П. П. Николаев

НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ УЗНАВАНИЯ ОКРАСКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1. Введение. С самого начала следует предупредить, что название статьи недостаточно точно отражает ее содержание: во-первых, предлагаемые ниже «алгоритмы» в некоторых ситуациях могут приводить к серьезным ошибкам, так как включают эвристические приемы обработки; во-вторых, они описаны здесь местами довольно фрагментарно, что, к сожалению, может затруднить понимание. Однако то, что мы сегодня знаем о задачах и возможностях зрительной системы человека, позволяет надеяться, что в ней используются способы первичной обработки сигналов, аналогичные предлагаемым. Даже если описанные в статье алгоритмы и не реализуются в зрительной системе человека, они должны представлять определенную ценность с точки зрения конструирования технических систем, способных ориентироваться в сложных зрительных ситуациях.

1.1. Константность цветовосприятия. В процессе узнавания существенную роль играют различия в форме и цвете предметов. Поскольку большинство окружающих нас предметов — тела несамосветящиеся, глаз воспринимает свет источника, **отраженный** этими предметами. Отраженный свет меняется при изменении освещения, зависит от спектральных характеристик источника. Именно поэтому спектральный состав света, попадающего на сетчатку от данной поверхности, не является устойчивым признаком поверхности. Ее устойчивый признак — отражательная способность (или иначе **окраска**), о которой глаз непосредственных сведений не получает.

Несмотря на отсутствие прямых данных, зрительная система хорошо узнает окраску тел в разнообразных условиях освещения. Например, освещенный закатными лучами солнца белый камень воспринимается как целиком белый, хотя теневая его часть посылает в глаз наблюдателя синие лучи, а наиболее освещенная часть — красные. В условиях существенно изменяющегося (во времени и от места к месту) относительного спектрального состава падающего на предметы излучения вызываемое предметом **цветовое ощущение** имеет тенденцию оставаться неизменным (константным). Эта способность зрения и получила название **константности восприятия цвета** (хотя более корректным было бы название «константность восприятия окраски»).

1.2. Феноменология. Определения. Существуют условия наблюдения, в которых физически одинаковые излучения вызывают неразличимые (одинаковые) цветовые ощущения. Опыты, поставленные в таких условиях и направленные на выяснение вопроса о том, какие спектральные составы неразличимы для глаза, называются колориметрическими. Установленные такими опытами свойства цветного зрения человека доказывают наличие в его сетчатке трех типов приемников с разными кривыми спектральной чувствительности[1], и дают возможность создать систему количественного описания воспринимаемого цвета излучения. Колориметрическая характеристика — цвет — обладает таким свойством: для предсказания цвета смеси нескольких излучений надо знать цвета компонент смеси и нет необходимости знать их спектральные составы.

Реакция каждого светочувствительного приемника глаза на излучение с абсолютным спектральным составом $F(\lambda)$ может быть описана формулой: $a'_k = A_k \int_0^\infty F(\lambda) \chi_k(\lambda)\, d\lambda$, где $k = 1, 2, 3$ (три типа приемников у трихромата), χ_k — спектральная чувствительность, A_k — скаляр, зависящий от предшествовавшего освещения, A_1, A_2, A_3 характеризуют состояние адаптации данного места сетчатки (в данный момент времени). В колориметрии (являющейся нуль-методом) учитывать значения A_k излишне. Но для решения задачи определения окрасок по реакциям приемников знание коэффициентов A_k необходимо. Мы полагаем, что зрительная система производит учет A_k, анализируя изменения a'_k по всей сетчатке, возникающие при движениях («скачках») глаза. Рассмотрение возможных алгоритмов этого анализа выходит за рамки данной работы, и мы будем исходить из того, что на входы наших алгоритмов подаются непосредственно величины $a_k = a'_k / A_k$.

Нашей основной задачей будет отыскание коэффициентов отражения. Вообще коэффициент отражения определяется как отношение видимой яркости объекта к его освещенности. Однако при построении алгоритмов зрительной обработки (для некоторой абстрактной системы) мы будем опираться не на величины создаваемых объектами яркостей, но лишь на пропорциональные им освещенности светочувствительных элементов системы.

Многие цветовые термины не имеют в обиходе одного точно определенного значения. Например, в высказываниях «красный сигнал светофора», «красный флаг», «красным выглядит желтый цвет после засвета глаза зелеными лучами» слово **красный** имеет три разных смысла. В первом случае ощущение вызвано ситуацией, когда на область спектра 0,65—0,70 мкм приходится максимум распределения энергии, во втором случае — когда на ту же область спектра падает максимум коэффициента отражения, в третьем — ощущение является следствием так называемой цветовой адаптации, т. е. зависит от предшествующей стимуляции глаза светом источника с узкой полосой испускания. Дадим определения наиболее важным терминам и понятиям и будем впредь использовать терминологию только согласно этим определениям.

Понятия, так или иначе зависящие от числа типов приемников (в зрительной системе наблюдателя), станем вводить для случая **трихроматического**

---

[1] При условии, что не рассматриваются случаи дихромазии и наличие на периферии сетчатки еще одного — 4-го типа приемников.

зрения. Поэтому, заменив цифру 3 всюду, где она встречается в нижеследующих определениях, на цифру 2, можно привести их в соответствие с дихроматическими системами зрения. Положим также, что кривые чувствительности приемников системы известны.

Спектральный стимул — излучение на входе системы, заданное своим абсолютным спектральным составом.

Растр — мозаика троек линейно независимых приемников системы, причем каждой его *точке* соответствует одна такая тройка. (Реакции приемников на спектральный стимул в каждой точке растра предполагаются известными.)

3-стимулом назовем три числа, пропорциональные интенсивностям спектрального стимула в трех базисных точках спектра.

Цвет — колориметрическая характеристика спектрального стимула. Описывается тремя числами, однозначно определяемыми по спектральному стимулу, и кривым чувствительности приемников. (Обратное неверно; одинаковые цвета могут иметь для данного наблюдателя излучения, существенно различающиеся по спектральному составу.)

Окраска — характеристика поверхности, описываемая зависимостью коэффициента отражения от длины волны и углов падения и рассеяния света.

3-окраской назовем три значения коэффициента отражения равномерно рассеивающей (матовой) поверхности в тех же, что и для 3-стимула, трех базисных точках спектра.

Цветовыми оценками: 1) *оценкой 3-стимула*, 2) *оценкой 3-окраски* назовем формируемые системой оценки 3-стимула или 3-окраски. (Оба вида цветовых оценок, каждая из которых — тройка чисел, это формальные аналоги цветовых ощущений человека.)

Константными условиями наблюдения назовем условия, в которых 1) одинаковые цветовые оценки вызываются одинаковыми 3-окрасками, 2) оценки 3-окрасок близки к оцениваемым 3-окраскам.

Ложноконстантными условиями наблюдения назовем такие, в которых условие 1) предыдущего определения выполняется, однако во всех цветовых оценках есть систематическая ошибка. (Условия эти имеют место при дефиците данных о цвете освещения.)

Сцена — совокупность спроектированных на растр объектов определенной окраски, освещения и формы (с учетом взаимного их расположения).

1.3. Окраска, освещение и форма. Глаз превращает сетчаточное изображение сцены в картину реакций приемников. Располагая такой исходной информацией о внешнем мире, зрительная система решает удивительно сложную задачу: распознает пространственное распределение света и его источников, оценивает форму предметов, строит оценки окрасок и т. д.

Глаз в состоянии оценить цвет луча, отраженного данной точкой предмета, но для того, чтобы правильно узнать какова окраска в этой точке (т. е. по каким законам преобразуется цвет падающего излучения), надо уметь строить хотя бы приблизительно верные гипотезы о цвете и углах падения лучей, **освещающих** эту точку. Прямых данных о цвете падающего на предмет света, о распределении света в пространстве сцены (и о цвете источника, когда его нет в поле зрения) глаз не получает. И все-таки окраски узнаются, причем чаще всего за доли секунды. Можно предположить, что для адекватного восприятия сцены в целом зрительная система пользуется набором стандартных признаков освещения, навыком классификации типов освещения, памятью на окраску и форму «унифицированных» в природе объектов и т. п. Однако подобных разнородных предположений явно недостаточно для построения единой схемы зрительной обработки, обеспечивающей константность цвето- и формовосприятия.

Очень часто полное узнавание формы предметов невозможно, если неизвестны окраски частей предмета. К примеру, цветовой камуфляж военного объекта мешает уловить его форму. И форма, и окраска трудно выявляемы в условиях многоцвётного освещения, особенно в том случае, когда разноцветные источники скрыты от глаз наблюдателя.

Приведенные примеры иллюстрируют взаимную зависимость трех сторон зрительного процесса — узнавания формы, освещения и окраски. Разберем эту зависимость несколько подробнее.

Спектральный стимул в том случае, когда он пришел от данной точки предмета, можно описать как произведение окраски на освещенность, измеренных в этой точке. Освещенность определяется тем, как ориентирована поверхность в окрестности этой точки относительно источников света, и зависит от их спектров испускания и от расстояний до них, т. е. освещенность — функция формы и расположения тел, а также характера освещения. Следовательно, **окраска**, **освещение** и **ориентация** участка поверхности однозначно определяют создаваемый им **спектральный стимул**. Таким образом, у наблюдателя имеется, по крайней мере в принципе, возможность по 3-стимулу (который надо предварительно построить по 3 реакциям приемников) оценить или окраску, или форму, или освещение, если остальные два «аргумента» функции, определяющей стимул, вычислены верно.

Одним из прямых следствий рассмотренной взаимосвязи между стимулом, окраской, освещением и формой является такой вывод: без целенаправленного сопоставления частей сетчаточной проекции и без некоторых априорных предположений об отражательных свойствах тел и об их освещении задача правильной интерпретации **объемных** сцен по реакциям приемников сетчатки неразрешима. О том, в каких случаях и какими способами зрительная система имеет возможность решать эту задачу, и пойдет речь в этой статье.

1.4. С т а т и ч е с к а я   м о н о к у л я р н а я   з а д а ч а   у з н а в а н и я   о к р а с к и. Можно предполагать, что решение цветовых зрительных задач упрощается в условиях: а) бинокулярно выявляемой формы предметов, б) динамического режима наблюдения с его преимуществами в задачах узнавания формы движущихся тел и поиска зеркальных бликов (как локальных признаков цвета освещения). Обе эти группы приемов неприменимы к условиям восприятия **неподвижной** проекции сцены (например, при разглядывании цветной фотографии). Узнавание сцены по ее плоской репродукции не вызывает у человека обычно никаких затруднений. Это обстоятельство дает основания считать, что при ограничении возможностей зрительной системы **статическим монокулярным** наблюдением существенные приемы зрительной обработки сохраняют свою эффективность, поэтому есть смысл для такого варианта постановки задачи искать алгоритм ее решения. Искать в надежде, что он, не включая слишком многого из арсенала логических, динамических и прочих «интеллектуальных» средств, будет достаточно простым, а потому и обозримым.

Итак, в статье не будут рассматриваться задачи, требующие привлечения временных характеристик и зависимостей в любых формах проявления—с учетом движений глаза или предметов, или же с включением в модель каких-либо динамических свойств цветовых ощущений (например, свойств стабилизированного сетчаточного изображения). Все описываемые далее модели работают в условиях статического и монокулярного восприятия и предназначены для формирования оценок окрасок видимых в сцене предметов.

Оценка наблюдателем окраски обычно тем более исчерпывающа и точна, чем правильнее удалось оценить ему характер освещения. Поэтому весьма существенным этапом предлагаемых моделей является создание гипотезы о характере освещения (включающей, например, цвет, число и тип источников в сцене). Выяснение особенностей освещения возможно благодаря существованию признаков освещения. Признаки эти с необходимостью использованы в предлагаемых моделях.

