

УДК 577.3

**БИОФИЗИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ**

II. О КОНСТАНТНОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ОКРАСКИ

Н. Д. НЮБЕРГ, П. П. НИКОЛАЕВ, **М. М. БОНГАРД**

Институт проблем передачи информации АН СССР, Москва

Статья является продолжением опубликованной ранее работы по изучению механизмов цветовосприятия у человека (см. [1]). Во второй части предложена «зональная» модель процесса восприятия цвета излучений и окраски предметов. На ее базе построены алгоритмы, осуществляющие константное восприятие окраски. В языке алгоритмов отсутствуют аналоги «гетерохромной яркости» или какие-либо другие операции по сравнению между собой возбуждений приемников разных типов. По этим алгоритмам гипотеза о свойствах источника строится на основании сопоставления нескольких мест поля зрения. Для плоской картины суждение о мощности излучения источника в каждой зоне спектра выносится по одному месту поля зрения. В ситуациях с неплоскими объектами (гофрами) гипотеза о каждой составляющей источника строится с учетом не только освещенных, но и теневых частей поверхности. Как показали психофизические опыты, для ряда простых ситуаций восприятие окраски поверхностей человеком качественно совпадает с «восприятием» построенных алгоритмов. Эксперименты доказали также возможность одновременного формирования разных гипотез об источнике для разных частей поля зрения.

Опыты, описанные в первой части данной статьи (см. [1]), выявили роль самых светлых мест поля зрения, роль неоднородностей цвета, вызванных многократными отражениями света от поверхности предмета, показали также, что хорошо известное физиологам явление одновременного цветового контраста, по-видимому, представляет собой частный случай так называемой ложной константности. Во второй части статьи мы рассмотрим несколько алгоритмов, моделирующих константное восприятие окраски поверхностей.

Описания окраски, даваемые человеком, обычно тем более исчерпывающи и точны, чем яснее наблюдателю характер освещения. Поэтому первым (и весьма существенным) этапом работы предлагаемых моделей является создание гипотезы о характере освещения. Выяснение особенностей освещения возможно благодаря существованию разнообразных признаков освещения. В [1] были упомянуты некоторые из этих признаков: блики на поверхности светящихся предметов; использование предметов, отражательные свойства которых известны, для восстановления по ним локальных особенностей освещения. Отыскание зрительной системой таких признаков — процесс, связанный и с сопоставлением проекций возбуждений с обеих сетчаток (бинокулярный поиск бликов), и с памятью («листья чаще всего зеленые»), и с узнаванием формы (ведь листья надо сначала узнать). Поэтому знания *только* распределения реакций трех типов приемников глаза недостаточно для описания всей совокупности ситуаций, называемых константными. Ситуации эти могут

сильно отличаться одна от другой сложностью поиска признаков освещения, их противоречивостью, трудностью процесса узнавания формы и т. п. В данной работе мы будем рассматривать лишь те простейшие константные ситуации, для которых задача по узнаванию окраски требует только задания карты возбуждений (реакций) приемников сетчатки одного глаза и не предполагает необходимости привлечения бинокулярности, памяти и т. п. Будем считать также, что узнавание формы закончилось к моменту включения механизмов константности, а потому форма предмета определена (для тех случаев, когда сведения такого рода необходимы при решении основной задачи).

Возбуждение a_i приемника (фовеальной части сетчатки человека) данного типа i излучением спектрального состава $f(\lambda)$ выражается так:

$$a_i = \int_0^{\infty} f(\lambda) \alpha_i(\lambda) d\lambda \quad (i = 1, 2, 3), \text{ где } \lambda \text{ — длина волны излучения,}$$

а $\alpha_i(\lambda)$ — спектральная чувствительность приемника i -го типа. Задача константности будет решена, если, комбинируя по заданному алгоритму реакции a_i различных мест сетчатки, удастся построить описание окраски предмета.

Ограничения, вводимые для зональной модели константности

В общем случае окраска поверхности описывается зависимостью коэффициента отражения поверхности от длины волны и углов падения и рассеяния света. Это сложная многомерная характеристика. В зависимости от конкретных условий наблюдения какая-то часть сведений, содержащихся в этой характеристике, может быть извлечена зрительной системой. На уровне описания ощущений это будет соответствовать появлению таких дополнительных определений отражательных свойств поверхности, как «поверхность глянцевая, бликующая», «материал радужный, переливчатый», «стекло матовое» и т. п.

Чтобы упростить положение, зададимся для модели таким «внешним миром», в котором все поверхности равномерно рассеивающие. Для таких поверхностей кривая отражения $\varphi(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{F(\lambda)}$, где

$F(\lambda)$ — спектральный состав излучения, освещающего поверхность, а $f(\lambda)$ — спектральный состав света, отраженного ею. Но и такое описание окраски своей сложностью превышает пропускные возможности одиночного зрительного канала. Поэтому мы введем еще такие дополнительные ограничения на свойства модели и ее «внешнего мира», что описание окраски поверхности станет трехмерным. Кроме того, нам будет удобно сделать, чтобы цвет излучения, отраженного поверхностью, зависел только от окраски поверхности и цвета падающего излучения (в реальном мире это соотношение не выполняется, так как на цвет отраженного излучения влияет и спектральный состав падающего света).

