

Измайлов Ч.А. Глава 1. Проблема носителя зрительного языка: психофизические методы // *Психологический журнал* Международного университета природы, общества и человека «Дубна». – 2011. – № 3. <http://www.psyanima.ru>.

Глава 1. Проблема носителя зрительного языка: психофизические методы

Ч. А. Измайлов

1. Взаимоотношение носителя и языка в лингвистике и восприятии

Носителем языка в лингвистике называется физическая субстанция, с помощью которой осуществляется речь. В случае устной речи это механические колебания воздуха, которые производит наш голосовой аппарат, в случае письменной речи это следы краски на бумаге или следы мела на доске и т.д. В случае языка жестов это движения рук, пальцев, тела.

Основные положения, связанные с отношением между речевым языком и его носителем, были сформулированы швейцарским лингвистом Ф. де Соссюром (1857–1913) следующим образом:

- а) язык не может существовать без физического носителя,
- б) язык не зависит от его носителя.

Хотя эти положения сформулированы для речевого языка, можно утверждать, что они остаются справедливыми для всех языков вообще, в том числе и для языка зрительного восприятия. Но в последнем случае, они требуют определенной модификации, поскольку речевой язык осуществляется непосредственно на физическом носителе, тогда как язык восприятия, о котором пойдет речь в данной работе, использует два вида носителей: физический и нейрофизиологический.

Физическая природа носителя зрительного языка очевидна – это электромагнитное излучение. Основная проблема заключается в определении нейрофизиологического носителя. Аналогично физическому носителю, в качестве которого выступает не вообще электромагнитное излучение, а только излучение в диапазоне 400-700 нм, то, что называется световым потоком, причем только спектральный состав и интенсивность света, а не поляризация, например. Нейрофизиологическим носителем зрительного языка также служит не мозг вообще, а специфически организованная нервная сеть зрительной системы.

Главной характеристикой носителя речевого языка является его специфическая структура, на основе которой формируется базисный уровень языка, базисные единицы языка. В качестве базисного уровня может выступать как буквенный алфавит, так и слоговый или фонематический, или он может быть представлен в виде слов и жестов. Например, буквы латинского алфавита или кириллицы в основном состоят из пространственных комбинаций прямой линии и полукружности. Но можно сформировать такой алфавит только из прямых линий, заменив полукруг на угол из двух отрезков. В работе [15] было показано, что изменения начертания букв русского и латинского алфавитов по этому принципу не влияют на структуру конфигуративных различий между этими стимулами. Аналогичные данные приводит Ф. Эттингер, показывая, что предмет, в котором дуги, отмечающие принципиальные точки контура, заменены на прямые отрезки, не меняется по форме и распознается так же, как и обычный. То есть, даже для такого сложного языка как письменная речь, алфавит может быть сформирован из комбинаций такой элементарной физической структуры, как отрезок прямой линии. С другой стороны, этот же самый алфавит может быть сформирован на таком носителе, который нельзя свести только к одному элементу. Например, в азбуке Морзе. Таким образом, можно сделать вывод, что сложность

алфавита и сложность структуры носителя независимые, произвольные характеристики языка.

Необходимо отметить, что специфика нейрофизиологического носителя зрительного языка состоит не только в особой организации нервной сети, но и в том, как она связана со специфическими характеристиками физического носителя, то есть пространственного и временного распределения светового потока по сетчатке глаза. Специфической организацией физического носителя зрительного языка мы считаем традиционные характеристики зрительного стимула: спектральный состав света, интенсивность, и пространственные (или временные) границы между различными световыми потоками в поле зрения. Это не единственная спецификация проксимального стимула в концепциях зрительного восприятия, например, возможно его определение через интенсивность и спектральный состав световой точки с определенными координатами на сетчатке, но в контексте наших исследований предпочтительней линия (граница) вместо точки.

Первые две характеристики принимаются практически всеми исследователями. Я приведу некоторые аргументы, для обоснования ориентации линии, как границы между разными участками зрительного поля.

Еще в ранней работе Дж. Гибсона [22] приведены данные, показывающие поразительное сходство феноменологии восприятия цвета и восприятия линии. В работах Д. Хьюбела и Т. Визеля (см. [19]) приводятся данные о детекторах ориентации линии в зрительной коре высших позвоночных, число которых доминирует по сравнению с другими типами детекторов. В работах по машинному зрению [17; 23] именно линия представляет главный элемент алфавита программ по распознаванию трехмерной сцены по ее двумерной проекции.

В наших работах [7; 27] показано, что различение линий разной ориентации может быть представлено сферической моделью, в точности совпадающей по своей структуре со сферическими моделями различения спектрального состава и интенсивности света. Далее, в экспериментах по различению пространственной [32] и временной [6] границы между участками разной яркости в зрительном поле лягушки была показана идентичность этих механизмов. Была выдвинута гипотеза, что они обусловлены нейронами внутреннего плексиформного слоя сетчатки (главным образом ганглиозными клетками) аналогично механизму различения пространственной границы между участками разной яркости в сетчатке высших позвоночных [33; 34].

