых окрасок и поверхностью цветового тела, хорошо видные вблизи его вершины, на самом деле тянутся вплоть до места на поверхности цветового тела, отмеченного на рисунке поперечной черточкой, соответствующего цвету одноступенчатой окраски со скачком спектрального коэффициента отражения при 565 нм. Только те одноступенчатые окраски, спектральный коэффициент отраже-

ния которых претерпевает скачок при еще больших длинах волн, образуют поверхность цветового тела.

Как видно из этого рисунка, только меньшая часть поверхности цветового тела может быть легко найдена как геометрическое место цветов одноступенчатых окрасок. Остальные точки поверхности цветового тела вычислять гораздо сложнее. К счастью, в зрительной системе окуня (как, впрочем, и во многих других дихроматических системах цветового зрения) нарушения монотонности отношения чувствительностей приемников проявляются в той части спектра, где чувствительность зрительной системы вообще занижена. Дело в том, что окунь имеет окрашенную в ярко-желтый цвет роговицу, спектральный коэффициент пропускания которой [151] показан на рис. 18, б. Такой общий светофильтр, поставленный на входе зрительной системы, меняет сами кривые спектральной чувствительности (приемники приобретают завалы чувствительности в синей части спектра, показанные пунктирными линиями на рис. 18, а), но не меняет их отношения. Следовательно, от этого не изменится и множество оптимальных окрасок. Однако вследствие малой чувствительности вид спектрального коэффициента отражения окраски в синем конце спектра мало сказывается на ее цвете. В результате цвета оптимальных двухступенчатых окрасок (со второй ступенькой в синем конце спектра) мало отличаются от цветов одноступенчатых окрасок. На рис. 18, е в увеличенном масштабе показана прилегающая к началу координат часть цветового тела. На вставках показаны спектральные коэффициенты отражения двух близких по цвету одноступенчатой и оптимальной двухступенчатой окрасок.

Фактически различия между цветами одноступенчатых и оптимальных двухступенчатых окрасок в системе цветового зрения окуня оказываются еще меньше, чем это видно на рис. 18, е. В приведенных здесь расчетах для наглядности не было учтено поглощение в хрусталике, который у окуня практически не пропускает излучений с длинами волн короче 400 нм [73]. Учет также хрусталикового светофильтра приводит к тому, что линии оптимальных цветов и цветов одноступенчатых окрасок на рисунке цветового тела сливаются и их не удастся разделить даже в увеличенном масштабе (как на рис. 18, е).

Таким образом, пример расчетов, проведенных для реальной дихроматической системы цветового зрения с немонотонным отношением чувствительности приемников и для реальных условий освещения, вселяет надежду, что и в других случаях поверхность, образованная цветами m -ступенчатых окрасок (где $m < n$), мало отличается от поверхности цветового тела и может быть использована для приближенных расчетов. Как будет видно в следующей главе, сложности, вызванные обращением в нуль детерминанта матрицы (2.1), возникают не только при вычислении формы поверхности цветового тела. Однако полученный здесь результат позволяет в качестве первого приближения проводить весь последующий анализ в упрощающем предположении, что ни при каких наборах λ_i , этот детерминант не равен нулю. При расчете же соответствующих

иллюстраций для аппроксимации кривых спектральной чувствительности приемников либо специально подбирали линейно независимые по всему спектру функции, либо попросту закрывали глаза на существование линейно зависимых точек и производили вычисления так, как если бы условие линейной независимости приемников выполнялось, зная, что полученный результат будет мало отличаться от реального положения вещей.

Цветовое тело при линейчатых спектрах освещения

Другие принятые нами при расчете формы цветового тела ограничения касались спектрального состава освещения. Вариантом, совершенно не удовлетворяющим этим ограничениям, будут источники освещения с линейчатыми спектрами, распределение интенсивности излучения которых в отдельных точках спектра обращается в бесконечность, а в остальных местах спектра равно нулю. С точки зрения проблемы константности цветовосприятия такие источники могут представлять только чисто прикладной интерес, например, в связи с возможными искажениями в цветопередаче на картинах, написанных художниками в расчете на рассмотрение при дневном освещении, а демонстрируемых при освещении источниками "дневного света". Такая задача ставилась Н.Д. Ньюбергом еще в 1936 г. [31] в связи с появившимися в то время газосветными источниками света. Однако теория цветопередачи может быть построена только после того, как будут досконально выяснены механизмы введения поправки на освещение в зрительной системе человека. Зная их, можно предсказать, как будет восприниматься одна и та же окраска при том или ином освещении, а следовательно, и каковы будут искажения в цветопередаче этой окраски при переходе от дневного освещения к противоестественному освещению с линейчатыми спектрами.

Тем не менее сейчас (когда вопрос о механизмах поправки на освещение только ставится) для полноты представлений о возможной форме цветового тела и ее связи со спектром освещения полезно коротко остановиться и на варианте линейчатых спектров освещения. Линейчатые источники могут представлять интерес и в связи с одной из интерпретаций зональной модели цветового зрения. Согласно этой интерпретации на кривые спектральной чувствительности приемников и спектральные коэффициенты отражения окрасок не накладывається почти никаких ограничений, но в качестве спектров освещения рассматриваются линейчатые спектры, где количество линий l равно размерности цветового зрения ($l = n$). Причем интенсивность каждой из этих линий может меняться произвольно, а положение их на спектре раз и навсегда выбрано так, чтобы каждая из них возбуждала только один ("свой") светочувствительный приемник и не возбуждала другие. Если последнее условие не выполняется, то имеем интерпретацию "расширенного варианта" зональной модели с перекрывающимися приемниками, который понадобится нам в последней главе.

Очевидно, что в случае линейчатых спектров источников, какую

бы форму ни имели кривые спектральной чувствительности приемников и спектральные коэффициенты отражения окрасок, видимые цвета поверхностей определяются только значениями чувствительностей приемников и коэффициентами отражения в l точках спектра, а их значения в промежутках несущественны. В результате при $l < n$ получаем вырожденное цветовое пространство, размерность которого определяется не размерностью цветового зрения, а числом линий в спектре источника. Цветовое тело при линейчатом освещении имеет вид центрально-симметричного l -мерного многогранника, грани которого представляют собой $(n - 1)$ -мерные параллелепипеды. В дихроматическом случае это будет многоугольник, в трихроматическом — многогранник, ограниченный параллелограммами. При $l \leq n$ цветовое тело приобретает вид l -мерного параллелепипеда (в общем случае — косоугольного) с 2^l вершинами. В эти вершины попадают цвета окрасок, коэффициенты отражения которых для каждой из длин волн, соответствующих линиям в спектре источника, принимают значения, равные 0 или 1. Ребра параллелепипеда, соединяющие его вершины, будут образованы цветами аддитивных смесей соответствующих окрасок.

Преобразования оптимальных цветов при изменении освещения

Так как цвета оптимальных окрасок, формирующих поверхность цветового тела, зависят не только от формы и взаимного расположения кривых спектральной чувствительности приемников, но и от спектра освещения, естественно, что цветовое тело для одной и той же системы цветового зрения должно изменяться при изменении освещения. В общем случае при произвольных спектрах освещения детальная картина изменений формы цветового тела при изменении освещения будет довольно сложной. Можно показать, что при выполнении принятых выше ограничений на кривые спектральной чувствительности приемников для одной и той же системы цветового зрения любым двум различающимся по спектру освещения всегда соответствуют разные по форме цветовые тела. Однако если ограничиться рассмотрением узкого класса естественных источников, то в таких изменениях формы цветового тела можно заметить определенные закономерности. Здесь в общих чертах опишем наиболее характерные для естественных спектров освещения изменения формы цветового тела и расположения на его поверхности цветов оптимальных окрасок при изменении освещения.

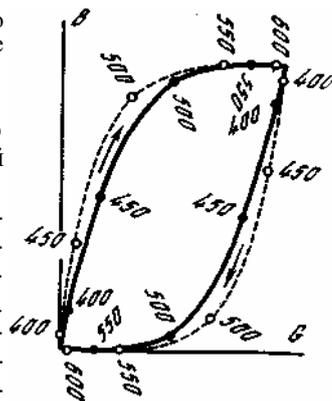
Очевидно, что изменения освещения только по мощности (без изменения относительного спектрального распределения интенсивности) приведут просто к подобному преобразованию цветового тела. В случае изменения освещения также и по цветности цветовое тело будет вытягиваться по тем координатным осям, которым соответствует увеличение интенсивности освещения, и сжиматься по направлениям, соответствующим уменьшению интенсивности освещения. Такие изменения формы цветового тела можно видеть на

рис. 14, где приведены цветовые тела для прямого солнечного освещения и освещения светом голубого неба. Однако, как можно судить по форме границы цветового тела и по расположению цветов оптимальных окрасок на ней, эти изменения на самом деле не сводятся просто к пропорциональному изменению масштаба координатных осей. Нагляднее это видно на рис. 19, где совмещены показанное сплошной линией то же самое цветовое тело для освещения светом голубого неба, что и на рис. 14, II, и показанная штриховой линией фигура, образованная из цветового тела для прямого солнечного освещения (рис. 14, I) путем соответствующего сжатия по зеленой и растяжения по синей координатным осям.

При переходе от солнечного освещения к более голубому освещению наряду с изменениями формы цветового тела наблюдаются также существенные и закономерные перемещения оптимальных цветов по его границе. Оптимальные цвета подмножества голубых одноступенчатых окрасок (верхняя дуга границы цветового тела) при этом перемещаются от черной вершины цветового тела к его белой вершине, а дополнительные им желтые оптимальные цвета симметрично перемещаются по желтой части границы цветового тела от белой вершины к черной. И те и другие смещаются по границе цветового тела по часовой стрелке. В результате при изменении освещения в синюю сторону цвета совокупности одноступенчатых окрасок со скачком спектрального коэффициента отражения в коротковолновой части спектра разрежаются — начинают занимать относительно большую часть границы цветового тела. Цвета одноступенчатых окрасок со ступенькой в длинноволновой части спектра при этом сгущаются. И наоборот, при переходе к более красному освещению оптимальные цвета перемещаются по границе цветового тела против часовой стрелки, что приводит к разрежению цветов одноступенчатых окрасок со ступенькой в длинноволновой части спектра и сгущению цветов окрасок со ступенькой в коротковолновой части спектра.

Естественно, что переход от одного освещения к другому будет приводить к разрежению цветов тех одноступенчатых окрасок, у которых происходит скачок спектрального коэффициента отражения в той части спектра, где наблюдается относительное увеличение спектральной интенсивности освещения. Качественно такое же циркулярное перемещение оптимальных цветов по границе цветового тела при переходе от одного освещения к другому происходит при любых монотонных изменениях спектрального состава освещения, т.е. когда отношение спектральной интенсивности источников освещения представляет собой монотонную функцию длины волны. В частности, это выполняется для любых переходов между источниками с планковскими спектрами (рис. 7, I) или между источниками *A*, *B* и *C* (рис. 7, II), а также в среднем (если отвлечься от мелких локальных немонотонностей, возможных вблизи фраунгоферовых линий поглощения) и между стандартными дневными излучениями *D* (рис. 8, I). Другие примеры преобразований цветовых тел для трех разных дихроматических систем при переходе как к более синему,

Рис. 19. Относительные изменения формы цветового тела и положения оптимальных цветов на его границе после перехода к более синему освещению



так и к более красному освещению можно увидеть на рис. 27 в следующей главе.

При немонотонных изменениях спектрального состава освещения перемещения оптимальных цветов по поверхности цветового тела будут уже иными. Практический интерес представляют такие изменения освещения, когда наблюдается относительное увеличение его интенсивности в центральной части спектра при подавлении по краям или наоборот. В природе такого типа вариации освещения (от места к месту) характерны, например, для зеленого лиственного леса и для световой обстановки под водой. На последнем примере остановимся подробнее. Здесь, во-первых, как и в случае густого лиственного леса, богатая фитопланктоном толща воды может служить зеленым светофильтром, подавляющим коротковолновый и длинноволновый концы спектра. Во-вторых, даже свободная от хлорофиллсодержащих микроорганизмов вода, хотя и в меньшей степени, также обладает свойствами зеленого светофильтра. Так, известно, что даже самая чистая, дистиллированная вода имеет сильное поглощение в инфракрасной и красной областях спектра [86]. Наряду с этим вода внутренних водоемов, а также прибрежной зоны морей содержит, иногда в большом количестве, стойкие окрашенные продукты разложения органического вещества — так называемую "желтую субстанцию" [74], которая поглощает коротковолновые лучи. Таким образом, вследствие поглощения света в воде общая интенсивность освещения в воде падает с глубиной. Но при этом происходит также характерное изменение относительного спектрального состава освещения: доля синих и красных лучей в освещении прогрессивно уменьшается. Иными словами, толща воды работает как монохроматор [180]. Такие изменения спектрального состава освещения довольно значительны и сказываются на цвете излучения, отраженного от какой-либо окраски, при погружении на глубину всего в пределах нескольких метров.

Мы рассчитали изменения формы цветового тела при таких изменениях освещения с глубиной для уже рассматривавшейся выше системы цветового зрения окуня. Использовались характеристики спектрального коэффициента поглощения в приповерхностном слое воды, полученные в работе [190] для одного из богатых планктоном водоемов. Для падающего на поверхность воды (глубина 0 м) освещения был принят спектр стандартного дневного излучения D_{75} и далее рассчитаны с учетом поглощения воды спектры освещения для глубин в 1, 2 и 3 м. Полученные таким образом спектры освещения для этих глубин приведены в логарифмическом масштабе в левой

части рис. 20. Как показывают эти кривые, относительный вклад средневолновых (зеленых) лучей в спектре освещения растет с глубиной. Для человека такие излучения будут выглядеть все более зелеными по цвету. Однако для системы цветового зрения окуня (как можно видеть из сопоставления этих спектров с нарисованными ниже кривыми спектральной чувствительности приемников окуня) изменения интенсивности освещения в длинноволновой и коротковолновой частях спектра происходят примерно одинаково. Поэтому для окуня такое освещение с глубиной почти не будет изменяться по цветности.

В правой части рис. 20 приведены четыре цветочных тела для системы цветового зрения окуня, построенных для освещений, соответствующих четырем разным глубинам погружения. Чтобы избавиться от несущественных сейчас изменений общего размера цветочного тела, происходящих вследствие прогрессирующего уменьшения интенсивности освещения с глубиной, цветочные тела изображены в разном масштабе (масштабная линейка в каждом случае нанесена на осях координат). Для наглядного представления характера перемещения оптимальных цветов по поверхности цветочного тела на рисунках нанесены крестообразно две пунктирные линии, соединяющие цвета пары дополнительных оптимальных окрасок. Как можно судить по изменению этой крестообразной фигуры с глубиной, при прогрессирующем позеленении освещения разрежаются (занимают все большее место на поверхности цветочного тела) цвета ступенчатых окрасок, скачок спектрального коэффициента отражения которых происходит в зеленой части спектра. При этом заметны и искажения формы самого цветочного тела — при позеленении освещения оно сужается и принимает ланцетовидную форму.

Итак, показано, что для естественных источников, характеризующихся довольно плавными изменениями спектрального состава освещения, изменение освещения приводит к единообразным перемещениям оптимальных цветов по поверхности цветочного тела. Но даже для таких источников эти изменения положения оптимальных цветов не сводятся к простым растяжениям и сжатиям цветочного пространства вдоль координатных осей. Иными словами, по координатным изменениями масштаба нельзя совместить поверхность одного цветочного тела (соответствующего одному освещению) с поверхностью другого. А это значит, что введение по координатной поправке на цвет освещения (согласно закону коэффициентов фон Криса) не сможет обеспечить константного восприятия оптимальных цветов. Более того, можно показать, что, для того чтобы узнавать константно оптимальные окраски, зрительной системе мало знать просто цвет освещения, а нужно знать абсолютно точно весь его спектр. Пример того, что знания только цвета освещения недостаточно для правильного узнавания оптимальных цветов, дает рис. 20, где цвет освещения изменялся так, как будто бы изменялась только его интенсивность, но форма цветочного тела и расположение оптимальных цветов на его поверхности при этом претерпевали существенные изменения, отличные от простого подобного преобразования цветочного пространства.

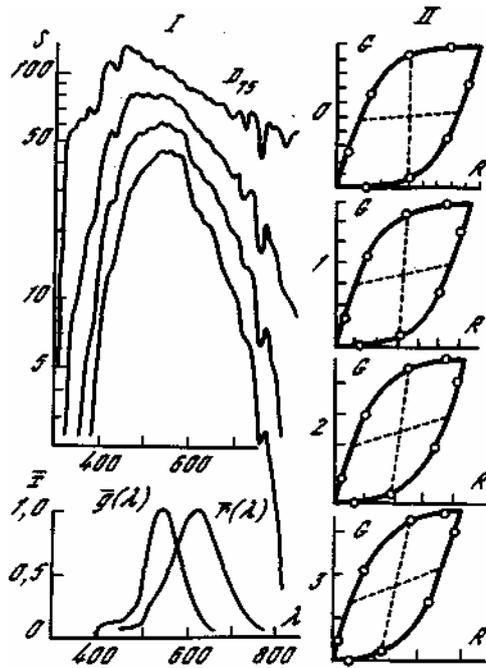


Рис. 20. Изменения формы цветового тела при изменении освещения для системы дихроматического зрения окуня

I – спектры дневного освещения в воде на разных глубинах (0 – 3 м) и кривые спектральной чувствительности приемников \bar{X} окуня; II – цветовые тела для соответствующих условий освещения

Хотя тот факт, что преобразования оптимальных цветов при изменении освещения не сводятся к покоординатным растяжениям и сжатиям цветового пространства, совершенно очевиден, он не воспринимался как серьезное противоречие моделям константности с покоординатной поправкой на освещение. Вероятно, это объясняется тем, что оптимальные цвета в основном соответствуют физически невозможным (и потому — неинтересным) ступенчатым окраскам, для которых задача константного узнавания просто не ставится. Цвета реальных окрасок, как правило, попадают внутрь цветового тела. Как будет показано в следующих главах, не только для поверхности цветового тела, но и для его внутренних точек преобразования цветов окрашенных поверхностей при изменении освещения также не сводятся к покоординатному изменению масштаба.

Вычисление спектра источника по форме цветового тела

В первой главе мы уже говорили о том, что, хотя зрительная система не получает непосредственных сведений о спектре освещения, она может узнавать его цвет, анализируя цвета излуче-

ний, отраженных от разнообразно окрашенных поверхностей в поле зрения. В действительности, используя ту же информацию о многообразии возможных цветов отраженных излучений, можно не только узнать положение белой вершины цветового тела, но и восстановить целиком (с той или иной точностью) всю его форму. И далее: поскольку форма цветового тела однозначно связана со спектром освещения, зная форму цветового тела при некотором освещении, в принципе возможно восстановить целиком его спектральный состав. В дихроматическом случае для этого нужно знать форму границы цветового тела, представляющей собой геометрическое место цветов одноступенчатых окрасок. В трихроматическом случае также достаточно знать форму ребра цветового тела, задаваемого цветами одноступенчатых окрасок, поскольку, как было показано ранее, в трехмерном случае форма цветового тела однозначно задается его ребром.

Для примера рассмотрим, как можно по форме цветового тела вычислить спектральный состав освещения $S(\lambda)$ для случая дихроматического зрения. Пусть нам известна форма границы цветового тела (например, той ее дуги, на которую попадают цвета желтых одноступенчатых окрасок) в виде функции

$$X_2 = X_2(X_1).$$

Для той же дуги существует другое, параметрическое задание:

$$X_1 = F_1(\lambda_1)$$

$$X_2 = F_2(\lambda_1)$$

где функции $F_i(\lambda)$ определены в (2.3), а параметр λ_1 задает значение длины волны, при котором спектральный коэффициент отражения соответствующей желтой ступенчатой окраски претерпевает скачок. Предполагается, что ни для какой точки этой дуги значение параметра λ_1 неизвестно, т.е. зрительная система получает информацию только о цвете X отраженного излучения, но не получает непосредственных сведений о том, какой конкретно одноступенчатой окраске оно соответствует. Однако сведения о значениях параметра λ_1 в каждой точке дуги содержатся в самой форме границы цветового тела. Действительно, легко видеть, что

$$dX_2 / dX_1 = \bar{x}_2(\lambda_1) / \bar{x}_1(\lambda_1).$$

Поскольку нам неизвестен только спектр освещения, а кривые спектральной чувствительности приемников можно считать известными, эта формула позволяет для любой точки поверхности цветового тела вычислить, какому значению параметра λ_1 одноступенчатой окраски она соответствует. После этого спектр освещения легко может быть вычислен по формуле

$$S(\lambda_1) = (dX_1 / d\lambda_1) / \bar{x}_1(\lambda_1) = (dX_2 / d\lambda_1) / \bar{x}_2(\lambda_1).$$

Таким образом, утверждается, что, если зрительная система может получить информацию о цвете любой одноступенчатой ок-

раски, даже не зная при этом, каков конкретно спектральный коэффициент отражения этой окраски, в принципе возможно полностью восстановить спектральное распределение интенсивности освещения только по набору возможных цветов оптимальных окрасок.

Метамеризм оптимальных окрасок

Все приведенные рассуждения относительно связи формы цветового тела со спектром освещения рассматривалась для случая, когда выполнялись все принятые нами упрощающие ограничения на кривые спектральной чувствительности приемников. В частности, предполагалось, что отсутствуют спектральные интервалы меньшей размерности, чем размерность цветового зрения животного. В этом случае при любом освещении каждому оптимальному цвету соответствовала только одна оптимальная окраска. Поэтому преобразование оптимальных цветов при изменении освещения было взаимно однозначным. Однако если это условие не выполняется, то на некоторых участках поверхности цветового тела, как мы это уже детально разбирали на примере цветового тела человека, в каждую точку будут попадать цвета многих различающихся по спектральному коэффициенту отражения оптимальных окрасок.

Таким образом, рассматривая оптимальные цвета на плоских и линейчатых участках поверхности цветового тела, мы впервые в данном изложении сталкиваемся с метамеризмом окрасок. В дальнейшем окраски, которые при некотором освещении имеют один и тот же цвет (т.е. отражают метамерные, одинаковые по цвету излучения), будем называть *метамерными окрасками* при данном освещении.

Преобразование метамерных оптимальных цветов, лежащих на таких участках поверхности цветового тела, уже не будет взаимно однозначным. Легко показать, что после изменения освещения цвета метамерных (при исходном освещении) окрасок, с одной стороны, остаются оптимальными (т.е. снова все попадают на поверхность цветового тела), а с другой стороны, могут различаться по цвету (т.е. перестанут быть метамерными). Геометрически это означает, что некоторые точки поверхности цветового тела после изменения освещения расплываются в целые области. Поскольку метамеризм оптимальных цветов возможен только на прямолинейных, линейчатых или плоских участках поверхности цветового тела, области, в которые переходят отдельные точки поверхности цветового тела при изменении освещения, представляют собой прямолинейные отрезки или плоские фигуры, лежащие на поверхности нового цветового тела.

Как мы увидим в гл. 3, проблема метамеризма окрасок еще более существенна для внутренних точек цветового тела, где любому цвету всегда соответствует множество метамерных окрасок. Здесь преобразование точек цветового тела при изменении освещения, как правило (за исключением тривиальных случаев), не будет однозначным.

**ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МЕТАМЕРНЫХ ЦВЕТОВ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОСВЕЩЕНИЯ****Зональная модель**

Поставленная нами в первой главе задача константности цветовосприятия состоит в том, чтобы найти механизм, компенсирующий изменения (преобразования) цвета излучения, отраженного от одной и той же поверхности, происходящие вследствие изменения освещения. Для этого нам нужно знать законы этих преобразований. Практический интерес при этом представляют только цвета реально возможных несамосветящихся окрасок, которым соответствуют точки цветового пространства, попадающие внутрь цветового тела. И здесь первая трудность, с которой мы сталкиваемся, — неоднозначность преобразования точек цветового пространства при изменении освещения, связанная с метамеризмом окрасок. Тем самым метамеризм неизбежно ограничивает возможную точность узнавания окрасок в механизмах константности цветовосприятия.

Прежде чем разбирать общий случай произвольно меняющихся по спектру кривых спектральной чувствительности приемников, спектров источников и спектральных коэффициентов отражения окрасок, остановимся на более простом варианте преобразования цветов в случае зональной модели цветового зрения с неперекрывающимися приемниками. Цветовое тело в этом случае представляет собой прямоугольный параллелепипед, построенный на осях координат, размеры которого определяются положением его белой вершины, соответствующей цвету освещения. При изменении освещения цветовое тело претерпевает вдоль каждой из осей сжатия и растяжения, пропорциональные изменению соответствующей компоненты цвета освещения. Пример такого преобразования координат X_1, X_2 для дихроматической зональной модели цветового зрения приведен на рис. 21. Здесь в исходном цветовом теле (рис. 21, I) для исходного освещения со спектром S_1 , показанным на рис. 21, IV, отмечены 9 цветов, соответствующих окраскам, зональные коэффициенты отражения которых могут принимать значения $1/4, 1/2$ и $3/4$ в каждой из зон спектра. А на рис. 21, II показано цветовое тело для освещения со спектром S_2 (рис. 21, IV) и расположение цветов, соответствующих этим точкам в новом цветовом теле.

Заметим, что в разбираемом примере совершенно несущественно, имеют ли спектральные коэффициенты отражения зональный вид, т.е. сохраняет ли $\rho(\lambda)$ одно и то же значение в пределах зоны спектра. Другие спектральные распределения $\rho(\lambda)$ будут давать метамерные цвета. Примеры спектральных коэффициентов отражения для пяти таких метамерных при исходном освещении S_1 окрасок показаны на рис. 22. Поскольку здесь значения координат

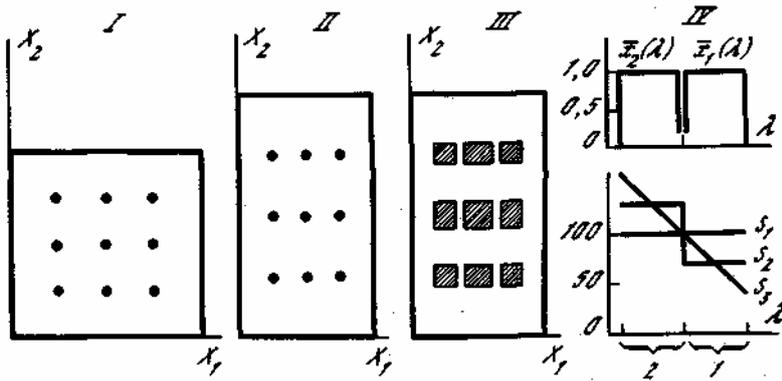


Рис. 21. Преобразование внутренних точек цветового тела при изменении освещения для зональной модели дихроматического зрения
 I – цветовое тело при исходном освещении S_1 с выбранными внутри него 9 цветами; II – цветовое тело и положения в нем соответствующих цветов после перехода к более синему освещению S_2 ; III – цветовое тело с заштрихованными внутри него областями метамерных окрасок после перехода к освещению S_3 ; IV – зональные кривые спектральной чувствительности (вверху) и спектры освещения (внизу); 1,2 – зоны на спектральной оси

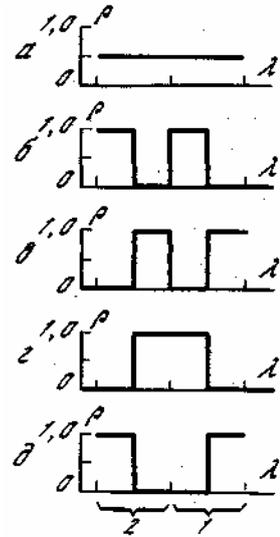


Рис. 22. Примеры спектральных коэффициентов отражения окрасок, метамерных при исходном освещении (для зональной модели цветового зрения, рис. 21)
 1,2 – зоны чувствительности двух приемников

нат цвета окраски определяются просто площадью под кривой спектрального коэффициента отражения в соответствующей зоне спектра, легко видеть, что цвета ступенчатых окрасок б, в, г и д совпадают с цветом 50%-ной серой окраски (а). При изменении одного освещения, спектр которого имеет зональный вид, на другое, того же вида, разные метамерные при исходном освещении окраски будут оставаться метамерными и после изменения освещения. Действительно, при

$$S_j(\lambda) = S_{ji} = const$$

в пределах i -й зоны спектра (индекс j здесь соответствует номеру источника) выражения для координат цвета окраски с произвольным коэффициентом отражения $\rho(\lambda)$ имеют вид

$$x_{ij} = \int_0^{\infty} S_j(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda = S_{ij} \int_0^{\infty} \rho(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda.$$

Следовательно, такие изменения освещения приводят просто к пропорциональным изменениям координат цвета окрасок. При этом точки цветового тела снова переходят в точки.

Если же осуществляется переход от зонального освещения к незональному (например, к такому, спектр которого приведен на рис. 21, IV — S_3), то окраски, метамерные при одном освещении, после изменения освещения перестанут быть метамерными: их цвета "расползутся" в некоторые области в цветовом пространстве. В дальнейшем область цветового пространства, в которую перейдут после изменения освещения цвета всех метамерных при исходном освещении окрасок, будем называть *областью метамерных окрасок*.

Примеры таких областей для разбираемого нами случая дихроматической зональной модели показаны на рис. 21, III. Здесь заштрихованы области метамерных окрасок внутри цветового тела, в которые преобразуются те же отмеченные на рис. 21, I точки исходного цветового пространства, при переходе к освещению со спектром $S_3(\lambda)$, показанным на рис. 21, IV. Третий источник освещения (S_3) по цвету совпадает со вторым (S_2), поэтому по форме соответствующие цветовые тела (рис. 21, II и III) одинаковы, но спектральные распределения интенсивности освещения у этих источников разные. Эти различия в спектре освещения и определяют различия в характере преобразования точек цветового тела. При этом цвета метамерных при исходном освещении окрасок, спектральные коэффициенты отражения которых приведены на рис. 22, попадут в центральный заштрихованный квадрат, куда переходит центр исходного цветового тела: цвет 50%-ной серой окраски (a) попадет в центр этого квадрата, а остальным окраскам (b , v , z , и d) соответствуют его вершины.

По форме области метамерных окрасок, как и само цветовое тело, будут представлять собой прямоугольные параллелепипеды только в том случае, когда кривые спектральной чувствительности приемников не перекрываются. При перекрывающихся приемниках форма областей метамерных окрасок усложняется.

Геометрические свойства областей метамерных окрасок

Первые попытки вычислить форму областей метамерных окрасок для случая, когда кривые спектральной чувствительности и спектры источников имеют незональный вид, по-видимому, были сделаны в работах [55, 56, 162, 163]. К сожалению, чисто прикладные цели этих работ, ориентация на конкретный (частный) случай цветового зрения человека не позволили получить интересующие нас общие закономерности для областей метамерных окрасок. В частности, как можно судить по приводимым к статьям иллюстрациям, некоторые закономерности формы областей метамерных окрасок, которые легко следуют из общей теории, оказались незамеченными. Более того неудачный выбор цветовых координат (как это принято у колориметристов, авторы представляли цвета не в системе координат

основных физиологических цветов и даже не в аффинных цветовых координатах, а в проективных координатах — на диаграмме цветности x_u) не позволил авторам обнаружить и использовать свойства симметрии цветового тела и областей метамерных окрасок в нем.

Существует определенная аналогия между геометрическими свойствами областей метамерных окрасок и свойствами цветового тела. Это видно из определений: и те и другие представляют собой часть цветового пространства, включающую в себя цвета множества несамосветящихся окрасок, т.е. окрасок, на спектральный коэффициент отражения которых наложены ограничения (2.2). При этом цветовое тело образовано цветами всех таких окрасок при данном освещении, а область метамерных окрасок образована цветами подмножества окрасок, имеющих один и тот же цвет X_1 при исходном освещении со спектром $S_i(\lambda)$.

Таким образом, спектральные коэффициенты отражения подмножества окрасок, определяющих область метамерных окрасок, удовлетворяют тем же ограничениям (2.2), но, кроме того, еще удовлетворяют следующим n условиям:

$$\int_0^{\infty} S_i(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda = X_1, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (3.1)$$

Ниже приведем без вывода перечень геометрических свойств областей метамерных окрасок. Как и цветовое тело, области метамерных окрасок представляют собой выпуклые фигуры. Далее, свойства центральной симметричности цветов несамосветящихся окрасок относятся не только к оптимальным цветам, т.е. не ограничиваются только центральной симметрией формы поверхности цветового тела. Действительно, пусть нам задан при исходном освещении некоторый цвет X . Цвета окрасок, имеющих такой цвет при исходном освещении, после перехода к другому освещению расплывутся в область метамерных окрасок. Тогда легко показать, что область метамерных окрасок, имеющих при исходном освещении цвет, дополнительный к данному:

$$X_i^* = X_i^0 - X_i,$$

будет в цветовом пространстве представлять собой фигуру, симметричную первой области метамерных окрасок относительно центра цветового тела. Это утверждение в общем случае ничего не говорит о симметричности самих областей метамерных окрасок и об их расположении в цветовом теле. Обычно области метамерных окрасок, соответствующие разным цветам при исходном освещении, сами по себе симметрией не обладают. Исключение составляет область метамерных окрасок, соответствующая центру цветового тела, которую образуют цвета всех окрасок, неотличимых при исходном освещении от 50%-ной сере и окраски. Поскольку в центре цветового тела находится цвет, дополнительный самому себе, то из приведенного выше утверждения следует, что область этих метамерных окрасок будет расположена в центре нового цветового тела и будет центрально-симметрична по своей форме.