Пусть спектры источников света представляют собой набор трех зон видимой части спектра, таких, что внутри каждой мощность излучения

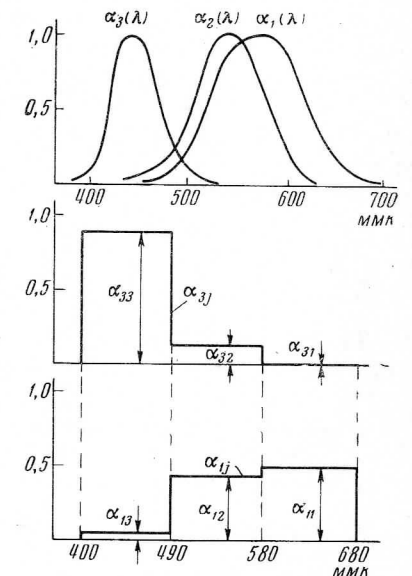


Рис. 1. Аппроксимация кривых спектральной чувствительности приемников глаза в модели «Ступенчатые» приближения приведены для кривых чувствительности красного и синего приемников. По оси ординат — относительная чувствительность

не зависит от длины волны и выражается числом энергетических единиц (одних и тех же для любой из зон). Кривые отражения поверхностей и кривые чувствительности приемников модели пусть имеют такой же зональный вид, с теми же границами зон (см. рис. 1). Каждая кривая чувствительности приемника глаза $\alpha_i(\lambda)$ в модели опишется тремя числами α_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), представляющими собой коэффициенты чувствительности i -го приемника модели в j -й зоне. Обозначив величины стимулов в «красной» ($j=1$), «зеленой» ($j=2$) и «синей» ($j=3$) зонах через f_j , получим выражение для реакции приемника модели:

$$a_i = \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} f_j. \quad (1)$$

Три коэффициента отражения зональной поверхности образуют числовой вектор \vec{a} . Величины его составляющих ϕ_j показывают, какую часть j -й составляющей вектора падающего излучения отражает эта поверхность. Если зональная поверхность освещена источником \vec{F} с составляющими F_j , а \vec{f}_j — составляющие вектора излучения \vec{f} , отраженного этой поверхностью, то

$$\phi_j = \frac{f_j}{F_j}. \quad (2)$$

Таким образом, вектор окраски $\vec{\phi}$ может быть найден по векторам стимулов \vec{f} и \vec{F} . Модель располагает лишь реакциями ее приемников на стимулы. Однако, решив систему уравнений (1) относительно f_j , мы можем выразить стимулы f_j через реакции a_i . Если обозначить решение системы (1) некоторой функцией Φ_j от α_{ij} и \vec{a} , т. е. $f_j = \Phi_j(\alpha_{ij}; \vec{a})$, а решение системы $A_i = \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} F_j$ некоторой функцией $\Phi_j(\alpha_{ij}; \vec{A}) = F_j$, где \vec{A} — вектор реакций приемников на \vec{F} , то из (2) получим:

$$\phi_j = \frac{\Phi_j(\alpha_{ij}; \vec{a})}{\Phi_j(\alpha_{ij}; \vec{A})}. \quad (3)$$

Поскольку между векторами стимулов и реакций установлено взаимнооднозначное соответствие, во всех дальнейших выкладках будем определять ϕ_j согласно (2). Итак, в модели, зная реакции приемников a_i и A_i на падающий и отраженный поверхностью свет, можно вычислить (см. (3)) величины составляющих вектора отражательной способности, т. е. описать окраску этой поверхности. Трудность, однако, заключается в том, что характер освещения (вектор \vec{A}) модели неизвестен. Его она должна восстановить (хотя бы приближенно) по многообразию векторов \vec{a} , соответствующих различным местам «поля зрения» модели.

Рассматриваемые ниже варианты моделей отличаются друг от друга именно алгоритмом построения гипотезы о характере освещения.

Алгоритм, строящий гипотезу об источнике по «самому яркому» месту зрительного поля

Рассмотрим алгоритм работы зрительной системы модели, с помощью которого можно описать группу опытов из [1] (раздел 2В). В этих опытах разнообразно окрашенные плоские образцы освещались так, что источник не был виден наблюдателю; а образцы не давали бликов. Когда в условиях цветного освещения «самыми яркими местами поля

зрения» были белые с образцы*, наблюдалось почти безошибочное узнавание окраски (восприятие — константное). Алгоритм, формально описывающий эту серию опытов, состоит из: 1) операции по формированию «гипотезы зрительной системы об источнике \vec{F} », обозначим эту гипотезу через \vec{X} ; 2) вычисления $\vec{\phi}$ образцов по формуле $\phi_j = \frac{f_j}{X_j}$, где X_j — составляющие \vec{X} .

Пусть «зрительное поле» модели представляет собой растр из K дискретных точек, в каждой из которых известен вектор \vec{f}_z (нумерация идет по z от 1 до K). Введем операцию поиска «самого яркого места поля зрения». Про эту операцию (назовем ее $M(\vec{f}_z)$) известно лишь, что она находит «самый яркий» стимул в точке поля с номером $z = m$. Правила, по которым ведется поиск, мы не будем уточнять, поскольку неясно, какого рода сравнения и для каких величин производятся в зрительной системе при выборе «самого яркого» из *различно окрашенных* образцов. Найденный в результате применения $M(\vec{f}_z)$ вектор \vec{f}_m и назовем «гипотезой об источнике \vec{F} ». Выпишем алгоритм:

$$\begin{aligned} 1) M(\vec{f}_z) &= \vec{f}_m = \vec{X}; \\ 2) \phi_{jz} &= \frac{f_{jz}}{X_j}. \end{aligned} \quad (4)$$

Мотивировка целесообразности таких преобразований очевидна. Всегда полезно найти белый предмет, ибо по нему легко определить источник. В алгоритме (4) белое ищется по самому яркому. И действительно, если в поле зрения есть белая поверхность, то она при любом освещении будет самой яркой. Поэтому при наличии белых объектов этот алгоритм работает безошибочно. Если же белых объектов нет, то алгоритм дает систематический сдвиг всех оценок окраски, проявляющий себя как «цветовой контраст»**. В этом случае модель воспроизводит «ложную константность» человека (см. [1]).