Три разбираемые в статье модели соответствуют трем вариантам сложности сцен или в некотором смысле трем степеням точности производимых цветовых оценок. Модели помогают представить устройство «сетчатки», способной решать довольно сложные зрительные задачи весьма простыми средствами и за малое число шагов, решать монокулярно и без привлечения динамических приемов, режима обучения и сведений другой сенсорной модальности.

2. Модель АППЛИКАЦИЯ [1]. 2.1. Постановка задачи. Проекцию сцены на светочувствительные элементы системы, заданную спектральными стимулами в точках растра, обозначим буквой P (растр), а координаты точек на P — через (x, y). Спектральную зависимость характеристик отметим посредством верхнего индекса при них; таким индексом будет служить либо λ —

---

[1] Подробнее тема этого и следующего разделов раскрыта в [1] и [2].

длина волны (случай непрерывного распределения), либо k — номер базисной точки спектра. Пусть «красная» ($k = 1$), «зеленая» ($k = 2$) и «синяя» ($k = 3$) точки имеют длины волн λ_1, λ_2 и λ_3 соответственно. Интенсивность спектрального стимула обозначим через F^λ, кривую отражения поверхностей — через Φ^λ.

Модель АППЛИКАЦИЯ предназначена для воспроизведения процесса константного восприятия сцен следующего вида. Сцена представляет собой равномерно освещенную, произвольным образом раскрашенную плоскость (аппликацию), диффузно рассеивающую свет. Пусть S^λ — освещенность растра в местах проекции идеально белых объектов сцены. В описание плоской сцены нет необходимости включать ориентацию ее объектов относительно источников света (что будет сделано в моделях для трехмерных сцен).

Для всякой точки (x, y) проекции сцены справедливо соотношение $F^\lambda(x, y) = S^\lambda\Phi^\lambda(x, y)$. В трехпараметрическом описании связь между векторами 3-стимула F, 3-окраски Φ и «3-освещения» S по аналогии с формулой для непрерывно распределенных характеристик имеет вид $\mathrm{F}^k(x, y) = \mathrm{S}^k\Phi^k(x, y)$, где $k = 1, 2, 3$.

Задачу оценки окраски в каждой точке (x, y) можно решить, если наблюдателю известен вектор S (с компонентами S^1, S^2 и S^3). Тогда, совершив покомпонентное деление 3-стимула на вектор S, наблюдатель получил бы в точках на P компоненты Φ: $\Phi^k(x, y) = \mathrm{F}^k(x, y)/\mathrm{S}^k$. Поскольку такой информацией зрительная система не располагает, она вынуждена строить по косвенным признакам, имеющимся в сцене, *гипотезу об освещении* — вектор $\tilde{\mathrm{S}}$ (значок $\sim$ заменяет слово «оценка»). И только оценив освещение, можно оценить 3-окраски, получить компоненты $\tilde{\Phi}^k$. Итак, задача для плоских сцен типа аппликации ставится следующим образом: 1) построить гипотезу об освещении, т. е. найти три числа, оценивающие компоненты вектора S, 2) оценить 3-окраски, произведя операцию

$$\tilde{\Phi}^k(x, y) = \mathrm{F}^k(x, y)/\tilde{\mathrm{S}}^k.$$

2.2. Решение задачи на поле 3-стимулов. Если белая поверхность проецируется в точку (x_0, y_0) на P, то $\mathrm{F}^k(x_0, y_0) = \mathrm{S}^k$. Поэтому если бы точно было известно, что в сцене есть *белый образец* (участок с $\Phi^\lambda \equiv 1$), то мы могли бы указать его местоположение, так как на P нет точки с более яркими компонентами стимула (т. е. $\mathrm{F}^k(x_0, y_0) \geqslant \mathrm{F}^k(x, y)$). А следовательно, могли бы и решить задачу с помощью процедуры

$$1)\ \tilde{\mathrm{S}} = \mathbf{F}(x_0, y_0),$$

$$2)\ \Phi^k(x, y) = \mathrm{F}^k(x, y)/\tilde{\mathrm{S}}^k = \Phi^k(x, y)/\Phi^k(x_0, y_0). \qquad (1)$$

Если же наиболее светлое место поля зрения образовано не белой, а серой поверхностью (например; $\Phi^\lambda_{\text{сер}} \equiv 1/2$, а данными о том, белая она или серая, зрительная система не располагает), то во всех оценках окраски появится неустранимая в этих условиях наблюдения **ошибка**. Все компоненты оцениваемых 3-окрасок будут пропорционально завышены таким образом, что самый светлый образец получит оценку белого (т. е. $\widetilde{\Phi}^k_{\text{сер}}(x_0, y_0) = 1$ для всех k); соответственно произойдет «осветление» и всех остальных участков P.

Назовем *цветовым каналом* поле заданных на растре значений любого из F^k или какой-либо функции одной из F^k. Используя понятие канала, определим, что понимается под *самым светлым* местом поля зрения. Будем называть самым светлым тот образец, вызываемый которым 3-стимул не уступает по величине при покомпонентном сравнении в каждом цветовом канале любому другому образцу в сцене. Тогда ясно, что процедура (1) останется лучшей из возможных, если самым светлым (в указанном смысле) в сцене окажется образец *хроматический*, т. е. имеющий хотя бы пару неравных по величине компонент 3-окраски.

Итак, если в сцене есть самый светлый образец и действительно устранены всякие иные пути оценки освещения, кроме как по самим образцам, у наблюдателя нет возможности дать более точную, чем результат процедуры (1), оценку окраски.

Однако возможен случай, когда образец в точке (x_1, y_1), будучи самым светлым по одному из каналов, при сравнении в другом канале уступает образцу, находящемуся в точке (x_2, y_2). Пусть, например, $F^1(x_1, y_1) \gg F^1(x_2, y_2)$; $F^2(x_1, y_1) \ll F^2(x_2, y_2)$; $(F^3(x_1, y_1) \approx F^3(x_2, y_2))$. По какому из этих двух **неравных** друг другу векторов строить гипотезу об освещении? Без дополнительных критериев сравнить их не удастся. Покажем, что нет нужды строить $\widetilde{S}$ по стимулу от одного («яркого») пигмента.

Набор нескольких образцов разной окраски можно использовать для формирования оценки освещения более точной, чем по одному образцу. Действительно, у ярко-красного образца, отражающего в длинноволновой части видимого спектра почти всю энергию падающего света, соответствующая ($k = 1$) компонента F мало отличается от одноименной компоненты S (т. е. $F^1_{\text{кр}} \sim S^1$), а поэтому можно положить $\widetilde{S}^1 = F^1_{\text{кр}}$. Аналогично и ярко-зеленый образец можно использовать для формирования $\widetilde{S}^2$ и т. д. Таким образом, совершая операцию поиска **максимального** сигнала F^k в каждом цветовом канале, получим оценку S, наилучшую в данных условиях наблюдения при данном числе каналов в зрительной системе. Эту процедуру запишем так:

$$1)\ \widetilde{S}^k = \max_{x,y}\{F^k(x, y)\} \quad \text{или} \quad \widetilde{S}^1 = \max_{x,y}\{F^1(x, y)\},$$

$$\widetilde{S}^2 = \max_{x,y}\{F^2(x, y)\},$$

$$\widetilde{S}^3 = \max_{x,y}\{F^3(x, y)\}; \qquad (2)$$

$$2)\ \widetilde{\Phi}^k(x, y) = F^k(x, y)/\widetilde{S}^k.$$

Гипотеза об освещении строится с использованием компонент 3-стимулов от разноокрашенных образцов числом от 1 до n, если n — число типов приемников в зрительной системе. Однако следует рассмотреть, как и при каких предположениях глаз может по реакциям приемников сформировать вектор 3-стимула.

2.3. Вычисление компонент 3-стимула по реакциям приемников. Во всех изученных системах цветного зрения кривые чувствительности приемников разного типа значительно перекрываются. Поэтому понятно, что между реакцией каждого типа приемника на данный спектральный стимул F^{λ} и величиной F^{k} в соответствующей k-й точке спектра нет линейной зависимости. Каковы же те условия, при которых по реакциям приемников можно восстановить (хотя бы приближенно) 3-стимулы и каким способом это сделать?

Предположим, что некая трихроматическая система каким-то образом нашла компоненты F^1, F^2, F^3 спектрального стимула F^{λ}, т. е. вычислила ординаты F^{λ} для трех значений длины волны. Но через три точки можно провести сколь угодно много кривых, соответствующих разным спектральным стимулам. Понятно, что подавляющему большинству этих стимулов будут отвечать несовпадающие наборы реакций на них приемников трех типов (станем называть такой набор трех реакций на данный спектральный стимул *3-реакцией*). Следовательно, однозначно поставить 3-реакции в соответствие искомый 3-стимул можно только в том случае, если существует способ однозначно поставить 3-стимулу в соответствие форму всей спектральной кривой, т. е. спектральный стимул. Поэтому зрительная система, неявно ориентируясь на некоторую фиксированную процедуру аппроксимации кривой по трем характеризующим ее параметрам, могла бы давать хорошие оценки 3-стимулов для спектральных стимулов, форма которых хорошо описывается этой фиксированной процедурой. Такому условию, например, удовлетворяют разнообразные **пологие** кривые испускания (и отражения, так как стимулы, по которым необходимо построить векторы $\mathbf{F}$, создаются несамосветящимися объектами).

Реакция a_k приемника k-го типа с *кривой чувствительности* χ_k^{λ} на излучение F^{λ} выражается так: $a_k = \int\limits_0^{\infty} F^{\lambda}\chi_k^{\lambda}d\lambda$. Положим, например, в основу *процедуры восстановления* F^{λ} по трем значениям F^k интерполяционную формулу Лагранжа, с помощью которой построим плавную кривую Γ^{λ}, такую, что $\Gamma^{\lambda} = F^{\lambda}$ в точках $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. (Отклонения Γ^{λ} от F^{λ} в других точках спектра можно оценить дополнительным членом той же формулы Лагранжа.)

При условии, что $F^{\lambda} \equiv \Gamma^{\lambda}$ (для всех λ), реакцию a_k можно разложить в сумму вида

$$\mathrm{a}_k = \sum_{l=1}^{3} \mathrm{F}^l c_{kl}. \qquad (3)$$

Коэффициенты c_{kl} можно определить через известные χ_k^λ и узлы интерполяции λ_1, λ_2 и λ_3 (например, $c_{k1} = (1/(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)) \int\limits_0^\infty (\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3)\chi_k^\lambda d\lambda$).

Понятно, что систему линейных уравнений (3) для a_1, a_2 и a_3 можно решить, выразив F^1, F^2 и F^3 через a_k и 9 известных постоянных коэффициентов c_{kl}. Таким образом, при условии $F^\lambda \equiv \Gamma^\lambda$ имеется способ по 3-реакции **a** найти значения F^λ. И поскольку в общем случае Γ^λ — лишь *приближение* к спектральной кривой F^λ, то величины, определяемые по известным из линейной алгебры формулам, будут *оценками* компонент вектора **F**. Обозначим эти оценки через $\widetilde{F}^k$.

Если функцию, выражающую $\widetilde{F}^k$ через **a** и c_{kl}, записать как D_k (**a**), то *алгоритм решения задачи* оценки окраски по 3-реакциям **a** (x, y) для сцен-аппликаций примет вид

$$1)\ \widetilde{F}^k(x,y) = D_k(\mathbf{a}(x, y)), \qquad 2)\ \widetilde{S}^k = \max_{x,\,y}\{\widetilde{F}^k(x,y)\},$$
$$3)\ \widetilde{\Phi}^k = \widetilde{F}^k(x, y)/\widetilde{S}^k \qquad (k = 1, 2, 3). \tag{4}$$

Операции 1) и 3), очевидно, полезны для обеспечения константности цветовосприятия. Использование в зрительной системе человека операции типа 2) (алгоритм (4)) требует опытного подтверждения, которое и было произведено в серии специальных психологических экспериментов.