Границы областей метамерных окрасок, так же как и поверхность цветового тела, образованы цветами ступенчатых окрасок определенного типа. Оценим нижнюю грань для числа ступенек в спектральном коэффициенте отражения таких окрасок. Окраски, лежащие на поверхности области метамерных окрасок, должны образовывать m -параметрическое семейство, где m определяется из следующих соображений. Во-первых, любая область в n -мерном цветовом пространстве должна быть ограничена $(n - 1)$ -мерной поверхностью, координаты точки на которой задаются $n - 1$ параметрами. Во-вторых, окраски на поверхности области метамерных окрасок должны удовлетворять еще n условиям (3.1), которые требуют дополнительно n параметров. Таким образом, поверхность области метамерных окрасок должна быть образована цветами, как минимум, $(2n - 1)$ -ступенчатых окрасок, каждая из которых характеризуется $2n - 1$ параметрами — значениями длин волн, при которых происходят скачки коэффициента отражения.

В случае цветового тела условием того, что на его поверхность попадают цвета не более чем $(n - 1)$ -ступенчатых окрасок, была линейная независимость по всему спектру n функций $\bar{x}_i(\lambda)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Аналогично для областей метамерных окрасок можно показать, что в случае линейной независимости на всем спектральном интервале $2n$ функций вида $S_j(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)$, где $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2$, на границы областей метамерных окрасок попадают только такие $(2n - 1)$ -ступенчатые окраски. При этом каждой такой окраске соответствует своя точка на границе областей метамерных окрасок.

Как и для поверхности цветового тела, существование двух взаимно дополнительных подмножеств m -ступенчатых окрасок приводит к тому, что поверхность области метамерных окрасок составлена из двух гладких поверхностей, образованных цветами $(2n - 1)$ -ступенчатых окрасок, взятых из разных подмножеств. Ступенчатым окраскам более низких порядков соответствуют особые точки, линии и т.п., на которых гладкая поверхность области метамерных окрасок претерпевает излом. Как и цветное тело, области метамерных окрасок имеют по две "острые" вершины. Здесь они образованы n -ступенчатыми окрасками, каждая из которых взята из разных дополнительных подмножеств (но сами окраски не обязательно являются взаимно дополнительными). Диагональ области метамерных окрасок, соединяющая их вершины, обычно (когда кривые спектральной чувствительности приемников не слишком перекрываются) ориентирована поперек цветового тела — в то время как все координаты вектора диагонали цветового тела (X^0) в выбранной нами системе цветовых координат имеют положительные значения, значения координат вектора диагонали области метамерных окрасок имеют разные знаки для четных и нечетных номеров i координат X_i .

Пример дихроматического зрения

В двумерном случае области метамерных окрасок напоминают по форме параллелограммы (часто — ромбы) с двумя скошенными углами. Границы их образованы цветами трехступенчатых окрасок. Для иллюстрации дихроматического случая мы выбрали один из наиболее распространенных вариантов нарушения цветового зрения человека — так называемую "дейтеранопию", характеризующуюся выпадением зеленочувствительного приемника. Как уже говорилось, цветовое зрение дейтеранопа осуществляется с помощью двух приемников, совпадающих с красночувствительным и синечувствительным приемниками нормального трихромата. Для аппроксимации кривых спектральной чувствительности приемников и спектров источников были подобраны удовлетворяющие принятым ограничениям и удобные для расчетов аналитические выражения. Соответствующие кривые приведены на рис. 23. Там же для сравнения нанесены кривые спектральной чувствительности приемников нормального трихромата [38] и спектры двух источников дневного освещения D_{42} и D_{250} [10], соответствующие прямому солнечному освещению в утренние часы и свету чистого голубого неба.

На рис. 24, I приведено цветовое тело для дейтеранопа при исходном освещении (рис. 23, I, кривая 1). Кривые спектральной чувствительности дейтеранопа сильно разнесены по спектру, поэтому цветовое тело по форме приближается к прямоугольнику. Точками внутри цветового тела обозначены три ахроматических цвета, для которых были рассчитаны области метамерных окрасок при переходе к синему освещению (рис. 23, I, кривая 2). Такие цвета имеют окраски, которые неотличимы при исходном освещении: a — от темно-серой окраски, отражающей 25% падающего на нее света, b — от серой, отражающей 50% света, v — от светло-серой, отражающей 75% света. На рис. 24, II показано, как изменится цветовое тело при переходе к синему освещению. Три заштрихованные области показывают, как "расплываются" цвета метамерных окрасок, соответствующие трем

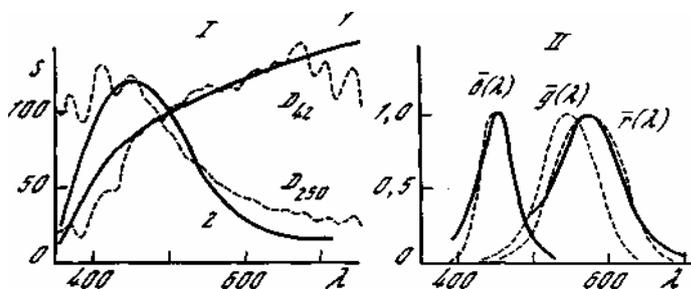


Рис. 23. Принятые для расчетов аппроксимации спектральных распределений интенсивности освещения (I) и кривых спектральной чувствительности приемников дейтеранопа (II) плавными кривыми

Штриховые линии — спектры реальных источников дневного освещения (D_{42} и D_{250}) и кривые спектральной чувствительности приемников человека

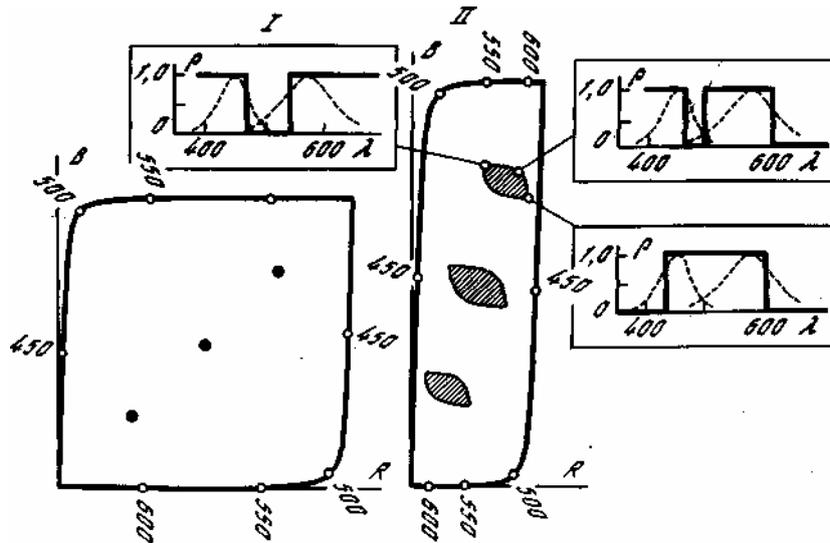


Рис. 24. Цветовые тела для системы цветового зрения дейтеранопии и области метамерных окрасок, соответствующие трем ахроматическим цветам при переходе от солнечного освещения (I) к освещению светом голубого неба (II)

точкам на ахроматической оси внутри исходного цветового тела на рис. 24, I. Как можно видеть и в соответствии с тем, что уже говорилось, область метамерных окрасок, расположенная в центре цветового тела, — центрально-симметрична. Две другие, несколько меньшие по размеру области метамерных окрасок, соответствующие двум взаимно дополнительным ахроматическим цветам, симметричны по форме и расположению друг другу. На вставках приведены примеры спектральных коэффициентов отражения двухступенчатых окрасок, цвета которых образуют вершины одной из областей метамерных окрасок, и трехступенчатой окраски, цвет которой попадает на границу этой области.

В дихроматическом случае вершины областей метамерных окрасок образованы цветами двух двухступенчатых окрасок из разных взаимно дополнительных подмножеств: зеленого и пурпурного. При этом при переходе к более синему освещению (когда отношение $S_2(\lambda)/S_1(\lambda)$ монотонно убывающая функция от λ , как это можно видеть на рис. 24, II, окраска из пурпурного подмножества будет выглядеть синее (т.е. отражать больше в синей области и меньше — в красной), чем двухступенчатая окраска из зеленого подмножества. При переходе к более красному освещению (когда отношение $S_2(\lambda)/S_1(\lambda)$ монотонно возрастающая функция) цвета тех же двухступенчатых окрасок, образующих вершины области метамерных окрасок, будут смещаться в противоположную сторону.

Размеры областей метамерных окрасок

Приведенный пример показывает, что в случае дихроматического зрения вариации освещения в естественных пределах (от прямого солнечного освещения до освещения светом голубого неба) приводят к существенному расхождению цветов предметов, которые исходно воспринимались одинаковыми. Области таких метамерных цветов могут занимать значительную часть всего цветового тела — области цветов всевозможных несамосветящихся окрасок. Исключение составляют цвета, расположенные на границе цветового тела, при условии, что выполняются принятые нами ограничения и цветовое зрение n -мерно на всем спектральном интервале. Поскольку каждому из этих цветов соответствует единственная m -ступенчатая окраска (где $m < n$), при изменении освещения каждая точка поверхности цветового тела переходит в точку.

Если характеризовать линейные размеры областей метамерных окрасок величиной проекции этих областей на некоторую (произвольную) ось, то можно показать, что область метамерных окрасок, соответствующая центру цветового тела, является максимальной в любом измерении. При этом размер областей метамерных окрасок монотонно уменьшается от центра цветового тела к его периферии. Как правило, в центральной части цветового тела размер областей метамерных окрасок изменяется слабо и только вблизи поверхности начинает быстро уменьшаться.

Эти особенности размеров областей метамерных окрасок, расположенных на разном удалении от центра цветового тела, иллюстрирует рис. 25, где нарисованы цветовые тела для дейтеранопии в том же приближении, что и для предыдущих иллюстраций этой главы. В качестве исходного освещения принято то же самое солнечное освещение. При этом в исходном цветовом теле (рис. 25, I) были выбраны 9 цветов — точек цветового пространства, расположенных на горизонтальной прямой, проходящей через центр цветового тела (т.е. с одинаковыми значениями синей цветовой координаты). Крайние из этих точек лежат на поверхности цветового тела и образованы цветами двух взаимно дополнительных одноступенчатых окрасок со скачками спектрального коэффициента отражения при 455 нм. В качестве второго источника использовали лампу накаливания (см. рис. 7, источник А). Цветовое тело после перехода к этому источнику вытянулось по красной координате (рис. 25, II). При этом две точки, лежащие исходно на поверхности цветового тела, перешли снова в точки. Остальные семь цветов перешли в области метамерных окрасок, занимающие ощутимую часть цветового тела. Только для двух из них, лежащих очень близко к поверхности цветового тела, области метамерных окрасок оказались заметно меньше.

Размеры областей метамерных окрасок естественно оценивать в относительных единицах, например, по отношению к объему цветового тела. Такая оценка не будет зависеть не только от произвола в выборе масштаба координатных осей, но вообще

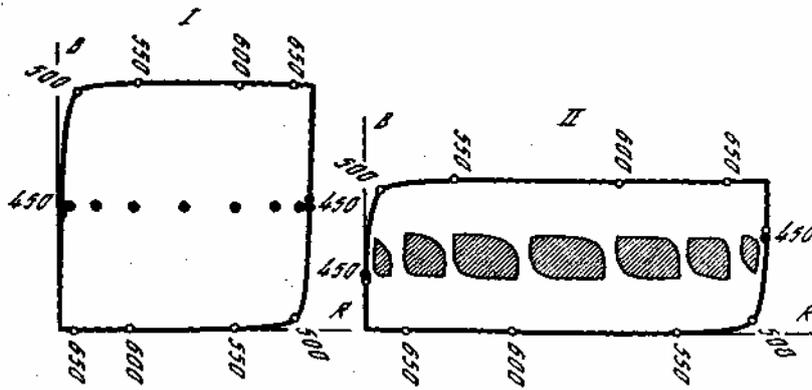


Рис. 25. Цветовые тела и области метамерных окрасок для дейтеранопа при переходе от солнечного освещения (I) к освещению лампой накаливания (II)

будет оставаться постоянной при любых аффинных преобразованиях цветового пространства — при переходе к другой системе координат. Тогда относительные размеры областей метамерных окрасок могут служить удобным показателем степени метамеризма, т.е. того, сколь велики могут быть ошибки в узнавании цвета предмета при помощи данного набора светочувствительных приемников для данной пары источников. Величина, обратная степени метамеризма, может служить оценкой количества достоверно различимых данной зрительной системой цветов при изменении освещения. Поскольку размеры областей метамерных окрасок в центральной части цветового тела примерно одинаковы, а область, прилежащая к его поверхности, не представляет практического интереса (в основном туда попадают цвета нереальных, физически невозможных окрасок), степень метамеризма можно приблизительно оценивать по относительным размерам центральной области метамерных окрасок. Так, в разобранных примерах для цветового зрения дейтеранопа при переходе от солнечного освещения к свету голубого неба (см. рис. 24) и к свету лампы накаливания (см. рис. 25) размеры центральной области метамерных окрасок составляли соответственно $1/25$ и $1/20$ часть от объема всего цветового тела.

**Связь формы, размеров и взаимного расположения
областей метамерных окрасок
с кривыми спектральной чувствительности приемников**

Системы цветового зрения животных различаются числом, шириной и взаимным расположением (перекрытием) кривых спектральной чувствительности приемников. В предыдущей главе мы рассмотрели, как форма поверхности цветового тела и взаимное расположение цветов различных окрасок на ней зависит от этих параметров. Естественно ожидать, что форма, размеры и взаимное

расположение областей метамерных окрасок, соответствующих разным цветам внутри цветового тела, также будут связаны с формой кривых спектральной чувствительности и со степенью их перекрытия. Здесь нас интересует не принципиальная возможность такой связи, а ее качественные особенности для систем цветового зрения, близких к реальным, при изменении характера освещения в реальных пределах.

Сведения о том, как те или иные параметры кривых спектральной чувствительности сказываются на форме, размерах и взаимном расположении областей метамерных окрасок, в существенной степени должны определять круг возможных алгоритмов введения поправки на освещение в механизмах константности. Так, с одной стороны, размеры областей метамерных окрасок задают предел точности узнавания цвета предмета при изменении характера освещения, выше которого никакие поправки на освещение обеспечить это узнавание не могут. Вследствие этого можно ожидать, что для систем цветового зрения, которые в принципе не могут обеспечить большой точности узнавания окраски, природа ограничилась довольно грубыми механизмами константности. С другой стороны, изменения взаимного расположения областей метамерных окрасок при изменении освещения определяют преобразования координат, необходимые для более или менее правильного узнавания окраски, и тем самым определяют оптимальные алгоритмы введения поправки на освещение. Вклад каждого из этих факторов может быть разным для разных наборов светочувствительных приемников.

Для того чтобы проиллюстрировать связь формы, размеров и взаимного расположения областей метамерных окрасок в цветовом теле со степенью перекрытия кривых спектральной чувствительности приемников, были произведены расчеты для трех дихроматических систем цветового зрения: 1) кошки, у которой имеется два далеко отставленных друг от друга приемника с λ_{\max} равными 450 и 555 нм (рис. 26, I), 2) суслика, у которого кривые спектральной чувствительности имеют максимумы при 460 и 525 нм (рис. 26, II), и 3) геккона, дающего пример сближенных кривых спектральной чувствительности с λ_{\max} равными 475 и 520 нм (рис. 26, III). Для всех этих кривых спектральной чувствительности приемников и для спектров источников были подобраны приближенные аналитические выражения. При этом основное внимание обращалось не столько на детальное совпадение с реальными приемниками этих животных, сколько на простоту проведения расчетов формы областей метамерных окрасок. Следует заметить, что в отношении перечисленных систем цветового зрения речь может идти только о некоторой аппроксимации, поскольку (см. гл. 1) реальные кривые спектральной чувствительности приемников известны для них весьма приближенно. Однако характер аппроксимирующих функций мало сказывается на качественной картине преобразования метамерных цветов при изменении освещения. Более того, вопрос о точности аппроксимации становится мало-

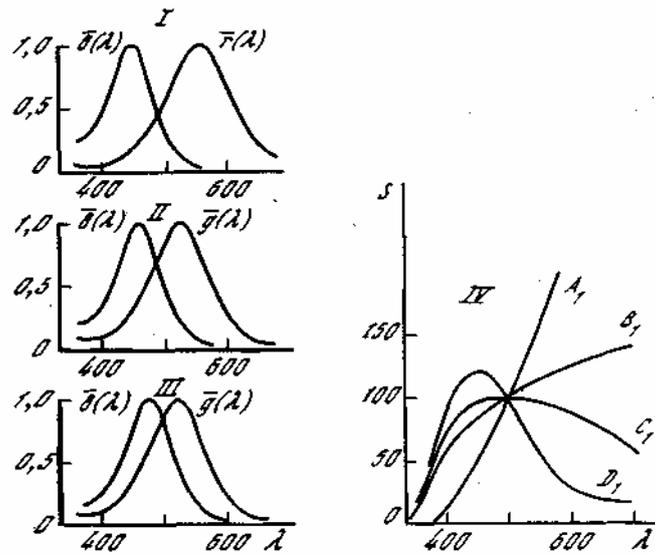


Рис. 26. Аппроксимации для кривых спектральной чувствительности приемников кошки (I), суслика (II) и геккона (III), а также для спектров S четырех источников освещения (IV)

существенным, когда исследуются общие особенности этого преобразования для систем цветового зрения, различающихся степенью перекрытия приемников, а не его детали, применительно к цветовому зрению именно кошки, суслика и геккона.

Спектры освещения, применявшиеся при расчетах, приведены рис. 26, IV. Кривая A_1 практически совпадает со спектром стандартного источника A МКО 1931 г. (планковского источника с цветовой температурой 2856 К, соответствующего лампе накаливания). Кривые B_1 и C_1 близки к спектрам солнечного (стандартный источник B МКО 1931 г.) и среднего дневного (стандартный источник C МКО 1931 г.) освещения. Спектральное распределение D_1 можно считать аналогом спектра весеннего голубого неба. Принятые в этих расчетах источники B_1 и D_1 совпадают по спектру с источниками, использовавшимися в расчетах областей метамерных окрасок для дейтеранопы (см. рис. 23, I).

Результаты расчетов преобразования метамерных цветов при изменении освещения показаны на рис. 27. Здесь нарисованы три ряда цветных тел, соответствующих трем системам дихроматического зрения: I — кошки, II — суслика и III — геккона, при четырех вариантах освещения — вертикальные колонки цветных тел для четырех типов источников: A_1 , B_1 , C_1 и D_1 . Солнечное освещение (источник B_1) было выбрано в качестве исходного. При этом для каждой из систем цветового зрения значения координат цвета исходного освещения принимались за единицу. Цветовые тела для других освещений строились в том же масштабе.

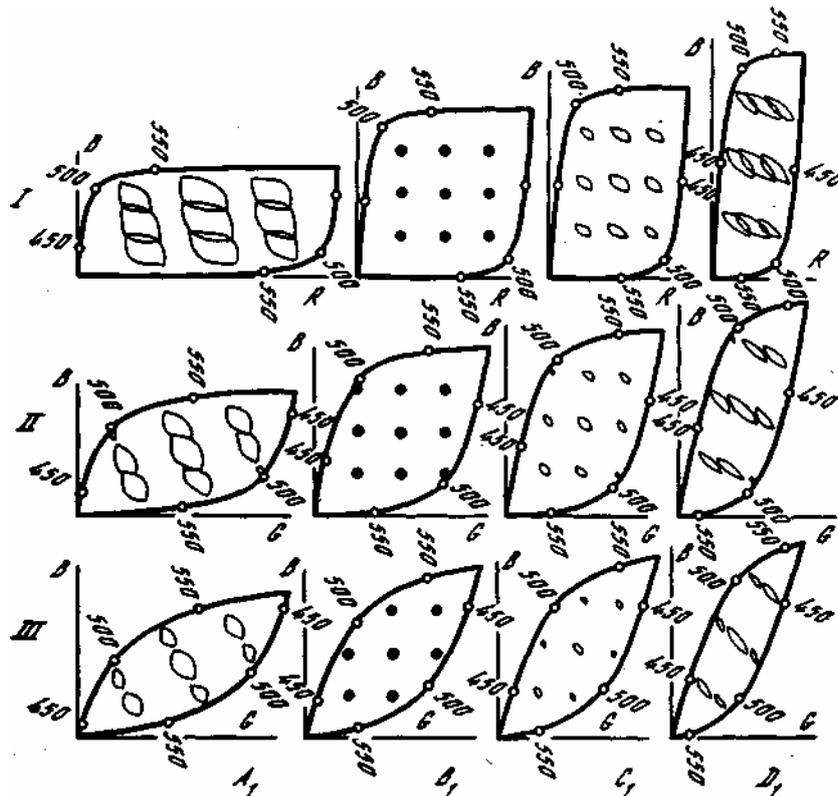


Рис. 27. Цветовые тела и области метамерных окрасок внутри них для систем дихроматического зрения: кошки (I), суслика (II) и геккона (III), при вариантах освещения A_1 , B_1 , C_1 и D_1

Для разных точек цветового пространства, отмеченных внутри исходных цветовых тел в колонке B_1 на рис. 27, рассчитывались и наносились на рисунки области метамерных окрасок при трех других вариантах освещения — от наиболее красного (колонка A_1) до наиболее синего (колонка D_1).

Из рисунка видно, что при переходе от прямого солнечного освещения к сильно отличающимся от него по спектру более синему свету неба или более красному свету лампы накаливания цвета окрасок, неотличимых при исходном освещении, расплываются на значительную часть цветового тела. Перекрывание областей метамерных окрасок в верхнем ряду рис. 27 означает, что для системы цветового зрения кошки возможны такие далекие по цвету при исходном освещении окраски (возбуждение того или иного из приемников светом, отраженным от них при исходном освещении, может отличаться в полтора-два раза), которые после перехода к другому освещению перестают различаться.

Сравнение разных систем цветового зрения показывает, что относительные размеры областей метамерных окрасок тем больше

(при прочих равных условиях), чем больше разнесены кривые спектральной чувствительности приемников. Такая закономерность является просто следствием того факта, что для систем цветового зрения со сближенными приемниками различия в спектрах тех же источников фактически оказываются меньше. Действительно, спектры источников, приведенные на рис. 26, IV, как и вообще спектры естественных источников, представляют собой медленно меняющиеся в зависимости от длины волны плавные кривые. В результате этого на более узком спектральном интервале, который занимает видимый диапазон в случае сближенных кривых спектральной чувствительности, спектры источников не успевают существенно измениться.

Связь формы областей метамерных окрасок со спектрами источников

В этом разделе рассмотрим, как сказывается на форме, размерах и взаимном расположении областей метамерных окрасок спектральный состав источников освещения. Напомним, что когда освещение изменяется только по интенсивности, а относительный спектральный состав его остается неизменным: $S_2(\lambda) = \alpha S_1(\lambda)$, то каждая точка цветового пространства переходит снова в точку, т.е. области метамерных окрасок в этом случае вырождаются в точку. Когда происходит переход к освещению, отличающемуся по спектральному составу от исходного, области метамерных окрасок уже не будут точечными. Естественно ожидать, что размеры областей метамерных окрасок будут тем больше, чем больше различия в спектрах освещения $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$. Так, на рис. 26, IV можно видеть, что из двух более синих, чем исходное прямое солнечное освещение, источников спектр источника C_1 меньше отличается от спектра источника B_1 , чем спектр источника D_1 . В соответствии с этим области метамерных окрасок при переходе к этому освещению оказываются существенно меньше по размеру, чем для источника D_1 (рис. 27).

Приведенное выше неформализованное утверждение о связи размеров областей метамерных окрасок с различиями в спектрах источников подтверждают следующие частные случаи. Пусть осуществляется переход от исходного освещения со спектром $S_1(\lambda)$ к одному из двух освещений со спектрами $S_2'(\lambda)$ и $S_2''(\lambda)$, различающимися между собой только по интенсивности: $S_2'(\lambda) = \alpha S_2''(\lambda)$. Очевидно, что в цветовом пространстве один случай будет отличаться от другого только масштабом: новые цветовые тела и области метамерных окрасок в этих случаях отличаются друг от друга по размеру во столько раз, во сколько раз различаются интенсивности источников. Рис. 28 иллюстрирует этот случай. Здесь для дихроматического зрения дейтеранопа (кривые приемников и спектр исходного освещения взяты те же, что и на рис. 23) в цветовом пространстве приведены цветовые тела и области

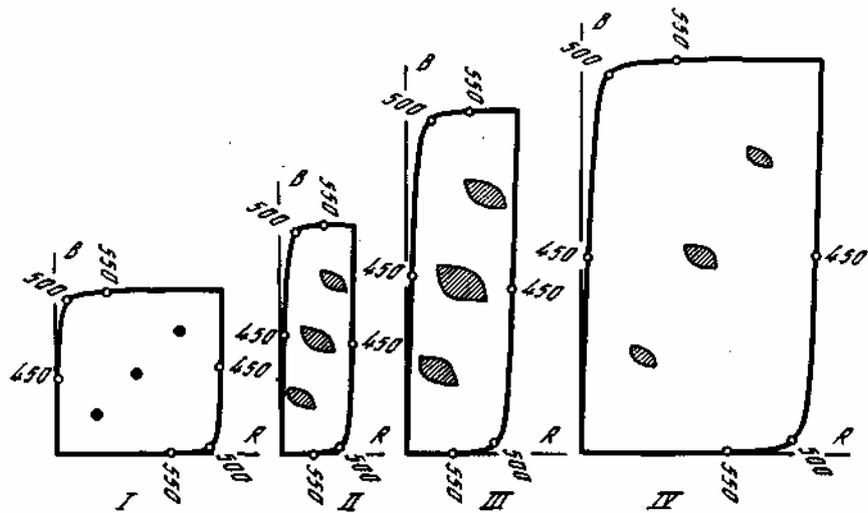


Рис. 28. Изменения формы областей метамерных окрасок с изменением освещения для системы цветового зрения дейтеранопа

I – при исходном (прямом солнечном) освещении, II – при переходе к освещению светом неба; III – при переходе к освещению, в 1,5 раза более интенсивному, IV – при переходе к освещению, спектр которого равен сумме прямого солнечного освещения и света голубого неба

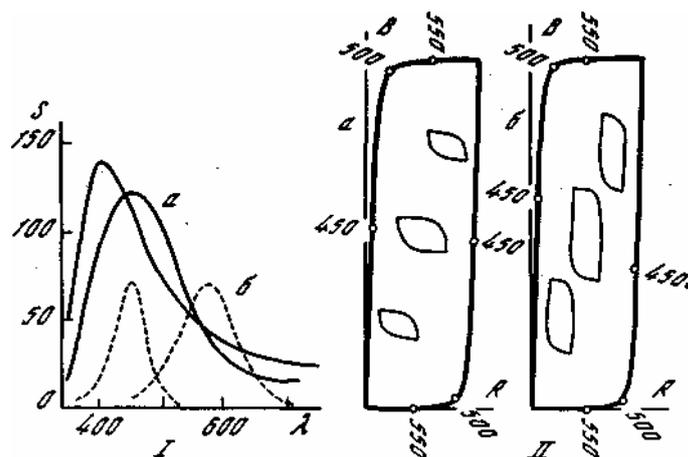


Рис. 29. Различия в форме областей метамерных окрасок при переходе от солнечного освещения к освещению разными по спектру источниками одинакового цвета

I – спектры двух источников (а, б) синего освещения (сплошные линии) и кривые спектральной чувствительности приемников дейтеранопа (штриховые линии); II – два цветовых тела и области метамерных окрасок внутри них для переходов от солнечного освещения к соответствующим синим освещениям

метамерных окрасок при переходе к освещению светом голубого неба (рис. 28, II), спектр которого показан кривой 2 на рис. 23, I, и к освещению с тем же относительным спектральным составом, но в 1,5 раза более интенсивному (рис. 28, III).

Рассмотрим теперь менее очевидный случай, когда спектры этих вторых источников отличаются друг от друга только некоторой добавкой спектра исходного освещения

$$S'_2(\lambda) = S_2(\lambda) + \alpha S_1(\lambda).$$

В этом случае области метамерных окрасок для одного и того же цвета при переходе к этим освещением будут одинаковы по форме, размеру и ориентации, хотя форма цветовых тел в целом и положение этих областей метамерных окрасок в цветовом пространстве будут разными. На рис. 28, IV приведен пример цветового тела и областей метамерных окрасок для перехода к источнику освещения, спектр которого равен сумме прямого солнечного освещения и света голубого неба. Сравнивая его с рис. 28, II, можно видеть, что добавка исходного освещения привела к изменению формы и размеров цветового тела и расположения областей метамерных окрасок в нем. В то же время форма самих областей метамерных окрасок осталась неизменной.

Следует отметить, что, как форма цветового тела определяется не только цветом источника, но всем его спектральным составом, так и на форме областей метамерных окрасок существенно сказывается спектральный состав источника. Для иллюстрации этого факта мы рассчитали форму областей метамерных окрасок для дейтеранопы при переходе от прямого солнечного освещения (рис. 23) к двум более синим источникам, совпадающим для дейтеранопы по цвету (рис. 29, I). Различия между этими источниками, грубо говоря, сводятся к перераспределению мощности излучения от середины спектра (кривая *a*) к его концам (кривая *b*). Эти различия в спектрах источников привели к некоторому различию в форме цветовых тел, в частности, к изменению расположения цветов оптимальных окрасок на границе. Но особенно разительно такое изменение спектрального состава освещения (без изменения его цвета) сказалось на форме областей метамерных окрасок (рис. 29, II). При этом варианты освещения *a* и *b* на рис. 29 существенно разнятся и по степени метамеризма: по своим относительным размерам центральные области метамерных окрасок для этих источников отличаются вдвое.

Три характерные особенности преобразования метамерных цветов

Разнообразие размеров, формы и взаимного расположения областей метамерных окрасок (рис. 27) позволяет провести чисто качественную классификацию преобразований метамерных цветов для разных систем цветового зрения и для разных вариантов изменения освещения. Такая классификация позволит нам в последующих главах, обращая внимание отдельно на ту или иную

особенность преобразования цветов окрашенных поверхностей при изменении освещения, исследовать это преобразование детальнее.

Большие относительные размеры областей метамерных окрасок для дихроматических систем цветового зрения с сильно разнесенными кривыми спектральной чувствительности приемников ограничивают многообразие окрасок, которые могли бы различаться животными при вариациях освещения в естественных пределах. Цвет излучения, отраженного от поверхности предмета, не может дать для таких систем цветового зрения стабильную характеристику его окраски, какие бы механизмы введения поправки на освещение ни предполагались. Поэтому такие животные не могут опираться на воспринимаемый цвет предметов при узнавании самих предметов. А это должно привести к тому, что окраска поверхности в поведении для них становится менее важным признаком предмета, чем прочие признаки. Это рассуждение может служить объяснением тому факту, что кошка практически не использует цветовое зрение в своем поведении: у нее трудно выработать условные рефлексы на различение цветов.

В еще большей степени, чем к зрению кошки, вывод о невозможности стабильного узнавания окраски поверхностей при изменении освещения в широких пределах приложим к цветовому зрению дейтеранопа, у которого кривые спектральной чувствительности приемников разнесены еще дальше по спектру. Поэтому имело бы смысл исследовать цветовое зрение дейтеранопа с этой стороны. До сих пор при исследовании цветового зрения дихроматов основное внимание обращалось на диагностику или на то, насколько цветовосприятие дихроматов отличается от цветовосприятия нормального трихромата. Полученный здесь результат предсказывает, что вследствие метамеризма дейтераноп должен сильно путать "свои собственные" цвета просто при изменении спектрального состава освещения.

Рис. 27 хорошо иллюстрирует также тот факт, что наряду с расплыванием цветов метамерных окрасок в целую область при изменении освещения наблюдается изменение взаимного расположения этих областей в цветовом пространстве. Особенно хорошо это видно на примере системы цветового зрения геккона, где цвета, расположенные при исходном освещении на горизонтальной или вертикальной прямой (с одинаковыми возбуждениями для синечувствительного или для зеленочувствительного приемников соответственно), при переходе к другому освещению преобразуются в области, расположения которых далеки от вертикали или горизонтали. При этом направления перемещения областей метамерных окрасок (например, относительно центра цветового тела) по характеру напоминают разобранные в конце предыдущей главы перемещения оптимальных цветов по поверхности цветового тела при таких же изменениях освещения. Так, при переходе к более синему освещению области метамерных окрасок, соответствующие цветам синих и голубых окрасок (прилежащим к границе цветового тела, образованной цветами голубых ступенчатых окрасок), и области метамерных окрасок, соответствующие цветам красных и желтых окрасок (прилежащим к

противоположной границе цветового тела, образованной цветами желтых ступенчатых окрасок), будут перемещаться относительно центра цветового тела по часовой стрелке (ср. с рис. 19). При переходе к более красному освещению эти области метамерных окрасок сдвигаются в цветовом теле против часовой стрелки.

Это наблюдение говорит о том, что для реальных зрительных систем при реальных вариациях спектра освещения преобразования цветов для внутренних точек цветового тела также не сводятся к простому покоординатному изменению масштаба, а сопровождаются существенными искажениями координатной сетки. Вследствие этого оптимальные механизмы приблизительной константности (которая возможна с точностью не большей, чем это допускают размеры областей метамерных окрасок) неизбежно должны учитывать эти перекосы координатной сетки. Разбору этого вопроса посвящена пятая глава.

И, наконец, еще одна особенность преобразования метамерных цветов, на которую здесь следует обратить внимание, связана с формой областей метамерных окрасок. Как можно видеть на рис. 27, для систем цветового зрения с достаточно перекрывающимися кривыми спектральной чувствительности приемников переход к некоторым источникам (здесь — к голубому небу) дает области метамерных окрасок вытянутой формы. С точки зрения проблемы константности цветовосприятия большие относительные размеры этих областей ограничивают возможную точность узнавания окрасок при изменении освещения. Так, для синего освещения D_1 (рис. 27) продольные линейные размеры центральной области метамерных окрасок составляют около $1/3$ от соответствующих размеров цветового тела. В то же время здесь метамерные цвета расплываются преимущественно в одном направлении, в другом же — поперек областей метамерных окрасок — практически не расплываются. Тем самым имеется принципиальная возможность с большой точностью узнавать хотя бы одну цветовую координату — в направлении, поперечном к областям метамерных окрасок. Вопросу о том, каким ограничениям должны удовлетворять спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников, чтобы было возможно вычисление такого параметра окраски, будет посвящена следующая глава.