* «Белая поверхность» — поверхность, отражающая весь (или почти весь) падающий на нее свет. Разумеется, свет, отраженный белой поверхностью, вовсе не обязательно имеет «белый цвет». Более того, дать корректное определение «белого цвета» вообще невозможно (хотя и существует приведенное выше определение «белой поверхности»), ибо не существует такой конкретной формы спектра источника света, которая соответствовала бы «белому излучению». Можно подобрать группу колориметрически различных излучений примерно равной мощности, такую, что при одновременном предъявлении наблюдатель опишет их (за исключением одного — «белого» для этой группы) как излучения, имеющие цветовые оттенки, хотя при одиночном предъявлении темноадаптированному глазу каждое из тестовых излучений с уверенностью назовется «белым». Такой опыт показывает, что не существует никакого вполне определенного соотношения степеней возбуждения приемников, которое зрительная система могла бы запомнить в качестве «эталоны белого цвета». Обычно белым кажется нам господствующее освещение, если оно принадлежит некоторому довольно широкому классу излучений (не слишком сильно «окрашено»).

** Проиллюстрируем на примере механизм возникновения одновременного цветового контраста у модели. Пусть источник \vec{F} — «белый» (например: $F_1 = F_2 = F_3$), в точке y — серая поверхность, отражающая \vec{f}_y ($f_{1y} = f_{2y} = f_{3y} = \frac{F_j}{c}$; $c > 2$), в точке m — ярко-желтый образец ($f_{1m} = f_{2m} = F_j$; $f_{3m} = \frac{F_j}{c}$). Для \vec{X} — минимум в синей зоне (ведь $\vec{X} = \vec{f}_m$), значит $\vec{\phi}_y$ имеет в этой зоне максимум: она выглядит синеватой ($\phi_{1y} = \phi_{2y} = \frac{1}{c}$; $\phi_{3y} = 1$), хотя «на самом деле» — серая. «Цвета» всех образцов «сдвигаются в синюю область» (красные образцы выглядят сиреневыми, желтые — белыми или даже голубыми и т. п.).

В разобранных примерах алгоритм (4) хорошо имитирует особенности работы зрительной системы человека. Оказалось, однако, что можно придумать другой способ формирования гипотезы \vec{X} , обладающий преимуществом по сравнению с разобранным алгоритмом. При наличии в поле зрения белых предметов этот усовершенствованный алгоритм дает тот же результат, что и алгоритм (4), а при их отсутствии — более точную гипотезу о характере освещения.

Алгоритм независимого поиска составляющих гипотезы об источнике

Ранее разбирался случай, когда самое яркое место зрительного поля — хроматическая поверхность. В этой ситуации окраска образцов определяется ошибочно. Более того, операция $M(\vec{f}_z)$ при некоторых условиях может привести к трудно истолковываемому результату. Представим себе ситуацию, когда оператор $M(\vec{f}_z)$ находит по крайней мере два «равноярких» по-разному окрашенных образца. Какой же из образцов «назвать белым», если яркости их равны? Оператору $M(\vec{f}_z)$ достаточно найти более одного φ_m , и алгоритм уже не даст однозначного решения. Попробуем извлечь данные о \vec{F} иначе. Можно утверждать, что никакой несамосветящийся образец не отражает по j -й составляющей большего стимула, чем j -я составляющая \vec{F} . Но величина хотя бы одной из составляющих (максимальной из трех) такого хроматического образца может мало отличаться от величины одноименной составляющей \vec{F} . Действительно, ярко-красный образец, отражая почти всю энергию падающего в красной зоне излучения, «содержит» довольно точную информацию про \vec{X} по одной — «красной» составляющей; ярко-зеленый образец может быть использован для формирования X_2 и т. д. Таким образом, совершая операцию поиска максимального сигнала f_{jz} по каждому из трех цветовых каналов, мы получим более полные сведения о \vec{F} по сравнению с операцией $M(\vec{f}_z)$ в ситуациях, когда в поле зрения нет белых предметов, бликов и т. д. Вводя по одному оператору поиска максимальной f_{jz} для каждого из трех подмножеств j -координат векторов \vec{f}_z (обозначим операторы через $M_j(f_{jz}) = \max\{f_{jz}\}$), выпишем второй алгоритм:

$$\begin{aligned} 1) \quad & M_1(f_{1z}) = \max\{f_{1z}\} = f_{1r} = X_1; \\ & M_2(f_{2z}) = \max\{f_{2z}\} = f_{2g} = X_2; \\ & M_3(f_{3z}) = \max\{f_{3z}\} = f_{3b} = X_3; \\ & \text{или } \vec{M}(f_{jz}) = \vec{X}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$2) \quad \varphi_{jz} = \frac{f_{jz}}{X_j}.$$

Если в поле зрения попадает или белый предмет, или бликующая поверхность, или источник, максимум f_{jz} достигается по всем j в одной точке раstra $z = m (r = g = b = m)$. При этом алгоритмы (4) и (5) совпадают. Если же в поле зрения нет белых образцов и бликов, то алгоритм (5) не «приписывает» ни одному из образцов качеств белого, гипотеза \vec{X} не связывается более ни с какой конкретной поверхностью, X_j в каждом из цветовых каналов строится независимо.