3. Психологические эксперименты по восприятию человеком плоских сцен. 3.1. Схема опыта по проверке предположения о независимом поиске компонент вектора «3-освещения» (см. [2]). Пусть в поле зрения наблюдателя расположены два серых тестовых образца с одинаковыми коэффициентами отражения. Каждый тестовый образец окружен индуцирующими образцами разных окрасок. Все образцы плоские и матовые. Располагаясь на плоскости, они образуют две пространственно разнесенные *группы* объектов сравнения. Каждая группа содержит один тестовый образец. Наблюдателю ясно, что каждая группа освещена своим источником, а потому требует своей гипотезы об освещении. Тестовые образцы отражают свет одинакового спектрального состава. Индуцирующие образцы подобраны таким образом, что в первой группе тестовый образец несомненно **самый светлый**, тогда как во второй группе светлóты тестового и индуцирующих образцов сравнить затруднительно, хотя каждый из двух индуцирующих образцов имеет такую компоненту **F** (со своим номером у каждого образца), что соблюдается условие $F^k_{\text{инд}} > F^k_{\text{тест}}$.

В этих условиях, согласно алгоритму (4), тестовый образец первой группы должен показаться наблюдателю **белым**, а гипотеза об освещении во второй группе, построенная по ее индуцирующим образцам, должна приводить к бóльшим значениям компоненты $\widetilde{S}$, нежели у одноименных компонент стимула от тестового образца этой группы. Поэтому тестовый образец второй группы должен казаться более **темным**, чем тестовый образец первой группы. Назовем это требование *условием сравнения тестовых образцов* и обозначим его для краткости через *У1*.

Чтобы результат опыта нельзя было истолковать как проявление одновременного светлотного контраста, выдвинем дополнительное требование: индуцирующие образцы второй группы **не должны** представляться наблюдателю **более светлыми**, чем индуцирующие образцы первой. *Условие сравнения индуцирующих образцов* обозначим через *У2*. Совместное выполнение условий *У1* и *У2* будет серьезным доводом в пользу выдвинутой гипотезы.

3.2. Результаты опытов по проверке предположения. Эксперимент состоял из серии опытов, а условия менялись от опыта к опыту так, что все больше возрастало число признаков однородного и независимого освещения каждой из групп образцов. Для большинства наблюдателей удалось добиться одновременного выполнения условий *У1* и *У2*, причем в одном из опытов видимые качества объектов удовлетворяли при выполнении *У1* более сильному требованию, чем *У2*, а именно: окружение тестового образца второй группы **темнее** окружения тестового образца первой. Таким образом, была создана экспериментальная ситуация, противоположная по эффекту *светлотному контрасту*. Кроме того, выяснилось, что разные гипотезы об источниках, освещающих две близкие части поля зрения, могут возникнуть не иначе, как при наличии достаточно веских доводов в пользу того, что источники действительно различны. Если же подобных доводов нет или они малоубедительны, то зрительная система ищет одну **общую** гипотезу об освещении (и тогда тестовые образцы, отражающие физически одинаковые излучения, производят одинаковые цветовые ощущения).

Одновременное соблюдение условий *У1* и *У2* потребовало тщательного подбора цвета стимулов в сцене. Их сочетание, при котором была достигнута инверсия одновременного светлотного контраста, едва ли не уникально[1]. Результаты эксперимента

---

[1] Рассмотрим на численном примере, при каком подборе стимулов алгоритм (2) приводит к результатам описанного опыта. Величины компонент векторов станем записывать в квадратных скобках в порядке возрастания номера зоны. Пусть образцы первой группы имеют компоненты 3-стимулов: от тестового F_{T1} [33, 33, 33], от индуцирующих — зеленого F_G [25, 33, 25] и желтого F_Y [33, 33, 19]. Образцы 2 группы: тестовый $T2$, сине-зеленый BG и красный R с компонентами 3-стимулов [33, 33, 33], [1, 41, 44] и [66, 15, 2] соответственно. В поле зрения образцы расположены так: $\begin{matrix} G & T1 & Y \\ R & T2 & BG \end{matrix}$, что затрудняет сравнение G с BG и R с Y. Гипотезы об освещении групп по (2) такие: $\widetilde{\mathrm{S}}_1$ [33, 33, 33] и $\widetilde{\mathrm{S}}_2$ [66, 41, 44]. Отсюда $\widehat{\Phi}_{T1}$ [1, 1, 1] и $\widehat{\Phi}_{T2}$ [1/2, 4/5, 3/4], и потому $T2$ по алгоритму (2) должен выглядеть темнее, чем $T1$ (и быть не серым, а зеленовато-синеватым).

говорят в пользу гипотезы о наличии в зрительной системе человека механизмов, осуществляющих при восприятии аппликаций сходную с алгоритмом (4) процедуру зрительной обработки. Следует отметить, что данные тестовых испытаний по изучению некоторого типа цветовых иллюзий, описанных в работе [3], хорошо согласуются с цветовыми оценками, вычисляемыми по (4). Результаты оценки окрасок в опытах М. М. Бонгарда [1] также предсказуемы качественно с помощью процедуры (1) (тем более с помощью алгоритма (4)).

3.3. Опыты М. М. Бонгарда[1]. Опишем кратко 6 опытов, в которых наблюдатели, обладавшие нормальным цветовым зрением, оценивали окраску плоских образцов в условиях, когда сами источники в поле зрения наблюдателей не попадали, и гипотезу об освещении (о его цвете) можно было строить только по стимулам от образцов.

В описаниях цвета освещения под «белым светом» будет подразумеваться свет, принадлежащий множеству колориметрически различимых (по цветности) излучений, действующих на темноадаптированный глаз наблюдателя так, что при предъявлении некоторых «белых» излучений наблюдатель замечает их различия (по цветности), хотя при одиночном предъявлении любого из этих излучений глазу не удается обнаружить у него сколько-нибудь заметной цветности.

Фоновую плоскость, на которой в качестве индуцирующих образцов были расположены по-разному окрашенные плоские фигурки (кружки, квадраты, треугольники), будем именовать кратко *фоном*, а индуцирующие образцы — *фигурками*. Оценка окраски фона была тестовым испытанием в первых четырех опытах. В 5-м и 6-м опытах тестовым был *серый кружок* в центре поля наблюдения.

Опыт 1 (контрольный). Окраска фона оранжевая, фигурок на нем нет, освещение зеленое. Все наблюдатели назвали фон зеленым, значит неучтенных возможностей оценки цвета освещения сцена не предоставляет.

Опыт 2. В сцену опыта 1 внесены разноцветные фигурки, среди которых есть белые. Наблюдатели назвали фон оранжевым.

Опыт 3. Окраска фона серая, освещение белое. Окраски образцов подобраны так, что цвета стимулов от них примерно те же, что и в опыте 2. Фон был назван оранжевым. С тем же систематическим цветовым сдвигом оценены и окраски фигурок.

Результат этого опыта может трактоваться и как следствие одновременного цветового контраста — ведь цвета наиболее ярких стимулов от фигурок группировались в сине-зеленом участке спектра. Для выяснения роли контраста были проделаны опыты 4—6.

Опыт 4. Единственное отличие от сцены опыта 3 — коричневые фигурки, которые могли только уменьшать цветовой контраст, заменены белыми фигурками. Наблюдатели назвали фон серым.

---

[1] Полностью описаны в [1].

Опыт 5. Белая волнистая поверхность, посыпанная «блестками» (чешуйками слюды), освещена красным светом всюду за исключением места, где на ней расположен серый кружок. Кружок освещен белым светом. Наблюдатели назвали кружок ярко-синим, т. к. была создана видимость всюду красного освещения.

Опыт 6. Белая поверхность заменена красной, освещение — повсюду белое. Большинство наблюдателей назвали кружок серым, т. е. «контраст», так ярко проявившийся в опыте 5, исчез, хотя свет, отраженный красной поверхностью, был более насыщенно красным по сравнению с красными стимулами в опыте 5.

Эти опыты показали, что одновременный цветовой контраст (в условиях, когда он наиболее заметен) можно, по-видимому, считать частной разновидностью ошибочных цветовых оценок, производимых наблюдателем в **ложноконстантных** условиях наблюдения (опыт 3). Проявления эти в специальных условиях маскированного освещения можно усилить (опыт 5), но они становятся почти незаметными в **константных** условиях наблюдения (опыты 4 и 6).

Другие эксперименты, разобранные в [1] и [2], касаются особенностей узнавания окраски **неплоских** объектов. Опыты эти подтвердили предположения авторов о том, что при восприятии объемных тел гипотезы об освещении сцены могут строиться с учетом не только самых светлых, но и теневых частей поверхности тел.

4. Алгоритм оценки окраски и ориентации пространственных объектов, освещенных точечным и распределенным источниками — модель ТОНИРОВАННЫЙ ГИПС[1]. 4.1. Ограничения на ситуацию и устройство системы. Назовем *накраской* связный участок поверхности, имеющий всюду одинаковые отражательные свойства. Опишем особенности модели.

Требования к объектам сцены.

1. Объектами сцены могут быть только кусочно-гладкие равномерно рассеивающие накраски произвольной формы. (Свойство поверхностей менять свои отражательные свойства только на линиях границ накрасок играет здесь принципиальную роль.)

2. Сцену освещают далекий точечный и менее яркий распределенный по полусфере (диффузный) источники (последний будем называть также «небом»). Во всех точках полусферы неба одинаков абсолютный спектральный состав создаваемых им излучений. Небо освещает все объекты сцены (но не все места — всей полусферой).

3. Вклад *рефлексов* (т. е. рассеянного накрасками света) в общее освещение сцены пренебрежимо мал.

4. Теневая область в сцене (область, освещаемая только небом) а) имеет четкую границу, б) связна. (Эти требования не обязательны, они наложены для простоты и краткости алгоритма.)

---
[1] Полнее описана в [4] и [5].

5. Вклад неба в освещение световой области (освещаемой лучами точечного источника) пренебрежимо мал.

6. В сцене нет флуоресцирующих накрасок. (Их наличие могло бы привести к заметному искажению производимых цветовых оценок.)

Требования к объектам и границам на растре.

1. В поле зрения системы источники не попадают. (Наличие самосветящихся или бликующих объектов приводит к дополнительной задаче отбора точек растра, в которые они спроецированы. К этим точкам неприменимы понятия, относящиеся к матовым накраскам или же к накраскам вообще.)

2. На растре а) проекция любой из накрасок двумерна и занимает много точек, б) проекция сетки границ занимает существенно меньшую часть всех точек растра. (Требования, связанные с ограниченной разрешающей способностью растра.)

3. Проекция любой границы двух накрасок (обозначим каждую такую границу на растре как *ГН*) нигде не совпадает с проекцией границы тени (с *ГТ*). (Не обязательное, но укорачивающее описание решения требование.)

4. Требование к сетке «границ предметов» (см. 4.3).

Цветовые особенности.

1. Система имеет два цветовых канала. (Двумерное зрение — простейший тип цветного зрения. Увеличение числа каналов до трех усложнит, но не изменит принципов работы алгоритма. При этом ее качество повысится, оценки освещения и окрасок будут более полными, поиск *ГТ* и других типов границ — более надежен и т. п.)

2. Входная картина задана 2-стимулами в каждой точке растра. (Предполагается, что пересчет реакций светочувствительных приемников системы в компоненты 2-стимулов по двумерному варианту операции 1) алгоритма (4) уже произведен.)

3. Векторы, характеризующие а) спектры точечного и диффузного освещений и б) отражательные свойства граничащих в поле зрения накрасок — линейно независимы. (В случае, если оба типа освещения характеризуются одинаковым относительным спектральным составом, световые области алгоритм не сумеет отделить на растре от теневых, хотя условия освещения в тени и на свету различны. Неразличимы для алгоритма и накраски, проекции которых граничат на растре, при условии коллинеарности векторов их 2-окрасок.)