Нервные сети, детектирующие именно эти характеристики светового излучения (спектральный состав, интенсивность, и пространственная или временная граница между световыми потоками в поле зрения), составляют также специфику нейрофизиологического носителя. Вопрос заключается в том, одна ли и та же сеть детектирует эти физические характеристики света, или для каждой характеристики существует свой отдельный тип нервной сети. Иными словами, какое число элементов входит в состав нейрофизиологического носителя зрительного языка?

Ответ на такой вопрос для разных языков может быть получен только эмпирическим путем, для каждого конкретного языка отдельно. Такое эмпирическое исследование аналогично формированию человеком письменной формы речевого языка, когда он владеет только устной формой речи. Таким образом, известна феноменология языка: правильно построенные слова, предложения, рассказы, но неизвестны алфавит языка, правила грамматики и формы синтаксиса.

2. Геометрический подход к исследованию детекции основных характеристик проксимального стимула

В исследовании зрительного восприятия мы также можем опираться на зрительную феноменологию: «правильно» воспринятые простые и сложные зрительные стимулы для того, чтобы выяснить структуру и принципы организации зрительного языка.

Рассмотрим результаты исследования детекции зрительной системой выделенных выше трех характеристик проксимального стимула. Необходимо отметить, что материал исследований, на который мы опираемся в данной работе, получен в рамках нового подхода к исследованию зрительного восприятия, который мы назвали геометрическим подходом. Его суть заключается в следующих положениях.

1. Исходным экспериментальным материалом для анализа являются воспринимаемые надпороговые различия между стимулами. Эти данные должны быть организованы в виде матрицы попарных различий между всеми стимулами, используемыми в эксперименте по различению как на человеке, так и на животных.

2. Полученные исходные меры различий рассматриваются, как евклидовы расстояния между точками-стимулами в некотором ортогональном пространстве неизвестной размерности. Соответственно, предполагается, что эти меры удовлетворяют аксиомам евклидовой метрики.

3. Матрица попарных различий анализируется метрическим методом многомерного шкалирования с целью построения сферической модели различения стимулов при следующих условиях: а) минимальная размерность пространства определяется линейным соответствием между матрицей исходных оценок межстимульных различий и матрицей попарных межточечных расстояний в полученном пространстве, б) точки-стимулы располагаются в полученном n -мерном пространстве на поверхности $(n-1)$ -мерной сферы.

Критерием для первого условия служит коэффициент линейной корреляции Пирсона или «стресс» Крускала, а критерием второго – коэффициент вариации радиус-векторов всех точек-стимулов в полученном n -мерном пространстве

4. Сферические координаты точки-стимула полученного пространства различения рассматриваются как «субъективные» переменные, составляющие воспринимаемый стимул, а декартовы координаты полученного пространства рассматриваются, как нейрофизиологические характеристики нейронного механизма различения стимулов зрительной системой. Соответствие между координатами точек-стимулов и субъективными (или нейрофизиологическими) характеристиками определяется путем построения функций, определяющих зависимость этих характеристик от физических характеристик стимула и сравнения этих функций с аналогичными данными, полученными другими методами и другими исследователями.

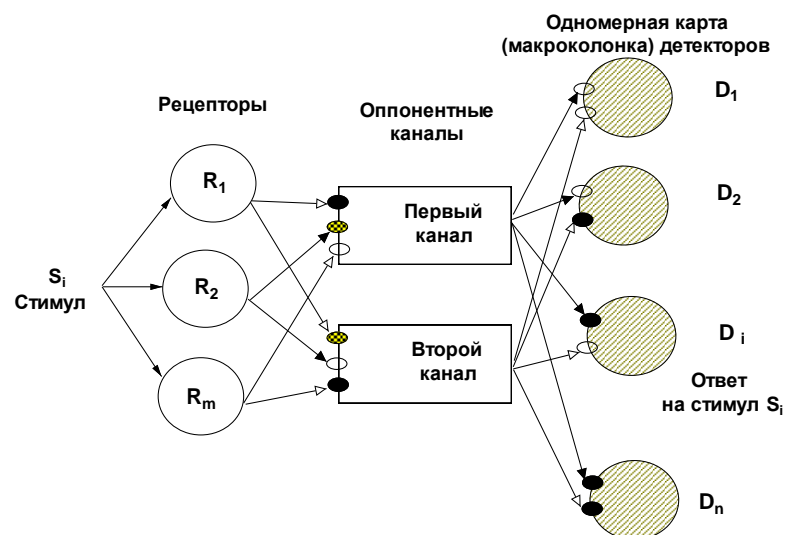
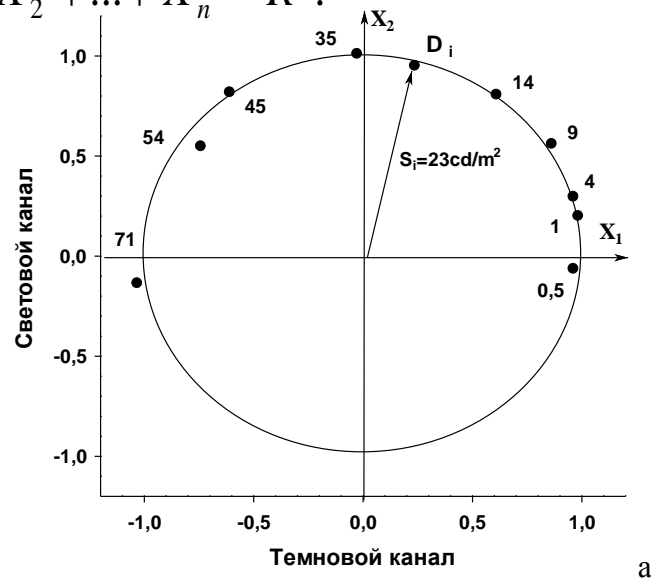
Все оригинальные эксперименты в этой работе проводились в рамках данного подхода, как на человеке, так и на животных. Поскольку сферическая модель детектирования стимулов используется в данной работе как общее математическое представление данных, рассмотрим вначале ее исходный вариант, разработанный Фоминым, Соколовым и Вайткявичусом [18].