Итак, по сравнению с (4) алгоритм (5) эффективен в более широком диапазоне условий наблюдения*. Однако ниоткуда не следует, что че-

* Алгоритм (5) в применении к условиям некоторых опытов по изучению одновременного цветового контраста [2, 3] дает результаты, качественно согласующиеся с визуальными оценками цвета тестового поля, даваемыми наблюдателем. Ни одна из предлагавшихся ранее схем возникновения одновременного контраста [4, 5], оперировавших только изменениями чувствительности приемников, не объясняла этих опытов.

ловек в действительности использует подобный алгоритм. Поэтому гипотеза о наличии в зрительной системе человека механизма, аналогами которого являются операции $M_j(f_{jz})$, требует опытной проверки.

Опыты по проверке предположения о $M_j(f_{jz})$

Рассмотрим предварительную схему опыта (см. рис. 2). Предположим, в поле зрения наблюдателя два плоских образца с одинаковыми отражательными свойствами (назовем их тестовыми образцами). Каждый окружен несколькими по-разному окрашенными образцами (назовем их индуцирующими). Тестовые и индуцирующие образцы разнесены пространственно в пределах зрительного поля и образуют две группы объек-

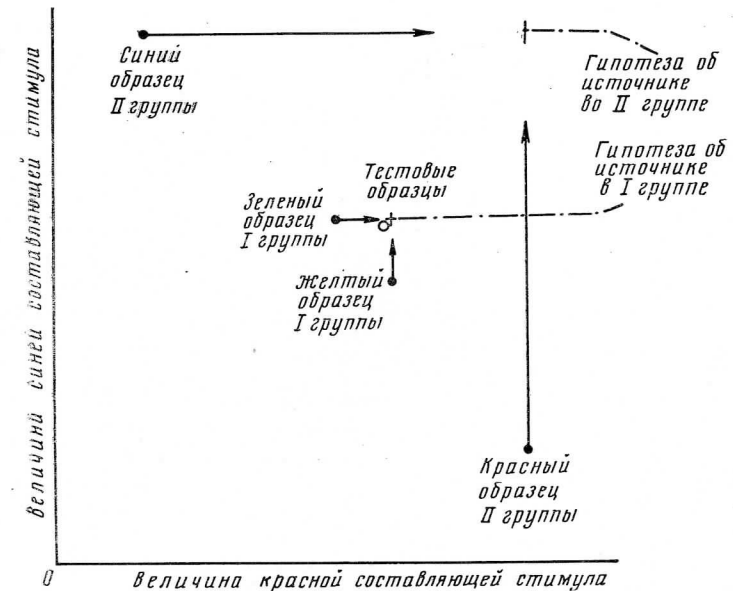


Рис. 2. Схема, поясняющая процесс независимого формирования составляющих гипотезы об источнике в каждом из цветовых каналов

Дана проекция координат образцов на сине-красную плоскость пространства стимулов

тов сравнения. Наблюдателю видно, что каждая группа освещена своим источником. Индуцирующие образцы подбираются так, что совокупность сведений, извлекаемых наблюдателем при рассматривании объектов I группы, соответствует ситуации, когда алгоритмы (4) и (5) дают совпадающие гипотезы о \vec{F} , в то время как при рассматривании II группы могут проявиться преимущества алгоритма (5) ($X_j\{\vec{M}(f_{jz})\} > X_j\{M(\vec{f}_z)\}$). Локально, в пределах каждого из тестовых образцов, можно добиться того, чтобы свет, отраженный этими образцами, был бы спектрально одним и тем же ($f_{jT_1} = f_{jT_2}$, где T_1 и T_2 — координаты образцов на растре). Поскольку в I группе каждая составляющая $X_j\{M(\vec{f}_z)\}$ меньше одноименной составляющей $X_j\{\vec{M}(f_{jz})\}$ для II группы, то в случае, если работает алгоритм (5), образец φ_{T_2} должен выглядеть для наблюдателя темнее, чем φ_{T_1} ($\varphi_{T_2} = \frac{f_{jT_2}}{X_j\{\vec{M}(f_{jz})\}} < \frac{f_{jT_1}}{X_j\{M(\vec{f}_z)\}} = \varphi_{T_1}$). Итак, если опыт покажет, что тестовые образцы (имеющие одинаковую окраску и отражаю-

щие колориметрически неразличимые излучения) вызовут различные ощущения цвета ($\vec{\varphi}_{T_2}$ темнее $\vec{\varphi}_{T_1}$), то выдвинутая гипотеза получит экспериментальное подтверждение.

Эксперимент представлял собой серию из пяти опытов. Все испытуемые (взрослые) обладали нормальным цветовым зрением и в каждом из опытов участвовали один раз. Опыты велись в полностью затемненном помещении. Условия эксперимента менялись от опыта к опыту таким образом, что содержали все большее число признаков *однородного* и *независимого* освещения для каждой из групп образцов. Таким путем могло быть выяснено, каков тот минимальный набор признаков, уже достаточный для возникновения ожидаемого эффекта, а также каков качественный вклад добавляемых признаков в ощущение наблюдателя.