4.2. Постановка задачи. Множество точек на Р представим как объединение двух областей — *области света* С, образованной проекциями накрасок, освещаемых преимущественно точечным источником, и *области тени* Т с чисто диффузным освещением соответствующих ей накрасок.

Назовем *районом* ту связную часть Р, которой соответствует в сцене поверхность данной окраски, освещенная источником данного типа, причем на С — *световым*, а в Т — *теневым* районом.

Часть области С, занимаемую районами проекций накрасок, рассеченных $ГТ$, назовем *световым поясом* и обозначим СП.

Введем основные соотношения, связывающие между собой спектральные характеристики и геометрические параметры. Для матовых поверхностей, освещенных только точечным источником, спектральный стимул F^λ, кривая отражения поверхности Φ^λ и β — косинус угла μ между нормалью к элементу поверхности в сцене и направлением на источник связаны соотношением

$$F^\lambda = \Phi^\lambda S_p^\lambda \beta. \tag{5}$$

Здесь S_p^λ — спектральный стимул, создаваемый нормально освещенной, идеально рассеивающей белой поверхностью. Уравнение (5) справедливо для точек области С.

В случае только диффузного освещения (без учета влияния рефлексов) уравнение для спектрального стимула имеет вид

$$F^\lambda = \Phi^\lambda S_d^\lambda \gamma. \tag{6}$$

Параметр γ пропорционален освещенности, создаваемой на элементе накраски распределенным источником. Когда элемент освещен всей полусферой неба, $\gamma = 1$. $S_d^\lambda \gamma$ — спектральный стимул, создаваемый идеально рассеивающей белой накраской, освещенной лишь небом (т. е. при условии, что внешние предметы, экранирующие небо для данной точки сцены, рефлексов не посылают).

Выпишем двухкомпонентное приближение уравнений (5) и (6). Если k, индекс цветового канала, принимает значения 1 и 3 (значение 2, определяющее «зеленую» зону, в двухканальном варианте модели выпадает), то для i-го района области С и для j-го района области Т имеем

$$\begin{aligned} \mathrm{F}_i^k(x, y) &= \mathrm{S}_p^k \Phi_i^k \beta(x, y), \quad i = 1, 2, \ldots, \\ \mathrm{F}_j^k(x, y) &= \mathrm{S}_d^k \Phi_j^k \gamma(x, y), \quad j = 1, 2, \ldots \end{aligned} \tag{7}$$

Например, F_i^1 (x, y) обозначает красную компоненту 2-стимула в точке (x, y), принадлежащей i-му световому району. Пару чисел Φ^1 и Φ^3 назовем *2-окраской*. Ясно, что вектор Φ в пределах района сохраняет постоянную величину.

Итак, на входе модели — векторное поле $\mathbf{F}$ (x, y). Ни о величинах векторов S (для диффузного — d и точечного — p источников), ни о скалярных полях β (x, y) и γ (x, y) заранее ничего не известно. Нет сведений о локализации границы тени и границ районов. Задача модели — оценить 2-окраски во всех районах растра, а также построить аппроксимацию поля β (x, y) — поля значений ориентации элементов поверхности относительно источника p.

4.3. Подготовительный этап решения задачи. Предлагаемый алгоритм использует постулированную (см. 4.1) особенность раскраски поверхностей в сцене: отражательные свойства поверхностей изменяются (скачком) только на границах накрасок. Если бы алгоритм давал возможность указать среди границ между районами те, на которых не меняется скачком величина $\beta\ (x,\ y)$ или $\gamma\ (x,\ y)$ (*ГТ* не принадлежит к таковым), то связная группа районов (назовем ее «цепочкой»), граничащих друг с другом по линиям такого типа, после некоторой достаточно простой обработки могла бы быть использована как входное поле для алгоритма (2) модели АППЛИКАЦИЯ. Действительно, на границах, где меняются только значения компонент 2-окрасок, сопоставление скачков по величине F^k (с учетом знака) на всех границах в цепочке может обеспечить оценку Ф накрасок в ней с точностью до некоторого единого (двумерного по числу каналов) коэффициента. После этого можно применять к части Р, занимаемой этой связной группой районов, алгоритм (2).

Ясно, что для формирования подобных цепочек необходимо провести классификацию границ на растре, а именно: а) найти все границы, общие для пар соседствующих районов (каждую такую границу двух районов станем сокращенно именовать *ГР*), б) среди *ГР* найти всю *ГТ*, в) среди *ГР*, не являющихся частью *ГТ*, указать те границы, на которых имеет место скачок величины параметра β или γ,— на таких границах вклад скачка величины Φ^k в перепад значений F^k неизвестен (и его неоткуда определить до тех пор, пока правильно не оценены окраска и форма предметов). И поскольку один из двух пространственно разнесенных предметов часто заслоняет другой при проецировании на Р по границе типа в), станем называть *ГР* со скачком величины β или γ «границей предметов» (сокращенно *ГП*).

Итак, подготовительный этап решения включает поиск на Р границ **районов, тени и «предметов»**, что и будет соответствовать шагам 1, 2 и 3 алгоритма. Разберем признаки каждого типа границ.

1. Внутри любого района постоянны окраска и тип освещения, а потому величина F^1/F^3 также постоянна. Назовем ее *кодом* района. В силу оговоренных ограничений на ситуацию наличие скачка величины F^1/F^3 является **необходимым и достаточным признаком** *ГР*.

2. Как видно из уравнений (7), на любой из *ГР*, составляющих *ГТ*, отношение кодов граничащих районов равно $(S^{1'}_p/S^3_p)/(S^1_d/S^3_d)$ и не зависит от 2-окрасок, являясь константой для Р в целом, в то время как для прочих границ районов с номерами r и $r-1$ она равна $(\Phi^1_r/\Phi^3_r)/(\Phi^1_{r-1}/\Phi^3_{r-1})$. Очевидно, чем больше районов в СП, тем легче указать *ГТ* по такому ее **необходимому признаку:** отношения кодов на всех *ГР* в СП, входящих в *ГТ*, равны между собой.

Имеется также **достаточный признак** *ГН* (позволяющий исключить найденные с его помощью *ГН* из списка *ГР*, имеющих вероятность принадлежности к $ГТ$): $[(\mathrm{F}_r^1/\mathrm{F}_{r-1}^1) - 1]/[(\mathrm{F}_r^3/\mathrm{F}_{r-1}^3) - 1] < 0$. Смысл признака в том, что на $ГН$ скачки компонент 2-стимула могут оказаться разнополярными (если так сочетаются накраски-соседи), а на $ГТ$ (не имеющей участков $ГН$) скачки в обоих каналах всегда совпадают по знаку.

3. В условиях, когда при проецировании на растр одна криволинейная поверхность заслоняет другую, $ГП$ между ними часто обладает таким свойством: освещенности предметов по обе стороны от $ГП$ меняются каждая по своему закону, а потому величина поперечного скачка освещенности вдоль $ГП$ непостоянна. Следовательно, **достаточный признак участка** $ГП$ таков: участок $ГН$ (не включающий своих концевых точек), на протяжении которого меняется величина отношения $\mathrm{F}_r^k/\mathrm{F}_{r-1}^k$, принадлежит к $ГП$.

Имеется еще несколько достаточных признаков $ГТ$ и $ГП$, но мы ограничимся перечисленными выше и отметим только, что совокупность известных нам признаков не дает гарантии выявления всех $ГП$ в любой из оговоренных в 4.1 ситуаций.

Сформулируем, наконец, требование к сетке $ГП$:

накраски и их освещение таковы, что в сетке $ГР$ нет замкнутых линий, содержащих только $ГП$ или, быть может, еще и участки $ГТ$ и (или) участки краев растра.

При условии, что $ГР$ удовлетворяют этому требованию, оказывается возможным представить области Т и С как две (разделенные $ГТ$) связные группы районов, нигде не рассекаемые нацело непрерывной линией $ГП$.

4.4. Получение оценок 2-окраски. Опустим индексы каналов (где это возможно), потребовав, чтобы все разбираемые далее операции производились в каждом канале независимо. Продолжим теперь разбор шагов решения.

4. Цель данного шага — для всех районов любой из областей оценить каждую компоненту 2-окраски с точностью до некоторого коэффициента $q_1 = 1/\Phi_1$, т. е. найти $\tilde{\Phi}'_r = \Phi_r/\Phi_1$. Паре граничащих районов, если только их разделяет не $ГП$ и не $ГТ$, сопоставим число, равное Φ_r/Φ_{r-1}, где r и $r-1$ — номера этих районов. Оно равно числу $\mathrm{F}_r/\mathrm{F}_{r-1}$, взятому на Р в соседних приграничных точках. Ясно, что производя последовательные умножения таких чисел по пути обхода районов данной области, не пересекающему нигде $ГП$, для каждой пары номеров районов (2,1; 3,2; 4,3; ... r, $r-1$; ...) получим Φ_r/Φ_1. Если же путь обхода включает не выявленную (по причине отсутствия необходимых признаков) $ГП$, то такая $ГП$ может стать дополнительным источником ошибок в формируемых далее оценках Φ и β. Положив $\tilde{\Phi}'_1 = 1$, получим

$$\tilde{\Phi}'_r = \prod_{l=2}^{r} (\mathrm{F}_l/\mathrm{F}_{l-1}) = \Phi_r/\Phi_1.$$

Единая для данной области константа Φ_1 — это значение компоненты 2-окраски того района, с которого был начат процесс последовательного умножения величин вида F_l/F_{l-1}. Если этот процесс начинать и в Т, и на С с накраски, рассекаемой *ГТ* (с двух соседних районов i и j), то коэффициент q_1 станет в этом случае единым (для данного канала) по всему Р. Несоблюдение требования к сетке *ГП* приводит к увеличению числа различных коэффициентов, определяющих ошибки $\widetilde{\Phi}$.

5. На этом шаге производится улучшение оценки всех $\widetilde{\Phi}_r'$ путем деления каждой $\widetilde{\Phi}_r'$ на наибольшую из них — $\widetilde{\Phi}_0'$. Так получаем окончательные оценки окрасок всех районов $\widetilde{\Phi}_r = \widetilde{\Phi}_r'/\widetilde{\Phi}_0' = \Phi_r q_2$, где $1/q_2 = \max\limits_{x,\,y} \{\Phi(x, y)\}$. Но таким q_2 будет лишь, если путь обхода на шаге 4 не пересекал *ГП*. В противном случае ошибки оценок могут быть иными.

4.5. **Аппроксимация поля $\beta(x, y)$ и задача вычисления объемной формы видимых системой тел.** Приведем продолжение разбираемого алгоритма с тем, чтобы помимо оценки окраски поверхностей найти оценки величин $\beta(x, y)$ по области С. Сведения эти могут помочь узнаванию формы поверхностей.

6. Цель шага — получить поле оценок величины $\beta(x, y)$ на С. Для этого сначала с помощью известных значений $\widetilde{\Phi}_i$ сформируем поле компонент оценок $\widetilde{\Phi}_i(x, y)$, приписав всем точкам области С значения $\widetilde{\Phi}_i$ соответствующих районов (накрасок). Затем в каждом канале вычислим величины $F_i^k(x, y)/\widetilde{\Phi}_i^k(x, y)$ для всех точек на С и, наконец, оценку величин $\beta(x, y)$ по формуле $\widetilde{\beta}(x, y) = [F_i^k(x, y)/\widetilde{\Phi}_i^k(x, y)]/[\max\limits_{x,\,y} \{F_i^k(x, y)/\widetilde{\Phi}_i^k(x, y)\}]$. Легко показать, что с истинным значением эта оценка связана соотношением $\widetilde{\beta}(x, y) = \beta(x, y)/\max\limits_{x,\,y} \{\beta(x, y)\} = \beta(x, y)/\beta_0$, т. е. оказывается одинаковой для обоих каналов и не зависит от ошибок в $\widetilde{\Phi}_i$. Ошибку величин $\widetilde{\beta}(x, y)$ определяют ориентации элементов накрасок. Однако, как и на шаге 5, это верно лишь при отсутствии *ГП* на пути обхода районов на шаге 4.