3. Сферическая модель детектирования стимулов

В этой модели (рис. 1) каждая физическая характеристика интенсивности стимула задана в виде окружности в двумерном евклидовом пространстве. Каналы взаимосвязаны реципрокным отношением, так что когда один канал в этой сети увеличивает свою активацию при возрастании интенсивности света (ось X_1), то другой канал (ось X_2) соответственно уменьшает свою активацию, и, наоборот, при убывании интенсивности стимула первый канал уменьшает свою активность, а второй – увеличивает. При этом общая активность каналов, представленная величиной радиуса окружности, остается всегда постоянной. Математически такая структура выражается уравнением сферы:

(1)

$$X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2 = R^2.$$



б

Рис. 1. Иллюстрация сферической модели детекции интенсивности стимула Фомина, Соколова и Вайткявичуса [18], примененной к экспериментальным данным. а) Геометрическая модель двухканального модуля различения яркости сетчаткой лягушки, полученная по данным ψ -волны ЭРГ, зарегистрированной в ответ на мгновенную замену стимулов. Точки представляют детекторы кодирования яркости света в зрительной системе лягушки. Числа рядом с точками показывают яркость стимулов в $\text{кд}/\text{м}^2$. Воспринимаемая яркость кодируется сферической координатой точки (угол вектора против часовой стрелки). б) Нейронная сеть детекции яркости стимула построенная на основе данной модели. Световое излучение (стимул i) активирует фоторецепторы R , от которых один и тот же сигнал передается на входы двух оппонентных каналов. Главной особенностью этих каналов является их реципрокная взаимосвязанность (ур-ние 1). С выхода каналов сигнал поступает на входы каждого из детекторов D . Коэффициенты синаптической передачи детекторов индивидуальны, но для каждого детектора они также отвечают ур-нию 1. Благодаря этому устанавливается однозначная связь между стимулом и ответом, поскольку вектор выходного возбуждения двухканального модуля S_i максимально активирует только один из детекторов D_i , тот, у которого вектор синаптических коэффициентов D_i коллинеарен (с точностью до дифференциальной характеристики данной сети, которая определяется числом детекторов n) вектору возбуждения S_i .

Но в отличие от сферической модели Фомина, Соколова и Вайткявичуса [18], где для измерения различий между стимулами предлагается риманова метрика, наши данные показывают, что оценки воспринимаемых различий между стимулами с большей точностью описываются евклидовой метрикой:

$$(2) \quad d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^n (X_{ki} - X_{kj})^2$$

Таким образом, рассматриваемая в наших работах сферическая модель различения стимулов описывается системой уравнений (1) и (2). Сферичность полученного пространства оценивается по величине коэффициента вариации, который характеризует отклонение экспериментальных данных от уравнения сферы. Для полученной методом многомерного шкалирования конфигурации точек-стимулов в пространстве определяется геометрический центр. Теоретически эта центральная точка должна находиться на равном расстоянии от всех точек, представляющих стимулы. Поскольку экспериментальные данные содержат случайные ошибки, эти расстояния (радиусы) будут случайно варьировать, поэтому центр сферы определяется так, чтобы дисперсия радиусов была минимальной. Для решения используется итерационная процедура, которая минимизирует дисперсию радиальных расстояний, сдвигая точку центра. Минимальная дисперсия характеризует разброс радиальных расстояний всех точек, т.е. толщину сферического слоя, в котором располагаются экспериментальные точки. Нормированное выражение этого разброса (отношение стандартного отклонения радиус-векторов точек к среднему радиусу) есть коэффициент вариации [2; 8].