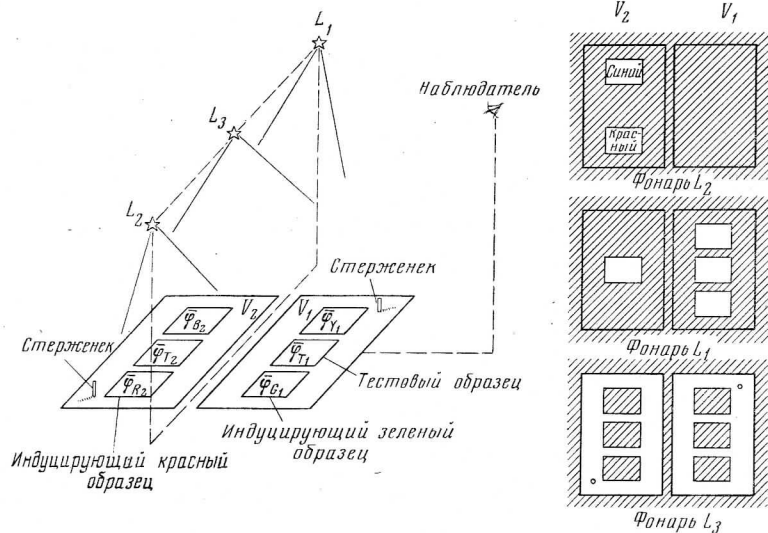


Рис. 3. Опыты с плоскими образцами
Справа показано, какие места на полях V_1 и V_2 освещались каждым из фонарей

Образцы располагались на двух примыкающих почти вплотную прямоугольных участках одной горизонтальной плоской поверхности ($\sigma(\lambda) \sim 0,3$), рассматриваемых наблюдателем с расстояния $1 \div 1,5$ м (в пределах телесного угла примерно в 20° и под углом к горизонтальной плоскости около 60°). Назовем эти участки фоновыми областями и обозначим через V_1 и V_2 (соответственно нумерации групп). Величина образцов, а также их место на V_1 и V_2 были строго фиксированы в связи с особенностями освещения (см. рис. 3). Тестовые образцы $\vec{\varphi}_{T_1}$ и $\vec{\varphi}_{T_2}$ и два индуцирующих образца I группы (обозначим их как $\vec{\varphi}_{G_1}$ и $\vec{\varphi}_{G_2}$) были изготовлены из одного листа матовой фотобумаги, равномерно экспонированной (проявленной и отфиксированной) до плотности $\varphi(\lambda) = 0,6$. Затем образец $\vec{\varphi}_{G_1}$ выкрашивался зеленым, а образец $\vec{\varphi}_{G_2}$ — желтым анилиновым красителем, причем окрашивание приостанавливалось на ранних стадиях, и образцы выглядели малонасыщенными. Индуцирующими образцами II группы ($\vec{\varphi}_{R_2}$ и $\vec{\varphi}_{B_2}$) были прямоугольные фигурки, вырезанные из одного куска белой ($\sigma(\lambda) \sim 0,9$) матовой бумаги.

Области V_1 (с расположенными посередине образцами $\vec{\varphi}_{G_1}$, $\vec{\varphi}_{T_1}$, $\vec{\varphi}_{G_2}$) и V_2 (в центр которой были помещены $\vec{\varphi}_{R_2}$, $\vec{\varphi}_{T_2}$, $\vec{\varphi}_{B_2}$) освещались сверху тремя источниками (проекторными фонарями): L_1 , L_2 , L_3 . На пути световых потоков от каждого из фонарей стояли фигурные заслонки, изображения которых

фокусировались на V_1 и V_2 . Фонарь L_1 при помощи своей заслонки освещал («белым» светом) *только* поверхности образцов $\vec{\varphi}_{T_2}$, $\vec{\varphi}_{T_1}$, $\vec{\varphi}_{G_1}$ и $\vec{\varphi}_{G_2}$ (т. е. свет от L_1 не попадал ни на $\vec{\varphi}_{R_2}$ и $\vec{\varphi}_{B_2}$, ни на фоновую поверхность *вне* образцов). Свет от L_2 попадал *только* на $\vec{\varphi}_{R_2}$ и $\vec{\varphi}_{B_2}$. У L_2 перед вырезами в заслонке были укреплены красный и синий светофильтры, так что образец $\vec{\varphi}_{R_2}$ выглядел насыщенно-красным, а образец $\vec{\varphi}_{B_2}$ — насыщенно-синим. Фонарем L_3 освещались на V_1 и V_2 области *вне* образцов. Яркость освещения у L_1 и L_2 регулировалась нейтральными светофильтрами, у L_3 — ирисовой диафрагмой. На полях V_1 и V_2 не было ни одного бликующего для наблюдателя участка. Наблюдателю не сообщались ответы его предшественников и ожидаемые результаты сравнений.

Сформулируем теперь условия, *достаточные* для вывода о совпадении результатов опыта с эффектами, ожидавшимися на основе гипотезы (5):

- A. Образец $\vec{\varphi}_{T_1}$ наблюдатель называет *более светлым, чем* $\vec{\varphi}_{T_2}$.
- B. Индуцирующие образцы II группы кажутся наблюдателю *не ярче* индуцирующих образцов I группы.