Трихроматический случай

В случае трехмерного цветового зрения граница областей метамерных окрасок составлена из двух поверхностей, образованных цветами 5-ступенчатых окрасок, "сшитых" друг с другом вдоль *ребер*, на которых гладкость нарушается. Ребра образованы цветами 4-ступенчатых окрасок. Области метамерных окрасок имеют также по две вершины, образованные цветами трехступенчатых окрасок.

Большое число ступенек у окрасок, формирующих границу областей метамерных окрасок, делает вычисление ее формы в трехмерном случае очень громоздким, даже если полученные экспериментально

табличные функции для кривых спектральной чувствительности приемников и спектров источников заменить приближенными легко интегрируемыми аналитическими выражениями. Другая трудность возникает в связи с графическим представлением результатов расчетов. По этим причинам не будем приводить здесь подробного разбора разных систем трихроматического зрения, аналогичного тому, какой был проведен для дихроматического случая, а ограничимся только сравнением трихроматического случая с дихроматическим.

Сравнение получается особенно наглядным, если сопоставить такие системы цветового зрения, у которых кривые спектральной чувствительности для двух приемников целиком совпадают, а трихроматическая система отличается от дихроматической добавлением к уже имеющимся третьего приемника. Такие взаимоотношения существуют, например, между системой цветового зрения нормального трихромата и дихроматической системой дейтеранопа. В этом случае удобно рассматривать плоскую проекцию цветового пространства нормального трихромата на "дейтеранопическую" координатную плоскость RB . Проекция цветового тела трихромата на эту плоскость совпадает с цветовым телом дейтеранопа для того же освещения. Объясняется это совпадение просто тем, что множество цветов, составляющих оба цветовых тела, определяются одним и тем же ограничением (2.2) на спектральные коэффициенты отражения окрасок и, разумеется, тем, что кривые $\bar{r}(\lambda)$ и $b(\lambda)$ в обеих системах цветового зрения одни и те же. В случае областей метамерных окрасок такого совпадения не будет, поскольку множества метамерных окрасок для дейтеранопа и трихромата различны. Для цветового зрения дейтеранопа множество метамерных окрасок определяется двумя условиями вида (3.1), требующими, чтобы значения двух координат цвета (общих для дейтеранопа и трихромата) при исходном освещении были фиксированы. Для трихромата добавляется такое же условие и для третьей цветовой координаты. В результате окраски, метамерные для трихромата, составляют только подмножество соответствующего множества метамерных окрасок для дейтеранопа. Следовательно, проекция области метамерных окрасок для трихромата на координатную плоскость RB всегда будет заключена внутри соответствующей области метамерных окрасок для дейтеранопа. При этом цвета двух трехступенчатых окрасок (из взаимно дополнительных подмножеств) в трехмерном случае образуют две вершины области метамерных окрасок. Цвета тех же трехступенчатых окрасок в дихроматическом случае обязательно попадают на две (противоположные) границы области метамерных окрасок. Таким образом, проекция трехмерной области метамерных окрасок нигде не будет выходить за пределы двумерной области метамерных окрасок для дейтеранопа и при этом будет "упираться" своими вершинами в ее границы.

Эти взаимоотношения областей метамерных окрасок нормального трихромата и дейтеранопа можно видеть на рис. 30, где показана часть цветового тела дейтеранопа при освещении светом голубого неба с нарисованными в нем границами двух областей метамерных окрасок (таких же, как на рис. 24), соответствующих переходу от

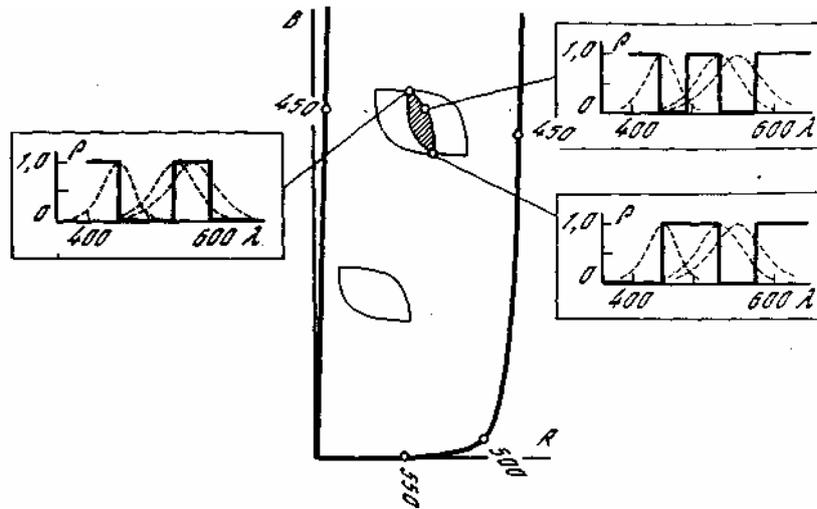


Рис. 30. Сравнение областей метамерных окрасок для дихромата (дейтеранопы) и трихромата при переходе от прямого солнечного освещения к свету голубого неба (проекция на координатную плоскость RB)

солнечного освещения к свету голубого неба. Внутри центральной области метамерных окрасок заштрихована проекция области метамерных окрасок для нормального трихромата, соответствующей центру цветового тела, т.е. образованной цветами окрасок, которые для трихромата при исходном прямом солнечном освещении неотличимы по цвету от 50%-ной серой окраски.

Как видно из рисунка, проекции вершин области метамерных окрасок трихромата попадают на границы области метамерных окрасок дейтеранопы, поскольку они образованы цветами трехступенчатых окрасок (их спектральные коэффициенты отражения приведены на вставках к рисунку). Проекция цветов всех 5-ступенчатых окрасок, образующих поверхность области метамерных окрасок в трехмерном цветовом пространстве, при этом попали внутрь этой заштрихованной области, а ее граница образована проекцией ребер области метамерных окрасок трихромата. Такое расположение цветов ступенчатых метамерных окрасок на проекции области метамерных окрасок обусловлено тем, что в трехмерном цветовом пространстве эта область представляет собой уплощенное чечевицеобразное тело, расположенное почти перпендикулярно к плоскости чертежа. Причем ребра области метамерных окрасок идут вдоль краев этой "чечевицы". В результате малая толщина области метамерных окрасок приводит к тому, что почти в любом ракурсе (в том числе и в проекции на плоскость RB) вид проекции области метамерных окрасок определяется ее ребрами. На одной из вставок к рис. 30 показан пример спектрального коэффициента отражения 4-ступенчатой окраски, цвет которой попадает на ребро области метамерных окрасок. Еще одно изображение областей метамерных окрасок для трихроматической системы

цветового зрения (лягушки), рассчитанных для перехода от солнечного освещения к более синему освещению со спектральным составом специального вида, можно найти на рис. 40.

Итак, дополнительные ограничения, накладываемые на цвета метамерных окрасок при исходном освещении в трихроматическом случае по сравнению с дихроматическим, приводят к тому, что относительные размеры областей метамерных окрасок существенно уменьшаются. Это означает, что внутри трехмерного цветового тела можно уместить таких областей гораздо больше, чем двумерных областей метамерных окрасок в двумерном цветовом теле. В результате чего количество цветов, которые могли бы различаться зрительной системой трихромата при изменении освещения (при наличии адекватных механизмов введения поправки на освещение), оказывается существенно больше, чем для дихромата.

Что касается формы и взаимного расположения областей метамерных окрасок, то они, так же как и в случае дихроматического зрения, определяются степенью перекрытия кривых спектральной чувствительности приемников. Обычные для трихроматов значительные перекрытия кривых спектральной чувствительности приводят к тому, что, во-первых, как мы уже видели на приведенном выше примере расчета, области метамерных окрасок у трихромата имеют уплощенный вид. Во-вторых, следствием перекрытия кривых спектральной чувствительности являются значительные взаимные перемещения областей метамерных окрасок в цветовом пространстве (искажения координатной сетки) при изменении освещения. Таким образом, в трихроматическом случае метамеризм окрасок не служит серьезным ограничением для узнавания цветов при изменении освещения, а основные трудности, которые возникнут при разработке механизмов введения поправки на освещение, обеспечивающих такое узнавание, будут определяться неизбежными существенными искажениями координатной сетки при изменении освещения.

Другие оценки степени метамеризма

Вывод о принципиальной невозможности организовать эффективные механизмы константности цветовосприятия для животных с далеко разнесенными по спектру кривыми спектральной чувствительности приемников опирается на расчеты размеров областей метамерных окрасок. На самом деле, области метамерных окрасок характеризуют только крайние (теоретические) пределы расхождения цветов метамерных окрасок при изменении освещения. Такая оценка степени метамеризма может оказаться неточной, вероятно, завышенной из-за того, что принятые ограничения на многообразие окрасок предметов внешнего мира и спектров возможных источников слишком грубые. Реально варибельности окрасок в том мире, где живут эти животные, могут быть меньше, чем предполагалось в этих расчетах. Так, даже трехступенчатые окраски, образующие границы областей метамерных окрасок в случае дихроматического зрения (не говоря уже о 5-ступенчатых — для трихроматического), в природе не встречаются. Может оказаться, что и все многообразие встречаю-

щихся в природе окрасок существенно уже, и если рассматривать только их, то цвета таких окрасок (неотличимых по цвету при исходном освещении) при переходе к освещению другими реальными источниками будут занимать не всю область метамерных окрасок, а только некоторую малую ее часть.

Казалось бы, эти рассуждения определяют другой, экспериментальный подход к оценке степени метамеризма для того или иного животного в его естественном зрительном окружении. К сожалению, такой подход совершенно нереализуем. Действительно, если последовательно его придерживаться, то для каждого из таких животных следовало бы экспериментально установить многообразие (базовую совокупность) спектральных коэффициентов отражения, которые могут попадать в его поле зрения в естественной среде обитания.

В цветоведении (применительно к цветовому зрению человека) вопрос о составлении экспериментальной базовой совокупности окрасок поверхностей был поставлен У. Стайлсом и Г. Вышецким [182]. Авторы видят путь к его решению в конструировании робота, который способен регистрировать спектральные коэффициенты отражения видимых цветных поверхностей. После того как такой робот проведет некоторое время в "типичном" цветовом окружении, он сможет составить коллекцию кривых отражения с заданным на ней распределением вероятностей встречи каждой из окрасок. Последнее совершенно необходимо для оценки степени метамеризма в этом случае, так как естественно, что ошибки в узнавании редко встречающихся окрасок для человека (и животных) менее рискованны. К этому нужно добавить, что одной статистики здесь недостаточно — для каждой из окрасок существенна не только ее встречаемость в природе, но и значимость такого цвета в жизни данного животного. Например, можно думать, что оттенки зеленого цвета огурцов для кошки менее важны, чем оттенки серого цвета меха мыши. Однако пока не совсем ясно, как оценивать эту значимость и, что существеннее, как "разменивать" ее на частоту встречи окрасок. Таким образом, как показывает этот умозрительный пример, пока мы еще далеки от получения каких-либо основанных на экспериментальных данных оценок метамеризма. В такой ситуации остается сопоставить разные теоретические оценки, построенные для разных гипотетических базовых совокупностей окрасок. А экспериментально можно (не набирая пока полной базовой совокупности окрасок) попытаться среди реальных окрасок найти примеры метамерных и рассмотреть, насколько их цвета будут расходиться в цветовом пространстве при правдоподобных изменениях освещения.

Проблема метамеризма окрасок давно беспокоит колориметристов и светотехников в первую очередь в связи с вопросами цветопередачи источников искусственного освещения. Требование, чтобы искусственное освещение не искажало восприятия цветов поверхностей, заставляет характеризовать источники не только, и даже не столько их цветом, сколько цветопередачей. Это потребовало введения вначале эмпирических оценок степени метамеризма и качества цветопередачи [10].

Первая серьезная теоретическая попытка оценить степень метамеризма была предпринята в работе У. Стайлса и Г. Вышецкого [182], где для этого был применен статистический подход. Сначала была определена базовая совокупность спектральных коэффициентов отражения окрасок с заданным на ней распределением вероятностей. Из этой совокупности выбирали все окраски, имеющие один и тот же цвет при исходном освещении. Затем определяли, как будут распределены цвета таких окрасок в цветовом пространстве после изменения освещения.

Базовая совокупность задавалась следующим образом. Весь видимый диапазон спектра разбивался на большое число (M) интервалов, в каждом из которых принималось, что спектральный коэффициент отражения имеет некоторое постоянное внутри этого интервала значение ρ_λ . Предполагалось, что значения ρ_λ в каждом из этих интервалов распределены независимо и, например, равновероятно в интервале от 0 до 1. Поскольку координаты цвета таких окрасок представляются в виде суммы M независимых случайных переменных, при большом M , согласно центральной предельной теореме, цвета этих окрасок распределены в цветовом пространстве примерно по нормальному закону. Теория позволяет для цветов окрасок, метамерных при одном освещении, легко вычислить центр распределения их цветов при другом освещении, а также матрицу дисперсий этого распределения. Нормальное распределение с такими параметрами удовлетворительно описывает распределение цветов метамерных окрасок из рассматриваемой базовой совокупности только для внутренней части цветового тела. При приближении к его границе это распределение все больше будет отклоняться от нормального.

Графически преобразование заданных таким способом метамерных цветов при изменении освещения удобно характеризовать эллипсоидами разброса, в которые попадают, например, цвета 95% окрасок из базовой совокупности, метамерных при исходном освещении. При этом оказывается, что, во-первых, координаты центров эллипсоидов линейно связаны с координатами цвета метамерных окрасок при исходном освещении. Во-вторых, для всех цветов форма, ориентация и размеры этих эллипсоидов одинаковы. Этим метамерные эллипсоиды отличаются от областей метамерных окрасок, форма которых получается разной для разных исходных цветов. Благодаря этому свойству метамерных эллипсоидов их размеры удобно использовать в качестве единой для всех цветов оценки степени метамеризма окрасок при изменении освещения.

Хотя У. Стайлс и Г. Вышецки формулировали свою теорию для цветового зрения нормального трихромата в координатах XYZ , стандартизованных МКО, простота теории позволяет легко приложить ее к цветовому зрению любой размерности и для произвольных цветовых координат. Приведем пример ее применения к неоднократно использовавшемуся в этой главе случаю дихроматической системы цветового зрения дейтеранопа. Для сравнения двух оценок разброса метамерных цветов при изменении освещения, которые дают области метамерных окрасок и метамерные эллипсоиды, мы рассчитали

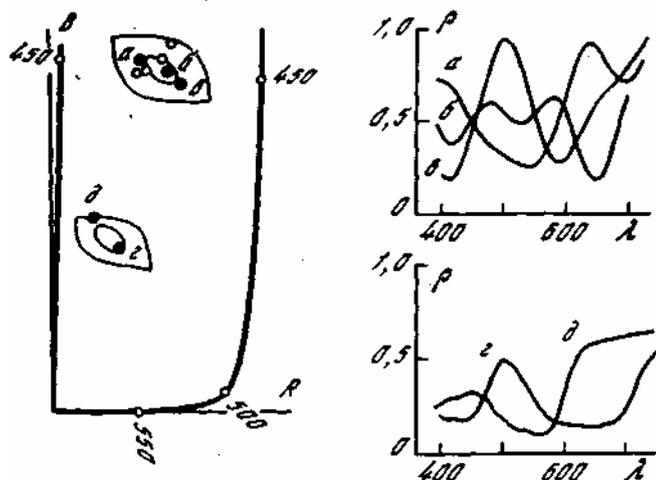


Рис. 31. Разные оценки степени метамеризма для дейтеранопы

I — часть цветового тела для дейтеранопы при освещении светом голубого неба с нанесенными в нем границами двух областей метамерных окрасок и соответствующих метамерных эллипсоидов (точки внутри этих областей — цвета двух групп метамерных при солнечном освещении окрасок); II — примеры спектральных коэффициентов отражения, построенных методом Монте-Карло метамерных окрасок; III — спектральные коэффициенты отражения двух естественных окрасок, неотличимых по цвету для системы зрения дейтеранопы при солнечном освещении

форму метамерных эллипсоидов, в которые попадает 95% метамерных при исходном освещении окрасок из базовой совокупности. Расчеты проводились для тех же ахроматических цветов, что и на рис. 24 и 30, и для тех же условий освещения. В двумерном случае метамерные эллипсоиды превращаются просто в эллипсы. В цветовом теле, показанном на рис. 31, I, эти эллипсы нанесены вместе с рассчитанными границами областей метамерных окрасок. Как можно видеть, хотя метамерные эллипсоиды по размерам заметно меньше областей метамерных окрасок, при изменении освещения цвета метамерных окрасок из определенной таким способом базовой совокупности также претерпевают некоторый разброс.

Напомним, что в такой базовой совокупности значения спектральных коэффициентов отражения окрасок задаются независимо в каждой точке спектра. Это приводит к скачкообразным изменениям его от точки к точке. В результате почти все такие окраски еще меньше похожи на реальные, чем, например, наши двух- и трехступенчатые окраски, цвета которых попадают на границы областей метамерных окрасок в дихроматическом случае. Поэтому меньшие размеры метамерных эллипсоидов по сравнению с областями метамерных окрасок могут быть не следствием увеличения точности оценки метамеризма, а отражением неверных (нереальных) предпосылок при задании базовой совокупности окрасок: "при больших значениях M (что необходимо для применимости центральной предельной теоремы) базовая совокупность становится нереалистической для практических применений" [182].

Позднее У. Стайлс, Г. Вышецки и Н. Охта [183] попытались обой-

ти эту трудность, построив аналогичную статистическую теорию оценки метамеризма для такой базовой совокупности окрасок, в которую входили только плавные кривые. Для этого спектральный коэффициент отражения представляли в виде фурье-разложения с ограничениями на частоты этого разложения. Такое представление эквивалентно тому, что мы задаем спектральный коэффициент отражения дискретным (зависящим от частотного ограничения фурье-разложения) количеством значений ρ_λ на равном расстоянии друг от друга в видимом диапазоне спектра и соединяем их плавной кривой. Предполагается, что коэффициенты дискретного представления ρ_λ являются независимо распределенными случайными величинами. Для заданной таким способом базовой совокупности цвета метамерных окрасок также распределены по нормальному закону и могут быть охарактеризованы метамерными эллипсоидами.

На частном примере перехода от дневного освещения (источник D_{65}) к искусственному (источник A) для цветового зрения нормального трихромата была рассчитана форма метамерных эллипсоидов для разных ограничений на фурье-разложение спектральных коэффициентов отражения. Оказалось, что, когда спектральный коэффициент отражения полностью определяется значениями ρ_λ примерно в десятке точек видимого диапазона спектра, соответствующие метамерные эллипсоиды по форме и размерам приближаются к эллипсоидам, построенным для тех же спектров освещения ранее в работе [182], где не накладывалось ограничений на гладкость кривых. Этот результат позволяет (в некоторых пределах) применять первоначальную более наглядную и с вычислительной точки зрения более простую теорию [182] для оценки метамеризма и такой базовой совокупности окрасок, которая характеризуется похожими на реальные спектральные коэффициенты отражения плавными кривыми. К сожалению, такое совпадение двух оценок метамеризма ограничивается только системой цветового зрения нормального трихромата.

Для дихроматических систем зрения естественно ожидать большей степени метамеризма окрасок с плавно меняющимися спектральными коэффициентами отражения. Это значит, что, например, в случае цветового зрения дейтеранопа метамерные эллипсоиды на рис. 31, I уже не будут отражать величину разброса цветов метамерных окрасок, если ограничиться только плавными кривыми для их спектральных коэффициентов отражения. Чтобы составить представление о степени метамеризма таких окрасок для системы цветового зрения дейтеранопа, мы воспользовались методом Монте-Карло: с помощью случайного жребия выбрали несколько таких (метамерных при исходном освещении) окрасок и посмотрели, как преобразуются их цвета при изменении освещения. Для этого спектральные коэффициенты отражения представляли в виде

$$\rho(\lambda) = \sum_{k=1}^8 a_k \frac{\sin \pi(\lambda - 300 + 50k)/50}{\pi(\lambda - 300 + 50k)/50},$$

где коэффициенты a_k соответствуют значениям спектрального коэф-

коэффициента отражения в дискретных точках спектра, отстоящих друг от друга на 50 нм. С помощью датчика случайных чисел последовательно генерировали значения a_k равномерно распределенные в интервале от 0 до 1. Из построенных таким способом плавных функций отбирались те, у которых $0 \leq \rho(\lambda) \leq 1$ при любых λ . Затем вычислялись цветовые координаты X_i соответствующих окрасок при исходном освещении (источник B_1) и отбирались те окраски, у которых

$$0,49 \leq X_i \leq 0,51, \quad i=1,2.$$

Всего было построено 7 таких плавных спектральных коэффициентов отражения. Положения их цветов в цветовом теле после перехода к освещению голубым небом (источник D_1) показаны на том же рис. 31, I внутри области метамерных окрасок, соответствующей центру цветового тела. Спектральные коэффициенты отражения трех из них (a , b и v), цвета которых отмечены черными точками, приведены на рис. 31, II. Как показывает этот рисунок, в случае дихроматического зрения дейтеранопа при таком способе генерации плавных спектральных коэффициентов отражения цвета метамерных окрасок выходят далеко за пределы соответствующих метамерных эллипсоидов. Таким образом, даже такой малой выборки достаточно, чтобы убедиться, что расхождение цветов метамерных окрасок из такого семейства гладких спектральных коэффициентов отражения оказывается больше, чем это предсказывают размеры метамерных эллипсоидов Стайлса и Вышецкого.

Сходный пример расчета расхождения цветов метамерных окрасок с плавными кривыми отражения, но для цветового зрения трихромата, приведен в работе [163]. На помещенном там рисунке видно, что в трехмерном случае цвета таких окрасок группируются в центральной части области метамерных окрасок и далеко отстоят от ее границ. Такое их положение в трихроматическом случае вполне естественно, так как здесь границы областей метамерных окрасок образованы цветами 5-ступенчатых окрасок, кривые отражения которых очень далеки от плавных спектральных кривых.

Метамеризм естественных окрасок

Разобранные в этой главе разные оценки расхождения цветов метамерных окрасок при изменении освещения, к сожалению, не дают нам уверенности в том, что наша зрительная система (или зрительная система животных) действительно сталкивается с проблемой метамеризма цветов естественных окрасок. Области метамерных окрасок определяют только теоретический предел метамеризма, задаваемый нереальными ступенчатыми окрасками. Статистические оценки [182, 183] по размерам метамерных эллипсоидов в существенной степени опираются на довольно искусственные и неизвестно, насколько адекватные действительности, априорные представления о распределении вероятности окрасок в природе.

Рассмотрим, как преобразуются цвета некоторых естественных окрасок. Здесь мы не ставили себе целью исследование многообра-

зия окрасок, с которыми встречаются те или иные животные в природе, а просто хотели посмотреть, легко ли среди доступных окрасок подобрать метамеры и как далеко будут расходиться их цвета в цветовом пространстве при изменении освещения. Для этого мы измерили с помощью спектрофотометра спектральные коэффициенты отражения около двухсот разнообразных цветных бумажек (в основном из наборов для детской цветной аппликации). Такая "экспериментальная совокупность окрасок" оказалась все-таки довольно бедной, чтобы среди них можно было отыскать достаточное количество метамеров. Однако в каких-то пределах абсолютное значение коэффициента отражения бумажек можно было уменьшать с помощью специальных наклеивающихся на их поверхность прозрачных нейтральных пленок с разными коэффициентами поглощения, подгоняя тем самым цвета окрасок по светлоте.

Для системы цветового зрения дейтеранопа (в том приближении, в котором здесь оно рассматривается, — с кривыми спектральной чувствительности приемников, показанным на рис. 23, II, и для двух вариантов освещения, спектры которых показаны на том же рисунке) были подсчитаны цветовые координаты этих окрасок. Из них выбраны те, которые при исходном солнечном освещении имели одинаковый цвет и были неотличимы от ахроматической темно-серой окраски, отражающей 25% падающего на нее света. При другом освещении (голубом небе) цвета этих окрасок уже не совпадали. Дальше всего в цветовом пространстве расходились "пурпурные" и "зеленые" окраски*. Цвета зеленых бумажек обычно попадали внутрь метамерного эллипсоида Стайлса и Вышецкого или на его границу. Цвета наиболее насыщенных пурпурных бумажек выходили за его пределы. Спектральные коэффициенты отражения двух таких окрасок — бирюзовой (σ) и малиновой (δ) — приведены на рис. 31, III. А точки внутри области метамерных окрасок, соответствующей 25%-ной серой окраске, показывают положения их цветов при этом освещении (рис. 31, I).

Как видно из этого рисунка, цвет малиновой бумажки попал почти на границу области метамерных окрасок. Это значит, что при таком освещении для системы цветового зрения дейтеранопа реальная малиновая бумажка неотличима по цвету от некоторой трехступенчатой окраски. Цвета реальных зеленых окрасок, напротив, существенно отличаются от цветов трехступенчатых окрасок. Фактически это является следствием того, что кривые спектральной чувствительности приемников дейтеранопа сильно разнесены. Действительно, малиновая бумажка имеет основное отражение вне зоны перекрытия приемников — в практически одномерных концах спектра, где, как было показано во второй главе, точная форма кривых отражения мало сказывается на цвете окраски. Зеленая бумажка, напротив, отражает преимущественно в той области спектра (рис. 31, III), где кривые спектральной

* Здесь окраскам даны названия соответственно тому, какими их видит нормальный трихромат. Для дейтеранопа они (по условию) неотличимы при исходном освещении от темно-серой окраски, а при освещении светом голубого неба должны получать некоторые (разные) цветовые оттенки.

чувствительности перекрываются, и отклонения ее спектрального коэффициента отражения от ступенчатой кривой приводят к отличию ее цвета от цветов трехступенчатых окрасок, формирующих границу области метамерных окрасок.

Этот разбор показывает, что наличие среди естественных окрасок таких, цвета которых попадают на границы областей метамерных окрасок, существенным образом связано с цветом этих окрасок при исходном освещении и со степенью перекрытия кривых спектральной чувствительности приемников. В частности, следует ожидать, что для системы цветового зрения дейтеранопа в отличие от разобранный примера метамеризма темных ахроматических реальных цветов из светлых цветов на границы областей метамерных окрасок будут попадать не цвета пурпурных, а естественных светло-зеленых окрасок. А для системы цветового зрения геккона (с сильным перекрытием приемников) естественные окраски, попадающие на границы областей метамерных окрасок, вообще маловероятны.

Таким образом, как показывают эти измерения и вычисления, для дихроматических систем цветового зрения среди естественных окрасок возможны метамеры, цвета которых при изменении освещения существенно расходятся в цветовом пространстве. При этом степень метамеризма реальных окрасок по порядку величины лежит между теоретическими оценками, задаваемыми размерами областей метамерных окрасок и метамерных эллипсоидов. Следовательно, можно заключить, что метамеризм окрасок должен сильно ограничивать возможную точность узнавания окрасок при изменении освещения в случае дихроматического зрения. Повышение размерности цветового зрения делает проблему метамеризма менее существенной, во-первых, по той причине, что относительные размеры областей метамерных окрасок в этом случае будут меньше, и, во-вторых, в еще большей степени благодаря тому, что естественные цвета при этом будут занимать только малую центральную часть этой области.

ГЛАВА 4

КОНСТАНТНАЯ ОЦЕНКА СВЕЛОТЫ С ПОМОЩЬЮ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Вводные замечания

Количество параметров, которыми может оцениваться отражательная способность (окраска) видимой поверхности в зрительной системе, определяется размерностью цветового зрения. В гл. 3 было показано, что возможная точность этой оценки также существенно зависит от размерности цветового зрения. При этом для трихроматических систем практически всегда можно обеспечить такую точность, когда при изменениях освещения в широких пределах зрительная система не будет путать между собой достаточное число разнообразных

окрасок поверхностей. В дихроматическом случае метамеризм окрасок является серьезным препятствием к их константному узнаванию.

Совсем плохо обстоят дела с узнаванием отражательной способности поверхности у ахроматов. При единственном светочувствительном приемнике (и когда сцена освещена единственным по относительному спектральному составу источником) зрительная система может оценивать только один параметр окраски. Это будет некоторый суммарный по спектру коэффициент отражения данной поверхности, или ее светлота:

$$l = \int_0^{\infty} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

Несмотря на уже введенную в этой формуле "поправку на яркость освещения", описываемую интегралом в знаменателе, такая оценка отражательной способности поверхности все-таки сильно зависит от спектрального состава освещения. Метамеризм окрасок здесь сказывается еще сильнее, чем в дихроматическом случае. В результате для ахроматической системы зрения со светочувствительным приемником, определяемым, например, родопсином (как, впрочем, и для любых других светочувствительных приемников, встречающихся у животных), окраски, одинаковые по светлоте при одном освещении, после изменения спектрального состава освещения в естественных пределах будут выглядеть существенно разными. Так, например, можно подобрать такую пару окрасок (голубую и желтую), которые для такого ахромата при исходном прямом солнечном освещении имеют светлоту, равную 0,5, и неотличимы от 50%-ной серой окраски. После перехода к свету голубого неба светлоты этих окрасок будут соответственно равны 0,75 и 0,25, т.е. по светлоте окраски станут отличаться втрое. Фактически это означает, что в таких условиях животные способны не путать между собой только очень темные предметы с очень светлыми. Для всех остальных вычисленная таким способом светлота не может быть константным признаком отражательной способности поверхности при широких вариациях освещения. По этой причине какая-либо оценка отражательной способности поверхности предмета в зрительной системе животных-ахроматов оказывается практически бесполезной, так какие помогает узнавать сами предметы.

В этой главе покажем, как увеличение размерности цветового зрения иногда позволяет построить такую оценку светлоты окраски, которая остается более или менее постоянной при определенных (довольно разнообразных) изменениях освещения. Причем в некоторых случаях эта оценка оказывается единственным не подверженным вариациям вследствие метамеризма константным параметром окраски.

На возможность получения такой оценки указывает следующее наблюдение. В гл. 3 отмечена та особенность областей метамерных окрасок, что в некоторых случаях они имеют вытянутую форму. Используя это, посредством подходящего выбора координатных осей в цветовом пространстве (перехода к другой системе координат) можно добиться того, что по крайней мере по одной из этих осей окраски, неотличимые по цвету при одном освещении, будут мало отличаться

между собой и после изменения освещения. При этом такая особенность формы областей метамерных окрасок проявилась только в определенных случаях, а именно для систем цветового зрения суслика и геккона, где оказалось, что при переходе от солнечного освещения к свету голубого неба эти области получают узкими и вытянутыми. Для системы цветового зрения кошки этот эффект менее выражен. Для дейтеранопа области метамерных окрасок при указанных источниках имеют округлую форму (см. рис. 24, II), да и для систем цветового зрения суслика и геккона области метамерных окрасок имеют вытянутую форму не всегда, в частности при переходе от солнечного освещения к освещению лампой накаливания (см. рис. 27).

Таким образом, пока это частное наблюдение ничего не говорит ни о том, для каких приемников и, для каких вариантов освещения возможна такая константная оценка окраски, ни о том, какое именно свойство отражательной способности поверхности характеризует эта оценка, когда она возможна. Проанализируем эти вопросы детальнее. Для этого сначала сформулируем условия на спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников, при которых возможно приписать окраскам некоторую константную характеристику, не зависящую от условий освещения. Покажем, что эта характеристика всегда соответствует нашим представлениям именно о светлоте окрасок. Затем разберем, к каким особенностям устройства и поведения должно привести предположение о том, что зрительная система действительно вычисляет такую характеристику окраски, и сопоставим их с экспериментальными данными из области нейрофизиологии и психологии.

Общее решение

Рассмотрим идеальный случай, когда области метамерных окрасок имеют нулевую толщину. Тогда при двумерном цветовом зрении можно ожидать, что, кроме тривиального случая, когда области метамерных окрасок в цветовом теле представляют собой точки, они могут вырождаться в прямолинейные отрезки. В трихроматическом случае возможны такие варианты: либо они также представляют собой точки или одномерные отрезки, либо плоские (двумерные) фигуры. Для каждого из этих случаев рассмотрим ограничения, которые необходимо наложить на спектры источников (и, возможно, на кривые спектральной чувствительности приемников).

Ни прямолинейный отрезок, ни плоская фигура, расположенная в трехмерном пространстве, не являются строго выпуклыми. Фактически в линейчатых или плоских областях метамерных окрасок все цвета лежат на их поверхности. Это значит, что введенные в предыдущей главе на с. 78 ограничения на спектры $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ источников, которые дают строго выпуклые области метамерных окрасок, в этом случае не должны выполняться. Это условие требовало, чтобы набор $2n$ функций вида $S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)$ был линейно независим. Напротив, если потребовать, чтобы эти функции были линейно зависимы на всем спектральном интервале, то можно показать, что для любой пары точек, лежащих

на поверхности некоторой (произвольной) области метамерных окрасок, на эту поверхность попадает и весь отрезок, их соединяющий. Это означает, что при таком условии все области метамерных окрасок, лежащие в цветовом теле, вырождаются в участки m -мерных гиперплоскостей, где m меньше размерности цветового пространства.

Требование линейной зависимости можно записать в виде одного или нескольких независимых условий следующего вида, накладываемых на функции $S_j(\lambda)\bar{x}_j(\lambda)$:

$$\sum_i a_{k1i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) = \sum_i a_{k2i} S_2(\lambda) \bar{x}_i(\lambda), \quad (4.1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, r$.