4. Детекция интенсивности света

Изменение интенсивности светового излучения воспринимается глазом человека как изменение от темноты к светлоте. Математическая модель зависимости светлоты от интенсивности света выражается логарифмической функцией [21]. Впервые эта модель (ур-ние 3) была предложена Г. Фехнером как универсальный психофизический закон для восприятия не только интенсивности света, но и для интенсивности разных модальностей. Закон Фехнера позднее нашел обоснование своей универсальности в свойствах рецепторов в разных сенсорных системах животных и человека, когда обнаружили, что электрический потенциал, характеризующий активность рецепторов в зависимости от интенсивности стимула, также выражается логарифмической функцией,

$$(3) \quad \Psi = a \lg L/b.$$

С другой стороны, субъективное шкалирование интенсивности стимулов разной модальности, проведенное С. Стивенсом и его сотрудниками [16], показало, что степенная функция (ур-ние 4) удовлетворяет кодированию интенсивности значительно большего числа стимулов,

$$(4) \quad \Psi_i = a L_i^k.$$

Рассмотренные выше модели детекции интенсивности света ориентируются в основном либо на данные пороговых измерений, либо на данные оценки величины надпорогового стимула. В геометрических терминах это означает, что шкала воспринимаемой интенсивности света одномерна. Наши данные, основываются на оценках межстимульных различий. В этом случае психофизическая функция определяется двумя

шкалами: «светлота-чернота» и «темнота» по Хиггелюнду [24] или двумерным евклидовым пространством, оси которого представляют два нейрофизиологических канала детекции интенсивности света: «светового» и «темнового».

На рис 2а показано двумерное сферическое пространство различения стимулов «диск-кольцо» только по яркости диска, полученное в работе [28], а на рисунке 2б, взятого из работы [4], показаны три психофизические функции, выведенные из этих данных для трех уровней яркости кольца.

$$(5) \quad \Psi = 2 \arcsin (\frac{1}{2} a \lg L/b)$$

Разница между приведенными выше моделями: логарифмической (ур-ние 3), степенной (ур-ние 4) и сферической (ур-ние 5), на основании которых строится линейная психофизическая функция кодирования яркости света, состоит в том, что в зрительной системе позвоночных существует два механизма кодирования [5; 6]. Один яркостный механизм кодирует стимульное воздействие мощностью разряда, он формирует информацию об абсолютном уровне яркости стимула. Его активность обусловлена в основном рецепторами и оп-клетками наружного плексиформного слоя сетчатки. Этот механизм силовой, энергетический, он реагирует в основном на появление нового стимула, когда сетчатка находится в состоянии адаптации к внешней освещенности. Поэтому его активность определяет оценку яркости в виде одномерной шкалы. Другой механизм основан на векторном коде воздействия стимулов, он формирует информацию о пространственной и временной дифференциации светового потока в поле зрения и связан в основном с оп- и off-клетками внутреннего плексиформного слоя сетчатки.