Итак, поле $\beta(x, y)$ восстановлено. В тех точках поверхностей, где нормаль к поверхности ориентирована по направлению на источник, $1/\widetilde{\beta}_0 = 1$ и $\widetilde{\beta}(x, y) = \beta(x, y)$. Даже если таких точек нет, но на С имеются места, где это условие выполняется лишь приближенно, величина $1/\beta_0 \geqslant 1$ весьма близка к 1.

В реальных (выходящих за модельные ограничения) ситуациях найденное поле $\beta(x, y)$ может быть использовано следующим образом. Если условия наблюдения позволяют выяснить направление на точечный источник[1], то с помощью этих данных можно

[1] Положение источника относительно неизменно во внешнем мире, а потому может быть известно наблюдателю заранее. Возможны также способы его вычисления по самой сетчаточной проекции сцены (по особенностям формы

решать дифференциальное уравнение, определяющее форму наблюдаемых тел, задавая начальные условия в точке (x_s, y_s), где $\beta(x_s, y_s) = \beta_0$, т. е. где нормаль к поверхности (по предположению) ориентирована на источник. Как показано в [7], для успешного вычисления пространственной формы гладких матовых поверхностей (с заранее известной отражательной способностью) по распределению на них светотени, т. е. задаваясь фактически полем $\beta(x, y)$, необходимо еще знать, выпукла или вогнута поверхность в окрестности точки (x_s, y_s) [1]. Таким образом, описанный выше алгоритм (шаги $1 \div 6$) позволяет свести задачу узнавания формы тел к теоретически разрешимому случаю.

4.6. О возможности реализации алгоритма с помощью однородных и изотропных операций. Описанный алгоритм применял операции над скалярными и векторными полями (шаги 1 и 6), линиями (шаги 2, 3, 4), числами (шаг 5). И на их выходах получались объекты этих трех типов.

Периферические части зрительных систем животных, по-видимому, не содержат устройств для обработки таблиц числовых и логических величин, например, механизма для шага 4 (на котором выбираются пути обхода по возможности всех районов каждой из областей, минующие *ГП*). Хотелось бы решить задачу, используя лишь последовательность изотропных и однородных по полю операций над числами, заданными на двумерной области x, y.

Оказывается, что эта задача действительно разрешима. Так, например, шаг 1 алгоритма — выделение сетки *ГР* — реализуется последовательно примененными операциями Λ^1 и δ' (все операции определим через преобразование, совершаемое каждой из них над произвольным векторным полем $\mathbf{V}(x, y)$, индекс которого принимает значения 1 и 3) вида

$\Lambda^1\mathbf{V}(x, y) = \mathbf{V}^1(x, y)/\mathbf{V}^3(x, y)$ (локальная операция над разными каналами в одной точке растра),

$$\delta'\mathbf{V}^k(x, y) = (\mathbf{V}^k(x, y))^2 \Big/ \left(\prod_{\xi=1}^{\omega} \mathbf{V}^k(x_\xi, y_\xi)\right)^{2/\omega},$$

где (x_ξ, y_ξ) — координаты точек (их общее число ω), окружающих данную точку (x, y) (квази-локальная операция над разными точками в одном канале, осуществляющая фильтрацию высоких пространственных частот, т. е. выделяющая скачки сигнала).

ГГ на Р). Наконец, известно, что человеком и животными видимая сцена интерпретируется предпочтительнее всего так, как если бы она освещалась сверху [6].

[1] Эти сведения не всегда могут быть получены из сетчаточной картины. При этом зрительная система, по-видимому, пытается построить оба варианта решения («выпуклое» и «вогнутое»). Выбрать одно из них человеку иногда помогает прошлый опыт, если же выбрать не удается (а оба решения существуют), возникает иллюзия попеременно выворачивающейся поверхности.

С помощью операций Λ^1 и δ' можно выделять *ГТ* и *ГН* (шаг 2), а для поиска участков *ГП* (шаг 3) достаточно применения одной лишь операции δ'.

Для выполнения шагов 5 и 6 требуется нелокальная операция *M*, производимая независимо в каждом цветовом канале (она реализует процедуру алгоритма (2))

$$MV^k(x, y) = V^k(x, y)/\max_{x,y} \{V^k(x, y)\}.$$

Наконец, можно показать, что организация процесса, эквивалентного интегрированию некоторого дифференциального (в частных производных) уравнения с заданными начальными условиями а) на *ГТ*, б) в точке (x_s, y_s), может аналоговыми методами обеспечить достижение целей соответственно шага 4 и этапа вычисления формы видимых накрасок. Обе эти процедуры, являясь нелокальными и динамическими, имеют аналог, как можно предположить, в феномене «заполнения пустого поля» [11], моделируемого итеративными методами [12].

4.7. Обсуждение. В какой мере разобранный алгоритм и свойства модели ТОНИРОВАННЫЙ ГИПС могут служить адекватным описанием устройства и работы зрительной системы человека (животных)?

В пользу сходства работы алгоритмов модели и зрительной системы говорит то, что условия, облегчающие работу зрения, помогают и модели. Так, наличие четких контуров (*ГН*) на картине существенно для правильной оценки окрасок изображенных тел [8]. Кроме того, задачи, трудные или недоступные для модели, часто трудны для наблюдателя: если опознаваемая поверхность имеет плавные переходы окраски, то они прежде всего интерпретируются как результат изменений освещенности, а не отражательных свойств поверхности, тем самым способствуя созданию иллюзорного представления о ее форме (например, цветная фотография шара, обрезанная по его контуру и прикрепленная к стене, может быть принята за выпуклость на ней); наличие на поверхности предмета области, освещенной ярким локальным рефлексом (непонятного наблюдателю происхождения), может сильно исказить оценку окраски предмета; наличие в сцене двух точечных источников с разным цветом лучей вызывает появление так называемых «цветных теней», и правильная цветовая интерпретация видимого в этих условиях чаще всего оказывается невозможной (во всяком случае на уровне непосредственных цветовых ощущений, без привлечения логики и мобилизации «пространственного» внимания) и т. п. У многих животных плавное посветление окраски от спины, обычно лучше освещенной, к животу приводит к искажению восприятия их истинной формы — «превращает их в плоские» [9]. Пятнистая («расчленяющая») окраска затрудняет узнавание целостной формы животного. Сама возможность использования разнообразных форм покровительственной окраски—

один из факторов выживания, возможный только при наличии «слабых мест» в процедуре зрительной обработки, применяемой врагами данного животного (обработки, по-видимому, во многом общей у разных видов животных с развитым цветовым зрением), причем набор этих трудных для адекватного восприятия ситуаций коррелирует, насколько об этом можно судить, с вызывающими ошибочные оценки зрительными ситуациями для модели.

Задача, первоначально поставленная перед рассмотренным выше алгоритмом,— оценка окрасок. Однако подготовительный этап алгоритма — поиск и классификация границ на растре — дает на Р сетки линий нескольких типов (*ГТ*, *ГН*, *ГП*), которые и сами по себе могут быть с пользой применены. В том, что они часто являются достаточными для узнавания форм, расположения и освещения предметов в объемных сценах, убеждает рассмотрение контурных рисунков. Руководствуясь этими соображениями, этапы классификации границ и формирования оценок окрасок имеет смысл именовать соответственно этапами **различения** и **узнавания** (на первом этапе: разно окрашенные поверхности друг от друга — по *ГН*, области с разным типом освещения — по *ГТ*, предположительные места разрыва по координате глубины — по *ГП*).

Наконец, несколько слов об электрофизиологических коррелятах операций, необходимых для аналоговой реализации рассмотренного алгоритма. Общеизвестными фактами, касающимися организации обработки зрительных сигналов сетчаткой, являются (у многих видов животных) концентрическое строение рецептивных полей и процессы латерального торможения сигналов, наличие рецептивных полей, центр и периферия которых «оппонентны по цвету» [10], логарифмирование сигналов. Операция δ', определявшаяся как «рецептивное поле» с периферией из ω точек, влияющих на свой центр — точку (x, y), если прибегнуть к логарифмированию, не будет формально отличаться от преобразования типа латерального торможения (в приближении, не учитывающем скорости проведения и обработки сигнала). В том же логарифмическом масштабе свойства операции Λ похожи на свойства цветовых оппонентных клеток, а комбинация операций Λ и δ' обрабатывает сигналы по типу «дубль-оппонентных» цветовых клеток.

5. Задача различения районов и алгоритм оценки зеркальной и диффузной компонент рассеяния поверхностей, использующий в некоторых ситуациях рефлексы для узнавания формы тел в тени — модель НАТЮРМОРТ. 5.1. Ранги уравнений стимула и задача различения районов. Уравнение (для) стимула, написанное с учетом вклада распределенного источника (неба) в освещение поверхности, имеющей компоненту окраски Φ_i^k, имеет для i-го района области С вид

$$\mathrm{F}_i^k(x, y) = \Phi_i^k(\mathrm{S}_p^k\beta(x, y) + \mathrm{S}_d^k\gamma(x, y)). \qquad (8)$$

В правых частях уравнений (7) и (8) ни одна векторная характеристика не зависит от координат x, y. Если плоская сцена имеет вид аппликации (т. е. составлена из ряда накрасок), то и для нее $\mathrm{F}_i^k = \Phi_i^k\,\mathrm{S}^k$ (где i — номер накраски). Обозначим независимый спектральный вклад в стимул (произведение вида $\Phi^k\mathrm{S}^k$) через H^k, а стереометрический параметр при нем (β или γ, например) через $h\,(x,\,y)$. Для сцен разной сложности характерны уравнения стимулов, правые части которых представимы различным числом слагаемых в сумме $\sum\limits_{l=1}^{e} \mathrm{H}_l^k h_l\,(x,\,y)$, причем, выписывая правые части в порядке возрастания сложности, можно получить такую последовательность: 1) H_1^k; 2) $\mathrm{H}_1^k\,h_1\,(x,\,y)$; 3) $\mathrm{H}_1^k h_1\,(x,\,y) + \mathrm{H}_2^k$; 4) $\mathrm{H}_1^k h_1\,(x,y) + \mathrm{H}_2^k h_2(x,\,y)$;...; $2e+1$) $\mathrm{H}_1^k h_1(x,y) + \ldots + \mathrm{H}_e^k h_e(x,y) + \mathrm{H}_{e+1}^k$;... Порядковый номер члена последовательности назовем *рангом* того *уравнения стимула*, правая часть которого описана этим членом. Ранг уравнения равен числу вкладов H_l^k и параметров $h_l\,(x,\,y)$, при этом все «относительные спектральные составы» векторной характеристики H_l^k (k может принимать сколь угодно большие значения, т. е. его можно заменить на λ) предполагаются различными (или же k-мерные векторы $\mathbf{H}_l$ неколлинеарными), а также предполагается, что среди $h_l\,(x,\,y)$ нет ни одной пары параметров с одинаковым законом изменения по полю района.

Уточним определение района. Будем называть районом ту часть (проекции) накраски на P, в пределах которой все вклады H_e^k суть константы (блестящая накраска, например, может иметь во внутренней своей части *район блика*, так как на его границах происходит скачок вклада зеркальной и диффузной компонент рассеяния).

Все накраски в аппликации — объекты 1 ранга (для краткости ранг уравнения для производимого объектом стимула присвоим самому объекту). Любой район сцены, описывающейся уравнениями (7) (модель ТОНИРОВАННЫЙ ГИПС), имеет ранг не выше 2 (так как все плоские накраски в безрефлексном приближении — объекты ранга 1), районы в уравнениях (8) — не выше 4. Модель, которую мы будем описывать, предназначена для работы с объектами (сцены) ранга 3.