Легко показать, что количество z таких условий не может превышать размерности цветового зрения n . Иначе эти ограничения потребуют также линейной зависимости между самими кривыми спектральной чувствительности приемников, что фактически означает снижение размерности цветового зрения. Величина r определяет размерность областей метамерных окрасок: $m = n - r$. Так, при $r = n$ области метамерных окрасок вырождаются в точку (0-мерные многообразия). В этом случае система (4.1) имеет тривиальное решение: $S_2(\lambda) = a S_1(\lambda)$; т.е. переход точки цветового пространства в точку возможен только при пропорциональных изменениях спектра освещения. Варианты областей метамерных окрасок другой размерности рассмотрим для частных случаев двумерного и трехмерного цветового зрения.

Дихроматическое зрение

В двумерном случае функции $S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)$ линейно зависимы, если они связаны одним соотношением вида

$$a_{11} S_1(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) + a_{12} S_1(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) = a_{21} S_2(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) + a_{22} S_2(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) \quad (4.2)$$

где a_{ij} — некоторые постоянные.

Для двух источников освещения, спектры которых удовлетворяют соотношению (4.2), цвета окрасок, неотличимых при одном освещении, расплывутся в цветовом пространстве, соответствующем другому освещению, в одномерные области метамерных окрасок — прямолинейные отрезки. Причем наклон этих отрезков определяется только соотношением двух из этих параметров, а именно a_{21} и a_{22} . Действительно, домножив выражение (4.2) на $\rho(\lambda)$ и проинтегрировав по λ , получим соотношение, связывающее цветовые координаты одной и той же окраски, имеющей спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$, при одном и при другом освещении:

$$a_{11} X_{11} + a_{12} X_{12} = a_{21} X_{21} + a_{22} X_{22} \quad (4.3)$$

Поскольку по определению окраски метамерные при исходном освещении имеют один и тот же цвет, левая часть этого выражения представляет собой константу (для всех метамерных окрасок данного цвета при исходном освещении). Обозначим ее через L . Тогда выражение

$$a_{21} X_{21} + a_{22} X_{22} = L, \quad (4.4)$$

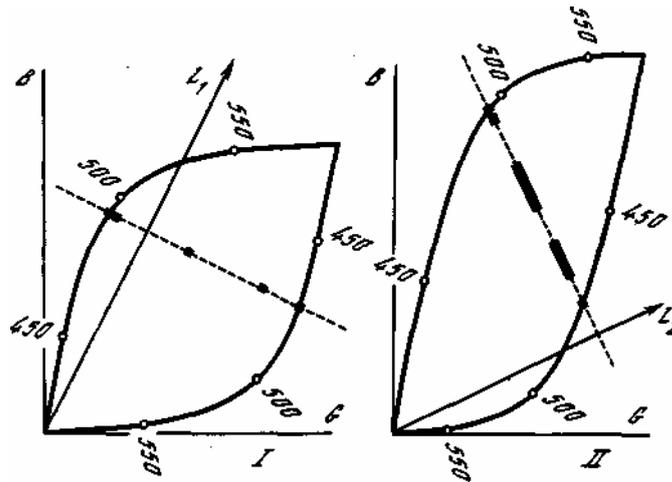


Рис. 32. Взаимное расположение прямолинейных областей метамерных окрасок для системы цветового зрения суслика

I — цветное тело для исходного освещения с отмеченными в нем пятью цветами; II — цветное тело и соответствующие пять областей метамерных окрасок после изменения освещения, L_1 и L_2 — направления осей светлоты при каждом освещении

связывающее между собой координаты цвета X_{21} и X_{22} при освещении со спектром $S_2(\lambda)$, представляет собой уравнение прямой, на которой расположен отрезок — соответствующая область метамерных окрасок. Наклон этой прямой определяется соотношением коэффициентов a_{21} и a_{22} .

Полученная формула показывает также, что при переходе от одного освещения к другому, спектры которых связаны соотношением (4.2), не только все области метамерных окрасок в цветном теле превращаются в прямолинейные отрезки, но и ориентация всех этих отрезков одинакова. Этот результат не является совсем неожиданным, поскольку уже на рис. 27 вытянутые области метамерных окрасок были расположены "параллельно" друг другу. Он означает, что в цветном теле возможно единое для всех областей метамерных окрасок (но свое для каждого освещения) направление, вдоль которого нет разброса метамерных цветов.

Более того, полученная формула позволяет сделать и другой важный для нас вывод: на прямую (4.4) будут попадать не только цвета всех метамерных при исходном освещении окрасок, но и вообще цвета окрасок, имеющих одинаковое значение L при исходном освещении.

Соотношение (4.3) имеет наглядную геометрическую интерпретацию. Каждому из двух освещений со спектрами $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ в цветном пространстве соответствует своя выделенная ось \mathbf{L} , направление которой определяется для первого источника коэффициентами a_{11} и a_{22} , а для второго — коэффициентами a_{21} и a_{22} . Тогда цвета, имеющие одинаковое значение по этой новой координатной оси при исходном освещении, после перехода к другому освещению на оси \mathbf{L} , соответствующей этому источнику, будут иметь также совпадающие значения координаты.

Рис. 32 иллюстрирует эти взаимоотношения, где для двух вариантов освещения приведены цветовые тела и ориентации осей \mathbf{L} в цветовом пространстве. На левом рисунке (I) на штриховой линии отмечены пять разных цветов, имеющих одинаковое значение координаты L_1 , а на правом (II) — области, в которые переходят цвета соответствующих окрасок. При этом точки, лежащие на поверхности цветового тела, переходят в точки, а точки, лежащие внутри цветового тела, в отрезки разной длины. И те и другие расположены на одной прямой, перпендикулярной оси L_2 .

Семейство допустимых источников

Итак, показано, что при определенных условиях возможна некоторая зависящая от характера освещения характеристика цвета излучения, отраженного от поверхности предмета, на которой не сказывается метамеризм окрасок. Для этого нужно, чтобы спектры источников $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ удовлетворяли условию (4.2). Определим теперь класс таких источников освещения, в котором для спектров любых двух источников из этого семейства справедливо соотношение вида (4.2). Этому требованию удовлетворяет семейство источников, спектры которых задаются следующим выражением:

$$S(\lambda) = H(\lambda) / [a_1 \bar{x}_1(\lambda) + a_2 \bar{x}_2(\lambda)], \quad (4.5)$$

где $H(\lambda)$ — фиксированная для всего семейства положительная функция от λ , определяющая семейство спектров источников, а a_1 и a_2 — произвольные параметры, задающие спектры конкретных источников. На эти параметры и на вид функции $H(\lambda)$ наложено естественное ограничение: допустимы только такие значения a_i , при которых $H(\lambda)$ всюду положительна и конечна. В дальнейшем семейство источников со спектрами такого вида будем называть *семейством допустимых источников*. Таким образом, формула (4.5) описывает двухпараметрическое семейство источников освещения, при этом параметры a_1 и a_2 определяют направление оси \mathbf{L} в цветовом пространстве, соответствующее данному освещению.

Для иллюстрации приведенных положений мы выбрали систему дихроматического зрения суслика, кривые спектральной чувствительности приемников которого приведены на рис. 26, II. Для нее построили 4 спектра освещения (A_2 , B_2 , C_2 и D_2) вида (4.5), в которых функция $H(\lambda)$ и коэффициенты a_i были подобраны так, чтобы цвета этих источников освещения совпадали с цветами источников, использовавшихся в иллюстрациях предыдущей главы. При этом источник B_2 здесь целиком совпадает по спектру с солнечным освещением B_1 (см. рис. 26, IV). Спектры этих источников приведены на рис. 33, I. Вид функции $H(\lambda)$ показан пунктирной кривой на рис. 33, II. Из сравнения кривых на рис. 33, I с кривыми на рис. 26, IV видно, что больше всего различаются спектры источников A_1 и A_2 , соответствующих по цвету излучению лампы накаливания. Спектр лампы накаливания A_1 , использовавшийся в иллюстрациях предыдущей главы, сильно отличается от того, что

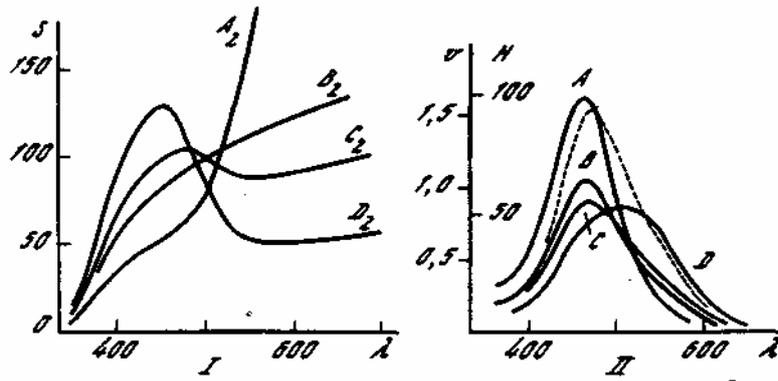


Рис. 33. Примеры спектральных характеристик освещения и зрительной системы, допускающие точное узнавание светлоты окраски для системы цветового зрения суслика

I — спектры освещения из семейства допустимых источников; II — кривые видности v (сплошные линии), соответствующие этим вариантам освещения, и порождающая функция $H(\lambda)$ — штриховая линия

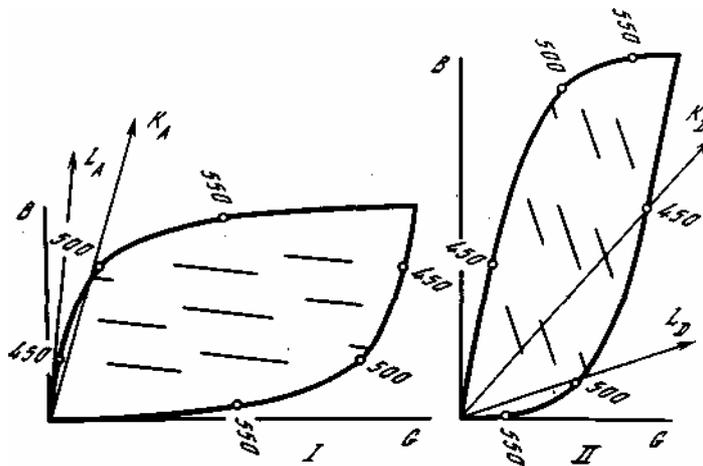


Рис. 34. Одномерные области метамерных окрасок для переходов от освещения источником B_2 к освещением источником A_2 (I) и источником D_2 (II) для системы цветового зрения суслика

L — направления осей светлоты, по которым не сказывается метамеризм окрасок, K — осей, соответствующих адаптации по закону коэффициентов фон Криса

требуется для одномерности областей метамерных окрасок. Следствием этого и является их довольно округлая форма и большая относительная толщина в любом измерении (см. рис. 27). Источники D_1 и D_2 , напротив, отличаются мало. В соответствии с этим на рис. 27 области метамерных окрасок, хотя и не были одномерными, имели малую толщину. Соответствующие одномерные области метамерных окрасок для источников A_2 и D_2 (рис. 33, I) приведены на рис. 34, где для каждого из источников показано также направление оси L .

Светлота окраски

Требование, чтобы спектр освещения $S(\lambda)$ был всюду положительной функцией, ограничивает возможные ориентации оси \mathbf{L} в цветовом пространстве: она может быть направлена только так, чтобы значения координат всех точек цветового тела по этой оси были положительны. При этом идеально белая поверхность всегда будет иметь наибольшее (из всех несамосветящихся поверхностей) значение по этой координате. Эти свойства оси \mathbf{L} коррелируют с интуитивными представлениями о яркости излучений, отраженных от поверхностей. Поэтому ось \mathbf{L} будем называть *осью яркости* или *осью светлоты*, поскольку соответствующую характеристику l отражательной способности поверхности принято называть *светлотой окраски*. Измерять светлоту естественно в относительных единицах:

$$l = (a_1 X_1 + a_2 X_2) / (a_1 X_1^0 + a_2 X_2^0) \quad (4.6)$$

Тогда в нашем определении, в соответствии с привычными представлениями о светлоте (или коэффициенте отражения) поверхности, идеально белая поверхность имеет светлоту, равную 1, идеально черная поверхность имеет светлоту, равную 0, а светлоты всех прочих распределяются в интервале между этими крайними значениями.

Подставляя в числитель этой формулы выражения для координат цвета излучения, отраженного от некоторой окрашенной поверхности со спектральным коэффициентом отражения $\rho(\lambda)$, и введя новое обозначение для линейной комбинации кривых спектральной чувствительности приемников

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 = \int_0^{\infty} S(\lambda) \rho(\lambda) (a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2) d\lambda = \int_0^{\infty} S(\lambda) \rho(\lambda) v(\lambda) d\lambda,$$

получим другое, более привычное представление для светлоты:

$$l = \int_0^{\infty} S(\lambda) \rho(\lambda) v(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda) v(\lambda) d\lambda,$$

аналогичное тому, которое было введено для ахроматической системы зрения — в терминах соответствующей кривой спектральной чувствительности $v(\lambda)$. Здесь функция $v(\lambda) = a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2$ играет роль "функции относительной спектральной световой эффективности" или "кривой видности" в стандартных определениях для яркости излучений или светлоты поверхности [10, 25]. Однако отличается она тем, что в нашем определении эта функция не постоянная, а вид ее зависит от характера освещения, так как коэффициенты a_1 и a_2 — разные для разных спектров освещения из данного семейства. Насколько эти функции могут различаться, демонстрирует рисунок 33, II, где показаны четыре разные функции относительной световой эффективности, соответствующие четырем разным источникам освещения.

Следует заметить, что в принципе один и тот же спектр $S(\lambda)$ может входить в разные семейства допустимых источников, задаваемые разными порождающими функциями $H(\lambda)$. При этом значения параметров a_1 и a_2 , определяющие данный спектр освещения, будут разными. Это значит, что направление оси яркости в цветовом пространстве при данном освещении не определяется однозначно спектром этого

освещения, но также зависит от того, в какое именно семейство допустимых источников входит этот источник. Соответственно и форма кривой видности (для одного и того же спектра освещения) будет зависеть от семейства допустимых источников.

Задача константного узнавания светлоты

Итак, показано, что для случая, когда множество спектров освещения ограничено семейством допустимых функций (4.5), возможна такая характеристика окраски, которая остается неизменной при изменении освещения. Вопрос теперь состоит в том, каким способом зрительная система может по цвету излучения, приходящего от окрашенной поверхности, определить (вычислить) эту характеристику. Поскольку прямым сведений о величине коэффициентов a_1 и a_2 , необходимых для определения светлоты по формуле (4.6), зрительная система не получает, то она сначала должна найти значения этих коэффициентов. Сделать это можно, если зрительной системе известен характер освещения. Действительно, как уже говорилось, формула (4.5) описывает двухпараметрическое семейство источников. Причем каждый источник можно, с одной стороны, характеризовать двумя параметрами a_1 и a_2 , а с другой — его цветом (X_1^0, X_2^0) . Друг с другом эти величины связывает следующая система уравнений:

$$\{X_i^0 = \int_0^\infty S(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)d\lambda = \int_0^\infty H(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)/[a_1\bar{x}_1(\lambda) + a_2\bar{x}_2(\lambda)]d\lambda \quad (4.7)$$

Следовательно, зная цвет источника, можно однозначно восстановить коэффициенты a_1 и a_2 , необходимые для вычисления светлоты. Это дает принципиальную возможность вводить поправку на цвет освещения при вычислении светлоты.

Таким образом, процедура оценки светлоты представляется следующей. Сначала, используя какие-то показатели освещения (см. гл. 1), зрительная система определяет его цвет. По цвету освещения, используя функциональную зависимость коэффициентов a_1 и a_2 от цвета освещения, которая в неявном виде задана формулой (4.7), зрительная система должна вычислить значения этих коэффициентов. И затем по цвету излучения, отраженного от данной поверхности, по формуле (4.6) может оценить ее светлоту.

В таком виде процедура введения поправки на цвет освещения для вычисления светлоты окраски представляется довольно громоздкой, так как для нее необходимо, чтобы в самом устройстве зрительной системы были "запаяны" две сложные нелинейные функции двух переменных для пересчета цвета освещения в значения коэффициентов в формуле (4.6). Вид одной из таких функций — $a_2(G^0, B^0)$ — для рассмотренного нами примера зрительной системы суслика — показан на рис. 35. Однако формулу (4.6) можно несколько преобразовать, что даст более простой алгоритм вычисления светлоты.

Прежде чем разбирать детали нашего алгоритма, остановимся

Рис. 35. Зависимость коэффициента a_2 от координат цвета освещения

A, B, C, D — значения коэффициента для примеров освещений из семейства допустимых источников

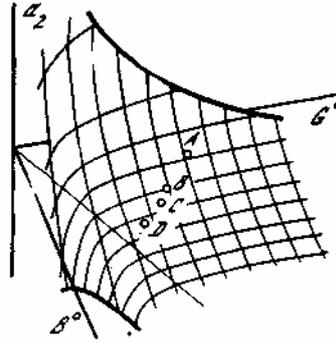
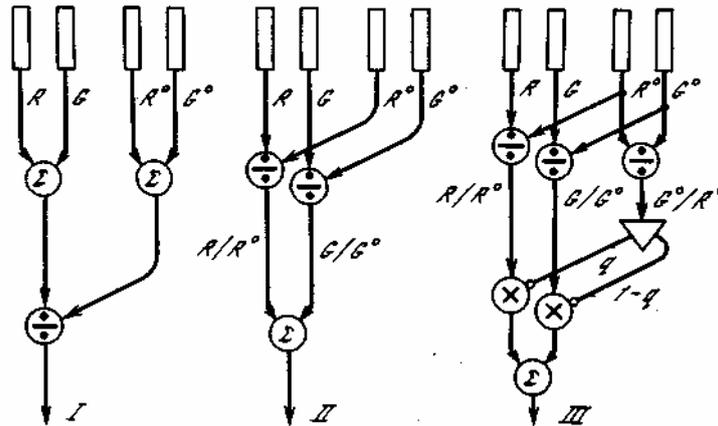


Рис. 36. Блок-схемы алгоритмов вычисления светлоты



кратко на тех представлениях о способах определения светлоты, которые приняты в цветоведении. Это позволит в дальнейшем выяснить его отличительные особенности. В фотометрии аналогом понятия светлоты является коэффициент яркости [25], под которым понимается отношение яркости данной поверхности к яркости идеально белой рассеивающей поверхности при том же освещении. Однако функция относительной спектральной световой эффективности $v(\lambda)$ для дневного зрения человека в определении фотометрической величины яркости здесь считается раз и навсегда заданной (в 1924 г. Международной комиссией по освещению) линейной комбинацией кривых спектральной чувствительности приемников человека с постоянными коэффициентами a_i . Поскольку из психофизики известно [120], что синечувствительный приемник не дает ощутимого вклада в восприятие яркости, эта кривая видности определяется практически только зеленочувствительным и красночувствительным приемниками. На рис. 36, I приведена блок-схема такого способа вычисления светлоты (коэффициента яркости). Сначала суммируются сигналы (R и G), поступающие от двух светочувствительных приемников и характеризующие цвет излучения, отраженного от данной поверхности. Аналогично суммиру-

ются сигналы (R^0 и G^0), характеризующие цвет освещения, а затем вычисляется отношение этих сумм — вводится поправка на яркость освещения.

Хотя понятие коэффициента яркости было введено для того, чтобы характеризовать окраски поверхностей, как видно из самого определения, его величина зависит также от условий освещения. И при вариации освещения в естественных пределах величина коэффициента яркости некоторых поверхностей может изменяться в полтора-два раза.

Совсем не так оценивает светлоту окрашенных поверхностей человек. Дело в том, что сама кривая видности не остается постоянной при изменении освещения. Изменения кривой видности объясняют разной адаптацией приемников, чувствительность которых подстраивается под цвет действующего освещения. При этом обычно явно или неявно предполагается, что цветовая адаптация приемников происходит в соответствии с законом коэффициентов фон Криса [31]. Иными словами, предполагается, что вклад каждого из цветовых каналов в субъективную светлоту остается постоянным, но каждый из приемников меняет при этом свою чувствительность в соответствии с цветом действующего освещения:

$$l = q_1 X_1 / X_1^0 + q_2 X_2 / X_2^0, \quad (4.8)$$

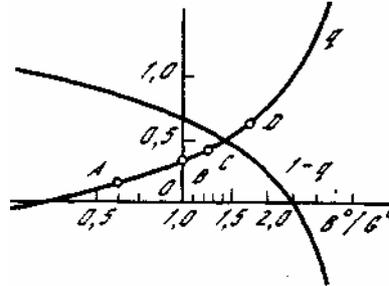
где q_1 и q_2 — некоторые константы, связанные соотношением $q_1 + q_2 = 1$, которое вытекает из требования равенства единице светлоты идеально белой поверхности.

Блок-схема такого способа вычисления светлоты (рис. 36, II), отличается от предыдущей изменением порядка операций суммирования сигналов, идущих по разным цветовым каналам, и вычисления их отношения. Следствием такой перестановки должны быть вариации формы кривой видности при изменении освещения, поскольку чувствительность приемников зависит от характера освещения. Геометрически этому соответствуют вариации ориентации оси светлоты в цветовом пространстве. Причем при переходе от некоторого исходного освещения к более красному эта ось будет поворачиваться в сторону синей координатной оси, а при переходе к более синему освещению — в противоположную сторону. Положения оси светлоты при адаптации в соответствии с законом коэффициентов фон Криса были рассчитаны для системы цветового зрения суслика. Стрелки \mathbf{K}_A и \mathbf{K}_D на рис. 34 показывают, как меняется ее ориентация при переходе от солнечного освещения к более красному (I) или к более синему (II) освещению и насколько она отличается от ориентации оси светлоты (\mathbf{L}_A и \mathbf{L}_D) для нашего алгоритма.

К сожалению, прямых экспериментов, подтверждающих, что у человека адаптация к цвету освещения при определении светлоты окраски происходит именно по закону коэффициентов, нам неизвестно. Имеется ряд указаний психологов на то, что такой закон в чистом виде к зрительной системе человека неприменим [196, 200, 201]. Однако почти все такие эксперименты проводились в неадекватных условиях предъявления стимулов, когда, например, в поле зрения

отсутствовали признаки освещения или когда вообще предьявлялись так называемые "апертурные цвета", которые испытуемые не могли интерпретировать в терминах окрашенных поверхностей, освещенных некоторым источником. Усилия же фотометристов, имеющих дело именно с "поверхностными цветами", были направлены больше на то, чтобы стандартизировать условия наблюдения, приблизить освещение к стандартному дневному (чтобы тем самым приблизить субъективную светлоту к фотометрической величине коэффициента яркости), чем на исследование закономерностей адаптации к меняющимся в широких пределах условиям освещения.

Рис. 37. Зависимость коэффициентов q и $1-q$ от цветности освещения B^0/G^0
 A, B, C, D — значения коэффициента для примеров освещений из семейства допустимых источников



В нашем определении светлоты вклад отдельных светочувствительных приемников также изменяется при изменении освещения. Однако закон этого изменения несколько отличается от закона коэффициентов фон Криса. Действительно, преобразуя нашу формулу (4.6) для светлоты к виду (4.8), получим

$$l = qX_1 / X_1^0 + (1 - q)X_2 / X_2^0, \quad (4.9)$$

где $q = 1 / (1 + a_2 X_2^0 / a_1 X_1^0)$.

Таким образом, коэффициенты q и $1 - q$, характеризующие вклад каждого из цветовых каналов, в этом случае уже не являются постоянными, а меняются при изменении освещения. Можно показать, что отношение a_2/a_1 , а следовательно и q , определяются только соотношением координат X_2^0/X_1^0 цвета освещения, т.е. зависят только от его цветности, но не от интенсивности. Причем эта зависимость q от цветности X_2^0/X_1^0 всегда представляет собой монотонно возрастающую функцию. Иными словами, при переходе к более синему освещению вклад q длинноволнового цветового канала в светлоту возрастает. Для цветового зрения суслика эта зависимость представлена на рис. 37, где за единицу принята цветность $X_2^0/X_1^0 = B^0/G^0$ исходного солнечного освещения.

Отличия нашего алгоритма вычисления светлоты окраски от рассмотренных ранее наглядно представляет его блок-схема, приведенная на рис. 36, III. Здесь видно, что введение поправки на освещение по этому алгоритму производится в два этапа: 1) сначала вводится поканальная адаптация к цвету освещения в соответствии с законом коэффициентов, 2) затем вычисляется цветность источника и по этой цветности определяется вклад каждого из цветовых каналов в суммар-

ную оценку светлоты стимула. Тогда при изменении освещения (например, от источника B_2 , рис. 33, I) в синюю сторону (к источнику D_2) относительный вклад коротковолнового приемника уменьшится, во-первых, за счет его адаптации в соответствии с законом коэффициентов, а во-вторых, за счет того, что вклад коротковолнового цветового канала (характеризуемый коэффициентом $1 - q$) при этом также уменьшается (рис. 37). Вследствие этого на рис. 34, II в цветовом пространстве, соответствующем синему освещению, ось светлоты L по сравнению с осью K проходит еще ближе к координатной оси, соответствующей длинноволновому приемнику (G).

Примечательно, что в нашем алгоритме при некоторых крайних условиях освещения вклад приемника может быть иногда даже отрицательным. Другие модели вычисления светлоты допускают только положительные веса для разных цветовых каналов. Да и сама возможность отрицательного вклада какого-либо из приемников в светлоту обычно отрицается [32]. Такая отличительная особенность нашего алгоритма могла бы служить удобным критерием при экспериментальной проверке, реализуется ли такой механизм определения светлоты в природе — в устройстве зрительной системы животных.

Вопросы зрительной экологии

До сих пор мы разбирали вопрос, как должна быть устроена обработка сигналов в зрительной системе для безошибочного узнавания светлоты окраски в меняющихся условиях освещения. Было показано, что вычисление светлоты действительно возможно, когда цвет освещения варьирует в широких пределах, хотя при этом его спектральный состав и не произволен, а на него наложены определенные ограничения. В этом разделе нас будет интересовать вопрос, возможен ли этот алгоритм обработки сигналов где-нибудь в живой природе.

Конечно, такой алгоритм имеет смысл использовать только в том случае, если многообразие спектров естественных источников освещения удовлетворяет сформулированным ограничениям (4.2). Однако, поскольку в пределах этих ограничений допустимы некоторые вариации освещения как по яркости, так и по цветности, можно надеяться, что спектры реальных источников в среде обитания того или иного животного с большей или меньшей точностью будут им удовлетворять. Для таких животных их световое окружение допускает получение более или менее константной характеристики окраски поверхности — ее светлоты. В формулу (4.5), задающую семейство допустимых источников (удовлетворяющих этим ограничениям), входит ряд произвольных параметров: базисная функция $H(\lambda)$, коэффициенты a_1 и a_2 , что дает некоторую свободу в подгонке спектров этих источников к спектрам естественного светового окружения, когда многообразие последних не слишком велико.

К сожалению, семейство допустимых спектров освещения (4.5) обладает одной неприятной особенностью, из-за которой даже точное выполнение условия (4.2) для некоторых естественных источников не

обеспечивает неизменности оценки светлоты при комбинированном освещении теми же источниками. Дело в том, что множество определенных таким образом спектров незамкнуто относительно операции сложения. Иными словами, если некоторый участок поверхности освещается одновременно смесью двух излучений, спектры каждого из которых принадлежат допустимому семейству, то спектр суммарного освещения уже не будет ему принадлежать. На практике мы часто сталкиваемся с такими смешанными освещенностями. Примером может служить освещение по-разному ориентированных к солнцу участков поверхности, где вклад неба и солнца в суммарное освещение может меняться. Правда, расчеты показывают, что в практически интересных случаях, например для разбирающейся здесь системы цветового зрения суслика, отклонения оценки светлоты (вычисленной по этому алгоритму для освещенных таким смешанным освещением участков поверхности) от истинного ее значения (вычисленного, например, для участков той же поверхности, освещенных только одним из этих источников) будут не очень большими.

Для животных-дихроматов можно надеяться удовлетворительно аппроксимировать спектрами вида (4.5) только двухпараметрическое многообразие спектров естественного освещения. Зрительная система животных-дихроматов, живущих в более разнообразной световой обстановке, не сможет компенсировать вариации освещения и не будет способна к константному узнаванию даже такой характеристики окраски предметов, как ее светлота. В трихроматическом случае допустимое множество спектров освещения, как будет показано в следующих разделах, становится трехпараметрическим. Здесь, по-видимому, любые естественные спектры с большей точностью укладываются в семейство допустимых источников (для любой реальной системы трехмерного цветового зрения).

В качестве примера рассмотрим двухпараметрическое семейство спектров дневного освещения D , рекомендованных МКО и описывающих распределение спектральной плотности облученности горизонтальной поверхности для различных фаз дневного света. Фазы одна от другой отличаются временем суток, тем, каким именно участком неба освещена поверхность, состоянием облачного покрова и т.д. Мы уже говорили, что соответствующие формулы и таблицы [10] для дневного освещения описывают ограниченный класс источников, в частности не учитывают сезонных и географических вариаций, высоты над уровнем моря и удовлетворительно характеризуют освещение, только когда поблизости отсутствуют другие отражающие или пропускающие свет объекты (например, листва деревьев). Вследствие этого фазы дневного света, рекомендованные МКО, характеризуются всего двумя параметрами: интенсивностью и коррелированной цветовой температурой, однозначно задающими спектр освещения. По-видимому, это семейство спектров достаточно хорошо отражает световое окружение такого жителя открытых пространств, как суслик, активного именно в дневное время суток. Поэтому имеет смысл проверить, насколько разные фазы дневного освещения D удовлетворяют ограничениям (4.2) для системы цветового зрения суслика.

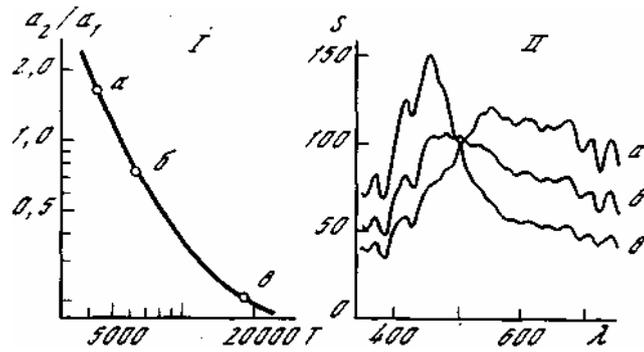


Рис. 38. Семейство допустимых источников для системы цветового зрения суслика, близких к дневному освещению

I — зависимость параметров a_2/a_1 источников от коррелированной цветовой температуры; II — примеры спектров освещения из семейства допустимых источников, соответствующие трем фазам дневного освещения

Хотя семейство спектров дневного освещения задается закономерностью [10], отличной от формулы (4.5), удовлетворяющей ограничениям (4.2), при надлежащем выборе базисной функции $H(\lambda)$, задающей спектры допустимых источников, оба семейства спектров оказываются достаточно близкими. Если не принимать во внимание мощность источника, то спектр дневного освещения однозначно определяется одним параметром — его коррелированной цветовой температурой, а спектры допустимых источников определяются соотношением коэффициентов a_2/a_1 . Таким образом, каждой фазе дневного освещения можно поставить в соответствие совпадающий с ним по цветности спектр допустимого источника. На рис. 38, I показана связь параметров допустимых источников с коррелированной цветовой температурой T соответствующих фаз дневного освещения. На рис. 38, II приведены три допустимых спектра, соответствующих крайним фазам дневного освещения (кривые a и $в$) и стандартному дневному освещению D_{65} (кривая $б$). Сравнение со спектрами дневного освещения на рис. 8, I показывает, что в том спектральном интервале, где приемники суслика имеют ощутимую чувствительность, эти спектры мало различаются между собой. Так как само семейство спектров дневного освещения D является только некоторым приближением к реальности, то, по-видимому, нет смысла требовать большего совпадения спектров допустимых источников со спектрами дневного освещения.

Такое чисто качественное сходство можно подкрепить расчетами, показывающими, к каким ошибкам в оценке светлоты приведут отличия спектров дневного освещения от подобранных нами спектров допустимых источников. Такие расчеты мы провели для перехода между крайними фазами дневного освещения от источника D_{40} к источнику D_{250} и для окрасок, значение светлоты которых при исходном освещении равно 0,5 — т.е. для случая, когда абсолютные ошибки в оценке светлоты ожидаются максимальными. Тогда, если вычислять оценку светлоты окрасок по описанному нами алгоритму, то одноступенчатые

взаимно дополнительные голубая и желтая окраски (со скачком спектрального коэффициента отражения в районе 490 нм), которые при исходном прямом солнечном освещении D_{40} имеют светлоту, равную 0,5, после перехода к дневному освещению D_{250} незначительно разойдутся по светлоте, ее оценки будут соответственно равны 0,53 и 0,47.

Для сравнения можно привести вариации оценки светлоты аналогичных одноступенчатых взаимно дополнительных голубой и желтой окрасок, вычисленные в соответствии со схемой рис. 36,1. В этом случае после перехода к свету ясного неба (D_{250}) оценки светлоты этих окрасок примут значения порядка 0,75 и 0,25 соответственно при любом соотношении вкладов приемников в кривую видности. Приведенный пример показывает, что для системы цветового зрения суслика и для светового окружения, характерного для суслика, использование нашего алгоритма приведет к хорошей (хотя и не абсолютной) константности узнавания светлоты окраски поверхностей.

Широкие вариации дневного освещения приводят к тому, что светлота оказывается единственным константным параметром окраски поверхности, поскольку оценка окраски по цветности (т.е. в направлении, перпендикулярном к оси светлоты), как правило, непостоянна из-за метамеризма окрасок. Поэтому животным-дихроматам, живущим в такой световой обстановке, в своем поведении при узнавании предметов внешнего мира имеет смысл опираться именно (и, возможно, только) на вычисляемую таким способом светлоту окраски. В средах обитания с большим разнообразием спектров освещения, которые нельзя аппроксимировать никаким двухпараметрическим семейством допустимых источников, светлота окраски (как бы она ни вычислялась) перестает быть такой полезной характеристикой, поскольку она подвержена вариациям вследствие метамеризма не меньше, чем прочие характеристики окраски поверхности. Примерами таких сред обитания могут служить широколиственный лес и пресноводные водоемы.