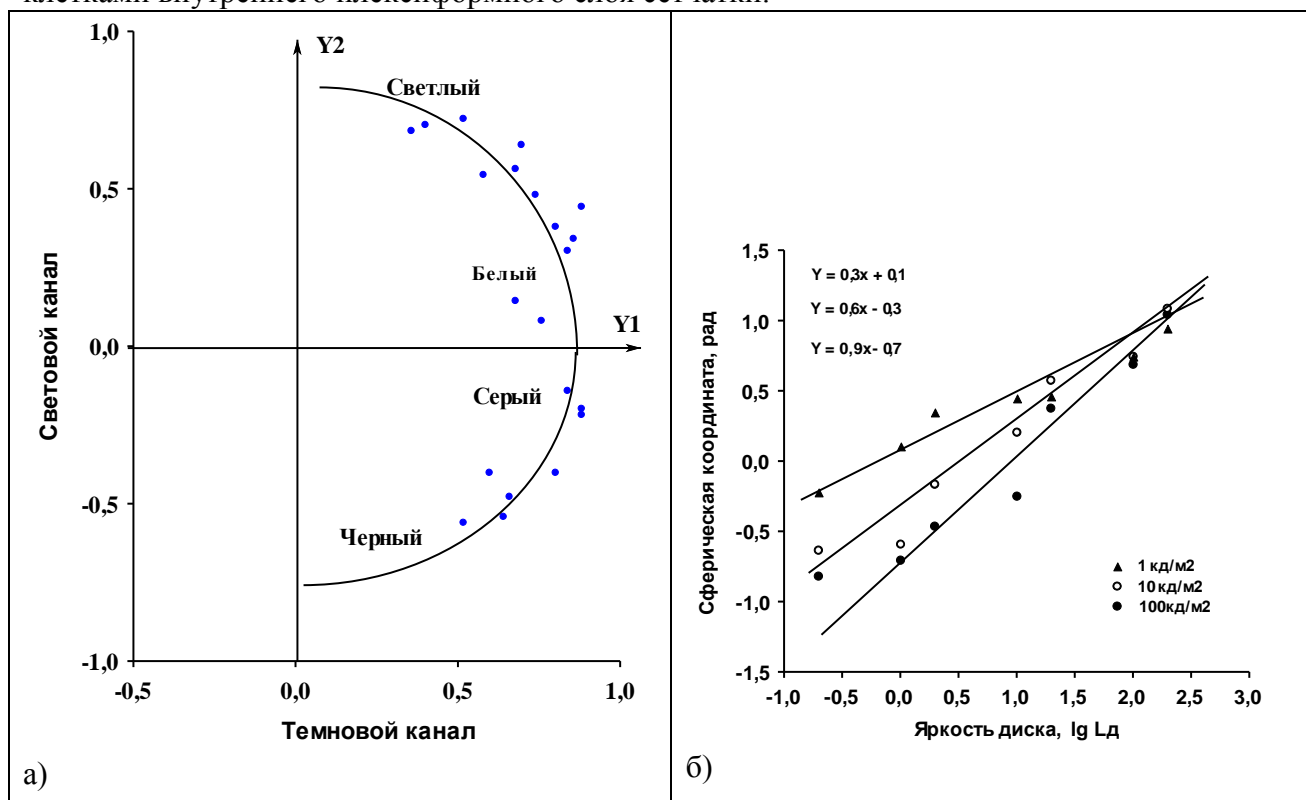


Рис. 2. Двумерное пространство ахроматических стимулов диск-кольцо, когда различение происходит в условиях одновременного яркостного контраста. а) Проекция 21 стимула (7 уровней яркости диска и три уровня яркости кольца) в форме диск-кольцо на плоскость Y_1Y_2 . Полуокружность, проведенная через точки, показывает сферичность полученной конфигурации точек-стимулов. Стимулы располагаются по круговой траектории в соответствии с воспринимаемой

яркостью внутреннего диска. Удостовериться в этом можно по графику психофизической функции светлоты (рис. 2б). По оси абсцисс отложен логарифм яркости внутреннего диска, а по оси ординат сферическая координата точки на плоскости Y_1Y_2 , характеризующая его светлоту. Точки, кружки и треугольники обозначают три уровня яркости окружающего кольца. Линейные графики характеризуют теоретически вычисленные функции светлоты.

5. Детекция спектрального состава светового излучения

Можно сказать, что первая модель различения световых излучений по спектральному составу впервые была разработана Исааком Ньютоном (т.н. цветовой круг Ньютона) в результате экспериментов по цветовому смещению (рис. 3). В этой модели цвета располагались на плоскости по круговой траектории так, что горизонтальный угол цветовой точки (сферическая координата) изменялся в монотонном соответствии с длиной волны монохроматического излучения и одновременно с этим менялся цветовой тон в соответствии с последовательностью цветов радуги.

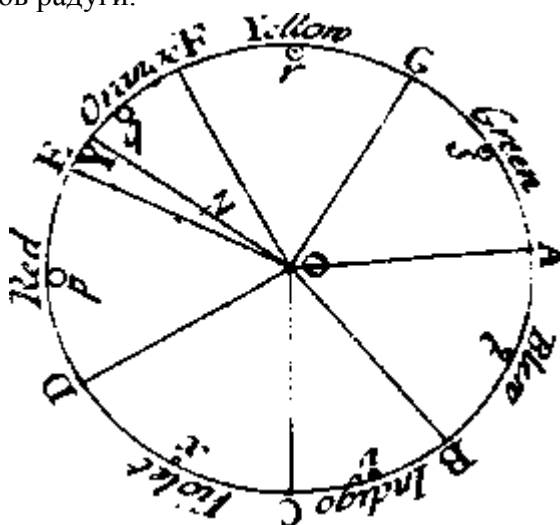


Рис. 3. Цветовая модель Ньютона

Эта модель была модифицирована в последующих работах разных авторов в виде цветового треугольника и получила свое первое нейрофизиологическое обоснование в работах Г. фон Гельмгольца [37]. Он предположил, что в основе цветового кодирования спектрального состава светового излучения лежит активность трех типов рецепторов сетчатки глаза, которые кодируют цветовой тон соотношением активностей, как трехмерным вектором. Базисный набор векторов соответствует максимальному вкладу каждого из трех рецепторов в данный цвет. Максимальный вклад рецептора определяется максимумом в функции его спектральной чувствительности. Эти функции определили на основе экспериментов со смещением цветов (Максвелл, 1856). В соответствии с тем, как человек воспринимает цвет монохроматического стимула с длиной волны, соответствующей этому максимуму, рецепторы обозначили как красный, зеленый и синий. Таким образом, цветовой круг Ньютона преобразовался в цветовой треугольник Максвелла (рис. 4).