Чем больший (по площади на P) участок *плавно меняющейся окраски* мы пытались бы охарактеризовать *единым* рангом, предполагая, что вариации $\mathbf{F}$ в пределах такого участка — следствие сложного освещения, а не изменчивости окраски, тем большим рангом пришлось бы этот участок охарактеризовать. Но сцена может содержать такие участки меняющейся окраски, распределение $\mathbf{F}$ по которым невоспроизводимо никакой пространственной конфигурацией одной гипотетической накраски. И если зрительная система умеет решать задачу различения районов для объектов ранга, например, не выше 3, то невозможность построить для некоторого участка P единый код может стать для системы аргументом в пользу непостоянства Φ на этом участке.

5.2. Геометрическое место районов данного ранга в пространстве стимулов и операции, необходимые для различения районов. Рассмотрим, как в пространстве стимулов располагаются соответствующие району стимулы от объекта данного ранга. Ограничимся пространством $\mathcal{F}$ 3-стимулов (т. е. размерностью, не большей чем у цветового пространства трихромата).

У объектов ранга 1 каждая r-я накраска в $\mathcal{F}$ — это точка с координатами ($S^1\Phi_r^1$, $S^2\Phi_r^2$, $S^3\Phi_r^3$) (или кратко — ($S\Phi_r$)). Переменное по x, y поле района у объекта ранга 2 образовано за счет изменений h_1 (x, y). Поэтому объект ранга 2 отображается в $\mathcal{F}$ на *прямую*, проходящую через начало координат и точку ($\mathbf{H}_1$), и располагается на ней непрерывно или дискретно между значениями $\min\limits_{x,\,y} \{h_1(x, y)\,\mathbf{H}_1\}$ и $\max\limits_{x,\,y} \{h_1(x, y)\,\mathbf{H}_1\}$. Геометрическое место объектов ранга 3 — такой же отрезок прямой, но проходящей уже через ($\mathbf{H}_1$) и ($\mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2$). Объект ранга 5 отображается внутрь параллелограмма с вершинами в точках ($\mathbf{H}_3$), ($\mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_3$), ($\mathbf{H}_2 + \mathbf{H}_3$) и ($\mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 + \mathbf{H}_3$).

Итак, если сцена содержит объекты ранга на выше 5, то в $\mathcal{F}$ имеются отдельные точки (ранг 1 плоских накрасок), отрезки и прямолинейные цепочки точек (ранги 2 и 3 трехмерных накрасок), совокупности точек, компактно расположенных в произвольно ориентированных плоскостях (сложно освещенные объекты ранга 4 и 5). При этом в $\mathcal{F}$ не найдется трехмерной области, соответствующей на Р одному району (она возможна лишь при наличии в сцене поверхности с плавно изменяющейся 3-окраской).

Попытаемся решить задачу различения районов, не прибегая к анализу описанных выше векторных свойств полей $\mathbf{F}_r$ (x, y). Найдем преобразования, формирующие код района как функцию векторов $\mathbf{H}_l$.

Пространственное направление отрезка прямой однозначно задается, например, тангенсами углов наклона его проекций на любые две координатные плоскости. Если в $\mathcal{F}$ выбрать координатные плоскости, пересекающиеся по оси F^3, и принять эту ось за начало отсчета углов, то необходимые для кодирования объектов (ранга 2 и 3) тангенсы численно выразятся как H_1^1/H_1^3 и H_1^2/H_1^3.

В качестве компонент преобразования Λ введем операции Λ^1, Λ^2, . . ., Λ^{n-1} над произвольным векторным полем $\mathbf{V}$ (x, y), где n — число компонент вектора $\mathbf{V}$: $\Lambda^1\mathbf{V}(x, y) = V^1(x, y)/V^n(x, y)$, $\Lambda^2\mathbf{V}(x, y) = V^2(x, y)/V^n(x, y)$, ..., $\Lambda^{n-1}\mathbf{V}(x, y) = V^{n-1}(x, y)/V^n(x, y)$. В случае $n = 3$ имеем Λ^1 и Λ^2, с помощью которых компоненты кода для объектов ранга 2 и 3 могут быть описаны через $\Lambda\mathbf{H}_1$. Для объектов ранга 2 искомые компоненты можно получить поточечным делением полей F^k (x, y) первого (P^1) и второго (P^2) каналов на поле F^n (x, y) третьего канала P^3, т. е. произвести операции $\Lambda\mathbf{F}$. Итак, отрезки в пространстве $\mathcal{F}$ проективным преобразованием Λ отображены в точки плоскости $\Lambda\mathcal{F}$

с осями $\Lambda^1 F$ и $\Lambda^2 F$, и код каждого r-го района имеет на этой плоскости координаты $\Lambda^1 H_{1r} = (\Lambda^1 S_1)\,\Lambda^1\Phi_r$ и $\Lambda^2 H_{1r} = (\Lambda^2 S_1)\cdot\Lambda^2\Phi_r$.

Однако для объектов ранга 3, описываемых уравнением $F^k(x, y) = H_1^k h_1(x, y) + H_2^k$, процедура ΛF не обеспечивает кодирования районов. Для приведения полей компонент 3-стимулов к виду, характерному для объектов ранга 2, необходимо уменьшить все значения $F^k(x, y)$ на величину H_2^k. Нужного результата можно добиться при помощи операции $\delta{:}\delta V^k(x, y) = 2V^k(x, y) - (2/\omega)\sum_{\xi=1}^{\omega} V^k(x_\xi, y_\xi)$, где ξ и ω имеют тот же смысл, что и для операции δ' (вообще же $\ln[\delta' V^k(x, y)] = \delta[\ln V^k(x, y)]$), а $k = 1, 2, \ldots, n$. Действительно, $\delta F^k(x, y) = H_1^k \delta h_1(x, y)$.

Ясно, что на полях $F^k(x, y)$ операция δ обеспечивает понижение нечетного ранга до ближайшего четного. Однако четный ранг она изменить не может. Нетрудно показать [1], что проективное преобразование Λ переводит поле, описываемое уравнением ранга $2l$ в поле ранга $2l - 1$. Отсюда понятно, что циклическое чередование преобразований δ и Λ может обеспечить кодирование района, занимаемого проекцией накраски ранга $2n - 1$, если, во-первых, система имеет n независимых цветовых каналов, во-вторых, в результате $(n - 1)$-кратного применения операции δ к каждому исходному (или рабочему) полю компонент в точках района не получается нулевых значений компоненты (k-стимула, где k последовательно уменьшается на единицу от n к 1). Следовательно, зрительная система трихромата, использующего указанную процедуру, могла бы различать накраски, ранг которых не выше 5.

Затронем, наконец, вопрос о связи задач различения объектов по их окраске и оценки цветности объектов. В колориметрии принято называть *цветностью* свойство, общее коллинеарным векторам цвета. По аналогии с колориметрической цветностью назовем ΛF — *цветностью n-стимула* и $\Lambda\Phi$ — *цветностью накраски*. При $n \to \infty$ колориметрическая цветность (в «n-цветной» колориметрии), ΛF и относительный спектральный состав стимула F^λ становятся эквивалентными характеристиками. Впрочем, для того, чтобы и при $n = 3$ цветности колориметрическая и 3-стимула коррелировали, в модификации преобразования Λ в качестве поля-делителя (вместо $F^n(x, y)$) можно использовать поле $(1/n)\sum_{k=1}^{n} F^k(x, y)$.

В естественных условиях поверхности, бликующие при освещении их точечным источником, наблюдаются повсеместно. Цвет-

[1] Теория многоканальных систем, решающих задачу различения районов,—тема отдельного исследования. Изложение ее уводит в сторону от поставленных здесь задач.

ность стимула в блике часто мало отличается от цветности его точечного освещения (т. е. от ΛS_p). Но формируемый трихроматической системой (двукомпонентный) код накраски ранга 2 и 3 равен $(\Lambda^1 S_p)\Lambda^1\Phi$, $(\Lambda^2 S_p)\Lambda^2\Phi$, а значит его величину при наличии блика на ней легко преобразовать в $\Lambda\Phi$ — оценку цветности накраски [1]. Таким образом, для сцен, описываемых уравнениями стимулов ранга не выше 3, отношение одноименных компонент кода бликующей накраски (вне района блика) и цветности блика на ней может служить оценкой цветности накраски. Иными словами, результаты этапа различения накрасок можно использовать для неполной (двухпараметрической) оценки 3-окрасок (для оценки цветностей накрасок).

Вполне вероятно, что в зрительной системе некоторых животных обработка сетчаточной картины могла бы ограничиваться этапом оценки цветностей, так как подобную процедуру осуществить гораздо проще (посредством меньшего числа шагов и требуемых типов операций), нежели процедуру оценки Ф. Кажется также целесообразным кодирование цветовых сигналов в координатах **цветность — светлота**, ибо вариант сетчаточной обработки с надежной оценкой цветности (и возможными ошибками по светлоте, исправляемыми на уровне интегративной деятельности мозга) лучше трехпараметрического кодирования окраски с независимыми ошибками по каждой из трех координат.

5.3. Безрефлексное приближение для уравнения стимула. Освещение любой точки предмета создается (порознь или совместно) лучами первичных источников света и рефлексами тел. Сама точка поверхности чаще всего рассеивает этот свет весьма неравномерно (и в пространстве, и по длине волны). Часть рассеянного точкой излучения и становится спектральным стимулом. Стимул, создаваемый освещенной поверхностью, можно представить суммой компонент различной природы: а) отраженного (диффузно и зеркально) света точечного источника p, б) рассеянных поверхностью лучей распределенного источника d, в) света отраженных рефлексов.

Рассмотрим картину взаимодействия света источника p с бликующей поверхностью. *Индикатрису рассеяния* поверхности при фиксированном угле μ падения лучей p представим суммой *диффузной* и *зеркальной компонент рассеяния*. При направлениях рассеяния E, далеких от направления зеркального отражения E_m, зависимость коэффициентов отражения от λ в индикатрисе станем аппроксимировать кривой отражения Φ^λ некоторой идеально рассеивающей поверхности. Эту часть индикатрисы и назовем *диф-*

[1] Для накрасок ранга 4 или 5 трихромат имеет возможность дать оценку величины отношения компонент цветности накраски, равной Φ^1/Φ^2, поскольку однокомпонентный код ее в этом случае равен $[(\Lambda^1 S_p - \Lambda^1 S_d)/(\Lambda^2 S_p - \Lambda^2 S_d)]\,\Phi^1/\Phi^2$, а сомножитель при Φ^1/Φ^2 можно найти по известным цветностям ΛS_p и ΛS_d источников обоих типов.

фузной компонентой рассеяния. Зеркальная компонента дополняет диффузную до индикатрисы.

Введем «кривую зеркального (поверхностного) отражения» Φ_m^λ (для идеального зеркала $\Phi_m^\lambda \equiv 1$) посредством соотношения $\Phi_m^\lambda = \boldsymbol{B}_m^\lambda \Omega_p / 2\pi$, где $\boldsymbol{B}_m^\lambda$ — максимум зеркальной компоненты $B_m^\lambda (E)$ в направлении E_m (т. е. $\boldsymbol{B}_m^\lambda = B_m^\lambda (E_m)$), а Ω_p — телесный угол, под которым из точки поверхности реально виден p. Потребовав от $B_m^\lambda (E)$ пропорциональную зависимость семейства ее кривых (поверхностного) отражения, получим такое описание $B_m^\lambda (E)$: $B_m^\lambda (E) = N\Phi_m^\lambda \ \alpha (E)$, где $N = 2\pi/\Omega_p$ (и потому $\alpha (E_m) = 1$).