Вопросы устройства зрительной системы

В этом разделе мы рассмотрим, насколько согласуются некоторые известные факты из биологии животных-дихроматов и трихроматов со сформулированными в этой главе представлениями о том, на какую характеристику окраски должны в первую очередь опираться животные в поведении и каким образом эта характеристика могла бы вычисляться в их зрительной системе. Пока прямые поведенческие опыты, направленные на проверку гипотезы о том, используют ли животные для узнавания предметов вычисленную именно таким способом светлоту их окраски, поставлены не были. Однако среди имеющих экспериментальных данных существуют некоторые косвенные подтверждения этой гипотезы, что может служить поводом к постановке целенаправленных опытов.

В морфологических и электрофизиологических исследованиях могут быть обнаружены те или иные "детали" (или целые "блоки"), необходимые для построения нашего алгоритма вычисления светлоты. Конечно, сам факт их существования еще не может служить подтвержде-

нием того, что этот алгоритм реализуется на самом деле. Те же детали могут использоваться и для совершенно других зрительных механизмов. Но такие сведения могут быть полезны при экспериментальных исследованиях механизма вычисления светлоты.

Из поведенческих работ отметим здесь только работу П. Силвер [179], которая, измеряя поведенческую кривую видности методом мелькающей фотометрии у серой белки, обнаружила достоверный провал этой кривой в синей части спектра, что заставляет предположить антагонистическое взаимодействие цветовых каналов. Как уже говорилось, возможность отрицательного вклада одного из приемников в кривую видности является отличительной чертой нашего алгоритма.

Электрофизиологических и морфологических работ, направленных на исследование устройства зрительной системы животных-дихроматов, известно больше. В частности, следующие два факта можно считать указанием на то, что зрительная система этих животных содержит детали, необходимые для нашего алгоритма. Так, во-первых, у всех этих животных (в том числе у суслика [150], бурундука [184], рыб-дихроматов [20, 21, 164]) отмечается наличие в зрительной системе оппозитного взаимодействия сигналов от разных светочувствительных приемников, уже на ранних этапах обработки информации о цвете формирующего сигнал о цветности излучения [80]. Как уже говорилось, в нашем алгоритме цветность освещения — существенный параметр для вычисления светлоты.

Второй факт касается устройства тех нейронных звеньев зрительной системы, которые осуществляют введение поправки на освещение в механизмах константности цветовосприятия. Так, нами было показано, что у рыб горизонтальные клетки сетчатки, осуществляющие латеральные связи между колбочками, служат тем первым этапом, на уровне которого уже вводится некоторая поправка на освещение [19,138]. А наши морфологические исследования сетчатки ставриды показали, что при наличии всего двух фотопических приемников у нее имеется три канала латеральной передачи информации — три типа колбочковых горизонтальных клеток, связывающих колбочки друг с другом. Причем два из них имеют специфические связи — каждый со своим типом колбочек, а третий тип горизонтальных клеток получает сигналы от того и от другого фототипических приемников. Такое устройство первого этапа обработки информации о цвете хорошо укладывается в нашу схему введения поправки на освещение при вычислении светлоты: специфические каналы (в соответствии с традиционными представлениями о способах введения поправки на освещение на уровне горизонтальных клеток у рыб [18]) осуществляют поканальную адаптацию, а горизонтальные клетки, связанные с двумя типами колбочек, на основании сигналов о цветности освещения могут управлять относительным вкладом отдельных цветовых каналов в суммарный выходной сигнал.

Конечно, механизмы вычисления цветности излучения и большое число каналов латерального взаимодействия нужны не только для нашего алгоритма вычисления светлоты. Так, например, уже в пределах простого зонального приближения, когда не возникает проблем, свя-

занных с метамеризмом окрасок, некоторое изменение постановки задачи константности в сторону усложнения воспринимаемой зрительной ситуации (по сравнению с рассматривавшимся здесь случаем однородного освещения окрашенных поверхностей в прозрачной среде) приводит к моделям, использующим похожие механизмы переработки сигналов о цвете. Во-первых, вычисление отношения координат X_2/X_1 цвета излучения (оппонентное взаимодействие сигналов) оказывается необходимым этапом в задаче узнавания объемных предметов, когда наряду с поправкой на цвет освещения требуется вводить поправку также на ориентацию элементов поверхности по отношению к источнику [17]. Во-вторых, для рыб задача константности восприятия цвета предметов в мутной среде требует не только введения поправки на характер освещения, но и учета рассеивающих и поглощающих свойств среды [16]. Для введения всех этих поправок нужно много каналов латерального взаимодействия. Это, в частности, может объяснить тот факт, что у некоторых рыб количество типов горизонтальных клеток превышает количество типов колбочек.

Что касается животных-трихроматов, то в тех формах поведения, которые действительно требуют точного определения окраски предметов для их узнавания, зрительная система, вероятно, вообще может обходиться без вычисления светлоты окраски. Действительно, в дихроматическом случае точная оценка светлоты существенна для узнавания предметов по их окраске, поскольку там только этот параметр окраски не претерпевает изменений при вариациях спектрального состава освещения. Как будет показано в следующем разделе, трихроматический случай отличается, с одной стороны, тем, что выбор оптимальной ориентации оси светлоты здесь не так важен, а с другой стороны, тем, что устройство алгоритма вычисления светлоты получается гораздо более громоздким.

Животные-трихроматы чаще дихроматов служили объектом поведенческих экспериментов [60, 206]. Здесь можно найти работы, результаты которых если не противоречат нашему алгоритму вычисления светлоты, то по крайней мере говорят о том, что у некоторых животных-трихроматов существуют такие формы поведения, в которых эти животные определяют светлоту поверхности по-иному. В качестве примера приведем здесь наши опыты с поведением затаивания зеленых жаб. Эта форма поведения проявляется в том, что жабы, будучи посажены в замкнутое пространство — камеру, стремятся к темным пятнам (стимулам), размещенным на светлом фоне стен на уровне пола, и затаиваются у них. Если в камере поместить два стимула разной светлоты, то жабы обычно предпочитают более темный. Результаты экспериментов, проведенных с разнообразными цветными стимулами и в разных условиях освещения, позволили выяснить механизм вычисления светлоты и, в частности, определить вклад каждого из светочувствительных приемников жабы. Оказалось, что соответствующая кривая видности определяется при этом целиком одним красночувствительным приемником и не меняется при изменении освещения от света голубого неба до излучения лампы накаливания.

Двумерные области метамерных окрасок в трихроматическом случае

Рассмотрим сначала вариант, когда в трихроматическом случае накладывается одно условие вида (4.1) и области метамерных окрасок представляют собой плоские (двумерные) фигуры, расположенные в трехмерном пространстве. В этом случае последовательность рассуждений, аналогичная той, которая была проведена в дихроматическом случае, приводит нас к формулированию семейства источников освещения, спектры которых описываются выражением

$$S(\lambda) = H(\lambda) / \sum_i a_i \bar{x}_i, \quad i=1,2,3. \quad (4.10)$$

При переходе от одного источника освещения из этого семейства к другому отдельные точки цветового пространства преобразуются в области метамерных окрасок, представляющие собой плоские фигуры, ограниченные некоторым замкнутым выпуклым контуром. Рассмотрим, цвета каких окрасок образуют этот контур. Для этого сначала вернемся к дихроматическому случаю и разберем аналогичный вопрос. Там переход от произвольных спектров освещения к спектрам, связанным соотношением (4.2), приводит к тому, что области метамерных окрасок слипаются в линейные отрезки. Цвета всех трехступенчатых окрасок, образующие границы, областей метамерных окрасок, при этом переходят во внутренние точки этого отрезка, а на его концы попадают вершины области метамерных окрасок, соответствующие цветам двухступенчатых окрасок. Аналогично в трихроматическом случае области метамерных окрасок, представляющие собой в общем случае объемные тела, будут сплющиваться в плоские (двумерные) фигуры. Причем цвета 5-ступенчатых окрасок, образующие поверхность областей метамерных окрасок, перейдут во внутренние точки этой плоской фигуры, а в ее границу перейдут ребра области метамерных окрасок, образованные цветами 4-ступенчатых окрасок.

Для иллюстрации трихроматического случая нами были выбраны кривые спектральной чувствительности приемников, по положению максимума совпадающие с приемниками лягушки, а в качестве спектра исходного освещения — та же функция, аппроксимирующая свет утреннего солнца, что и для предыдущих иллюстраций. Спектр второго, синего источника освещения был выбран таким, чтобы удовлетворять введенным ограничениям на источники. Эти спектры приемников и источников приведены на рис. 39.

Для каждого из источников значения коэффициентов v_i в формуле (4.10), описывающей их спектр, определяют направление оси светлоты в цветовом пространстве, а уровни равной светлоты (плоскости, перпендикулярной этой оси) дают плоские сечения соответствующего цветового тела. При переходе от одного освещения к другому все точки такой плоскости преобразуются в точки аналогичной плоскости. При этом точкам, лежащим на границе цветового тела при одном освещении, при другом освещении соответствуют точки, также лежащие на границе, а равные им по светлоте цвета, лежащие внутри цветового тела, переходят в плоские области метамерных окрасок, лежащие в той же плоскости.

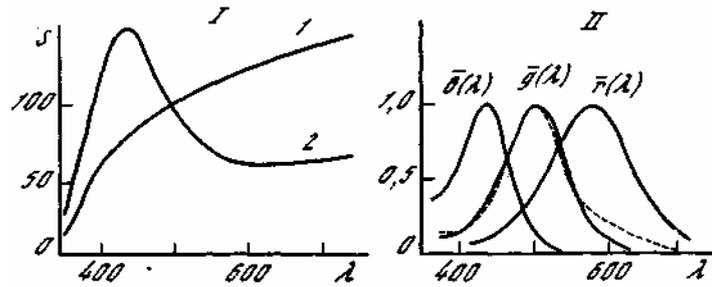


Рис. 39. Примеры спектров освещения из семейства допустимых источников для системы цветового зрения лягушки, дающих плоские области метамерных окрасок (I), и аппроксимации кривых спектральной чувствительности приемников лягушки (II) (штриховая линия — кривая спектральной чувствительности зеленочувствительного приемника, при которой возможны прямолинейные области метамерных окрасок)

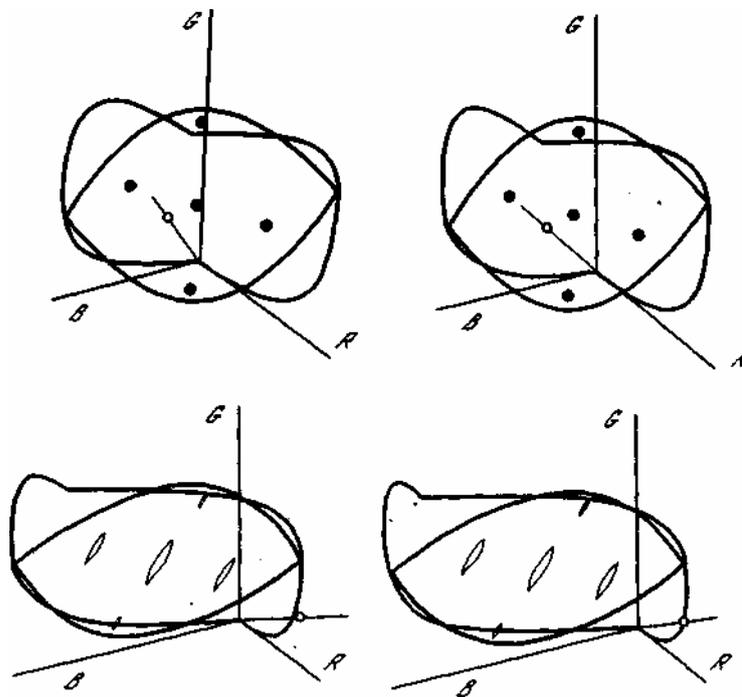


Рис. 40. Стереопары для цветных тел и областей метамерных окрасок в них, соответствующих исходному солнечному освещению (вверху) и более синему освещению (внизу) для системы цветового зрения лягушки

В цветовом пространстве с координатами R , G , B нанесены ребра цветного тела, линия оптимальных цветов равной светлоты, а также пять цветов равной светлоты (вверху) и соответствующие им области метамерных окрасок (внизу)

Были рассчитаны такие преобразования цветов в трехмерном цветовом пространстве только для одного уровня светлоты, равного 0,5. Соответствующее сечение плоскостью равной светлоты проходит через центр цветового тела. Геометрическое место цветов двухступенчатых окрасок, имеющих такую светлоту при исходном освещении, представляет собой в цветовом пространстве замкнутую линию, соответствующую пересечению поверхности цветового тела плоскостью равной светлоты. Затем было рассчитано положение цветов этих же окрасок в цветовом пространстве при другом освещении. Кроме того, внутри этого контура в плоскости равной светлоты было выбрано 5 разных точек, для которых найдены границы областей метамерных окрасок после изменения освещения. На рис. 40 приведено положение в трехмерном цветовом пространстве контура оптимальных цветов и пяти выбранных цветов в плоскости равной светлоты при исходном освещении (вверху) и соответствующие им фигуры, полученные при переходе к другому освещению (внизу). Для наглядности здесь нанесены также ребра цветовых тел и ориентация оси светлоты для каждого из источников — отрезок, идущий из начала координат и перпендикулярный плоскости равной светлоты. Как можно видеть, оптимальные цвета на границе цветового тела, а также области метамерных окрасок, соответствующие равным по светлоте цветам при исходном освещении, после изменения освещения также оказались лежащими все в одной плоскости (перпендикулярной новому направлению оси светлоты).

Обратим внимание также на следующую особенность формы областей метамерных окрасок на рис. 40. Спектр второго источника освещения (кривая 2 на рис. 39, I) подбирался так, чтобы области метамерных окрасок в трехмерном цветовом пространстве превратились в плоские фигуры. Но в результате они оказались не только плоскими, но и очень узкими. Как будет показано в следующем разделе, такая форма областей метамерных окрасок обусловлена видом и взаимным расположением кривых спектральной чувствительности приемников лягушки.

Оценка светлоты в трихроматическом случае

Семейство допустимых источников (4.10) для трихроматического случая трехпараметрично (спектр освещения определяется тремя параметрами a_1 , a_2 и a_3), и, таким образом, как и в дихроматическом случае, спектр каждого источника однозначно характеризуется его цветом. Коэффициенты a_i являются компонентами вектора яркостной оси в трехмерном цветовом пространстве. Поскольку каждый из этих коэффициентов сложным и нелинейным способом зависит от всех трех координат X_i^0 цвета источника, формулу для оценки светлоты окраски

$$l = \sum a_i X_i / \sum a_i X_i^0$$

удобнее переписать в виде, аналогичном (4.9):

$$l = \sum q_i X_i / X_i^0.$$

где $\sum q_i = 1$, каждое q_i является функцией только цветности освещения. В трихроматическом случае цветность излучения есть характеристика двумерная (ее можно задавать, например, парой отношений: X_2/X_1 и X_3/X_2). Поэтому такой алгоритм вычисления светлоты для трихроматического случая получается довольно громоздким.

Как было показано в гл. 3, относительные размеры областей метамерных окрасок в трихроматическом случае существенно меньше, чем в дихроматическом. Там мы это показали, сопоставляя системы цветового зрения трихромата и дейтеранопа, имеющие общие красночувствительный и синечувствительный приемники. Для совершенно разных дихроматической и трихроматической систем зрения наглядное представление о величине этих различий может дать сравнение относительных линейных размеров областей метамерных окрасок, подсчитанных для животного-трихромата (рис. 40) с их размерами для дихромата (например, суслика) при аналогичных условиях освещения — колонка D_1 на рис. 27. Меньшие относительные размеры областей метамерных окрасок означают, что животные-трихроматы могут узнавать цвета окрашенных поверхностей при изменении освещения с большей точностью. Вследствие этого для них проблема выбора такой цветовой координаты, вдоль которой ошибки в вычислении значения цвета будут минимальны, — менее актуальна. И без этого, используя какие-то существенно более простые (и, может быть, даже менее точные) алгоритмы введения поправки на освещение, в трихроматическом случае можно обеспечить узнавание по цвету большого числа разнообразных окрасок, не путая их друг с другом при изменении освещения.

Таким образом, если в дихроматическом случае переход к меняющимся в зависимости от цвета освещения координатам светлоты был совершенно необходим для правильного узнавания окрасок, а алгоритм, вычисляющий характеристику окраски по этой координате, был сравнительно простым, то в трихроматическом случае переход к таким цветовым координатам менее существен, а соответствующий алгоритм, как было показано выше, оказывается более громоздким. Возможно, что по этим причинам у животных-трихроматов, такие механизмы вычисления светлоты окраски вообще не выработались. Исключение составляет зрительная система человека, отличающаяся специфическим взаимным расположением кривых спектральной чувствительности. Этот случай рассмотрим ниже.

Одномерные области метамерных окрасок

Разобранные до сих пор случаи, когда спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников связаны одним условием типа (4.1) и когда вследствие этого размерность областей метамерных окрасок была на единицу меньше размерности цветового зрения, позволяли вычислять некоторую константную одномерную характеристику окраски поверхностей. Соответствующая ось в цветовом пространстве выбиралась в направлении, перпендикулярном к этим областям метамерных окрасок. Вариант областей метамерных окрасок

еще меньшей размерности дает заманчивую возможность получать сразу несколько разных константных характеристик окраски. Действительно, так как в проекции цветов на r -мерную гиперплоскость, перпендикулярную к $(n - r)$ -мерным областям метамерных окрасок, метамеризм окрасок не будет сказываться, при $r > 1$ это позволит безошибочно узнавать окраски не только по светлоте, но и по цвету.

В случае трихроматического зрения для этого необходимо, чтобы области метамерных окрасок в цветовом пространстве представляли собой отрезки линий. Ориентация таких отрезков и соответственно перпендикулярной им плоскости будет зависеть от освещения. Поэтому для вычисления константных оценок окраски поверхности при каждом варианте освещения зрительная система должна уметь находить ориентацию этой плоскости — подстраиваться под действующее освещение. Таким образом, аналогично тому, как в дихроматическом случае, используя ограничения на источники освещения и специальный вид адаптации к цвету действующего освещения, удалось с помощью двух приемников построить систему ахроматического (одномерного) зрения, нечувствительную к изменениям освещения, так и в трихроматическом случае можно надеяться с помощью трех приемников построить аналогичную адаптивную систему двумерного цветового зрения. Работа такой дихроматической системы описывалась в терминах кривой видности, адаптирующейся к условиям освещения. Аналогично трихроматическую систему будут характеризовать два "адаптирующихся приемника", кривые спектральной чувствительности каждого из которых представляют собой разные (при разных освещенностях) линейные комбинации кривых спектральной чувствительности трех приемников данной системы цветового зрения.

Точное знание двух цветовых характеристик окраски поверхности особенно важно в задачах константного восприятия цвета объемных предметов [17] и узнавания объемной формы цветных предметов [15], освещенных одновременно двумя источниками разного спектрального состава (например, солнцем и небом). Ранее эти задачи удалось решить только в зональном приближении, когда нет проблемы метамеризма окраски (см. также [27, 105, 106, 123]). Переход к произвольным спектральным коэффициентам отражения создает серьезные трудности в разделении вкладов окраски и каждого из источников в цвет излучения, отраженного от поверхности. Выход из этого положения может быть найден в использовании таких приемников, форма кривых спектральной чувствительности которых может адаптироваться к условиям освещения. Это позволит при каждом освещении определять в цветовом пространстве такие направления цветовых координат, по которым возможно точное узнавание окраски. Как будет показано ниже, такое возможно ценой введения некоторых ограничений как на множество спектров источников, так и на форму самих кривых спектральной чувствительности приемников.

Для того чтобы в трехмерном цветовом пространстве получить одномерные области метамерных окрасок, в условии (4.1), связывающем спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников, нужно положить r равным 2. В результате это условие

сводится к двум соотношениям следующего вида:

$$\begin{aligned}\sum_i a_{11i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) &= \sum_i a_{12i} S_2(\lambda) \bar{x}_i(\lambda), \\ \sum_i a_{21i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) &= \sum_i a_{22i} S_2(\lambda) \bar{x}_i(\lambda),\end{aligned}$$

которые должны выполняться одновременно.

Рассмотрим подробнее, к каким ограничениям на конструкцию системы цветового зрения и многообразию источников приводят эти ограничения. Во-первых, поделив эти соотношения одно на другое, можно избавиться от спектров источников и получить соотношение, связывающее между собой только кривые спектральной чувствительности трех приемников;

$$\sum_i a_{11i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) / \sum_i a_{21i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) = \sum_i a_{12i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) / \sum_i a_{22i} S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda)$$

После приведения к общему знаменателю это условие сводится к требованию равенства нулю некоторой квадратичной формы от кривых спектральной чувствительности $\bar{x}_i(\lambda)$:

$$A\bar{x}_1^2 + B\bar{x}_2^2 + C\bar{x}_3^2 + 2D\bar{x}_1\bar{x}_2 + 2E\bar{x}_1\bar{x}_3 + 2F\bar{x}_2\bar{x}_3 = 0 \quad (4.11)$$

коэффициенты которой выражаются через параметры a_{kji} .

Когда речь идет о построении технических систем, для которых наличие цветового зрения и специальное цветовое освещение должны облегчать анализ объемных сцен, то ограничения (4.11) определяют, какими для этого должны быть выбраны кривые спектральной чувствительности трех ее приемников. Что же касается устройства реальных зрительных систем, то пока не совсем ясно, какое отношение имеет развитая в этом разделе теория к зрению животных-трихроматов. Похоже, что здесь главным препятствием в ее приложении служит условие функциональной зависимости между кривыми спектральной чувствительности приемников. До сих пор представлялось, что наборы светочувствительных приемников животных-трихроматов произвольны и не связаны никакими ограничениями. В частности, приемники человека совершенно достоверно не удовлетворяют условию (4,11). Однако у некоторых животных отклонения формы кривых спектральной чувствительности приемников от требований этой теории могут быть незначительными. По-видимому, так обстоит дело с лягушкой. Подтверждением этому может служить вытянутая, почти "палочковидная" форма областей метамерных окрасок на рис. 40. На рис. 39, II пунктирной линией нанесена теоретическая кривая спектральной чувствительности, которая вместе с кривыми $\bar{r}(\lambda)$ и $b(\lambda)$ обеспечивала бы для таких источников освещения одномерные области метамерных окрасок. Как видно, пунктирная кривая мало отличается от кривой зеленочувствительного приемника лягушки.

Другая трудность в приложении этой теории к реальным зрительным системам состоит в сильных ограничениях на спектры источников. Описанные принципы переработки информации о цвете могут использоваться зрительными системами только тех животных-трихроматов, которые живут в не слишком разнообразной световой

обстановке. Не будем здесь выписывать громоздкие выражения для спектров теоретических источников, при которых переход от одного освещения к другому дает одномерные области метамерных окрасок в трехмерном цветовом пространстве. Заметим только, что увеличение ограничений (по сравнению с рассмотренным ранее случаем плоских областей метамерных окрасок в трехмерном цветовом пространстве) снижает число произвольных параметров, задающих спектр освещения, до двух. Вследствие этого класс допустимых источников оказывается ограниченным не только по спектру, но и по цвету: цвета возможных источников занимают двумерное подпространство трехмерного цветового пространства.

Таким образом, по типу ограничений на спектры освещения разобранный здесь трихроматический случай напоминает вариант вычисления светлоты окраски в дихроматическом случае, для которого требовалось также двухпараметрическое многообразие спектров освещения. Однако в таком мире источников трехмерное цветовое зрение дает ряд преимуществ. Во-первых, оно позволяет при таких освещениях узнавать окраски по двум разным цветовым характеристикам, а не только по светлоте. Во-вторых, при трихроматическом зрении имеется возможность по цвету освещения определить, принадлежит ли оно к семейству допустимых источников — попадает ли цвет данного освещения на двумерную плоскость допустимых цветов источников. В результате цвет освещения может служить критерием применимости соответствующих алгоритмов константности, когда среди естественных источников попадаются и такие, которые не удовлетворяют этому условию. В дихроматическом случае цвет освещения использовался для вычисления светлоты окрасок, но только по цвету освещения нельзя было отличить те источники, при которых такая оценка заведомо не имеет смысла.

Случай цветового зрения человека

В повседневной жизни светлота является для нас одним из параметров, с помощью которого мы характеризуем окраску предметов, когда одни предметы называем светлыми, другие — темными. Светлота как психофизическая характеристика окраски, а также яркость как соответствующая характеристика излучения исследовались довольно подробно (в первую очередь для чисто прикладных нужд светотехники). В результате сейчас мы хорошо знаем, как ориентирована ось светлоты в цветовом пространстве по крайней мере в условиях стандартного дневного освещения. При этом, однако, совершенно не ясно, почему и для чего ось светлоты направлена именно так, а не иначе. В частности, почему светлота определяется в основном возбуждениями красночувствительного и зеленочувствительного приемников, а возбуждение синечувствительного на светлоте почти не называется?

Представления о светлоте, сформулированные в этой главе, появились совершенно из других посылок. Здесь мы искали такую координату в цветовом пространстве, на которой метамеризм окрасок

почти не сказывается. Эта цветовая координата была названа нами также осью светлоты. Посмотрим теперь, насколько наша светлота как константная характеристика окраски согласуется с той светлотой, которую приписывает окраскам человек.

Несколько прикидочных расчетов формы трехмерных областей метамерных окрасок в цветовом пространстве человека, проведенных для разных (случайно выбранных) спектров освещения, показали, что эти области представляют собой тонкие (толщина составляет менее 10% от их размера в максимальном измерении), "блинообразные" тела, ориентированные в цветовом пространстве вдоль синей координаты. Следовательно, оптимальное направление оси светлоты, перпендикулярной к этим областям метамерных окрасок, должно лежать почти в плоскости RG . Такая ориентация оси светлоты означает, что в этих случаях синечувствительный приемник почти не дает вклада в оценку светлоты, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными [120] относительно цветового зрения человека.

Покажем, что такая уплощенная форма областей метамерных окрасок и их ориентация вдоль синей цветовой координаты, получившиеся для некоторых вариантов освещения, не случайны, а являются следствием взаимного расположения кривых спектральной чувствительности приемников человека (рис. 2, I). Основная причина этого — в сильном перекрытии кривых $\bar{r}(\lambda)$ и $\bar{g}(\lambda)$ и изолированном расположении на спектральной оси кривой $\bar{b}(\lambda)$. Если бы синечувствительный приемник вообще не перекрывался с длинноволновыми приемниками, то для исследования такого вырожденного случая совершенно не обязательно было бы рассматривать все три цветковые координаты в совокупности. Любые закономерности преобразования метамерных цветов, справедливые для системы цветового зрения такого трихромата, могут быть получены путем независимого анализа ахроматической системы колбочкового монохромата (с единственным коротковолновым приемником) и дихроматической системы тританопа (имеющей два длинноволновых приемника). В частности, области метамерных окрасок в трехмерном цветовом пространстве, соответствующие переходу от одного освещения к другому, могут быть представлены в виде геометрического произведения соответствующих одномерных областей для такого монохромата и двумерных областей для тританопа для тех же изменений освещения. Фактически это означает, что области метамерных окрасок для такого трихромата представляют собой цилиндрические тела с образующей, параллельной оси B .

Рассмотрим теперь подробнее, какую форму будут иметь области метамерных окрасок при естественных изменениях освещения. В синем конце спектра, в области чувствительности коротковолнового приемника, относительные распределения спектральной интенсивности естественных источников освещения очень разнообразны (см. рис. 8). Такие изменения спектров освещения, как правило, будут приводить к существенному расхождению значений синей координаты цветов метамерных окрасок. Это определяет высоту цилиндров — областей

метамерных окрасок. Направляющими этих цилиндров служат двумерные области метамерных окрасок для тританопа (в проекции на координатную плоскость RG), форма которых определяется изменениями спектрального состава освещения в длинноволновом конце спектра. Как видно на примере других дихроматических систем с сильно перекрывающимися кривыми спектральной чувствительности, изменения освещения в естественных пределах приводят к узким, вытянутым областям метамерных окрасок, ориентированным поперек соответствующего цветового тела. Узкими, ланцетовидными они будут и для тританопа. Таким образом, для такой трихроматической системы с отдельно отстоящим синечувствительным приемником области метамерных окрасок будут иметь форму тонких цилиндрических тел, ориентированных вдоль синей координатной оси. При изменении освещения меньше всего будут изменяться цвета метамерных окрасок в направлении, поперечном к этим областям. Соответствующая цветовая координата будет лежать в плоскости RG .

В реальной системе цветового зрения человека синечувствительный приемник слегка перекрывается с длинноволновыми приемниками, и поэтому области метамерных окрасок занимают не весь объем цилиндров, а получаются слегка скошенными в углах. Это может привести к тому, что оптимальное направление оси яркости для нормального трихромата слегка отклонится от плоскости RG — синечувствительный приемник будет вносить малый вклад в кривую видности.

Итак, тот факт, что в зрительной системе человека ось светлоты ориентирована в том направлении, которое по теории необходимо для вычисления наиболее константной характеристики окраски поверхности — ее светлоты, может служить экспериментальным подтверждением правильности развиваемых здесь взглядов. Конечно, как мы знаем по собственному опыту, зрительная система человека оценивает окраски не только по их светлоте. Однако при изменении спектра освещения светлота меняется меньше всего, поэтому она оказывается существенным для узнавания параметром окраски.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ЦВЕТОВ

**Расширенная зональная модель
с перекрывающимися приемниками**

Разобранные в гл. 3 примеры преобразований цветов окрасок, происходящих вследствие изменения освещения, показали, что наряду с расплыванием цветов в целые метамерные области в некоторых случаях наблюдается существенное взаимное смещение этих областей друг относительно друга. Если отвлечься от неоднозначности этого преобразования, то такое смещение областей метамерных окрасок можно интерпретировать как преобразования (перекосы) координатной сетки, которые не сводятся к покоординатному изменению масштаба. В этом случае введение поканальной поправки на цвет освещения по фон Крису уже не может обеспечить достаточно точного узнавания окраски. Поэтому здесь должны быть использованы более сложные алгоритмы константности цветовосприятия, учитывающие перекосы координатной сетки. В данной главе проанализируем эти особенности преобразования цветовых координат при изменении освещения детальнее и исследуем, какими параметрами освещений они определяются.

Впервые необходимость учета перекосов координатной сетки была показана при рассмотрении такой модификации зональной модели цветового зрения, в которой допускалось перекрытие кривых спектральной чувствительности приемников [37]. Зональная модель цветового зрения удобна тем, что там нет проблемы метамеризма — при переходе от одного освещения к другому точки цветового пространства преобразуются в точки. Поэтому, прежде чем рассматривать общий случай, разберем, как преобразуются цвета при изменении освещения в таком расширенном варианте зональной модели.

В зональной модели цветового зрения, описанной в гл. 1, предполагалось, что каждый из приемников обладает определенной чувствительностью только в пределах своей зоны, т.е. чувствительность \bar{x}_{ij} i -го приемника в j -й зоне спектра равна 0 при $i \neq j$. На этом языке предположение о перекрытии кривых спектральной чувствительности приемников означает неравенство нулю перекрестных членов \bar{x}_{ij} . Тогда в выражении (1.2) для цвета X некоторой окраски, задаваемой коэффициентами отражения ρ_j в каждой из зон спектра, при некотором освещении, интенсивность которого в каждой из зон задается величинами S_j , интегралы заменяются суммами:

$$X_i = \sum_j S_j \rho_j \bar{x}_{ij} \tag{5.1}$$

Цветовое тело при этом приобретает форму косоугольного параллелепипеда, 2^n вершин которого задаются цветами всевозможных окрасок, у которых коэффициенты отражения ρ_j принимают значения только 0 или 1 в каждой из зон спектра.

Рассмотрим теперь, как будут преобразовываться точки цветового пространства, соответствующие одним и тем же окраскам, при переходе от одного освещения (с составом $S_{1j}, j = 1, 2, \dots, n$) к другому (с составом $S_{2j}, j = 1, 2, \dots, n$), т.е. найдем, как связаны между собой цветовые координаты X_{1i} и X_{2i} окрасок при одном и при другом освещении. Для этого, поскольку речь идет о цветах одной и той же окраски, нужно из выражений вида (5.1) для ее цвета X_1 при исходном освещении S_{1j} определить значения коэффициента отражения, решив их как систему уравнений относительно ρ_j и подставить эти значения в аналогичную систему уравнений, написанную для второго источника. Пусть

$$\|\xi_{ij}\| = \|\bar{x}_{ij}\|^{-1}$$

тогда выражение для коэффициентов отражения ρ_j некоторой окраски через ее цвет при исходном освещении будет иметь вид

$$\rho_j = (\sum_i \xi_{ij} x_{1i}) / S_{1j}$$

и, следовательно, цвет X_2 этой окраски при другом освещении будет выражаться через ее цвет X_1 при исходном освещении следующим образом:

$$X_{2k} = \sum_{ij} \bar{x}_{kj} \xi_{ij} X_{1i} S_{2j} / S_{1j}. \quad (5.2)$$

Геометрический смысл такого преобразования цветов (точек цветового пространства) можно понять из сопоставления с зональной моделью, где светочувствительные приемники не перекрываются. Там при переходе к другому освещению преобразование цветового пространства сводилось к простому изменению масштаба осей, соответствующих каждому из светочувствительных приемников или (что в пределах этой модели то же самое) каждой из зон спектра. В расширенной зональной модели с перекрывающимися приемниками аналогичное преобразование масштаба нужно производить в косоугольной системе координат, определенной не приемниками, а именно зонами спектра.