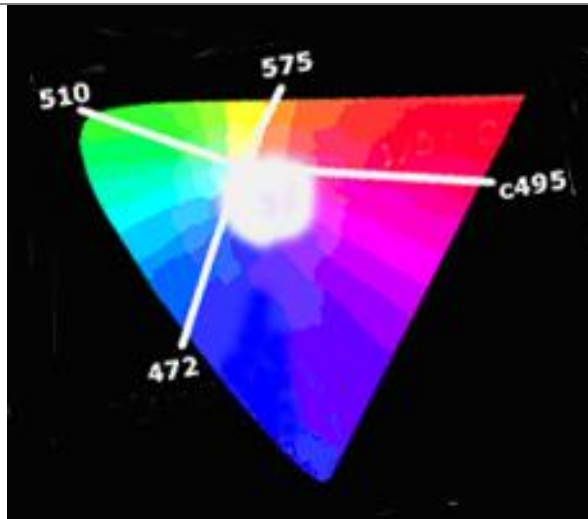


Рис. 4. Цветовой треугольник Максвелла, полученный из трехмерного векторного пространства цветового смешения как сечение этого пространства плоскостью.

Однако, поскольку траектория цветовых тонов на плоскости образует замкнутый контур, горизонтальный угол цветовой точки (сферическая координата) остается основной цветовой характеристикой стимула. Последующие исследования зрительной системы человека и животных показали, что основную роль в этом процессе играют не рецепторы, а т. н. «цветоопponentные» клетки зрительной системы. Понятие цветоопponentности, введенное в цветовые исследования Г. Герингом, означало, что в кодировании цвета участвуют не отдельные элементы нейронной сети, а их парные комбинации, которые находятся в антагонистическом отношении [36; 38]. В нейрофизиологии зрения они обозначены как r-g и b-y клетки, которые противоположным образом реагируют на один и тот же спектральный состав излучения. Так, r-g клетки, которые возбуждаются на излучение из длинноволновой части спектра, и тормозятся средневолновым излучением, представляют красно-зеленый цветоопponentный канал, а b-y клетки, которые возбуждаются на излучение из коротковолновой части спектра, и тормозятся средневолновым и длинноволновым излучением, представляют сине-желтый цветоопponentный канал. Харвич и Джемсон [25] показали, что в цветовом круге (рис. 5), который они получили методом констелляций, эти цветоопponentные каналы могут быть представлены декартовой системой координат на плоскости так, что центр круга совпадет с началом осей. Спектральные функции, характеризующие цветоопponentные каналы зрительной системы, приведены на рис. 6. Траектория монохроматических цветов на рис. 5, полученная в работе Харвича и Джемсон имеет форму промежуточную между цветовым кругом Ньютона и треугольником Максвелла.



Рис. 5. Пространство монохроматических цветов, полученное в работах Л. Харвича и Д. Джемсон [25], на основании измерения цветоопонентных функций человека методом констелляций. Цветовая траектория на этой плоскости уже существенно отличается по форме от цветового круга Ньютона, сжатием по сине-желтой оси. Т.е. цветовой круг становится похож на цветовой треугольник.

Для количественного выражения цветовых тонов стимулов, характеризующих излучения разного спектрального состава, Харвич и Джемсон использовали соотношение цветоопонентных функций, приведенных на рис. 6, которое они обозначили как тоновый коэффициент (рис. 7).

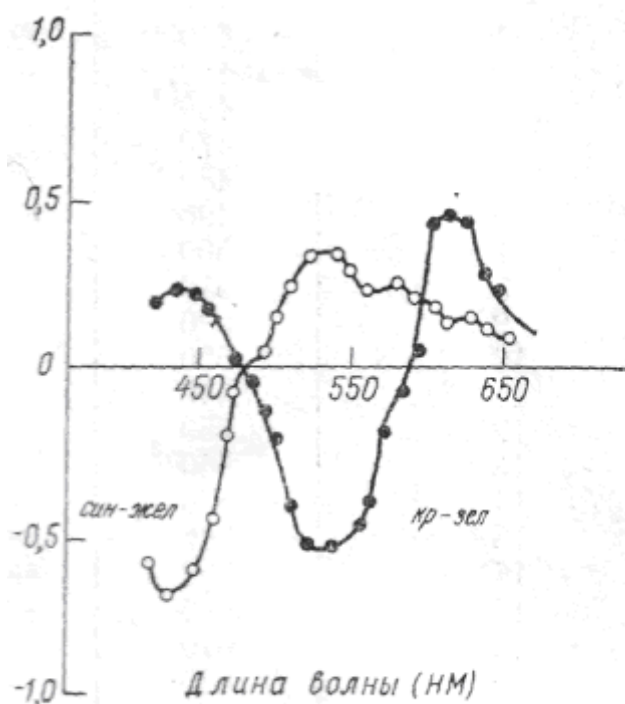


Рис. 6. График цветоопонентных функций, полученных в работе [25], представляет данные одного из испытуемых.