При узком угле зрения системы всем точкам растра соответствует в сцене приблизительно одно и то же E. Но поскольку параметр α (характеризующий степень ослабления яркости зеркальной компоненты при угловом удалении E от E_m) меняется при изменении угла $\varkappa$ между E и E_m, а E_m различны при разных углах $\mu (x, y)$ (т. е. при изменениях параметра $\beta (x, y) = \cos \mu$), то $\alpha = \alpha (\varkappa (x, y), \ \beta (x, y))$. Конкретный вид этой зависимости нас интересовать не будет, поэтому в дальнейшем параметр α станем записывать как $\alpha (x, y)$.

При сделанных ограничениях вклад p в стимул равен $S_p^\lambda (N \cdot \Phi_m^\lambda \times \times \alpha (x, y) + \Phi^\lambda \beta (x, y))$. Поскольку вклад d в стимул равен $S_d^\lambda \Phi^\lambda \ \gamma (x, y)$ (см. (6)), то безрефлексное приближение для F^λ таково:

$$F^\lambda (x, y) \approx S_p^\lambda (N\Phi_m^\lambda \alpha (x, y) + \Phi^\lambda \beta (x, y)) + S_d^\lambda \gamma (x, y) \Phi^\lambda. \tag{9}$$

В области С, обозначая номером i районы диффузного отражения, а номером i' — районы бликов (границу которых характеризует скачок $B_m^\lambda (x, y)$), выпишем векторные приближения ранга 3 для уравнения (9)

$$\mathrm{F}_{i'}^k (x, y) = \mathrm{S}_p^k N \Phi_{mi}^k \alpha (x, y) + \Phi_i^k (\mathrm{S}_p^k \beta_{i'} + \mathrm{S}_d^k \gamma_{i'}), \tag{10}$$

$$\mathrm{F}_i^k (x, y) = (\mathrm{S}_p^k \beta (x, y) + \mathrm{S}_d^k \gamma_i) \Phi_i^k. \tag{11}$$

Параметры β и γ в (10) и γ в (11) в пределах района суть константы (в (11) $\alpha = 0$), так как изменения $\mathrm{H}_2^k (x, y)$ по сравнению с $\mathrm{H}_1^k h_1 (x, y)$ предполагаются малосущественными (что с хорошей точностью выполняется для районов блика и несколько хуже — для остальных мест световой области).

Заметим наконец, что с помощью Φ_m^k описывается лишь часть свойств зеркальной компоненты, определяемая данным углом μ. При этом важен тот факт, что при расположении источника p на достаточном удалении и малом по углу поле зрения все попавшие на Р зеркальные отражения произошли под равными углами μ (к нормали в точке).

5.4. Рефлексы в области тени. Роль параметра $h(x, y)$ в Т выполняет $\gamma(x, y)$. Поясним физический смысл этого параметра. Построим с центром в некоторой точке О поверхности симметрично относительно нормали к поверхности в этой точке полусферу диаметра Д. Центральную проекцию на эту полусферу всей картины, какая видна из т. О, спроектируем на плоскость основания полусферы последней проекции, которая соответствует различным типам источников освещения (p, d или рефлексам)[1]. Предметы, как они видны из т. О, частично заслоняют распределенный источник d. Если долю общей площади предметов в проекции на основание полусферы обозначить как $1-\gamma$, то освещенность, создаваемая d, составит γS_d^λ (величину γ для данного объекта — неба d или накраски — назовем его *апертурой*).

Если из расположенной в тени точки сцены О, проекция которой на Р имеет координаты x, y, видны L участков, каждый из которых характеризуется спектральной яркостью F_l^λ и апертурой γ_l, то освещенность точки О равна

$$S_d^\lambda \gamma(x, y) + \sum_{l=1}^{L(x, y)} \gamma_l(x, y) F_l^\lambda, \quad \left(\gamma + \sum^{L} \gamma_l = 1\right). \tag{12}$$

Вводя «условную среднюю окраску» Φ_σ^λ (которая создала бы в т. О суммарный рефлекс, равный фактическому, если бы ее имели все тела, видимые из т. О), определяемую соотношением $\Phi_\sigma^\lambda(x, y) = \sum_{l=1}^{L(x, y)} \gamma_l(x, y) F_l^\lambda / S_d^\lambda (1-\gamma(x, y))$, напишем, используя формулу (12), выражение для компонент зонального стимула $\mathbf{F}_j$ в j-м районе области Т

$$\mathrm{F}_j^k(x, y) = \mathrm{S}_d^k \Phi_j^k [\gamma(x, y) + (1-\gamma(x, y))\, \Phi_\sigma^k(x, y)]. \tag{13}$$

Второе слагаемое в (13) меняется при изменениях первого в среднем в $1/\Phi_\sigma^k$ раз медленнее. Например, при $\Phi_\sigma^k \approx 1/3$ (что характерно для многих реальных сцен, особенно при чисто диффузном освещении) в 3 раза медленнее. Будем поэтому полагать, что второе слагаемое в пределах района есть константа H_{2j}^k, равная $\gamma_{\sigma j} \Phi_{\sigma j}^k \Phi_j^k \mathrm{S}_d^k$. В результате получим уравнение ранга 3 для компоненты 3-стимула из j-го района области Т, которое с уравнениями (10) и (11) составит полный список исходных уравнений для модели НАТЮРМОРТ:

$$\mathrm{F}_j^k(x, y) = \mathrm{S}_d^k \Phi_j^k (\gamma(x, y) + \gamma_{\sigma j} \Phi_{\sigma j}^k). \tag{14}$$

[1] Например, диск солнца (p), имеющий на полусфере диаметр д, при изменениях угла μ меняет величину вклада в освещенность по закону $F_p^\lambda \cos \mu / N$, где F_p^λ — спектральная яркость p, а $N = 2(Д/д)^2$, или в введенных нами обозначениях $S_p^\lambda \beta$.

5.5. **Узнавание формы при диффузном освещении.** Хорошо освещенная поверхность яркой окраски, расположенная вблизи от некоторого тела, может дать существенный вклад в его освещение, а значит и заметным образом повлиять на цвет стимулов, производимых телом. Для разных точек тела (имеющих различные значения апертуры γ диффузного источника — неба), чем ближе апертура $\gamma_{\text{п}}$ такой поверхности к величине $1-\gamma$ (уменьшение апертуры неба компенсирует прирост апертуры поверхности), тем легче использовать цветовые искажения, вносимые поверхностью в картину рассеяния света телом, для оценки формы этого тела, так как в этом случае мы получаем еще одно уравнение $\gamma+\gamma_{\text{п}}\approx 1$. И такие ситуации нередки: рефлексы от окрашенной стены на близко стоящие к ней предметы, рефлексы от скатерти на столе, подцвечивающие тела на ней (сцена — натюрморт) и т. п. Во внутренней части двугранного угла, где состыкованы поверхности двух различных окрасок, локальные изменения вклада рефлексов в освещение также подчиняются (в первом приближении) описанной выше закономерности. Приняв во внимание распространенность подобных ситуаций и важность задачи узнавания формы, рассмотрим в качестве простейшего примера сцену, для которой сумма апертур неба и некоторой плоской поверхности в точности (а не приближенно) равна 1, и сформулируем для сцен, удовлетворяющих этому условию, алгоритм аппроксимации поля μ_d — поля угловых отклонений нормалей в точках лежащего на плоскости тела от нормали к плоскости.

В условиях чисто диффузного освещения стимулы, создаваемые выпуклым телом окраски Φ, лежащим на плоскости Ξ окраски Φ_{Ξ}, с учетом рефлексов первого порядка [1] описываются уравнением (13), в котором переменная $\Phi^k_\sigma(x, y)$ должна быть заменена на константу Φ^k_{Ξ}. Обозначив переменный сомножитель $\gamma(x, y)+[1-\gamma(x, y)]\cdot\Phi^k_{\Xi}$ через $\mathrm{T}^k(x, y)$, получим исходное уравнение для точек x, y проекции тела

$$\mathrm{F}^k(x, y)=\mathrm{S}^k_d\Phi^k\mathrm{T}^k(x, y). \qquad (15)$$

---

[1] *Порядок рефлекса* равен числу последовательных (диффузных) отражений света, добавляющих свой вклад в общее освещение. Отражениями более высоких порядков мы пренебрегли — их вклад в освещение незначителен. Например, для случая диффузно освещенного прямого двугранного угла с гранями окраски Φ^λ_1 и Φ^λ_2 вклад рефлексов t-го четного порядка в стимул вблизи ребра грани равен $(\Phi^\lambda_1\Phi^\lambda_2)^{t/2}\Phi^\lambda S^\lambda_d/2^{t+1}$, где Φ^λ — окраска оцениваемой грани. Легко подсчитать, что, пренебрегая рефлексами второго порядка для тел с альбедо, равным например 1/2, мы ошибаемся в оценке освещенности приблизительно на 5% — и это в случае не ослабевающего с расстоянием влияния. Для тел ограниченного размера доля рефлексов в освещении быстро убывает с расстоянием.

От нормали к Ξ (как от направления на «центр» полусферического d) будем отсчитывать углы[1] μ_d $(0 \leqslant \mu_d \leqslant \pi)$ до нормали в данной точке выпуклого тела. Нетрудно убедиться, что $\gamma(x, y)$ — апертура d — в этом случае равна $(1 + \cos\mu_d(x, y))/2$, а потому $\mathrm{T}^k(x, y) = (\cos\mu_d(x, y)(1 - \Phi_\Xi^k) + 1 + \Phi_\Xi^k)/2$. Преобразовав это выражение к виду $\cos\mu_d(x, y) = 1 - 2(1 - \mathrm{T}^k(x, y))/(1 - \Phi_\Xi^k)$, получим способ вычисления поля $\beta_d(x, y) = \cos\mu_d(x, y)$, обработка которого для определения формы видимой части тела ничем не отличается от обработки поля $\beta(x, y)$ на С (см. 4.5).

Положим для простоты известным вектор Φ_Ξ (есть способы оценить его величину, даже если плоскость Ξ не видна). Тогда останется лишь одна неизвестная переменная $\mathrm{T}^k(x, y)$. Оценку поля $\mathrm{T}^k(x, y)$ обеспечивает операция M над полем (15): $\widetilde{\mathrm{T}}^k(x, y) = M\mathrm{F}^k(x, y) = \mathrm{T}^k(x, y)/\mathrm{T}_0^k$ (если на Р видна точка тела, в которой $\mu_d = 0$, то $\mathrm{T}_0^1 = \mathrm{T}_0^2 = \mathrm{T}_0^3 = 1$). Проверить, правильно ли найдены Φ_Ξ^k и $\mathrm{T}^k(x, y)$, можно, воспользовавшись следующим свойством уравнения (15): $\Lambda(1 - \mathbf{T}(x, y)) = \Lambda(1 - \Phi_\Xi)$. Итак, алгоритм аппроксимации поля $\beta_d(x, y)$ таков:

$$\widetilde{\beta}_d(x, y) = 1 - (1 - M\mathrm{F}^k(x, y))\,(2/(1 - \Phi_\Xi^k)).$$

Оценив форму тела (см. 4.5), можно дополнительно проверить правильность оценки Φ_Ξ по стимулам $\mathbf{F}_1$ из горизонтального участка тела и $\mathbf{F}_2$ из вертикального участка. Должно выполняться условие $\Phi_\Xi^k = 2\mathrm{F}_2^k/\mathrm{F}_1^k$.

Знание фактов, касающихся особенностей распределения стимулов по полю, может помочь узнаванию и окраски, и формы поверхности. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда в поле зрения находится плоская матовая поверхность неизвестной окраски Φ^λ, имеющая полусферическую лунку и освещенная источником d неизвестного цвета. С хорошей точностью по области лунки $F_0^\lambda(x, y) \approx \mathrm{const} = S_d^\lambda\Phi^\lambda(1 + \Phi^\lambda)/2$. Но в плоской части поверхности $F_\Xi^\lambda = \mathrm{const} = S_d^\lambda\Phi^\lambda$, а значит $\Phi^\lambda = 2F_0^\lambda/F_\Xi^\lambda$. В этой формуле предписываемые операции над стимулами внутри и вне лунки аналогичны осуществляемым над компонентами 2-стимула, взятыми в приграничных точках соседних районов на шаге 4 (описанного в 4.4 алгоритма).