Пример преобразования цветового пространства для зональной модели двумерного цветового зрения с перекрывающимися приемниками показан на рис. 41. В правой части рисунка (III) приведены кривые спектральной чувствительности приемников и распределения интенсивностей двух источников. Цветовые тела для этих источников приведены слева. Внутри цветового тела, соответствующего исходному освещению (I), нанесена координатная сетка, а на рис. 41, II показано, как она преобразуется при изменении освещения. Из рисунка видно, что направления сторон косоугольного цветового тела после перехода к другому освещению остались неизменными, но при этом цветовое тело подверглось сжатию вдоль одной из сторон (соответствующей красной зоне спектра) и растяжению по другой, что привело к перекосу координатной сетки внутри цветового тела.

Перечислим основные свойства полученного нами преобразования цветов окрашенных поверхностей при изменении освещения в расши-

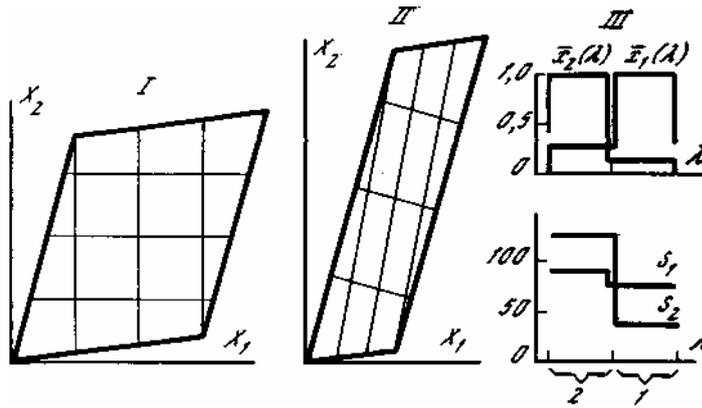


Рис. 41. Преобразования цветов при изменении освещения для случая зональной модели цветового зрения с перекрывающимися приемниками

I, II — цветовые тела с нанесенной внутри них координатной сеткой для вариантов освещения S_1 и S_2 ; III — кривые спектральной чувствительности приемников и спектры источников

ренной зональной модели цветового зрения. Во-первых, как видно из формулы (5.2), это преобразование является линейным. Во-вторых, его можно представить в виде последовательности трех преобразований — соответственно порядку приведенного выше вывода формулы (5.2). Сначала нужно перейти от системы координат основных физиологических цветов (т.е. от цветовых координат, определяемых приемниками) к системе координат, связанной с зонами спектра. Это преобразование задается матрицей $\|\zeta_{ij}\|$. Заметим, что в рамках такой модели такой переход к новой системе координат определяется только характером кривых спектральной чувствительности приемников и не зависит от освещения. Затем в новых координатах производится покоординатное изменение масштаба каждой из осей соответственно изменению интенсивности освещения в данной зоне спектра. После чего производится обратный переход к системе координат основных физиологических цветов (с матрицей преобразования $\|\bar{x}_{ij}\|$), который также не зависит от освещения. В-третьих, поскольку в зональной модели спектр освещения однозначно связан с его цветом, то и преобразования координат при изменении освещения также зависят только от его цвета и могут быть учтены при введении поправки на освещение для правильного узнавания окрасок.

Незональный случай. Линейное приближение

Перейдем теперь к рассмотрению общего случая, когда спектры источников и кривые спектральной чувствительности приемников представляют собой произвольные функции длины волны. Отличительная особенность линейного преобразования состоит в том, что оно прямую переводит в прямую. С этой точки зрения стоит посмотреть

на расположение областей метамерных окрасок, соответствующих цветам, лежащим на той или иной прямой при исходном освещении. Именно для таких групп точек рассчитывались области метамерных окрасок для иллюстраций к предыдущей главе. Как можно видеть из сравнения их с рис. 41, в общем случае перекосы координатной сетки в довольно большой центральной части цветового тела близки к линейному преобразованию. По крайней мере, в качестве первого приближения можно попытаться представить преобразование цветов внутренней части цветового тела в таком же линейном виде, как оно было найдено для расширенной зональной модели. Конечно, вблизи границы цветового тела возможны отклонения от линейности. Такие отклонения видны уже на рис. 25, где почти все цвета, расположенные на горизонтальной прямой при дневном освещении (I), после перехода к освещению лампой накаливания (II) превращаются в области метамерных окрасок, расположенные также по горизонтали, за исключением точек, лежащих на поверхности цветового тела, и ближайших к ним цветов. Аналогично на рис. 27, II положение двух маленьких областей метамерных окрасок, соответствующих цветам, близко расположенным к поверхности цветового тела, слегка отклоняется от узлов регулярной косоугольной прямолинейной решетки, образованной центрами остальных областей метамерных окрасок.

Вывод о том, что преобразование цветов, лежащих на поверхности цветового тела, не укладывается в рамки чисто линейного преобразования, может быть получен и из общих соображений. Действительно, как показано в гл. 2, разным спектрам освещения всегда соответствует разное расположение цветов оптимальных окрасок на поверхности цветового тела. В то же время многообразие линейных преобразований существенно беднее. Каждое линейное преобразование определяется ограниченным числом параметров — не более чем $n(n + 1)$ параметрами (n^2 элементов матрицы этого преобразования и n свободных членов). Это больше, чем просто цвет освещения (n параметров), но меньше, чем многообразие спектров освещения — произвольных функций длины волны. Однако отклонения от линейности вблизи поверхности цветового тела не должны нас беспокоить, так как в эту область попадают в основном цвета нереальных или редко встречающихся окрасок с довольно крутыми перепадами спектрального коэффициента отражения по спектру. В первую очередь нас интересует именно внутренняя часть цветового тела. Поэтому в дальнейшем будем искать преобразование цветовых координат для центральной части цветового тела в линейном приближении и определим, каким образом и от каких параметров освещения и окрасок это преобразование зависит.

Для того чтобы отвлечься от неоднозначности преобразования вследствие метамеризма, можно считать, что образом некоторой точки цветового пространства при одном освещении после изменения освещения будет не вся область метамерных окрасок, в которую переходит эта точка, а только ее "центр тяжести" — каким-то способом усредненный цвет метамерных окрасок. Конечно, в выборе

центра тяжести имеется некоторый произвол. Соответственно от того, как мы будем производить усреднение, будет зависеть вид преобразований цветковых координат. По-видимому, наилучшими были бы центры тяжести цветов метамерных окрасок, вычисленные с учетом частоты встречаемости (и значимости) каждой из окрасок в среде обитания данного животного. Тогда можно было бы сформулировать необходимый для более или менее правильного узнавания окраски поверхностей учет преобразования цветового пространства, лучше всего соответствующий среде обитания и образу жизни данного животного. Пока это совершенно неразрешимая экспериментально задача.

Однако точность выбора центров тяжести все-таки не очень критична, так как некоторые ошибки в узнавании окрасок вследствие метамеризма все равно неизбежны. И хорошим приближением к идеалу могут служить многие варианты достаточно разумного усреднения цветов метамерных окрасок. Более того, на первых порах, вероятно, имеет смысл разбирать общий случай, а не привязываться к конкретной среде обитания, образу жизни, поведения и т.д. какого-то определенного вида животных. Поэтому в качестве такого общего приближения рассмотрим вариант, предполагающий равную вероятность всех возможных спектральных коэффициентов отражения. Достоинством этого варианта является то, что для него уже разработан У. Стайлсом и Г. Вышецким [182] адекватный математический аппарат, позволяющий вычислять положение центра тяжести метамерного эллипсоида (см. гл. 3). Остается только обобщить эту теорию, в которой рассматривается только цветовое зрение человека, на случай произвольного n -мерного цветового зрения.

Следует заметить, что теория Стайлса и Вышецкого является только приближением и приложима для описания преобразования цветов именно в интересующей нас центральной части цветового тела. Более того, эта теория линейна. Согласно формуле, которую дают авторы в своей статье [182], координаты центров метамерных эллипсоидов, в которые переходят цвет окрасок при изменении освещения, линейно связаны с их цветовыми координатами при исходном освещении. К сожалению, У. Стайлс и Г. Вышецки, уделяя основное внимание вычислительной стороне вопроса, сделали свое изложение настолько громоздким и труднопонимаемым, что мы не можем здесь ему следовать. В то же время формула для центров метамерных эллипсоидов имеет другую, наглядную интерпретацию и соответственно более простой вывод.

Характеристические окраски

Итак, неоднозначное преобразование цветов поверхностей при изменении освещения, когда каждая точка цветового пространства переходит в целую область метамерных окрасок, мы хотим свести к однозначному преобразованию, выбрав в качестве образа исходной точки центр тяжести области метамерных окрасок (или центр мета-

мерного эллипсоида в приближении Стайлса и Вышецкого). Иными словами, каждому цвету \mathbf{X}_1 окраски со спектральным коэффициентом отражения $\rho(\lambda)$ при исходном освещении со спектральным составом $S_1(\lambda)$, где компоненты вектора \mathbf{X}_1 равны

$$X_{1i} = \int_0^{\infty} S_1(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.3)$$

после перехода к другому освещению со спектральным составом $S_2(\lambda)$ ставится в соответствие некоторый цвет, полученный усреднением всех цветов \mathbf{X}_2 окрасок с любым спектральным коэффициентом отражения $0 \leq \rho(\lambda) \leq 1$, имеющих тот же цвет (5.3) при исходном освещении:

$$X_{2i} = \int_0^{\infty} S_2(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Поскольку выражение для цвета окраски представляет собой линейный функционал от ее спектрального коэффициента отражения, процедуру усреднения цветов \mathbf{X}_2 метамерных окрасок можно заменить усреднением их спектральных коэффициентов отражения $\rho(\lambda)$. Это значит, что средний цвет метамерных окрасок равен цвету окраски с усредненным спектральным коэффициентом отражения. Тем самым, потребовав однозначности преобразования цветов поверхностей при изменении освещения, мы перешли от рассмотрения цветов произвольных окрасок к цветам окрасок, имеющих вполне определенные спектральные коэффициенты отражения. Легко убедиться, что эти окраски образуют n -параметрическое семейство. Спектральный коэффициент отражения каждой из этих окрасок однозначно определяется ее цветом при исходном освещении. Такой результат совершенно понятен: проблема метамеризма окрасок пропадает и преобразование цветов становится однозначным, если ограничиться именно n -параметрическим (где число параметров n равно размерности цветового зрения) семейством спектральных коэффициентов отражения окрасок.

Таким образом, задачу поиска закона преобразования цветовых координат при изменении освещения можно переформулировать следующим образом. Требуется найти такое n -параметрическое семейство окрасок, цвет которых при любом освещении совпадал бы с усредненным цветом метамерных окрасок. Эти окраски будем называть *характеристическими окрасками*. Спектральный коэффициент отражения характеристических окрасок может быть найден простым усреднением метамерных при исходном освещении окрасок.

Тогда, подставив выражения для спектрального коэффициента отражения $\rho_c(\lambda)$ характеристических окрасок в выражения для их цвета при том и другом освещении, можно будет найти закон преобразования цветовых координат при изменении освещения аналогично тому, как это было сделано для расширенной зональной модели цветового зрения, где многообразие окрасок уже исходно было n -параметрическим.

Прежде чем получить выражение для характеристической окраски,

разберем некоторые общие свойства ее спектрального коэффициента отражения, вытекающие из двух принятых нами особенностей этого преобразования координат: его линейности и симметричности относительно центра цветового тела. Из линейности преобразования естественно следует аддитивность характеристических окрасок: если у нас имеются две характеристические окраски со спектральными коэффициентами отражения $\rho_{c1}(\lambda)$ и $\rho_{c2}(\lambda)$, то любые их смеси путем усреднения тоже будут характеристическими. Далее, из линейности следует, что n параметров характеристической окраски могут быть выбраны так, чтобы ее спектральный коэффициент отражения линейно от них зависел. Из симметричности преобразования следует, что окраски, дополнительные к характеристическим, также будут характеристическими. Вследствие этого 50%-ная серая окраска, которая является дополнительной самой себе, будет характеристической. Отсюда получаем общее выражение для семейства характеристических окрасок:

$$\rho_c(\lambda) = 1/2 + \sum_{i=1}^n a_i f_i(\lambda), \quad (5.4)$$

где a_i — произвольные параметры, характеризующие окраску, а $f_i(\lambda)$ — фиксированные, но пока еще не определенные нами функции длины волны. Из общих соображений можно только сказать, что эти функции должны каким-то образом зависеть от спектра освещения $S_i(\lambda)$ и от кривых спектральной чувствительности $\bar{x}_i(\lambda)$, $i=1,2,\dots,n$.

Найдем теперь вид функции $f_i(\lambda)$. Выше мы уже формально определили аналитическую процедуру усреднения для вычисления спектрального коэффициента отражения характеристических окрасок. Однако изложение упростится, если воспользоваться языком геометрии и проводить такое усреднение в пространстве возможных спектральных коэффициентов отражения. Для этого вслед за У. Стайлсом и Г. Вышецким [182] разобьем весь спектральный интервал на большое число (M) малых интервалов (зон), в пределах которых значения $\rho(\lambda)$, а также всех прочих интересующих нас функций длины волны, будем считать постоянными. Рассмотрим M -мерное пространство спектральных коэффициентов отражения с координатами ρ_λ , задающими значение коэффициента отражения в соответствующем спектральном интервале. В этом пространстве каждому спектральному коэффициенту отражения соответствует точка. Предполагается, что в мире любые значения коэффициентов отражения $0 \leq \rho_\lambda \leq 1$ равновозможны. Это значит, что допустимые окраски равномерно распределены в пределах единичного M -мерного куба. Многообразие спектральных коэффициентов отражения характеристических окрасок, которые мы ищем в виде (5.4), в этом пространстве будет представлять собой n -мерную гиперплоскость, проходящую через центр этого M -мерного куба с координатами $(1/2, 1/2, \dots, 1/2)$. При этом M -мерные векторы $f_i(\lambda)$ задают базис этой гиперплоскости.

Множество спектральных коэффициентов отражения метамерных (при исходном освещении) окрасок определяется системой уравнений (5.3). Каждое из этих уравнений определяет ($M - 1$)-мерную

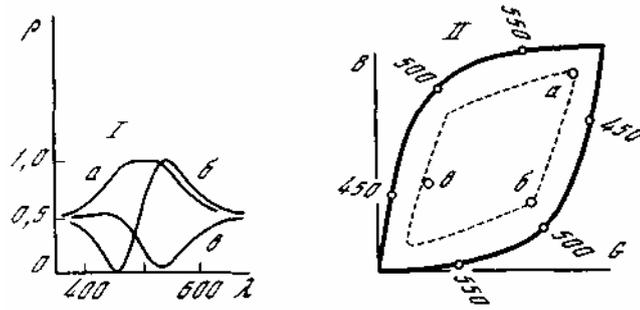


Рис. 42. Примеры спектральных коэффициентов отражения трех характеристических окрасок для системы цветового зрения суслика при освещении источником B_1 (I) и положении их цветов в соответствующем цветовом теле (II)

гиперплоскость в пространстве спектральных коэффициентов отражения. Причем коэффициенты $S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)$ определяют ее ориентацию (направление M -мерного вектора ее нормали), а цветовые координаты X_{1i} — ее удаление от начала координат. Пересечение n таких гиперплоскостей, задаваемых системой n уравнений (5.3), определяет ($M - n$)-мерную гиперплоскость метамерных окрасок. А фигура, образованная пересечением M -мерного единичного куба этой гиперплоскостью метамерных окрасок, определяет множество спектральных коэффициентов отражения метамерных окрасок, удовлетворяющих ограничению: $0 \leq \rho_\lambda \leq 1$. В результате, поскольку предполагается, что все окраски равновероятны, средний спектральный коэффициент отражения метамерных окрасок может быть найден как центр тяжести этой фигуры. При больших M для не очень удаленных от центра куба секущих гиперплоскостей положение центра тяжести этой фигуры с большой точностью совпадает с проекцией центра куба на гиперплоскость метамерных окрасок (т.е. лежит на нормали, проведенной из центра куба к этой гиперплоскости). Эта точка определяет спектральный коэффициент отражения характеристической окраски (для данного цвета X_1). А все множество характеристических окрасок (соответствующих всевозможным цветам), как и предполагалось, будет лежать в n -мерной гиперплоскости, проходящей через центр единичного куба. В качестве ее базиса можно взять непосредственно коэффициенты $S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)$, определяющие ориентацию вектора нормали в пространстве.

Таким образом, показано, что базис n -мерной гиперплоскости метамерных окрасок задается, с одной стороны, искомыми функциями $f_i(\lambda)$ а, с другой стороны — функциями вида $S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda)$. Поэтому без нарушения общности можно считать, что

$$f_i(\lambda) = S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda),$$

а выражение для спектрального коэффициента отражения характеристической окраски приобретает вид

$$\rho_c(\lambda) = 1/2 + \sum_{i=1}^n a_i S_i(\lambda)\bar{x}_i(\lambda). \quad (5.5)$$

Примеры спектральных коэффициентов отражения нескольких характеристических окрасок, рассчитанных для системы дихроматического зрения суслика, когда в качестве исходного выбрано солнечное освещение (источник B_1 на рис. 26, IV), приведены на рис. 42, I. Положения цветов этих окрасок в цветовом теле при исходном освещении показаны соответствующими точками на рис. 42, II. Из ограничений на спектральные коэффициенты отражения характеристических окрасок $0 \leq \rho_c(\lambda) \leq 1$ следуют ограничения на коэффициенты a_i и на многообразие цветов, которые могут иметь такие окраски. На рис. 42, II внутри цветового тела пунктиром ограничена область цветов, где характеристические окраски удовлетворяют этому ограничению. Вне этой области линейное приближение неприменимо — оно дает для характеристических окрасок нереальные спектральные коэффициенты отражения.

Добавочные характеристики спектра освещения

Подставив полученные формулы (5.5) для спектрального коэффициента отражения характеристических окрасок в (1.2), получим выражения для координат цвета X_i характеристических окрасок при некотором освещении со спектральным распределением интенсивности $S(\lambda)$:

$$X_i = 1/2 \int_0^{\infty} S(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) d\lambda + \sum_j a_j \int_0^{\infty} S(\lambda) S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) \bar{x}_j(\lambda) d\bar{x}_j(\lambda)$$

Первый интеграл в этой сумме представляет собой координаты цвета освещения X^0 . Но и подынтегральные выражения в остальных членах этой формулы также имеют сходную структуру: они представляют собой произведения спектра действующего источника $S(\lambda)$ на некоторые стандартные функции, играющие в этом выражении роль кривых спектральной чувствительности:

$$\bar{y}_{ij}(\lambda) = S_1(\lambda) \bar{x}_i(\lambda) x_j(\lambda).$$

Поскольку $\bar{y}_{ii} = \bar{y}_{ii}$, при n -мерном цветовом зрении возможно $n(n+1)/2$ разных кривых спектральной чувствительности $\bar{y}_{ii}(\lambda)$.

В дихроматическом случае это даст три такие кривые. Для разбираемого нами примера цветового зрения суслика, где в качестве исходного совещения выбран источник B_1 , построенные по этой формуле кривые спектральной чувствительности приведены на рис. 43. Поскольку абсолютное значение чувствительности здесь несущественно (чувствительность может входить в коэффициенты a_j , выбираемые произвольно), на рисунке кривые $\bar{y}_{ii}(\lambda)$, как это принято для кривых спектральной чувствительности, отнормированы по максимуму.

Итак, для того чтобы вычислить цвет характеристической окраски, задаваемой набором коэффициентов a_i , при некотором освещении, совершенно не нужно знать полностью спектр этого освещения $S(\lambda)$. Достаточно знать только его разложение всего по нескольким $n(n+3)/2$ функциям — кривым спектральной чувствительности. Из них разложение по n функциям $\bar{x}_i(\lambda)$ определяет просто цвет

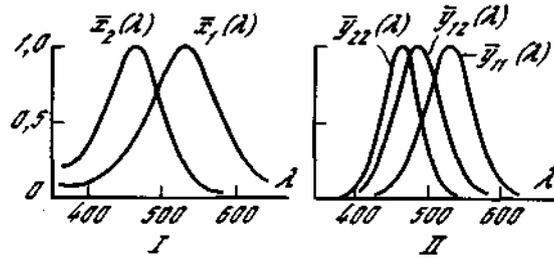


Рис. 43. Кривые спектральной чувствительности приемников (I) и добавочные кривые спектральной чувствительности (II) для системы цветового зрения суслика

X^0 этого источника, а разложение по функциям $\bar{y}_{ij}(\lambda)$ дает нам еще $n(n + 1)/2$ параметров. Иначе говоря, все выглядит так, как будто освещение оценивается его цветом с точки зрения некоторой более многомерной системы цветового зрения, кривые спектральной чувствительности которой определенным образом связаны с данной системой цветового зрения.

Для краткости в дальнейшем функции $\bar{y}_{ij}(\lambda)$ будем называть *добавочными кривыми спектральной чувствительности* для данной системы цветового зрения. Соответственно совокупность величин

$$Y_{ij}^0 = \int_0^{\infty} S(\lambda) \bar{y}_{ij}(\lambda) d\lambda$$

будем называть *добавочным цветом источника*. В таких обозначениях выражение для цвета характеристической окраски, задаваемой n параметрами a_j , будет иметь вид

$$X_i = 1/2 X_i^0 + \sum_j a_j Y_{ij}^0, \quad (5.6)$$

Несмотря на формальную аналогию между цветом источника, определяемым кривыми спектральной чувствительности $\bar{x}_i(\lambda)$, и добавочным цветом того же источника, определяемым кривыми $\bar{y}_{ij}(\lambda)$, нужно помнить и о существенном различии. Для определения обычного цвета освещения в зрительной системе имеется соответствующий спектральный аппарат — набор светочувствительных приемников именно с этими кривыми спектральной чувствительности. Конечно, узнавание цвета освещения даже с помощью имеющихся светочувствительных приемников имеет свои трудности. В частности, в обычных зрительных ситуациях, когда сам источник не попадает в поле зрения или когда в сцене отсутствуют белые поверхности, цвет света может характеризовать цвет освещения. Но по крайней мере в зрительной системе существует необходимый для этого набор функций $\bar{x}_i(\lambda)$. В то же время специального аппарата — добавочных приемников, позволяющих узнать значения добавочных координат цвета освещения, в зрительной системе, по-видимому, нет. Поэтому пока для нас "добавочный цвет источника" — только короткая форма записи для громоздкого выражения. Впоследствии, когда будет

видно, что наши формулы для преобразования цветовых координат существенным образом зависят от добавочного цвета источников и что для введения поправки на освещение знать этот цвет необходимо, нам придется рассмотреть вопрос о том, каким образом зрительная система могла бы его вычислять.

Преобразование цветовых координат

Для того чтобы вывести закон, преобразования цветовых характеристик окрасок при изменении освещения, поступим так же, как и в случае зональной модели цветового зрения. Из выражений вида (5.6) для координат цвета X_{1i} характеристической окраски при исходном освещении $S_1(\lambda)$ находим параметры этой окраски, решая их как систему уравнений относительно a_j . Пусть

$$\|\Xi_{ij}\| = \|Y_{1ij}^0\|^{-1},$$

тогда коэффициенты a_j характеристической окраски могут быть выражены через координаты ее цвета при исходном освещении следующим образом:

$$a_j = \sum_i \Xi_{ij} (X_{1i} - 1/2 X_{1i}^0).$$

Полученные a_j подставляем в выражение для цвета той же характеристической окраски при измененном освещении. В результате

$$X_{2k} = 1/2 X_{2k}^0 + \sum_{ij} Y_{2kj}^0 \Xi_{ij} (X_{1i} - 1/2 X_{1i}^0) \quad (5.7)$$

Вид преобразования координатной сетки при изменении освещения, рассчитанный по этой формуле для разбираемого нами примера цветового зрения суслика, приведен на рис. 44. Расчеты проводились для тех же условий освещения и для тех же кривых спектральной чувствительности приемников, что и проведенные в гл. 3 расчеты преобразования метамерных цветов, результаты которых приведены на рис. 27, II. Но здесь мы считали не преобразования цветов всех метамерных (при исходном освещении) окрасок, а преобразования только их "центров тяжести" — цветов характеристических окрасок. Внутри цветового тела, соответствующего исходному освещению (источник B_1), в той его внутренней части, где $0 \leq \rho_c(\lambda) \leq 1$, и которая ограничена штриховой линией на рис. 42, II, была нанесена прямоугольная сетка линий, соответствующих цветам характеристических окрасок с постоянными значениями зеленой (G) или синей (B) координат. Линии проводились для трех разных значений цветовых координат, равных $1/4$, $1/2$ и $3/4$ частям от соответствующих значений координат цвета X_{1i}^0 , исходного освещения (рис. 44, B_1). Затем для других источников освещения (A_1 , C_1 и D_1) по формуле (5.7) рассчитывали, какими станут цвета этих характеристических окрасок. Как видно из этого рисунка и в полном соответствии с тем, чего можно было ожидать на основании рис. 27, II, наряду с растяжениями по той или иной цветовой координате изменение освещения приводит также к сильным перекосам координатной

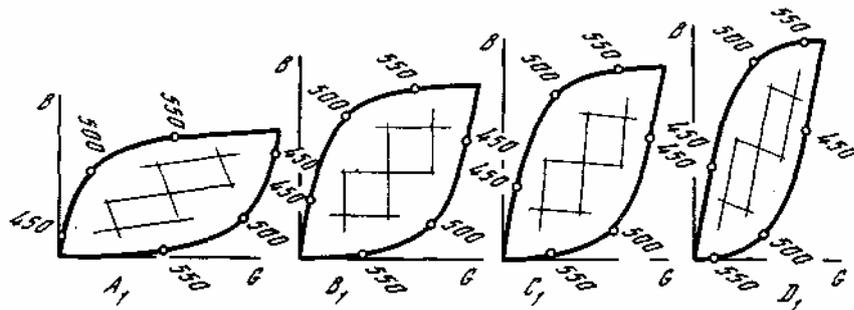


Рис. 44. Перекосы координатной сетки для системы дихроматического зрения суслика при переходе от солнечного освещения (источник B_1) к вариантам освещения A_1 , C_1 и D_1

сетки. Эти перекосы обусловлены отличием от нуля недиагональных членов матрицы преобразования (5.7) — $\left\| \sum_i Y_{2kj}^0 \Xi_{ij} \right\|$.

Таким образом, в этой главе, перейдя от рассмотрения всевозможных окрасок к вполне конкретному, специально подобранному (но, по-видимому, более или менее адекватному задаче) семейству n -параметрических окрасок, нам удалось избавиться от проблемы метамеризма и свести преобразование для значительной (и интересующей нас в первую очередь) части цветового тела к линейному преобразованию цветового пространства. Проанализируем основные свойства этого преобразования, сравнив его с полученным ранее преобразованием (5.2) для расширенной зональной модели цветового зрения. Первое отличие состоит в том, что здесь в преобразовании появился свободный член, в то время как в расширенной зональной модели соответствующее преобразование было однородным. Проявление свободного члена в преобразовании приводит к смещению начала координат. Преобразование (5.7) при изменении освещения переводит центр цветового тела (так же, как впрочем, и в случае расширенной зональной модели) снова в центр цветового тела. Однако начало координат и противоположная, "белая" вершина цветового тела при этом могут сместиться. Фактически это означает, что цвета характеристических окрасок, расположенные при исходном освещении на диагонали цветового тела, после изменения освещения уже не обязательно будут попадать на диагональ нового цветового тела. Происходит это потому, что характеристические окраски, цвета которых при исходном освещении лежат на диагонали цветового тела, отличаются от ахроматических окрасок. Цвета же ахроматических окрасок, у которых $\rho(\lambda) = \text{const}$, всегда, при любом освещении расположены на диагонали соответствующего цветового тела.

Другое отличие от зональной модели состоит в большем разнообразии этих преобразований, вследствие того что в данном случае преобразование не определяется целиком n параметрами — цветом освещения, как это было в расширенной зональной модели, а зависит еще от дополнительных параметров освещения — его добавочного цвета. Причем в этом случае изменение цвета освещения определяет

только перенос начала координат — свободный член преобразования. А все перекосы координатной сетки и изменения масштаба определяются его добавочным цветом.

Свойства преобразования координатной сетки

В случае дихроматического зрения направление наклона той или иной (вертикальной или горизонтальной) линии координатной сетки определяется знаком соответствующего недиагонального элемента матрицы преобразования (5.2) или (5.7). В расширенной зональной модели наклон линий координатной сетки однозначно был связан с направлением изменения цвета освещения. Там характер изменения освещения определялся такими соотношениями координат цвета освещения: при $X_{21}^0/X_{11}^0 > X_{22}^0/X_{12}^0$ освещение изменялось в красную сторону, а при $X_{21}^0/X_{11}^0 < X_{22}^0/X_{12}^0$ освещение изменялось в синюю сторону. Соответственно было возможно только два варианта сочетаний знаков недиагональных членов матрицы преобразования: они всегда имели разные знаки. При этом при покраснении освещения и вертикальные, и горизонтальные линии координатной сетки поворачивались против часовой стрелки, а при посинении освещения двигались в противоположную сторону (см. рис. 41).

В случае плавных перекрывающихся кривых спектральной чувствительности приемников перекосы координатной сетки, задаваемые элементами матрицы преобразования (5.7), определяются значениями трех координат Y_{11}^0 , Y_{12}^0 и Y_{22}^0 добавочного цвета источника. В соответствии с тем, как обычно распределены в дихроматическом случае области чувствительности трех добавочных кривых спектральной чувствительности (рис. 43, II), координаты добавочного цвета фактически характеризуют интенсивность освещения уже не в двух, а в трех (красной, зеленой и синей) областях спектра. Тогда характер изменения освещения (и соответственно характер поворота линий координатной сетки) определяется соотношениями между значениями координат добавочного цвета освещения, аналогичными приведенным выше: Y_{211}^0/Y_{111}^0 , Y_{212}^0/Y_{112}^0 и Y_{222}^0/Y_{122}^0 . При этом переходам к более красному освещению, где $Y_{211}^0/Y_{111}^0 > Y_{212}^0/Y_{112}^0 > Y_{222}^0/Y_{122}^0$, и к более синему освещению, где $Y_{211}^0/Y_{111}^0 < Y_{212}^0/Y_{112}^0 < Y_{222}^0/Y_{122}^0$, соответствуют повороты линий координатной сетки (см. например, рис. 44), аналогичные тем, которые возможны при соответствующих изменениях освещения в случае расширенной зональной модели. Но в отличие от нее здесь добавляются еще изменения освещения в зеленую сторону, где $Y_{211}^0/Y_{111}^0 < Y_{212}^0/Y_{112}^0 > Y_{222}^0/Y_{122}^0$, и изменения освещения в пурпурную сторону, где $Y_{211}^0/Y_{111}^0 > Y_{212}^0/Y_{112}^0 < Y_{222}^0/Y_{122}^0$.

На рис. 45, I и II показаны рассчитанные для рассматриваемого здесь цветового зрения сулика изменения координатной сетки при переходе от того же исходного освещения (источник B_1) с исходной координатной сеткой, показанной на рис. 44, B_1 , к другим, соответствующим образом подобранным вариантам освещения, совпадающим по цвету (но не по добавочному цвету) с исходным освещением. По параметрам добавочного цвета эти изменения освещения соответствовали пере-

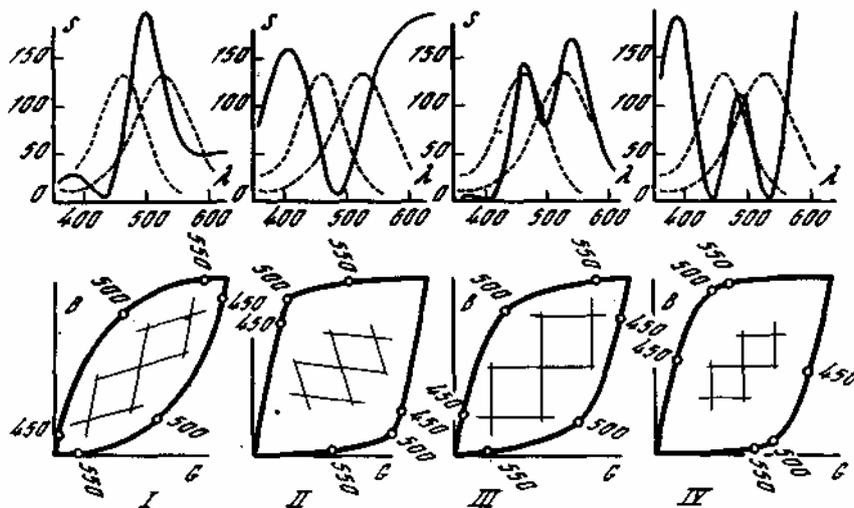


Рис. 45. Преобразования цветных тел и перекосы координатной сетки в них при переходе от солнечного освещения (источник B_1 — рис. 44) к вариантам освещения: I—IV

Сплошные линии сверху — спектры освещения; штриховые линии — кривые спектральной чувствительности приемников суслика

ходам к более зеленому (I) и более пурпурному (II) освещению. Здесь в верхней части рисунка показаны спектры освещения, где также для сравнения нанесены штриховыми линиями положения кривых спектральной чувствительности приемников суслика, а внизу — соответствующие цветные тела с нанесенной сеткой цветов характеристических окрасок. Как видно из рисунка, при переходе от солнечного освещения к более зеленому все цветное тело и в особенности цвета характеристических окрасок из его центральной части сжимаются вдоль диагонали цветного тела, а при переходе к пурпурному освещению собираются в середине цветного тела и растягиваются поперек его диагонали.

Еще одним проявлением большего разнообразия преобразований координатной сетки являются возможные изменения относительного размера ячейки координатной сетки. Если в случае расширенной зональной модели координатная сетка, заполняющая целиком все цветное тело, при изменении освещения перекашивалась вместе с ним (в соответствии с аффинным преобразованием координат), в данном случае размер цветного тела (например, длина его диагонали) определяется цветом источника, а преобразования координатной сетки зависят от добавочного цвета источника. При больших расхождениях между тем и другим можно получить существенные изменения относительного размера ячейки координатной сетки. Правда, для того чтобы эти изменения были значительными, требуются очень вычурные спектры освещения. Для двух таких специально подобранных спектров освещения соответствующие изменения координатной сетки показаны на рис. 45, III и IV. Еще больших перекосов координатной сетки и еще больших отклонений относительных размеров ячеек, чем на рис. 45, можно добиться, если спектры освещения приближаются к линейчатым.