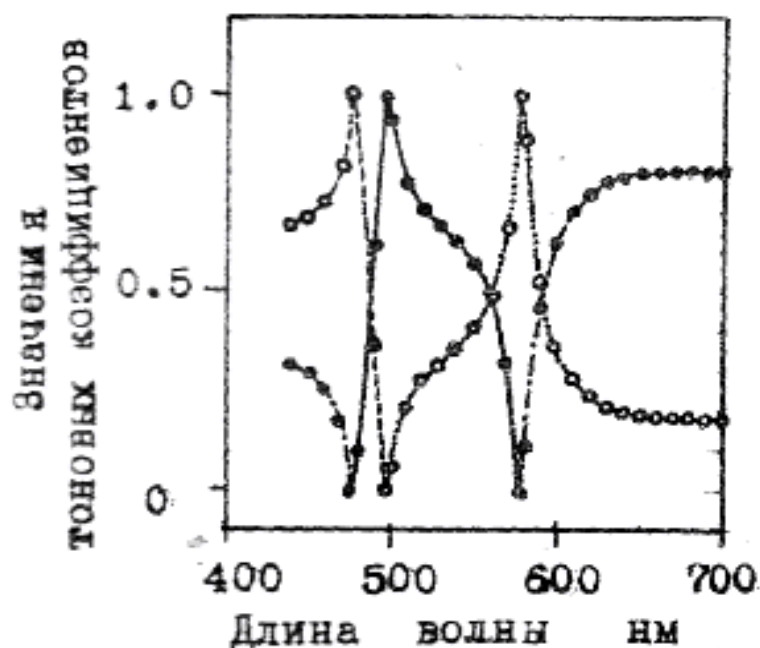


Рис. 7. График сине-желтого (кружки) и красно-зеленого (точки) коэффициентов цветового тона по данным Харвича и Джемсон [25].

В этой модели воспринимаемая яркость света рассматривалась как третье измерение, ортогональное плоскости цветового круга. Она кодировалась специализированными клетками с широкополосными характеристиками, которые охватывают весь спектральный диапазон светового излучения.

Такое трехмерное представление воспринимаемых цветов позволяло согласовать в единой модели самые разные аспекты цветового зрения. Вложенное в него трехмерное векторное пространство с косоугольной системой координат хорошо отображало законы смешения цветов, которые можно было объяснить активностью трех типов рецепторов сетчатки. Трехмерная цилиндрическая система координат в этом же пространстве хорошо описывала три субъективные характеристики цвета – тон, насыщенность и светлоту – как результат активности двух цветооппонентных каналов и одного яркостного.

Существенным недостатком этого трехмерного представления оказалась невозможность введения единой метрики для описания пороговых и сверхпороговых (больших) цветовых различий. В работах Мак Адама [32] и Джадда (см. [1]) было показано, что цветоразличение неаддитивно, т.е. сумма различий между тремя цветами-точками, лежащими на одной прямой в цветовом пространстве всегда больше, чем различие между крайними точками-цветами.

Наши исследования цветоразличения равноярких цветов методом многомерного шкалирования матрицы попарных сверхпороговых различий [2; 8] позволили решить эту проблему, рассматривая цветовой круг Ньютона, как сферическую поверхность в трехмерном евклидовом пространстве. Проекция сферической поверхности на горизонтальную плоскость (рис. 8) показывает, что траектория монохроматических цветов на плоскости декартовых координат также отличается по форме от цветового круга Ньютона сжатием по сине-желтой оси. Полярная координата цвета на этой плоскости, так же как и в работе Харвич и Джемсон, характеризует цветовой тон, а две декартовы координаты представляют два цветооппонентных канала, детектирующие спектральный состав излучения (рис. 8).

Третья декартова координата в этом пространстве представляет вклад ахроматической системы в кодирование светового излучения в дополнение к традиционному каналу, детектирующему интенсивность света [3]. Это положение основывалось с одной стороны на работе Шепарда и Кэрролла [35], которые показали, что евклидово пространство равноярких цветов, в котором выполняется условие линейной связи между цветовыми различиями и межточечными расстояниями, будет трехмерным, а не двумерным, как это представлено в цветовом круге Ньютона.



Рис. 8. Проекция сферической поверхности на плоскость монохроматических цветов, полученная на основании измерения сверхпороговых различий методом многомерного шкалирования [26]. Цветовая траектория на этой плоскости также отличается по форме от цветового круга Ньютона, как и на евклидовой плоскости, показанной на рис. 5.