Результаты опытов

Опыт 1. L_1 и L_2 освещали образцы. L_3 не включался, поля V_1 и V_2 вне образцов — в темноте. Соотношение освещенностей образцов было подобрано (изменением интенсивностей L_1 и L_2) таким образом, что для всех 12 наблюдателей (в этом и остальных 4 опытах) выполнялось условие B. Поэтому в дальнейшем будет говориться лишь о выполнении соотношения A. В этом опыте для *всех* наблюдателей образцы выглядели самосветящимися, а $\vec{\varphi}_{T_1}$ ничем не отличался от $\vec{\varphi}_{T_2}$ (см. рис. 4).

Опыт 2. Включался L_3 , диафрагмой подбиралась такая освещенность на V_1 и V_2 , что фоновая поверхность выглядела немного темнее тестовых образцов. Трех наблюдателям образец $\vec{\varphi}_{T_2}$ показался чуть темнее образца $\vec{\varphi}_{T_1}$.

Опыт 3. Перед заслонкой у L_3 помещались два светофильтра с едва заметной цветностью. Поле V_1 выглядело теперь голубоватым, а поле V_2 — желтоватым (т. е. добавился признак различного освещения полей). Пять наблюдателей сказали, $\vec{\varphi}_{T_2}$ темнее $\vec{\varphi}_{T_1}$.

Опыт 4. На пути светового пучка от L_3 ставилось матовое стекло. Часть света (10—15%), рассеивавшаяся на стекле, попадала теперь и на образцы. Образцы $\vec{\varphi}_{R_2}$ и $\vec{\varphi}_{B_2}$ стали выглядеть более «естественно»: теперь их умеренная насыщенность не вызывала подозрений в том, что они подсвечены. Равенство $f_{T_1} = f_{T_2}$ при этом не нарушилось. Восемь наблюдателей зафиксировали выполнение условия A.

Опыт 5. На поле V_2 (рядом с $\vec{\varphi}_{R_2}$, $\vec{\varphi}_{T_2}$, $\vec{\varphi}_{B_2}$) положили кусочки гофрированной красной бумаги и укрепили стерженек, отбрасывающий четкую тень. На поле V_1 также укрепили стерженек. Направления теней от

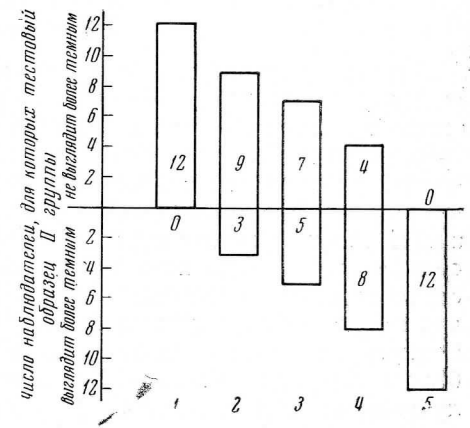


Рис. 4. Результаты пяти опытов с плоскими образцами

1 — поля V_1 и V_2 вне образцов в темноте, 2 — поля V_1 и V_2 освещены одинаково, 3 — поля V_1 и V_2 освещены по-разному, 4 — на поле V_2 уменьшена насыщенность цветных образцов, 5 — на полях V_1 и V_2 укреплены стерженки, на поле V_2 — кусочки жатой красной бумаги

первого и второго стерженьков не совпадали. Осуществить это было трудно, так как пучок света от L_3 — расходящийся (под углом $\sim 80^\circ$), а стерженьки располагались как можно дальше друг от друга у внешнего края полей V_1 и V_2 . Добавленные в этом опыте предметы укрепили уверенность наблюдателей, что освещение полей независимое и каждое поле освещается только одним источником. Все наблюдатели отметили выполнение условия A . Более того, в этом опыте эффект оказался настолько сильным, что подбором яркостей L_1 и L_2 удалось для всех наблюдателей создать ситуацию, в которой яркость индуцирующих образцов I группы казалась *большей*, чем у индуцирующих образцов II группы, и при этом сохранялось соотношение A .

Очевидно, условие B необходимо, чтобы результат опыта (относительное потемнение $\vec{\Phi}_{T_2}$) нельзя было бы истолковать как проявление яркостного контраста. То, что в опыте 5 удалось получить результат, когда яркостный контраст «работал в обратную сторону» (окружение $\vec{\Phi}_{T_2}$ было *темнее*), полностью снимает опасение такого рода. (К вопросу об одновременном яркостном контрасте как об одном из частных проявлений константного восприятия окраски мы вернемся в заключительной части статьи.)

Итак, опыты показали, что в зрительной системе человека происходит обработка сигналов по алгоритму, похожему на алгоритм (5). При этом, как и следовало ожидать, оказалось, что *разные* гипотезы об источниках, освещающих две близкие части поля зрения, могут возникнуть, только если имеются достаточно веские доводы за то, что источники действительно разные (разное направление теней, разный цвет освещения фона и т. п.). В противном случае зрительная система ищет *одну общую* гипотезу об источнике (и тогда тестовые образцы, отражающие физически тождественные излучения, кажутся одинаковыми).