Сопоставление с экспериментами

Итак, следует ожидать, что введение поправки на освещение, учитывающее перекосы координатной сетки при обычных условиях освещения обеспечивает более константную оценку окраски, чем, например, поканальная поправка на освещение в соответствии с законом коэффициентов фон Криса. Однако учет этих перекосов встречается с серьезными трудностями, связанными с определением добавочных параметров освещения. Да и аппаратурно сама схема введения поправки на освещение становится существенно более громоздкой, поскольку для нее требуется организованное определенным образом взаимодействие цветовых каналов. Поэтому остается вопрос, пошла ли природа на такие издержки ради повышения точности узнавания окраски при изменении освещения или обходится какими-то существенно более грубыми, но зато более простыми механизмами константности, не учитывающими перекосов координатной сетки.

Прежде чем анализировать возможные способы вычисления добавочных параметров освещения и конкретные алгоритмы введения поправки на них, остановимся на том, учитываются ли в зрительной системе перекосы координатной сетки при узнавании окрасок после изменения освещения. В этом разделе коротко перечислим некоторые экспериментальные работы, говорящие в пользу того, что узнавание окраски в зрительной системе (в первую очередь человека) производится не путем введения поканальной поправки на освещение по закону коэффициентов фон Криса, а в какой-то степени учитывает перекосы. Что касается животных, то количество поведенческих экспериментов, поставленных с целью доказательства способности тех или иных животных к константному восприятию окраски, не превышает десятка. Из этих работ следует, что в зрительной системе исследованных животных вводится некоторая поправка на освещение, но точность этих экспериментов слишком низка, чтобы позволить отделить один алгоритм введения поправки от другого.

Большинство опытов по восприятию цветов окрашенных поверхностей в меняющихся условиях освещения у человека также ставились с целью доказательства того, что наши цветовые ощущения не ограничиваются только цветом отраженного излучения (без поправки на освещение). В качестве альтернативной гипотезы обычно предполагается, что наша зрительная система вводит поканальную поправку на освещение [103, 112, 123, 144]. Однако более тонкие эксперименты [71, 72] показывают, что испытуемые в экспериментах после изменения освещения называют не в точности тот цвет, который предсказывается поканальной поправкой на освещение, а несколько от него отличный. Качественно эти отклонения, как правило, соответствуют тому, что должно происходить в случае, если зрительная система на самом деле учитывает перекосы координатной сетки. К сожалению, недостаточно полная спецификация использовавшихся в опытах стимулов не позволяет сделать детальные количественные сопоставления.

Для проверки разных гипотез о способах введения поправки на освещение мы поставили небольшую серию экспериментов по узнаванию окрасок при изменении освещения. Не останавливаясь на полученных

результатах подробно, отметим только, что они отвергают гипотезу о поканальной поправке, так как в них показана большая точность узнавания окрасок, чем это возможно с помощью введения поканальной поправки на освещение. В этих опытах испытуемому при дневном освещении предлагали запомнить цвета трех определенных окрасок: бежевой, малиновой и лазурной. А затем, после хорошей адаптации к освещению лампой накаливания, просили найти их среди большого набора близких. Зная спектральные коэффициенты отражения окрасок и спектры освещения, можно было рассчитать их цветовые координаты при том и при другом освещении, а также предсказать (в соответствии с той или иной гипотезой о характере преобразования цветового пространства при изменении освещения), в какие точки цветового пространства при искусственном освещении должны перейти цвета этих бежевой, малиновой и лазурной окрасок. В экспериментах испытуемым, как правило, выбирались такие же по окраске (или похожие) стимулы, но совсем не те окраски, которые должны были бы выбираться, если бы была верна гипотеза о том, что в зрительной системе человека вводится поканальная поправка на освещение.

Наглядное подтверждение того, что зрительная система не обходится поканальной поправкой, дают также результаты экспериментов в которых исследовалось индуцирующее влияние цветного фона на воспринимаемый цвет предъявляемых стимулов. Конечно, здесь нельзя проводить детальное сопоставление с моделями константности, так как такие опыты ставятся в заведомо "аконстантных" [27] условиях предъявления стимулов. Однако даже такая простая экспериментальная ситуация позволяет обнаружить, что в зрительной системе происходит довольно сложная обработка сигналов о цвете. Действительно, постепенное накопление экспериментальных фактов [96, 178, 197] заставило отказаться от примитивных представлений о только аддитивном (типа цветовой оппонентности) или только мультипликативном (типа закона коэффициентов фон Криса) взаимодействии цветовых сигналов и заставляет предположить существование сложного многоуровневого взаимодействия. Примечательно, что одна из предложенных моделей такого взаимодействия [96] очень похожа на алгоритм введения поправки на освещение, учитывающий перекосы координатной сетки, который приводится ниже.

Переход к фиксированным цветовым каналам

Оставив пока в стороне вопрос о том, каким способом зрительная система может получить сведения о добавочном цвете источника, необходимые для введения поправки на освещение, разберем варианты переработки сигналов о цвете, вводящей такую поправку. Хотя найденное преобразование цветового пространства в линейном приближении существенно упрощает задачу по сравнению с общим случаем, полученное решение (5.7) оказывается все еще довольно громоздким по сравнению, например, с решением для расширенной зональной модели. Основное удобство этой модели состояло в том, что там был возможен стандартный, не зависящий от освещения переход к другим коор-

динамам: от координат цвета, определяемых приемниками, к координатам цвета, определяемым зонами спектра. Затем в каждом из цветовых каналов, связанных с зонами спектра, можно было вводить обычную поканальную поправку на освещение. Преобразование (5.7) не обладает таким желательным свойством. В общем случае преобразование цветового пространства оказывается более разнообразным и в виде последовательности таких преобразований непредставимо. Поэтому здесь нельзя устроить единый, не зависящий от освещения переход к другим цветовым каналам, в которых удобнее производить поправку на освещение.

Не останавливаясь подробно на этом вопросе, заметим, что здесь возможен следующий подход. Можно попытаться ввести ограничения на многообразие источников и выделить такое их семейство, для которого возможен переход к некоторым фиксированным цветовым каналам и последующая поправка в этих каналах. После этого можно посмотреть, насколько такие источники реальны.

Таким образом, мы хотим представить матрицу (5.8) преобразования (5.7) в виде произведения матриц для независящих от освещения преобразований цветовых каналов и диагональной матрицы, в которой учитываются изменения освещения. Понятно, что в этом случае учет изменений освещения возможен только по n независимым параметрам соответственно количеству ненулевых членов этой диагональной матрицы. А это значит, что $n(n + 1)/2$ координат добавочного цвета освещения, определяющих элементы матрицы (5.8), должны быть связаны некоторыми ограничениями. Можно показать, что это должны быть $n(n - 1)/2$ условий линейной зависимости координат добавочного цвета освещения. Для дихроматического случая ограничения сводятся к единственному линейному уравнению, связывающему координаты добавочного цвета источника:

$$AY_{11}^0 + BY_{12}^0 + CY_{22}^0 = 0 \quad (5.9)$$

Постоянные коэффициенты A , B и C определяют ограничения на спектры источников и тем самым задают семейство допустимых источников. Ограничения (5.9) можно представить в другом виде, подставив вместо Y_{ij}^0 их выражения через интегралы. Тогда получим

$$\int_0^{\infty} S(\lambda)\varepsilon(\lambda)d\lambda, \quad (5.10)$$

где $\varepsilon(\lambda)$ представляет собой линейную комбинацию (с весами A , B и C) добавочных кривых спектральной чувствительности. В таком виде (5.10) ограничение на спектры источников требует ортогональности на спектральном интервале $(0, \infty)$ спектра освещения некоторой фиксированной функции $\varepsilon(\lambda)$. В случае n -мерного цветового зрения спектры освещения должны быть ортогональными $n(n - 1)/2$ разным (линейно независимым) функциям $\varepsilon(\lambda)$.

В то же время коэффициенты A , B и C определяют для этого семейства источников вид преобразования цветовых координат и вид цветовых каналов, к которым следует перейти для последующего поканального введения поправки на освещение. В цветовом пространстве переход к таким фиксированным цветовым каналам означает просто пере-

ход к новым координатам (фиксированное линейное преобразование цветового пространства). Этому преобразованию координат соответствует переход от кривых спектральной чувствительности $\bar{x}_i(\lambda)$ приемников к некоторым кривым сложения $\bar{x}'_i(\lambda)$, представляющим собой линейные комбинации кривых спектральной чувствительности приемников. При этом функция $\varepsilon(\lambda)$, задающая ограничения на семейство источников, определяется через кривые сложения для цветовых каналов следующим образом:

$$\varepsilon(\lambda) = \bar{x}'_1(\lambda)\bar{x}'_2(\lambda).$$

Задавая разные значения коэффициентов A , B и C в формуле (5.9), будем получать разные семейства источников, для которых допустим такой переход к фиксированным цветовым каналам. Можно решить и обратную задачу: по семейству источников найти параметры, определяющие преобразования координат цветового пространства и преобразования кривых спектральной чувствительности. В дихроматическом случае можно однозначно определить значения параметров A , B и C , задав два примера спектров освещения из этого семейства. Тем самым мы определим ограничения на источники (например, в виде некоторой функции $\varepsilon(\lambda)$ и вид кривых сложения $\bar{x}'_i(\lambda)$). Такие расчеты проведены для рассматриваемой нами модели цветового зрения суслика. В качестве примеров спектров освещения, задающих семейство, были выбраны спектры солнечного освещения (источник B_1) и голубого неба (источник D_1). Вид рассчитанных кривых сложения для фиксированных цветовых каналов приведен на рис. 46, I. На рис. 46, II сплошной линией показана форма кривой $\varepsilon(\lambda)$, описывающей ограничения на источники.

К чему приводит такой переход к фиксированным цветовым каналам в случае системы цветового зрения суслика, показывает рис. 47, где представлены те же преобразования цветового пространства и координатной сетки, что и на рис. 44, только в системе координат \bar{x}'_1, \bar{x}'_2 , соответствующей фиксированным цветовым каналам (подобранным для источников B_1 и D_1). Сравнивая цветное тело для источника D_1 с исходным цветным телом (для источника B_1), можно видеть, что в таких координатах сетка остается прямоугольной. Происходят только ее растяжения вдоль синей оси и сжатие вдоль красной. Примечательно, что такой переход к фиксированным цветовым каналам подходит даже для источника A_1 , под который эти цветовые каналы совсем не подгонялись. Координатная сетка в цветном теле, соответствующем этому освещению (рис. 47, A_1), также осталась практически ортогональной.

Таким образом, показано, что при определенных ограничениях, накладываемых на спектры источников, даже в таком сложном случае перекрывающихся плавных кривых спектральной чувствительности, механизм учета перекося координатной сетки (введения поправки на освещение) может свестись к довольно простому, по координатному изменению масштаба в фиксированной (не зависящей от освещения) системе координат аналогично тому, которое было получено для расширенной зональной модели цветового зрения. В рассмотренной здесь модели сигналы цветовых каналов получались в результате взаимного

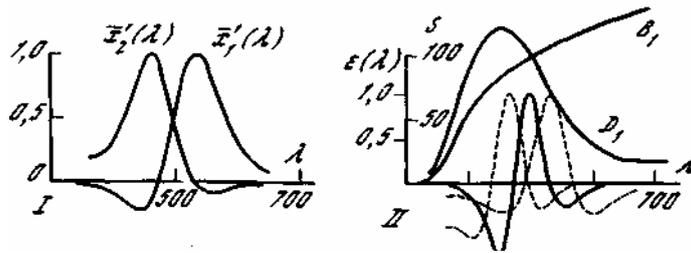


Рис. 46. Фиксированные цветовые каналы для системы цветового зрения суслика

I — кривые сложения; II — спектры источников B_1 и D_1 , для которых строились фиксированные цветовые каналы, и функция $\epsilon(\lambda)$, определяющая условия на спектры источников, штриховые линии — функции, определяющие дополнительные условия на источники, необходимые для вычисления добавочных координат цвета источника

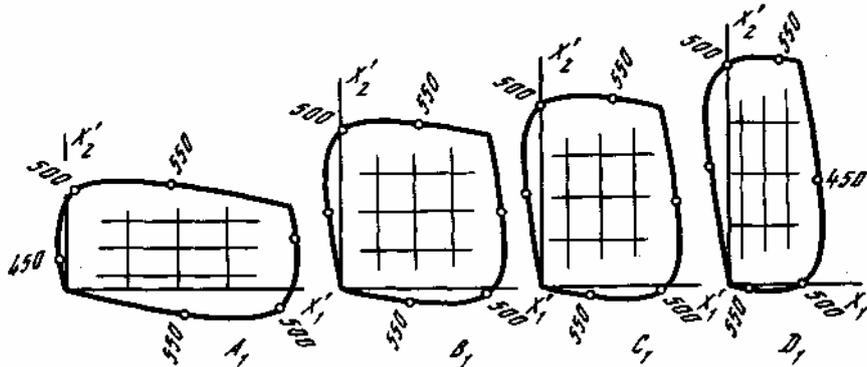


Рис. 47. Преобразования координатной сетки для тех же вариантов освещения, что и на рис. 44, построенные в системе координат $X'_1 X'_2$ для фиксированных цветовых каналов

вычитания (оппонентного взаимодействия) сигналов приемников. Представления о том, что в зрительной системе в результате такого взаимодействия между сигналами приемников осуществляется переход к другим, так называемым "оппонентным цветовым каналам", распространены среди психологов [107], которые видят отражение такой оппонентности в поведении зрительной системы человека, и электрофизиологов [186], которые регистрируют реакции оппонентных нейронов на разных уровнях зрительной системы.

Узнавание характера освещения

В этой главе, перейдя к рассмотрению характеристических окрасок, а затем введя специальные ограничения на источники, нам удалось представить преобразование цветового пространства при изменении освещения в довольно простом виде. Тем не менее задача узнавания окраски поверхности в меняющихся условиях освещения может оказаться совершенно безнадежной, если мы не придумаем способа, позволяющего определять параметры освещения. Вопросы, связанные с вычислением цвета источника, необходимого для введения поправки на

освещение в пределах зонального приближения, были рассмотрены в первой главе. Теперь, однако, оказалось, что, кроме нескольких параметров цвета, для введения поправки на освещение нужно дополнительно знать еще довольно большое число параметров — добавочный цвет освещения. Коротко остановимся на вопросах, как эти параметры можно было бы находить.

Прямой путь — снабдить зрительную систему наряду с обычными приемниками, предназначенными для вычисления n -мерного цвета излучения, еще $n(n + 1)/2$ специально подобранными узкополосными приемниками, предназначенными для узнавания добавочного цвета освещения. В принципе такая возможность не исключена. Так, в зрительной системе голубя и цыпленка имеются как широкополосные кривые спектральной чувствительности, так и более узкополосные, сделанные с помощью внутриклубочковых цветных фильтров. В сумме количество всех этих приемников достигает шести [94]. Тогда можно себе представить такой механизм, в котором цвет поверхности определяется только по сигналам от широкополосных приемников, а приемники с узкими полосами чувствительности используются исключительно для узнавания добавочного цвета источника. Однако нам кажется маловероятным, чтобы в зрительной системе какого-то животного сигналы о спектральном составе отраженного от поверхности излучения полностью игнорировались при узнавании ее окраски.

Другой способ определения параметров добавочного цвета — вычислять характер освещения, используя только имеющиеся приемники. На первый взгляд может показаться, что о спектре освещения зрительная система в принципе не может получить сведений больше, чем позволяет ее аппарат цветоразличения. Однако такое утверждение верно только до тех пор, пока мы наблюдаем излучения в поле сравнения колориметра. В естественных условиях наблюдения в поле зрения попадает довольно много спектральных приборов — окрашенных поверхностей, которые помогают зрительной системе анализировать спектральный состав освещения.

В гл. 2 было показано, что если в поле зрения попадает достаточно богатый набор $(n - 1)$ -ступенчатых окрасок, то по цветам излучений, отраженных от них, можно составить довольно полное представление о спектре освещения. Реально ступенчатые окраски не встречаются, да и такого большого числа разных цветов в поле зрения одновременно не попадает. Однако наличие цветных поверхностей в поле зрения позволяет больше узнать о спектре освещения, чем просто его цвет, который узнается по цвету одной белой окраски. При этом, чем больше будет цветных объектов в поле зрения и чем ближе будут их цвета расположены к поверхности цветового тела, тем больше они будут нести информации о характере освещения.

Принципиальная возможность вычислять добавочный цвет освещения по цветам излучений, приходящих к нам в глаз от всей видимой сцены, пока остается только довольно расплывчатой гипотезой. У нас нет ни конкретных алгоритмов для такого способа обработки информации, ни тем более экспериментальных доказательств способности зрительной системы человека или животных действительно использовать

такие признаки, помогающие узнавать добавочный цвет освещения для введения на него поправки.

Третья возможность состоит в следующем. Можно предположить, что для всего многообразия реально встречающихся в жизни животного освещений всегда спектр однозначно характеризуется цветом. Тогда и добавочный цвет источника тоже будет однозначно определяться обычным цветом. Легко убедиться, что для множества спектров освещения, замкнутого относительно операции сложения, зависимость координат добавочного цвета источника от простого цвета может быть только линейной:

$$Y_{ij}^0 = \sum_k A_{ijk} X_k^0,$$

где A_{ijk} — некоторые постоянные для всего семейства возможных источников освещения коэффициенты.

Фактически набор $n(n + 1)/2$ таких выражений (для каждой из координат добавочного цвета) при фиксированных A_{ijk} определяет ограничения, накладываемые на спектры освещения. Только для семейства источников, удовлетворяющих этим ограничениям, будет возможно правильное вычисление добавочного цвета по обычному цвету и, следовательно, будет возможен правильный учет перекосов координатной сетки при введении поправки на освещение.

Перейдя к интегральным выражениям для координат цвета и добавочного цвета, можно свести эти ограничения к $n(n + 1)/2$ ограничениям типа (5.10), где функции $\varepsilon(\lambda)$ будут представлять собой разные (нефиксированные для всего семейства) линейные комбинации кривых спектральной чувствительности приемников и добавочных кривых спектральной чувствительности.

Напомним, что в предыдущем разделе мы уже рассмотрели ряд ограничений на возможный спектральный состав источников освещения, встречающихся в природе. Использование таких ограничений упрощает алгоритмы введения поправки на освещение, так как позволяет произвести единообразное не зависящее от освещения преобразование координат цветового пространства и уже в новых координатах вводить поканальную поправку. В этом разделе решалась совсем другая задача: не заботясь о сложности алгоритма введения поправки на освещение, мы искали ограничения на источники, позволяющие узнавать параметры освещения, необходимые для введения поправки. Сравнительно с предыдущей задачей это потребовало большего числа ограничений на спектры источников: $n(n + 1)/2$ вместо $n(n - 1)/2$. Замечательная особенность ограничений, введенных в этом разделе, состоит в том, что они целиком покрывают ограничения, введенные в предыдущем разделе. Это означает, что в мире, где добавочный цвет источника однозначно определяется его обыкновенным цветом, всегда возможен переход к фиксированным цветовым каналам. Тогда зрительная система животного, живущего в таком мире, может обходиться довольно простыми алгоритмами введения поправки на освещение.

Для системы дихроматического зрения суслика и для семейства источников, включающего источники B_1 и D_1 , мы рассчитали формулы кривых $\varepsilon(\lambda)$, определяющих ограничения на источники в этом случае.

Все три кривые приведены на рис. 46, II вместе со спектрами источников. Кривая, нарисованная сплошной линией, определяет ограничение, общее с ограничением для возможности перехода к фиксированным цветовым каналам, а пунктирные кривые определяют дополнительные ограничения.

Разобранные в этом разделе два последних варианта вычисления параметров добавочного цвета освещения иллюстрируют два подхода к построению алгоритмов константности цветовосприятия как нахождения решения системы уравнений (1.2). Как отмечалось в гл. 1, сколь угодно точное решение этой системы невозможно без дополнительных сведений об окрасках и источниках освещения. Для узнавания характеристических окрасок такой необходимой дополнительной информацией об источнике являются координаты его цвета и добавочного цвета. В одном из этих подходов вся дополнительная информация должна извлекаться из анализа сетчаточного изображения — многообразия цветов излучений, отраженных от окрашенных поверхностей в поле зрения, несет информацию о форме цветового тела и, следовательно, о спектре источника. Другой подход, напротив, опирается главным образом на априорную информацию. Здесь многообразие источников настолько ограничено, что дополнительных сведений об источниках (кроме их цвета) для введения поправки просто не требуется. Какой из этих вариантов реализуется на самом деле в зрительной системе животных, пока не ясно. Во многом это должно зависеть от реального многообразия спектров освещения в среде обитания конкретных животных. Вполне возможно, что зрительная система того или иного животного обходится каким-то промежуточным вариантом и использует некоторые (не слишком жесткие) ограничения на источники, а недостающую информацию черпает из самой видимой сцены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Один из основных результатов этой работы состоит в том, что высокая степень метамеризма, которая возможна для некоторых систем цветового зрения в средах обитания с широкими вариациями спектров освещения и окрасок поверхностей, создает серьезные трудности в константном узнавании окрасок. При этом в некоторых случаях наше рассмотрение приводило к довольно серьезным выводам о том, что константное узнавание окрасок вообще невозможно или невозможно определение какого-либо их параметра (например, цветности), и поэтому таким животным вообще бесполезно опираться в поведении на те или иные признаки окраски. Отсутствие достаточного количества сведений по зрительной экологии и этологии не позволяет сейчас проверить такие выводы. Однако сопоставление их с уже известными фактами позволит с новой стороны подойти к вопросу о роли цветового зрения в зрительно обусловленном поведении разных животных.

Особенно велика степень метамеризма для систем цветового зрения низкой размерности. Так, ахроматы, живущие в условиях, где возможны как прямое солнечное освещение, так и освещение светом голубого неба, вообще не могут узнавать более двух-трех градаций светлоты. Поэтому отражательная способность поверхности предметов (которую они не способны константно узнавать) не может служить для них полезным признаком при узнавании самих предметов. Это вообще принижает роль зрения в поведении, в узнавании предметов. Возможно, это в какой-то степени объясняет тот факт, что ахромазия встречается редко, а основная масса животных имеет цветное зрение.

В то же время для тех животных, которые достоверно являются ахроматами, по-видимому, следует предположить, что либо световое и цветное окружение их менее разнообразны, вследствие чего метамеризм окрасок будет меньше, либо зрительная система этих животных вообще не решает задачу узнавания светлоты окраски поверхности, а решает какую-то другую задачу.

Хороший пример последнему дают глубоководные рыбы, которые вообще не видят излучений, отраженных от предметов. Они живут в мире источников проникающего сквозь толщу воды слабого рассеянного света, идущего сверху, на фоне которого видны силуэты плывущих выше

рыб, и люминесцирующих источников — рыб того же вида или других животных. В таком мире нет задачи узнавания окраски поверхности, так как свет, отраженный от любой поверхности, неизмеримо слабее этих источников и попросту не может восприниматься светочувствительными рецепторами. Но там вполне реальна задача детектирования темных силуэтов других рыб, затеняющих идущий сверху свет, или например, узнавания светящихся особей своего вида [161].

В случае дихроматического зрения степень метамеризма (и его характер) зависит не только от широты вариаций освещения, но также от взаимного расположения кривых спектральной чувствительности приемников. Для далеко отставленных друг от друга светочувствительных приемников метамеризм окрасок, как и у ахроматов, мешает константному узнаванию окрасок при широких вариациях спектров освещения. Перекрытие приемников уменьшает степень метамеризма. Однако при этом оказывается, что при определенных вариантах освещения области метамерных окрасок приобретают узкую ланцетовидную форму, из-за чего возможна только одна константная характеристика окраски — ее светлота, в то время как цветность оказывается очень вариабельной. Таким образом, ситуация с дихроматами получается более разнообразной.

Для того чтобы сопоставить возможности разных дихроматических систем зрения, мы подсчитали степень метамеризма при переходе от солнечного освещения к освещению светом голубого неба для разных систем цветового зрения, отличающихся положением λ_{\max} их светочувствительных приемников на спектральной оси. Для этого построили в цветовом пространстве соответствующие цветовые тела и центральные области метамерных окрасок в них, что позволило не только оценить общую степень метамеризма для каждой из систем цветового зрения, но также подсчитать относительные разбросы метамерных цветов по разным направлениям. Каждая такая дихроматическая система (задаваемая, например, светочувствительными пигментами родопсинового типа) характеризуется двумя значениями λ_{\max} ее светочувствительных приемников и может быть представлена точкой на соответствующей диаграмме (рис. 48). По степени и характеру метамеризма дихроматические системы можно разбить на отдельные группы. Так, в область I на рис. 48 входят дихроматические системы с далеко разнесенными λ_{\max} и соответственно с большой степенью метамеризма. Для таких систем при переходе от солнечного освещения к свету голубого неба возможно константное узнавание не более 15 разных окрасок. Про эту область можно сказать, что цветовое зрение для узнавания окрасок при таких вариациях освещения мало полезно. В область II попадают системы цветового зрения, для которых возможно большее число различных окрасок, но области метамерных окрасок имеют здесь настолько вытянутую форму, что их длина составляет более 1/3 размеров цветового тела в соответствующем направлении. Поэтому для таких дихроматических систем имеет смысл вычисление единственного константного параметра окраски — ее светлоты. В область III попадают системы цветового зрения, для которых возможно узнавание уже двух константных параметров окраски, однако для этого совершенно необходим учет пе-

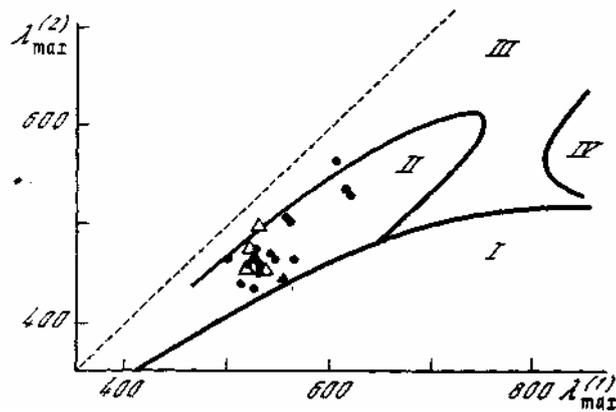


Рис. 48. Диаграмма дихроматических систем зрения

Сплошные линии разделяют области, где: I — высокая степень метамеризма не позволяет различать более 15 разных окрасок; II — возможно узнавание светлоты, но цветность допускает не более 3 градаций; III — возможно вычисление двух цветовых координат окраски, но необходим учет перекосов координатной сетки; IV — допустима покоординатная поправка на освещение; $\lambda_{\max}^{(1)}$ и $\lambda_{\max}^{(2)}$ — длины волн для максимумов чувствительности приемников

рекосов координатной сетки. И только в области IV возможно узнавание большого числа окрасок при простом покоординатном введении поправки на освещение.

Конечно, проведенные на рис. 48 границы между областями довольно условны. Их положение зависит как от задаваемой произвольно пороговой степени метамеризма, так и от принятых аппроксимаций для кривых спектральной чувствительности и спектров источников. Особенно это сказывается на расположении области IV. Появление на диаграмме дихроматических систем такой области, где допустима простая поканальная поправка на освещение, объясняется тем, что в далекой красной и ближней инфракрасной области исчезают различия между спектрами солнца и неба — кривые идут почти параллельно (рис. 1. I). Это значит, что там происходят пропорциональные изменения спектра освещения, в результате чего метамеризм окрасок почти не сказывается. Однако это удобное (с точки зрения организации механизмов константности) свойство длинноволнового конца спектра почему-то не используется животными.

На эту же диаграмму (рис. 48) нанесены отдельными точками известные системы цветового зрения животных-дихроматов. Кружки здесь соответствуют рыбам, сплошные треугольники — млекопитающим (кошка и суслик), а контурные треугольники — гекконам. Почти все эти дихроматические системы попали в область II. Таким образом, одна из гипотез о роли цветового зрения этих животных состоит в том, что с его помощью они определяют одну константную характеристику окраски — светлоту, а на цветность не должны обращать внимания, так как она меняется при изменении освещения. Нужно отметить, что, хотя возможности таких дихроматических систем в смысле константности оценки отражательной способности поверхности неизмеримо выше, чем

у ахроматических систем, такая обработка информации о цвете не дает полноценного цветового зрения. Цветность окраски поверхности для дихроматов в таких условиях освещения не будет стабильным признаком предмета, и поэтому на нее нельзя опираться животным в своем поведении.

Рассмотрим теперь альтернативные гипотезы о роли цветового зрения в поведении животных-дихроматов. Как видно из рисунка, основную массу (по крайней мере, известных) животных-дихроматов составляют рыбы. Это ставит вопрос о том, что либо водная среда допускает меньшие вариации освещения (что маловероятно, судя по тому, что нам известно о световой обстановке в водной среде), либо, напротив, зрительная система рыб-дихроматов вообще не решает задачу константного узнавания окраски предметов. Тогда следует предположить, что дихроматическое зрение рыб обслуживает свою, специфическую для водной среды, задачу. Одна из таких зрительных задач, вообще не связанных с узнаванием предметов (и необходимым для этого узнаванием их окраски), но в то же время требующая дихроматического зрения, была сформулирована именно для рыб [147]. Это задача обнаружения объектов на фоне толщи воды. Такая задача решается зрительными системами как рыб-хищников при обнаружении жертв, так и самих жертв, которые спасаются от хищников. В работе [147] показано, что в условиях водной среды для успешного обнаружения как темных, так и светлых объектов полезно иметь два разных светочувствительных приемника.

Может быть, такая гипотеза и согласуется с тем фактом, что известные пресноводные рыбы-дихроматы — щука и окунь — засадные хищники, которые бросаются на любой обнаруживаемый движущийся объект, возможно, и не удосуживаясь узнавать его цвет. Среди упоминавшихся нами морских рыб-дихроматов скорпена — также засадный хищник, а ставрида и черноморская сельдь — пелагические хищники. Однако пока не ясно, насколько можно широкое распространение дихроматии у рыб объяснить тем, что они решают не задачу узнавания окрасок предметов, а задачу обнаружения объектов на водном фоне. Зрение обслуживает не только охотничье поведение и механизмы обнаружения потенциальных врагов. Предназначение аппарата цветоразличения в других формах поведения может быть иным.

Одна из таких возможных задач, в которой зрение часто играет определяющую роль, — брачное поведение. Наличие яркого брачного наряда служит показателем того, что данный вид обладает цветовым зрением и, следовательно, узнавание раскраски брачного партнера является одной из задач аппарата цветоразличения. Однако в случае рыб-дихроматов трудности в узнавании окраски, которые ставит высокая степень метамеризма, заставляют нас сделать вывод, что сигнальная окраска как средство общения должна быть сравнительно редкой. Особенно сомнительно использование в брачном наряде рыб-дихроматов ярких цветов, так как именно оценка цветности оказывается нестабильной при вариациях освещения. Правда, задача узнавания окраски брачного партнера отличается своеобразием жизненно важных для животного (и для данной формы поведения) спектральных коэффициентов отражения окрасок. В брачном поведении нужно узнавать не любые ок-

раски, а только те, которые специально были подобраны в процессе эволюции к тому, чтобы их легко было узнавать.

Пока не известно, насколько широко распространена брачная окраска у рыб-дихроматов. По крайней мере, названные нами выше рыбы такой раскраски не имеют. Поэтому выяснение того, как связано наличие брачного наряда у разных видов рыб с размерностью их цветового зрения, может оказаться весьма полезным для понимания роли цветового зрения в разных формах зрительно обусловленного поведения.