5.6. Окончательная постановка задачи и алгоритм ее решения. В сравнении с моделью ТОНИРОВАННЫЙ ГИПС модель НАТЮРМОРТ отличается более точным описанием условий освещения и характеристик рассеяния: добавлением константы $\mathbf{H}_{2r}$ в каждом районе r $(r = i', i, j)$, что позволяет включить в рассмотрение блики на С и постоянный вклад в стимулы r-го района: источников p и d на С $(r = i')$, источника d на небликующей части С $(r = i)$ и рефлексов от предметов в Т $(r = j)$. Пусть число каналов модели $n = 3$.

[1] Формула (15) малопригодна для точек тела, имеющих $\mu_d > 2\pi/3$.

При дневном освещении $N \sim 10^4—10^5$ и потому блики на гладких поверхностях намного ярче окружающих мест. Процедуру выделения на Р районов бликов в приводимом ниже алгоритме опускаем.

В алгоритме используются операции δ', M (см. 4.6), Λ и δ (см. 5.2). Кроме них понадобится операция $\Delta_{r,r-1}$, которая, будучи примененной к любой функции $V(x, y)$, полученной в канале при преобразованиях поля 3-стимулов, приписывает всем (кроме конечных) точкам любой $ГР$ значение V_r/V_{r-1}, где V_r и V_{r-1} взяты в местах, соседних с точкой (x, y) по обе стороны $ГР$ (осуществить $\Delta_{r,r-1}$ удобно с помощью предварительного применения операции δ').

Операция δ' всегда следует за δ и характеризуется тем, что она а) должна иметь «рецептивное поле» (из ω точек) в 5—10 раз большее по диаметру, чем для операции δ (чувствительность результата к искажениям — контрастированию сигналов — на $ГР$, вызванным δ, при этом уменьшается), б) может быть заменена в варианте алгоритма на операцию $\delta(\ln)$ (свойства так модифицированного алгоритма согласованы с законом Вебера — Фехнера). Правила заполнения участка района ненулевыми сигналами его окружения, если на участке $\delta h_1(x, y) = 0$, разбирать не будем, положив обязательным условие $\delta h_1(x, y) \neq 0$ всюду на Р. Этап аппроксимации поля $\beta_d(x, y)$ (см. 5.5) в алгоритм не включен. Наконец, операции, последовательно применяемые в данной точке (x, y) к исходному или рабочим (промежуточным) полям канала, будем указывать значками, приписываемыми справа налево по мере добавления новых операций (не ставя скобок).

Алгоритм[1]: Этап А. Различение накрасок и условий освещения.

1. Выделение $ГР$. $\delta'\Lambda\delta F^k(x, y) \neq 1$ на $ГР$, а внутри районов — $\delta'\Lambda\delta F^k(x, y) \equiv 1$ (так как перед этим при выполнении $\Lambda\delta\mathbf{F}(x, y)$ были получены по i' — $[\Lambda\Phi_{m_i}]\Lambda S_p$, по i — $[\Lambda\Phi_i]\Lambda S_p$, по j — $[\Lambda\Phi_j]\Lambda S_d$).

2. Выделение $ГТ$ и границ бликов — $ГБ$. Признак $ГТ$ — $\Delta_{i,j}\Lambda\delta\mathbf{F}(x, y) = \Lambda S_p/\Lambda S_d$ для всех участков $ГТ$ (сигнал на $ГБ$ $\Delta_{i,i'}\Lambda\delta\mathbf{F}(x, y) = \Lambda\Phi_i/\Lambda\Phi_{mi}$[2]).

3. Выделение участков $ГП$ по признаку $\Delta_{r,r-1}\delta F^k(x, y) \neq \neq \text{const}$ вдоль границы.

Этап Б. Оценка по бликам зеркальной компоненты рассеяния.

4. Отыскивание максимальных сигналов в каждом i'-ом районе блика. Формируется набор значений $\{F_{i'}^k(x_s, y_s)\}$.

5. Оценка Φ_{mi}: $\widetilde{\Phi}_{mi}^k = M\{F_{i'}^k(x_s, y_s)\} = M\Phi_{mi}^k$.

Этап В. Оценка цветности поверхностей.

---

[1] Руководствуясь преимуществами краткой формы записи шагов алгоритма, введем операцию «умножения» («деления») двух векторов, имеющую результатом вектор, каждая компонента которого суть произведение (частное) одноименных компонент исходных векторов.

[2] Для многих неметаллических поверхностей цветность блика близка к ΛS_p. Для них $\Delta_{i,i'}\Lambda\delta\,\mathbf{F}(x, y) \approx \Lambda\Phi_i$, и шаг 6 не нужен.

6. Оценка цветности диффузной компоненты рассеяния бликующих накрасок. $\Lambda\widetilde{\Phi}_i = \Delta_{i,i'}\Lambda\delta\mathbf{F}(x, y)]\Lambda\widetilde{\Phi}_{mi} = \Lambda\Phi_i/\Lambda [\max_i \{\Phi^k_{mi}\}]$.

7. Формирование полей значений $\Lambda\Phi_{m_i} [\Lambda S_p]$ и $\Lambda\Phi_i[\Lambda S_p]$ на С и $\Lambda\Phi_j [\Lambda S_p]$ на Т.

Произвести на С $\Lambda\delta\mathbf{F}(x, y)$. Произвести на Т $[\Delta_{i,j}\Lambda\delta\mathbf{F}_p(x, y)] \times [\Lambda\delta\mathbf{F}(x, y)]$.

8. Оценка $\Lambda\Phi$ и (новая) оценка $\Lambda\Phi_m$. Присвоить номер 0 району, имеющему $\Lambda^1\Phi_m = \Lambda^2\Phi_m = 1$, и, совершая обход растра по линии, нигде не пересекающей *ГП*, произвести над полем $\Lambda(\Phi_r S_p)$, полученном на шаге 7, операцию $\prod_{l=1}^{r} \Delta_{l,\, l-1}\Lambda(\Phi_r S_p)$.

В итоге $\Lambda\widetilde{\Phi}_r = \Lambda\Phi_r/\Lambda\Phi_{m0}$, где $\Lambda\Phi_{i'} = \Lambda\Phi_{mi}$.

Этап Г. Оценка альбедо поверхностей (и яркости источника p). Операции этого этапа тесно связаны с процедурой деления множества точек Р на подмножества Ц (цвета) и О (окраски). Отнесенные к Ц объекты — источники (и не имеющие собственной цветности блики) оцениваются зрительной системой колориметрически. С этой процедуры, проявляющейся (в психологических тестах) уже при простейшей двухстимульной пространственной организации зрительного поля, начинается, по-видимому, всякая зрительная обработка. Анализ 3-стимулов (по типу гистограммного, но с учетом связности одноцветных областей) на этапе Г может быть произведен с использованием операции, усредняющей в каждой точке Р сигналы цветных каналов и формирующей яркостную (интенсивность источника для Ц) или светлотную (альбедо поверхностей для О) координату более чем трехмерного многообразия цветовых ощущений трихромата (об иных аспектах этой проблемы см. в [13]).

Заключение. Априорное правило понимания смысла видимого, по нашему мнению, можно выразить так: «Начинать анализ любой сцены следует, исходя из предположения, что множество несовпадающих окрасок в сцене невелико и дискретно, одноокрашенные объекты протяженны, а освещение создается либо одним диффузным источником (таким, как небо), либо небом с добавлением одного точечного источника; все то в общей картине распределения цвета, что не удается объяснить одними лишь оговоренными обстоятельствами, следует относить за счет бликов или рефлексов». Этот тезис лежит в основании развитого здесь подхода к проблеме константного восприятия окраски. В условиях разумных ограничений, налагаемых на сложность сцен, три описанные модели иллюстрируют преимущества подобного эвристического подхода. Усложнение процедуры решения (от первой модели — к третьей) окупается возрастающими точностью и разнообразием производимых оценок. Так, например, в модели НАТЮРМОРТ допустимы три типа источников освещения: точечный и распределенный источники и доминирующий рефлекс. В той же модели индикатриса рассеяния может оцениваться шестью параметрами.

Для оговоренного вида сцен даны схемы зрительной обработки, не нуждающиеся в сведениях незрительной природы, в обучении и в обращении к памяти, к динамическим и бинокулярным методам узнавания формы тел и обнаружения бликов на них. При этом результаты цветовой обработки удается использовать для вычисления формы поверхностей. Исследование свойств и возможностей описанных алгоритмов на ЭВМ начинается только сейчас. Многое в этом направлении предстоит еще сделать. Однако постановка задачи в целом и предложенная методика решения имеющей самостоятельную ценность задачи различения объектов по их окраске уже теперь могут быть полезны для построения зрительных систем высокоорганизованных автоматов.

Результаты, полученные при моделировании процессов константного цвето- и формовосприятия, позволяют надеяться, что процедура осуществляемой животными (или человеком) обработки зрительной ситуации включает в себя решение таких задач, как 1) различение накрасок (задача инвариантного к освещенности кодирования объектов постоянной окраски), 2) оценка зеркальной компоненты рассеяния, 3) оценка цветности накрасок и источников света, 4) полная оценка отражательных свойств поверхностей. Традиционные представления о роли и месте константного цветовосприятия в процессах зрения, по-видимому, должны быть пересмотрены.

Литература

1. *Н. Д. Нюберг, М. М. Бонгард, П. П. Николаев.* О константности восприятия окраски.— Биофизика, 1971, т. 16, № 2.
2. *Н. Д. Нюберг, П. П. Николаев, М. М. Бонгард.* О константности восприятия окраски.— Биофизика, 1971, т. 16, № 6.
3. *М. С. Смирнов, М. М. Бонгард.* О контрастных цветах.— Биофизика, 1956, т. 1, № 2.
4. *В. В. Максимов, П. П. Николаев.* Цветовая оппонентность и константность цветовосприятия.— Биофизика, 1974, т. 19, № 1.
5. *И. С. Лосев, В. В. Максимов, П. П. Николаев.* Об узнавании окраски и объемной формы предметов.— Биофизика, 1975, т. 20, № 2.
6. *Р. Л. Грегори.* Глаз и мозг. М., «Прогресс», 1970.
7. *B. K. P. Horn.* Shape from shading: a method for finding the shape of a smooth opaque object from one view. MIT A. I. Project: MAC TR-79, Cambridge, 1970.
8. *Н. Д. Нюберг.* Особенности цветного зрения при оценке цветовоспроизведения на цветных изображениях.— Проблемы физиологической оптики, 1953, т. 8, № 128.
9. *X. Котт.* Приспособительная окраска животных. М., ИЛ, 1950.
10. *N. W. Daw.* Neurophysiology of color vision.— Physiol. Rev., 1973, v. 53, p. 571.
11. *А. Л. Ярбус.* Роль движений глаз в процессе зрения. М., «Наука», 1965.
12. *М. М. Бонгард, К. В. Голубцов.* О типах горизонтального взаимодействия, обеспечивающих нормальное видение перемещающихся по сетчатке изображений.— Биофизика, 1970, т. 15, с. 361.
13. *В. Е. Щадрин.* О размерности многообразия цветовых ощущений человека.— Сб. «Сенсорные системы». Л., «Наука», 1976.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
138	9 сн.	$\Gamma\Gamma$	ΓT
150	2 св.	$\Delta_{i,\ i'}$	$[\Delta_{i\ i'}$
150	5 св.	$\mathbf{F}_p$	$\mathbf{F}$
225	10 св.	xc	$x\overleftarrow{c}$
228	3 св.	ответ u	ответ y

Моделирование обучения и поведения