Формирование гипотезы об источнике в ситуациях с неплоскими объектами (гофрами)

Рассмотрим некоторый возможный способ определения зрительной системой характера освещения в ситуациях, когда в поле зрения — объемные предметы. В I части данной статьи [1] были разобраны причины того, почему при последовательных отражениях на неплоской *ахроматической* поверхности относительный спектральный состав излучения не меняется, тогда как затененные места в углублениях и складках поверхностей *хроматических* отражают свет не только меньшей мощности (по сравнению с $F(\lambda)$), но и иного спектрального состава (цвет излучения становится более насыщенным). Опыты с гофрами (см. [1]) показали, что наблюдатель в условиях, когда источника не видно и предметы не бликуют, уверенно отличает цветной гофр, освещенный белым светом, от белого гофра, освещенного цветным светом (даже при условии, что излучения от самых светлых участков обоих гофров колориметрически *неотличимы*). Следовательно, и в случае, когда для успешного узнавания окраски уже явно недостаточно анализа *только* самых ярких мест зрительного поля (т. е. операций типа $M(f_z)$ или $M_j(f_{jz})$), зрительная система способна сформировать правильное предположение о цвете источника. Построим алгоритм, реализующий такую способность зрительной системы.

Для простоты ограничимся рассмотрением лишь таких ситуаций, в которых: а) все поверхности в пределах зрительного поля равномерно рассеивающие; б) рассматриваемые объекты — гофрированные образцы (гофры), расположенные на фоновой плоскости; в) рефлексы (отраженный свет) от одного образца на другой пренебрежимо малы по сравнению с рефлексами от освещенных источником частей гофра на теневые

части того же гофра; г) любой из гофров освещен не более чем одним источником (рассеянием света воздухом и рефлексами на область поля зрения со стороны предметов, расположенных вне его, можно пренебречь); д) образцы ориентированы так, что у каждого имеются участки, не освещенные прямым светом источника (и видимые наблюдателю).

Будем считать также, что форма гофра и направление светового потока от $F(\lambda)$ ясны наблюдателю, а потому он в состоянии оценить, прямым или отраженным светом освещены разные части гофра. Пусть наблюдатель умеет находить на гофре области, освещенные *преимущественно*:

1) прямым светом источника (вклад рефлексов минимален), назовем их областями однократного отражения и обозначим «С» («свет»);

2) однократно отраженным светом (вклад прямых лучей источника и рефлексов порядка выше первого минимален), назовем их областями двукратного отражения и обозначим «Т» («тень»).

Иными словами, свет, отраженный областью «С» — источник для области «Т». Наблюдатель видит и падающее на область «Т» излучение, и излучение, отраженное ею. Поэтому, если он сделает правильную поправку на разницу углов падения первичного и вторичного световых потоков, то сможет получить верное представление об отражательных свойствах поверхности гофра. Но как только выявлена окраска гофра, нетрудно сделать предположение и о свойствах источника (ведь отражаемой областью «С» излучение $f(\lambda)$ непосредственно видимо и

$F(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{\varphi(\lambda)}$). Любой из гофров «содержит», таким образом, информацию о $F(\lambda)$. Выбирая на разных гофрах максимальные значения составляющих гипотезы об источнике, наблюдатель получит о нем довольно точное представление.

Алгоритм с данной последовательностью операций — один из возможных вариантов процесса в зрительной системе. Главной, интересующей нас особенностью такого процесса является умение наблюдателя сопоставлять излучения, идущие не только из самых светлых мест зрительного поля, но и темных, теневых его участков. Эта особенность и была исследована в специальном эксперименте. Смысл опытов состоял в том, чтобы искусственным изменением отражательных свойств *только теневых* частей гофров вызвать *ошибочное* представление об источнике.

Опыты с гофрами

Все гофры были изготовлены из матовой фотобумаги, равномерно засвеченной до плотности $\varphi(\lambda) \sim 0,7$, для фоновых плоскостей использовалась фотобумага плотностью $\varphi(\lambda) \sim 0,4$. Бумага для гофров окрашивалась анилиновыми красителями таким образом, что те места, которые впоследствии на гофре соответствовали областям «С», прокрашивались в течение фиксированного времени и выглядели на одноцветных гофрах одинаково. Области «Т» прокрашивались в данном красителе для *одного* образца меньше фиксированного времени окраски областей «С», для *другого* образца — больше этого времени. «Т»-области на одном гофре (на плоской его заготовке) выглядели поэтому светлее и белесоватее областей «С», а на другом — темнее и насыщеннее их*. Таким путем были получены три пары образцов: серые, красные и синие гофры. (После окраски области «С» выглядели *не темнее* фоновой бумаги.) Чтобы гофры не просвечивали, их изнанка окрашивалась черной тушью.

Опыты проводились в тех же условиях, что и предыдущий экспери-

* «Двухстадийное» окрашивание велось при помощи плоских заслонок в виде решетки из планочек постоянной ширины и «периодичности». Плотно прилегая к окрашиваемой заготовке, планочки не пропускали краситель под закрытые ими области (вне их окрашивание продолжалось).

мент (см. рис. 5). Отличия таковы: не использовался фонарь L_3 ; источники L_1 и L_2 освещали белым светом каждый свое поле (фоновые плоскости V_1 и V_2), причем угол падения света был подобран так, что края теней от гребней гофров точно совпадали с границей между областями «С» и «Т» (на гранях гофра, обращенных к источнику); тестовыми образцами служили поля V_1 и V_2 (вне гофров), размер полей был уменьшен: рас-