В случае трихроматического зрения (а также цветового зрения более высоких размерностей) метамеризм окрасок перестает сказываться. Как правило, для животных-трихроматов возможно константное узнавание большого числа окрасок при любых естественных вариациях освещения. При этом возможно различать окраски не только по светлоте, но и по цветовому тону и насыщенности, так что трихромазия дает нам полноценное цветовое зрение. Возможно, именно этим объясняется широкое распространение трихромазии в мире животных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашкенази Г.И. Цвет в природе и технике. М.: Энергия, 1974. 88 с.
2. Бардин И.С. Развитие цветоразличения в онтогенезе человека. — В кн.: Сенсорные и сенсомоторные процессы. М.: Педагогика, 1972, с. 244—264.
3. Бонгард М.М. Колориметрия на животных. — Докл. АН СССР, 1955, т. 103, N 2, с. 239—242.
4. Бонгард М.М., Смирнов М.С. Четырехмерность цветового пространства человека. — Докл. АН СССР, 1956, т. 108, N 3, с. 447—449.
5. Бонгард М.М., Смирнов М.С. Кривые спектральной чувствительности при емников, связанных с одиночными волокнами зрительного нерва лягушки. — Биофизика, 1957, т. 2, N 3, с. 336—342.
6. Бонгард М.М., Смирнов М.С. Цветная адаптация и границы применимости понятия "светочувствительный приемник глаза". — Биофизика, 1958, т. 3, N 2, с. 184—189.
7. Гельмгольц Г.Л.Ф. О зрении. СПб.: Научное обозрение, 1896. 152 с.
8. Гнубкин В.Ф., Кондрашев С.Л., Орлов О.Ю. О константности цветовосприятия у серой жабы. — Биофизика, 1975, т. 20, N 4, с. 725—730.
9. Говардовский В. И. Метод определения зрительных пигментов *in situ* и их изучение у некоторых позвоночных. — Журн. биохим. и физиол., 1975, т. 11, с. 346—352.
10. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 592 с.
11. Диментман А.М., Карась А.Я., Максимов В.В., Орлов О.Ю. О константности восприятия цвета предмета у карпа. — Журн. высш. нерв. деятельности, 1972, т. 22, N 4, с. 772-779.
12. Канаев И.И. Очерки из истории проблемы физиологии цветового зрения от античности до XX века. Л.: Наука, 1971. 159с.
13. Кондрашев С.Л., Гнубкин В.Ф. Участие зеленых палочек сетчатки бесхвостых амфибий в зрительном процессе. — В кн.: Механизмы зрения животных. М.: Наука, 1978, с. 76—84.
14. Ломоносов М.В. Полн. собр. соч. М.; Л.: Наука, 1952, т. 3, с. 317—344.
15. Лосев И.С., Максимов В.В., Николаев П.П. Об узнавании окраски и объемной формы предметов. — Биофизика, 1975, т. 20, N 2, с. 313—318.
16. Максимов В.В. Проблема константности восприятия окраски предметов в мутной среде. — В кн.: Механизмы зрения животных. М.: Наука, 1978, с. 200—221.
17. Максимов В. В., Николаев П. П. Цветовая оппонентность и константность цветовосприятия. — Биофизика, 1974, т. 19, N 1, с. 151—157.
18. Максимова Е.М., Диментман А.М., Максимов В.В. и др. Простейшие физиологические механизмы константности цветовосприятия в зрительной системе животных. — В кн.: Механизмы зрения животных. М.: Наука, 1978, с. 96—134.
19. Максимова Е.М., Диментман А.М., Максимов В.В., Орлов О.Ю. Электрофизиологическое исследование константности цветовосприятия в сетчатке. — В кн.: Механизмы работы рецепторных элементов органов чувств. Л.: Наука, 1973, с. 75—80.
20. Максимова Е.М., Максимов В. В. Насыщение S-потенциалов сетчатки рыб. Двух компонентные реакции. — Биофизика, 1969, т. 14, N 5, с. 905—913.
21. Максимова Е.М., Максимов В.В., Орлов О.Ю. Усилительное взаимодействие между сигналами от рецепторов в клетках — источниках S-потенциалов. — Биофизика, 1966, т. 11, N 3, с. 472—477.
22. Мазохин-Поршняков Г.А. Колориметрическое доказательство трихрома-

- зии пчелиных (на примере шмелей). — Биофизика, 1962, т. 7, N 2, с. 211—217.
23. *Мазохин-Поршняков Г. А.* Зрение насекомых. М.: Наука, 1965. 263 с.
24. *Мазохин-Поршняков Г. А.* Насекомые и цвет. — Природа, 1965, N 6, с. 58—62.
25. Международный светотехнический словарь/Под ред. Г.И. Ашкенази. М.: Физматгиз, 1963. 428 с.
26. *Мешков В.В.* Основы светотехники. Физиологическая оптика и колориметрия. М.; Л.: Госэнергиздат, 1961. Ч. 2. 416 с.
27. *Николаев П.П.* Некоторые алгоритмы узнавания окраски поверхностей. — В кн.: Моделирование обучения и поведения. М.: Наука, 1975, с. 121 — 151.
28. *Нюберг Н.Д.* Опыт построения тела цветовых ощущений при заданном освещении. — Вест. теорет. и эксперим. Электротехники, 1928, т. 1, N 6, с. 232—238; N 7, с. 248—252.
29. *Нюберг Н.Д.* Математические основы задачи измерения цвета. — В кн.: Федоров Н.Т. Современное состояние колориметрии. М.: ГТТИ, 1933, с. 141 — 169.
30. *Нюберг Н.Д.* Математические основы задачи построения цветового тела. — В кн.: Федоров Н.Т. Современное состояние колориметрии. М.: ГТТИ, 1933, с. 169—183.
31. *Нюберг Н.Д.* Спектральный состав источника и цвета освещаемых им тел. — Светотехника, 1936, с. 117—124.
32. *Нюберг Н.Д.* Определение положения в цветовом треугольнике основного-синего цвета. — Докл. АН СССР, 1949, т. 65, N 2, с. 159—162.
33. *Нюберг Н.Д.* Светочувствительные приемники глаза. — Пробл. физиол. оптики, 1950, т. 9, с. 61—76.
34. *Нюберг Н.Д.* Особенности цветного зрения при оценке цветовоспроизведения на цветных изображениях. — Пробл. физиол. оптики, 1953, т. 8, с. 128—134.
35. *Нюберг Н.Д.* Парадоксы цветного зрения. — Природа, 1960, N 8, с. 53—59.
36. *Нюберг Н.Д., Бонгард М.М., Николаев П. П.* I. О константности восприятия окраски. — Биофизика, 1971, т. 16, N 2, с. 285—293.
37. *Нюберг Н.Д., Николаев П. П., Бонгард М.М.* II. О константности восприятия окраски. — Биофизика, 1971, т. 16, N 6, с. 1052—1063.
38. *Нюберг Н.Д., Юстова Е.Н.* Исследование цветного зрения дихроматов. — Труды ГОИ, 1955, т. 24, N 143, с. 33—93.
39. *Орлов О.Ю.* Приемники сетчатки и зрительные пигменты. — Биофизика, 1961, т. 6, N 3, с. 331—338.
40. *Орлов О.Ю.* Цветовое зрение. — В кн.: Физиология сенсорных систем. Физиология зрения. Л.: Наука, 1971, ч. 1, с. 246—269.
41. *Орлов О.Ю.* Об эволюции цветного зрения у позвоночных. — В кн.: Проблемы эволюции. Новосибирск: Наука, 1972, т. 2, с. 69—94.
42. *Орлов О.Ю.* Цветные очки животных. — Природа, 1974, N 8, с. 35—41.
43. *Орлов О.Ю., Максимов В.В.* Цветовое зрение и поведение амфибий. — В кн.: Сенсорные системы. Зрение. Л.: Наука, 1982, с. 114—125.
44. *Орлов О.Ю., Максимова Е. М.* О роли внутриколбочковых светофильтров: (Механизм цветного зрения ящериц и черепах). — Докл. АН СССР, 1964, т. 154, N 2, с. 463—466.
45. *Оствальд В.* Цветоведение. М.; Л.: Промиздат, 1927. 165 с.
46. *Островский М.А.* Фоторецепция. — В кн.: Физиология сенсорных систем. Физиология зрения. Л.: Наука, 1971, ч. 1, с. 88—119.
47. *Подугольникова Т. А., Максимов В.В.* Мозаика фоторецепторов и нервных элементов сетчатки рыб. — В кн.: Сенсорные системы: Морфологические и поведенческие аспекты. Л.: Наука, 1977, с. 178—196.
48. *Смирнов М.С., Бонгард М.М.* О контрастных цветах. — Биофизика, 1956, т. 1, N 2, с. 174—177.
49. *Федоров Н.Т.* Современное состояние колориметрии. М.: ГТТИ, 1933. 186 с.
50. *Федоров Н.Т.* Общее цветоведение. М.: ГОНТИ, 1939. 228 с.
51. *Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. I. Адекватный зрительный стимул. — Биофизика, 1975, т. 20, N 5, с. 916—919.
52. *Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека II. Цвет. — Биофизика, 1975, т. 20, N 6, с. 1099—1104.
53. *Adams E.Q.* X-Z planes in the 1931 CIE system of colorimetry. - J. Opt. Soc. Amer., 1942, vol. 32, p. 168-174.
54. *Ali M.A., Wagner H.-J.* Visual pigments: phylogeny and ecology. - In: Vision in fishes. New approaches in research/ Ed. M.A. Ali, N.Y.: Plenum press, p. 481-516.
55. *Allen E.* Theoretical limits of me-

- tamerism. - J. Opt. Soc. Amer., 1966, vol. 56, N 4, p. 559.
56. *Allen E.* Some new advances in the study of metamerism. — Color Eng., 1969, vol. 7, p. 35—41.
57. *Anderson D.H., Jacobs G.H.* Color vision and visual sensitivity in the California ground squirrel (*Citellus beecheyi*). — Vision Res., 1972, vol. 12, N 12, p. 1995-2004.
58. *Autrum H.* Colour vision in man and animals. — Naturwissenschaften, 1968, Bd. 55, H. 1, S. 10-18.
59. *Bartleson C.J.* Review of chromatic adaptation. - In.: AIC Color 77: Proc. 3 rd AIC Congr. L.: Adam Hilger, 1977, p. 63-96.
60. *Birkow G.* Purkinjesches Phenomen und Farbsehen beim Grosfrosch (*Rana temporaria*). - Ztschr. vergl. Physiol., 1939, Bd. 27, S. 41-79.
61. *Blackwell H.K., Blackwell O. M.* Rod and cone receptor mechanisms in typical and atypical congenital achromatopsia. - Vision Res., 1961, vol. 1, N 1/2, p. 62-107.
62. *Bowmaker J.K.* Long-lived photoproducts of the greenrod pigment in the frog, *Rana temporaria*. — Vision Res., 1977, vol. 17, N 1, p. 17-23.
63. *Bowmaker J.K., Dartnall H.J.A.* Visual pigments of rods and cones in a human retina. - J. Physiol., 1980, vol. 298, p. 501-511.
64. *Bowmaker J.K., Dartnall H.J.A., Motion J.D.* Microspectrophotometric demonstration of four classes of photoreceptor in an old world primate (*Macaca fascicularis*). - J. Physiol., 1980, vol. 298, p. 131-143.
65. *Brill M.H.* A device performing illuminant-invariant assessment of chromatic relations. - J. Theor. Biol., 1978, vol. 71, p. 473-478.
66. *Brown P.R., Wald G.* Visual pigments in single rods and cones of the human retina. - Science, 1964, vol. 144, p. 45—51.
67. *Bühler K.* Die Erscheinungsweisen der Farben. — Im: Handbuche der Psychologie. T. I. Die Structur der Wahrnehmungen. H. 1. Jena: Fischer, 1922, S. 3-77.
68. *Bull H.O.* Studies on conditioned responses in fishes. III. Wave-length discrimination in *Blennius Pholis L.* — J.Mar. Biol. Assoc. U.K., 1935, vol. 20, p. 347-364.
69. *Burcamp W.* Versuche über das Farbenwiedererkennen der Fische. — Ztschr. Sinnesphysiol., 1923, Bd. 55, N 3, S. 133-170.
70. *Burkhardt D.A.* The goldfish ERG: Relation between photopic spectral sensitivity functions and absorption spectra. - Vision Res., 1966, vol. 6, N 4, p. 517-532.
71. *Burnham R.W.* Predictions of shift in color appearance with a change from daylight to tungsten adaptation. - J. Opt. Soc. Amer., 1959, vol. 49, N 3, p. 254-263.
72. *Burnham R.W., Evans R.M., Newhall S.M.* Influence on color perception of adaptation to illumination. - J. Opt. Soc. Amer., 1952, vol. 42, N 5, p. 597-605.
73. *Cameron N.E.* The photopic spectral sensitivity of a dichromatic teleost fish (*Perca fluviatilis*). - Vision Res., 1982, vol. 22, N 11, p. 1341-1352.
74. *Clarke G.L., James P.* Laboratory analysis of the selective absorption of light by sea water. - J. Opt. Soc. Amer., 1939, vol. 29, N 2, p. 43-55.
75. *Condit H.K., Grum F.* Spectral energy-distribution of daylight. - J. Opt. Soc. Amer., 1964, vol. 54, N 7, p. 937-943.
76. *Cooper G.F., Robson J.G.* The yellow colour of the lens of the grey squirrel (*Sciurus carolinensis leucotis*). — J. Physiol., 1969, vol. 203, p. 403-410.
77. *Crescitelli F.* The gekko visual pigments: The behavior of opsin. - J. Gen. Physiol., 1979, vol. 73, N 5, p. 541-552.
78. *Dartnall H.J.A.* Visual pigment 467, a photosensitive pigment present in teleost retinae. - J. Physiol., 1952, vol. 116, p. 257-289.
79. *Dartnall H.J.A.* The interpretation of spectral sensitivity curves. - Brit. Med. Bull., 1953, vol. 9, p. 24-30.
80. *Daw N. W.* Neurophysiology of color vision. - Physiol. Revs, 1973, vol. 53, N 3, p. 571-611.
81. *Daw N.W., Pearlman A.L.* Cat colour vision: One cone process or several? - J. Physiol., 1969, vol. 201, p. 745-764.
82. *Dietz M.* Über das Helligkeits- und Farbsehen der Erdkrote *Bufo bufo*. München: Diplomarbeit, 1971.
83. *Dixon E.R.* Spectral distribution of Australian daylight. - J. Opt. Soc. Amer., 1978, vol. 68, N. 4, p. 437-450.
84. *Donner K.O., Reuter T.* The spectral sensitivity and photopigment of the greenrods in the frog's retina. - Vision Res., 1962, vol. 2, N 3, p. 357-372.
85. *Dunn R.F.* Studies in the retina of the gekko *Coleonyx variegatus*. I. The visual cell classification. - J. Ultrastruct. Res., 1966, vol. 16, p. 651-671.
86. *Duntley S.Q.* Light in the sea. - J. Opt. Soc. Amer., 1963, vol. 53, p. 214-233.
87. *Ebrey T.G., Honig B.* New wavelength dependent visual pigment nomog-

- rams. - *Vision Res.*, 1977, vol. 17, N 2, p. 147-151.
88. *Engstrom K.* Cone types and cone arrangement in teleost retinas. - *Acta zool.*, 1963, vol. 44, N 1/2, p. 179-243.
89. *Evans G.C.* Model and measurement in the study of woodland light climates. - In: *Light as an ecological factor.* Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1966, p. 53-76.
90. *Fernald R.D., Liebman P.A.* Visual receptor pigments in the African cichlid fish, *Haplochromis burtoni*. - *Vision Res.*, 1980, vol. 20, N 10, p. 857-864.
91. *Frisch K.* Weitere Untersuchungen über Farbensinn der Fische. - *Zool. Jb. Jena. Abt. allg. Zool.*, 1913, Bd. 34, S. 43-68.
92. *Gaines R., Powell G.J.* Children's color perception in relation to habitat and skin color. - *Child Develop.*, 1981, vol. 52, p. 914-920.
93. *Govardovskii V.I., Zueva L.V.* Spectral sensitivity of the frog eye in the ultraviolet and visible region. - *Vision Res.*, 1974, vol. 14, N 12, p. 1317-1321.
94. *Govardovskii V.I., Zueva L.V.* Visual pigments of chicken and pigeon. - *Vision Res.*, 1977, vol. 17, N 4, p. 537-543.
95. *Gruber S.H.* Duplex vision in the elasmobranchs: Histological, electrophysiological and psychological evidence. - In: *Vision in fishes: New approaches in research.* N.Y.: Plenum press, 1975, p. 525-540.
96. *Guth S.L., Massof R.W., Benzschawel T.* Vector model for normal and dichromatic color vision. - *J. Opt. Soc. Amer.*, 1980, vol. 70, N 2, p. 197-212.
97. *Mailman J.P.* Environmental light and conspicuous colors. - In: *The behavioral significance of color.* N.Y.: Garland STPM press, 1979, p. 291-354.
98. *Handbook of colorimetry / Ed. A. Hardy.* Cambridge: Technol. press, 1936, 93 p.
99. *Handbook of sensory physiology. Vol. VII/1. Photochemistry of vision / Ed. H.J.A. Dartnall.* N.Y.: Spring.-Verl., 1972, 637 p.
100. *Hárosi F.I.* Spectral relations of cone pigments in goldfish. — *J. Gen. Physiol.*, 1976, vol. 68, p. 65-80.
101. *Helmholtz H.L.F.* *Handbuch der Physiologischen Optik.* Hamburg: Verl. von L. Voss, 1909, 513 S.
102. *Helson H.* *Adaptation-level theory.* N.Y.: Harper and Row, 1964, 148 p.
103. *Helson H., Judd D.B., Warren M.H.* Object-color changes from daylight to incandescent filament illumination. - *Illum. Eng.*, 1952, vol. 47, p. 221-233.
104. *Hering E.* *Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn.* B.: Springer, 1920, 268 S.
105. *Horn B.K.P.* Shape from shading: A method for finding the shape of a smooth opaque object from one view. MAC TR-79, MIT, 1970, 196 p.
106. *Horn B.K.P.* Determining lightness from an image. - *Comput. Graph. and Image Process.*, 1974, vol. 3, p. 277-299.
107. *Hurvich L.M., Jameson D.* An opponent-process theory of color vision. - *Psychol. Revs.*, 1957, vol. 64, p. 384-404.
108. *Jacobs G.H., Bowmaker J.K., Mollon J.D.* Behavioral and microspectrophotometric measurements of color vision in monkeys. - *Nature*, 1981, vol. 292, N 5823, p. 541-543.
109. *Jacobs G.H., Yollon R.L.* Visual sensitivity and color vision in ground squirrel. - *Vision Res.*, 1971, vol. 11, N 6, p. 511-537.
110. *Jaensch E.R.* Über der Farbenkontrast und die sog. Berücksichtigung der farbigen Beleuchtung. - *Ztschr. Sinnesphysiol.*, 1921, Bd. 52, N 5, S. 165-180.
111. *Jerlov N.G.* *Optical oceanography.* N.Y.: Elsevier, 1968, 153 p.
112. *Judd D.B.* Hue, saturation and lightness of surface color with chromatic illumination. - *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1940, vol. 24, p. 293-333.
113. *Judd D. B., Mac Adam D.L., Wyszecki G.* Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. - *J. Opt. Soc. Amer.*, 1964, vol. 54, p. 1031-1040.
114. *Julesz B.* *Foundation of cyclopean perception.* Chicago: Univ. press, 1971, 222 p.
115. *Kasperczyk M.* Comparative studies on colour sense in amphibia (*Rana temporaria L., Salamandra salamandra L.* and *Triturus cristatus Laur.*). — *Folia biol. (PRL)*, 1971, vol. 19, N 2, p. 241-288.
116. *Kälz D.* *Der Aufbau der Farbenwelt.* Leipzig: J.A. Barth, 1930, 300 S.
117. *Katz D., Revesz G.* Experimentelle Studien zur wergleichen den psychologic. - *Ztschr. angew. Psychol.*, 1921, Bd. 18, N 4/6, S. 307-344.
118. *Kicliter E., Loop M.S.* A test of wavelength discrimination. - *Vision Res.*, 1976, vol. 16, N 9, p. 951-956.
119. *Köhler W.* Die Farbe der Sehedinge beim Schimpansen und Haushuhn. — *Ztschr. Psychol.*, 1916, Bd. 77, S. 148—185.
120. *König A.* *Handbuch der Experimentalphysik.* Bd. 20. T. I. Physiologische

- Optik. Leipzig: Akad. Verlagsges., 1929, 241 S.
121. *Kries J.* Die Gesichtsempfindungen. — In: Handbuch der Physiologie des Menschen. Braunschweig, 1905, Bd. 3, S. 109-282.
122. *Kroh O.* Über Farbenkonstanz und Farbentransformation. — Ztschr. Sinnesphysiol., 1921, Bd. 52, N 5, S. 181-216; N 6, S. 235-274.
123. *Land E.H.* The retinex theory of color vision. — Sci. Amer., 1977, vol. 237, N 6, p. 108-128.
124. *Land E.H., McCann J.J.* Lightness and retinex theory. — J. Opt. Soc. Amer., 1971, vol. 61, p. 1-11.
125. *Levine J.S., MacNichol E.F., Kraft T., Collins B.A.* Intraretinal distribution of cone pigments in certain teleost fishes. — Science, 1979, vol. 204, N 4392, p. 523-526.
126. *Liebman P.A.* Microspectrophotometry of photoreceptors. — In: Handbook of sensory physiology. Vol. VII/1. Photochemistry of vision/Ed. H.J.A. Dartnall. N.Y.: Spring-Verl., 1972, p. 481—528.
127. *Liebman P.A., Entine G.* Visual pigments of frog and tadpole (*Rana pipiens*). — Vision Res., 1968, vol. 8, N 6, p. 761-775.
128. *Locket N.A.* Retinal anatomy in some scopolarchid deep-sea fishes. — Proc. Roy. Soc. London, 1971, vol. 178, p. 161-184.
129. *Loew E.R.* The visual pigments of the gray squirrel, *Sciurus carolinensis leucotis*. — J. Physiol., 1975, vol. 251, N 1, p. 47-49P.
130. *Loew E.R., Lythgoe J.N.* The ecology of cone pigments in teleost fishes. — Vision Res., 1978, vol. 18, N 6, p. 715—722.
131. *Loop M.S., Bruce L.* Effect of target size on color discrimination in the cat. — In: Society for neurosciences. Abstr. Vol. HI, 7th Annu. Meet. Anaheim, 1977, p. 568.
132. *Luther R.* Aus dem Gebiet der Farbmetrik. — Ztschr. Techn. Phys., 1927, Bd. 8, N 12, S. 540-558.
133. *Lythgoe J.N.* Visual pigments and visual range underwater. — Vision Res., 1968, vol. 8, N 9, p. 997-1012.
134. *Lythgoe J.N.* List of vertebrate visual pigments. — In: Handbook of sensory physiology. Vol. VII/1. Photochemistry of vision, Ed. H.J.A. Dartnall. N.Y.: Spiring.-Verl., 1972, p. 604-624.
135. *Lythgoe J.N.* Problems of seeing colours under water. — In: Vision in fishes: New approaches in research / Ed. M.A.Ali. N.Y.: Plenum press, 1975, p. 619-634.
136. *MacAdam D.L.* Maximum visual efficiency of coloured materials. — J. Opt. Soc. Amer., 1935, vol. 25, p. 361-379.
137. *MacAdam D.L.* Chromatic adaptation. — J. Opt. Soc. Amer., 1956, vol. 46, N 4, p. 500-513.
138. *Maksimova E.M.* Cellular mechanisms of colour constancy. — Activ. nerv. super., 1977, sv. 19, N 3, s. 199-201.
139. *Marks W.B.* Visual pigments of single goldfish cones. — J. Physiol., 1965, vol. 178, N 1, p. 14-32.
140. *Marks W.B., Dobelle W.H., MacNichol E.F.* Visual pigments of single primate cones. — Science, 1964, vol. 143, p. 1181-1183.
141. *Maturana H.R., Uribe G., Frenk S.* A biological theory of relativistic colour coding in the primate retina. — Archiv. biol. y med. exp., 1968, supl. I, p. 1-30.
142. *McCann J.J., Benton J.L.* Interaction of long-wave cones and rod rods to produce color sensation. — J. Opt. Soc. Amer., 1969, vol. 59, N 1, p. 103-107.
143. *McCann J.J., Hall J.A., Land E.H.* Color Mondrian experiments: The study of average spectral distribution. — J. Opt. Soc. Amer., vol. 67, N 10, p. 1380.
144. *McCann J.J., McKee S.P., Taylor T.H.* Quantitative studies in retinex theory: A comparison between responses to the Color Mondrian experiments. — Vision Res., 1976, vol. 16, N 5, p. 445-458.
145. *McCullough E.C., Porter W.P.* Computing clear day solar radiation spectra for terrestrial ecological environment. — Ecology, 1971, vol. 52, N 6, p. 1008-1015.
146. *McFarland W.N., Munz F.W.* Pt II. The photic environment of clear tropical seas during the day. — Vision Res., 1975, vol. 15, N 10, p. 1063-1070.
147. *McFarland W.N., Munz F.W.* Pt III. The evolution of photopic visual pigments in fishes. — Vision Res., 1975, vol. 15, N 10, p. 1071-1080.
148. *McKee S.P., McCann J.J., Benion J.L.* Color vision from rod and long-wave cone interactions: Conditions in which rods contribute to multicolored images. — Vision Res., 1977, vol. 17, N 2, p. 175-185.
149. *Meyer D.K., Anderson R.A.* Colour discrimination in cats. — In: Ciba Found. Symp. Colour Vision. L.: Churchill, 1965, p. 325-344.
150. *Michael C.R.* Receptive fields of single optic nerve fibers in a mammal with an all cone retina. III. Opponent

- color units. — *J. Neurophysiol.*, 1968, vol. 31, p. 268-281.
151. *Moreland J.D., Lythgoe J.N.* Yellow corneas in fishes. — *Vision Res.*, 1968, vol. 8, N 12, p. 1377-1380.
152. *Muntz W.R.A.* Phototaxis and green rods in urodeles. — *Nature*, 1963, vol. 199, p. 620-630.
153. *Muntz W.R.A.* Inert absorbing and reflecting pigments. — In: *Handbook of sensory physiology*. Vol. VII/1. Photochemistry of vision/Ed. H.J.A. Dartnall. N.Y.: Springer-Verl., 1972, p. 529-565.
154. *Muntz W.R.A.* Visual adaptations to different light environments in Amazonian fishes. — *Rev. Canad. Biol. Exp.*, 1982, vol. 41, N 1, p. 35-46.
155. *Muntz W.R.A., Northmore D.P.M.* The independence of the photopic receptor system underlying visual thresholds in a teleost. — *Vision Res.*, 1971, vol. II, N 8, p. 861-876.
156. *Muntz F.W., McFarland W.N.* The significance of spectral position in the rhodopsins of tropical marine fishes. — *Vision Res.*, 1973, vol. 13, N 12, p. 1829-1873.
157. *Muntz F.W., Schwanzara S.A.* A nomogram for retinene-based visual pigments. — *Vision Res.*, 1967, vol. 7, N 1, p. 111-120.
158. *Naka K., Rushton W.A.H.* An attempt to analyse colour reception by electrophysiology. — *J. Physiol.*, 1966, vol. 185, p. 556-573.
159. *Nickerson D.* Measurement and specification of color rendition properties of light sources. — *Illum. Eng.*, 1958, vol. 53, N 2, p. 77-90.
160. *Nyberg N.* Zum Aufbau des Farbkörpers im Raume aller Lichtempfindungen. — *Ztschr. Phys.*, 1928, Bd. 52, N 5/6, S. 406-419.
161. *O Day W.T., Fernandez H.R.* *Aristostromias scientillans (Malacosteidae)*: A deep-sea fish with visual pigments apparently adapted to its own bioluminescence. — *Vision Res.*, 1974, vol. 14, N 5, p. 545-550.
162. *Ohta N., Wyszecki G.* Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers viewed under different illuminants. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1975, vol. 65, N 3, p. 327-333.
163. *Ohta N., Wyszecki G.* Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers due to a change from CIE Illuminant Ass to C. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1975, vol. 65, N 10, p. 1152-1153.
164. *Orlov O.Yu., Maksimova E.M.* 5-potential sources as excitation pools. — *Vision Res.*, 1965, vol. 5, N 4, p. 573-582.
165. *Parsons J.H.* An introduction to the study of color vision. Cambridge: Univ. press, 1924. 316 p.
166. *Powers M.K., Easter S.S.* Wavelength discrimination by the goldfish near absolute visual threshold. — *Vision Res.*, 1978, vol. 18, N 9, p. 1149-1154.
167. *Reuter T.* Visual pigments and ganglion cell activity in the retinae of tadpoles and adult frogs (*Rana temporaria L.*). — *Acta zool. fenn.*, 1969, vol. 122, p. 1-64.
168. *Richards W.* Why rods and cones? — *Biol. Cybern.*, 1979, vol. 33, N 3, p. 125-135.
169. *Ringo J., Wolbarsht M.L., Wagner H.G.* et al. Trichromatic vision in the cat. — *Science*, 1977, vol. 198, N 4318, p. 753-755.
170. *Rosch S.* Darstellung der Farbenlehre für die Zwecke des Mineralogen. — *Fortschr. Miner., Kristallogr., Petrogr.*, 1929, Bd. 13, S. 73-234.
171. *Ruddock K.H.* The effect of age upon colour vision. II: Changes with age in light transmission of the ocular media. — *Vision Res.*, 1965, vol. 5, N 1, p. 47-59.
172. *Sastri V.D.P., Das S.R.* Typical spectral distributions and color for tropical day light. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1968, vol. 58, N 3, p. 391-398.
173. *Schrodinger E.* Theorie der Pigmente von grb/3ter Leuchtkraft. — *Ann. Phys. IV*, 1920, Bd. 62, S. 603-622.
174. *Schrödinger E.* Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. — *Ann. Phys. IV*, 1920, Bd. 63, S. 397-520.
175. *Schulz H.* Bemerkungen über Komplementärfarben. — *Ztschr. Phys.*, 1925, Bd. 32, N 1/2, S. 173-179.
176. *Sechzer J.A., Broun J.L.* Colour discrimination in the cat. — *Science*, 1964, vol. 144, N 3617, p. 46-48.
177. *Sensory ecology*. Review and perspectives/Ed. M.A.Ali. N.Y.: Plenum press, 1978, 597 p.
178. *Shevell S.K.* The dual role of chromatic backgrounds in color perception. — *Vision Res.*, 1979, vol. 18, N 12, p. 1649-1662.
179. *Silver P.H.* A gray squirrel spectral sensitivity by heterochromatic flicker and its implications. — *Vision Res.*, 1976, vol. 16, N 11, p. 1235-1239.
180. *Smyth R.C., Tyler J.E.* Optical properties of clear natural water. —

- J. Opt. Soc. Amer., 1967, vol. 57, N 5, p. 589-595.
181. *Steli W.K.* The structure and morphological relations of rods and cones in the retina of the spiny dogfish, *Squalus*. - Comp. Biochem. and Physiol. A, 1972, vol. 42, p. 141-151.
182. *Stiles W.S., Wyszecki G.W.* Counting metameric object colors. — J. Opt. Soc. Amer., 1962, vol. 52, N 3, p. 313-328.
183. *Stiles W.S., Wyszecki G., Ohta N.* Counting metameric object-color stimuli using frequency-limited spectral reflectance functions. — J. Opt. Soc. Amer., 1977, vol. 67, N 6, p. 779-784.
184. *Sumitomo I., Sugitani M., Iwana K.* Opponent-color cells of the chipmunk dorsal lateral geniculate nucleus. - J. Physiol. Soc. Jap., 1980, vol. 42, N 8/9, p. 293.
185. *Svaetichin G., MacNichol E.F.* Retinal mechanisms for chromatic and achromatic vision. — Ann. N.Y. Acad. Sci., 1958, vol. 74, p. 385-404.
186. *Svaetichin C., Negishi K., Fatchand R.* Cellular mechanisms of a Young-Hering visual system. - In: Ciba Found. Symp. Colour Vision. L.: Churchill, 1965, p. 178-203.
187. *Terstiege H.* Farbumstimmung. - Farbe, 1971, vol. 20, N 4/6, p. 276-288.
188. *Tomita T.* Electrophysiological study of the mechanisms subserving color coding in the fish retina. - Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol., 1965, vol. 30, p. 559-566.
189. *Tresona P.W.* The tetrachromatic colour match as a colorimetric technique. - Vision Res., 1973, vol. 13, N1, p. 9-25.
190. *Tyler J.E., Smyth R.C.* Spectroradiometric characteristics of natural light under water. - J. Opt. Soc. Amer., 1967, vol. 57, N5, p. 595-601.
191. *Underwood G.* The eye. - In: Biology of the reptilia/Ed. C. Gaus. N.Y.: Acad. press, 1970, p. 1-97.
192. *Viaud G.* La vision chromatique chez les animaux (sauf les insectes). - In: Mechanisms of colour discrimination. L.: Pergamon press, 1960, p. 41-57.
193. *Viénot J.* Colorimétrie de l'adaptation chromatique. - J. physiol. norm, et pathol., 1978, vol. 75, N4, p. 419-434.
194. *Wald G.* Human vision and the spectrum. - Science, 1945, vol. 101, p. 653-656.
195. *Walls G.L.* The vertebrate eye and its adaptive radiation. Bloomfields Hills: Cranbrook Inst. Sci., 1942. 537 p.
196. *Walraven J.* Discontinuity in the background - the missing link in the explanation of chromatic induction. - Vision Res., 1976, vol. 16, N3, p. 289-295.
197. *Ware C., Cowan W.B.* Changes in perceived color due to chromatic interaction. - Vision Res., 1982, vol. 22, N11, p. 1353-1362.
198. *Warner L.H.* The problem of color vision in fishes. — Quart. Rev. Biol., 1931, vol. 6, p. 329-348.
199. *West R.W.* Light and electron microscopy of the Ground squirrel retina: Functional considerations. - J. Corp. Neurol., 1976, vol. 168, N3, p. 355-378.
200. *Whittle P.* The brightness of coloured flashes on background of various colours and luminances. - Vision Res., 1973, vol. 13, N3, p. 621-638.
201. *Whittle P., Chaltands P.D.S.* The effect of background luminance on the brightness of flashes. - Vision Res., 1969, vol. 9, N8, p. 1095-1110.
202. *Winch G.T., Boshoff M.C., Kok C.J., du Toit A.G.* Spectro-radiometric and colorimetric characteristics of daylight in the Southern Hemisphere: Pretoria, South Africa. - J. Opt. Soc. Amer., 1966, vol. 56, N3, p. 456-464.
203. *Witkovsky P.* The effect of chromatic adaptation on color sensitivity of the carp electroretinogram. - Vision Res., 1968, vol. 8, N7, p. 823-837.
204. *Wolff H.* Das Farbenunterschiedungsvermögen der Ellritze. - Ztschr. vergl. Physiol., 1925, Bd. 3, N3, S. 279-329.
205. *Wyszecki G.* A note on colors of equal lightness. - Farbe, 1960, Bd. 9, N1/3, S. 3-6.
206. *Yager D.* Behavioral measures and theoretical analysis of spectral sensitivity and spectral saturation in the goldfish, *Carassius auratus*. — Vision Res., 1967, vol. 7, N 9/10, p. 707—727.
207. *Zrenner E., Gouras P.* Spectral opponency and asymmetry between cone mechanisms in the cat electroretinogram (ERG). - In: Society for neurosciences. Abstr. Vol. III, 7th Annu. Meet. Anaheim, 1977, p. 583.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1	
Константность цветовосприятия	10
Глава 2	
Цветовое тело	42
Глава 3	
Преобразования метамерных цветов при изменении освещения 74	
Глава 4	
Константная оценка светлоты с помощью цветового зрения. .	100
Глава 5	
Преобразования характеристических цветов	127
Заключение	149
Литература	154