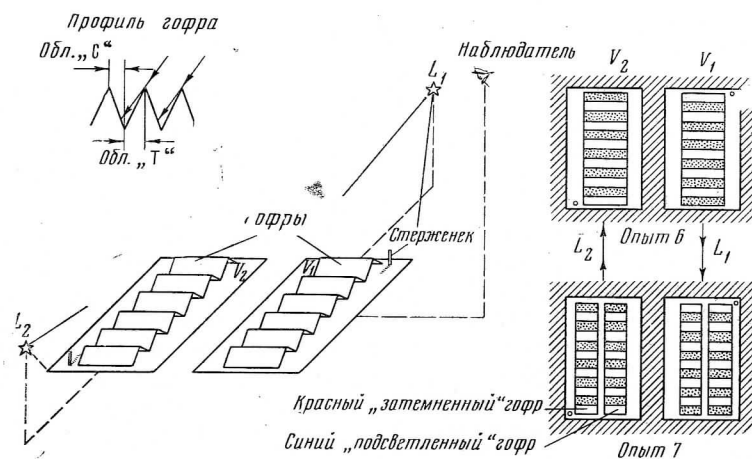


Рис. 5. Опыты с гофрами

Справа показано положение гофров на полях V_1 и V_2 в опытах 6 и 7

стояние между смежными их границами возросло до $10-15^\circ$; плоские образцы были заменены гофрами, которые занимали большую часть площади фонового поля. На полях укреплялось по тонкому стерженьку, отбрасывающему тень. Яркость L_1 и L_2 была подобрана так, что без гофров поля V_1 и V_2 неотличимы.

В опытах участвовало пять наблюдателей. Им предлагалось сравнить поля V_1 и V_2 (точнее, участки их, не занятые гофрами).

Опыт 6. На поле V_1 — серый гофр с «подсветленными» областями «Т», на поле V_2 — серый гофр с «затемненными» областями «Т». Все наблюдатели сказали, что V_1 светлее V_2 (и L_2 ярче L_1). Этот результат не может быть объяснен действием светлотного контраста (ведь гофр на V_1 в целом светлее другого гофра). И если в экспериментах, описанных в первой части статьи [1], выяснилось, что цветовой контраст можно рассматривать как результат работы механизма константности, то данный опыт показал, что и светлотный контраст вызывается введением разных поправок на освещение для разных мест поля зрения, а не просто относительной яркостью соседних частей поля зрения, т. е. также является одним из частных проявлений константного восприятия.

Опыт 7. На поле V_1 — красный гофр с «подсветленными» областями «Т» и синий «затемненный» гофр; на поле V_2 — красный и синий гофры, подкрашенные «в обратную сторону». Для всех наблюдателей поле V_1 выглядело розоватым, а поле V_2 — синева-зеленоватым (и соответственно L_1 — синева-розоватым, а L_2 — красноватым). Опыт показал, что зрительная система, строя гипотезу об источнике для поля V_1 , действительно делает заниженную оценку мощности источника в длинноволновой части спектра (по красному гофру) и завышенную оценку — в коротковолновой его части (по синему гофру). На поле V_2 ошибки имеют «обратный знак». Результат опыта «противоположен» действию одновременного цветового контраста (так как из красных гофров в целом ярче тот, что на V_1 , а из синих — тот, что на V_2).

Заметим, что обстановка опытов 6 и 7 не очень далека (вопреки кажущейся «искусственности») от реальных ситуаций. В жизни мы часто сталкиваемся со случаем, когда источник не один, например: и солнце, и рассеянный свет неба. В тенях, где освещение слабее и более синее, надо применить одну гипотезу об источнике, на освещенных солнцем участках — другую.

В заключение отметим, что алгоритм узнавания окраски объемных поверхностей требует предварительного знания их формы. Однако ясно, что полное узнавание формы предметов невозможно, если неизвестна окраска поверхностей (вспомним камуфлирующую раскраску военных объектов, когда необычное распределение цвета мешает понять форму). Поэтому есть основания предположить, что узнавание формы и окраски — взаимосвязанные процессы, идущие в зрительной системе по способу последовательных уточнений рабочих гипотез о геометрии поверхностей и их отражательных свойствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нюберг Н. Д., Бонгард М. М. и Николаев П. П., Биофизика, 16, № 2, 285, 1971.
2. Смирнов М. С., Бонгард М. М., Биофизика, 1, 174, 1956.
3. Бонгард М. М., Смирнов М. С., Биофизика, 1, 754, 1956.
4. Федоров Н. Т., Докл. АН СССР, 67, 3, 1949.
5. Федоров Н. Т., Скляревич В. В., Юрьев М. А., Маширова О. Ф., Пробл. физиол. оптики, 8, 75, 1953.

Поступила в редакцию
25.VII.1970

II. ON THE CONSTANCY OF PERCEPTION OF COLORATION

N. D. NYUBERG, P. P. NIKOLAEV, M. M. BONGARD

Institute of the Problems of Information Transmission, Acad. Sci. USSR, Moscow

The paper continues a previously published study on some mechanisms of colour perception in man (see [1]). In this part a «zone» model of the process of perception of colour of radiations and coloration of things is suggested. On its basis algorithms providing colour constancy of perception are built. Neither any correlates of «heterochromatic brightness», nor any other operations on comparing the excitations of different cone mechanisms are present in the algorithms language. Using these algorithms the hypothesis on the properties of the light source is constructed on the basis of comparison between several parts of the visual field. For two-dimensional pictures a judgement upon photic source intensity in each spectrum zone is taken from a unique part of the visual field. In situations with non-flat objects («ruffles») the hypothesis on each component of the source is built regarding not only the illuminated but also the dark parts of the surface. As psychophysical experiments have shown, for a number of simple situations perception of surface coloration in man is qualitatively identical with that of the algorithms constructed. The experiments have also proved the possibility of simultaneous forming the different hypotheses on the source for different parts of the visual field.