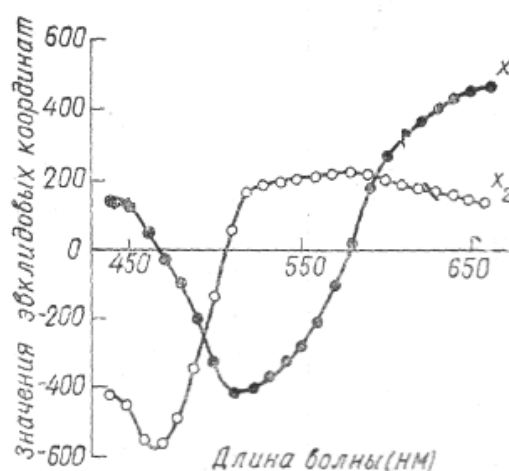


Рис. 9. График цветоопонетных функций, полученных в работе Измайлова и Соколова [8].

С другой стороны, в работе Хиггелюнда [24] было показано, что различия ахроматических стимулов лучше описывается двумерной геометрической моделью, чем одномерной. Согласование данных Шепарда и Кэрролла, Хиггелюнда, и наших привело к разработке новой геометрической модели различения световых излучений в виде гиперсферы в четырехмерном евклидовом пространстве. В этой модели цветового зрения детектирование световых стимулов по спектральному составу (хроматическая составляющая

светового стимула), так и по интенсивности (ахроматическая составляющая светового стимула) [13; 28] представлено в виде двумерных подпространств общего четырехмерного пространства в соответствии со сферической моделью детектирования стимулов в зрительной системе Фомина, Соколова и Вайткявичуса [18].

Таким образом, сферическая модель различения служит единой формой представления как для яркости света, так и для его спектрального состава. Декартовые оси координат (рис. 9) отображают два оппонентных канала нейрофизиологической сети, а сферическая координата – воспринимаемый цветовой тон стимула (рис. 10).

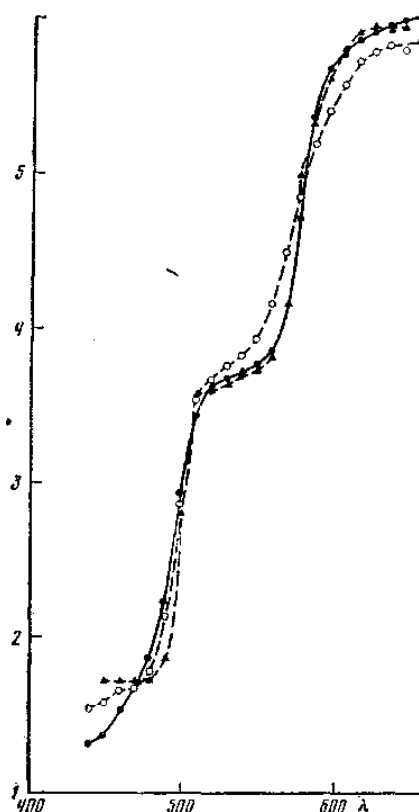


Рис. 10. Функции цветового тона в сферической модели цветоразличения. По оси абсцисс отложена длина волны цвета (нм); а по оси ординат — горизонтальный угол на сфере (рад), отсчитываемый от положительной полуоси X_1 по часовой стрелке: черными кружками, светлыми кружками и треугольниками обозначены траектории монохроматических цветов соответственно для стимулов яркостью 100, 1000 троландов, и после адаптации к белому свету; шаг между точками в каждой траектории равен 10 нм.

6. Сферическая модель различения границы в зрительном поле

Пространственная природа зрения, обусловленная расположением фоторецепторов сетчатки в виде двумерной поверхности, обуславливает включение в список базисных физических характеристик проксимального стимула не только тех, которые связаны с электромагнитным излучением, но и тех, которые выражают эту пространственность. Некоторые авторы рассматривают в качестве такой характеристики непосредственно пространственные координаты световой точки на сетчатке. Другие – пространственные частоты, представленные двумерными решетками, составленными из полос разной частоты, яркости и цвета. В данной работе используется граница между двумя участками зрительного поля, отличающимися по интенсивности или спектральному составу. Зрительным стимулом, отражающим границу, может служить отрезок линии по разному ориентированный в

зрительном поле. Феноменология восприятия линии во многом пересекается с феноменологией цветового восприятия [22].

Рассмотрим теперь данные, полученные в результате многомерного шкалирования оценок надпороговых различий между линиями одинаковыми по яркости и цвету, и меняющихся только по ориентации в зрительном поле [7; 27]. Эксперименты с линиями проводились по той же методике, что и с цветами и яркостями. На экране монитора испытуемому предъявляли одновременно две линии, одинаковой длины, светлые на темном фоне, по разному ориентированные во фронтальной плоскости зрительного поля. Испытуемый смотрел на стимулы в свободной позе бинокулярно. Длительность предъявления пары стимулов была 0,5 с., а интервал между парами – 1,5 с. Испытуемый оценивал воспринимаемое различие между стимулами в баллах от 1 (минимальное различие) до 9 (максимальное различие). Оценки нужно было делать как можно быстрее, не задумываясь, по первому впечатлению. В одном эксперименте [27] использовали 18 стимулов в диапазоне от 0 до 160 градусов по отношению к горизонтали, а в другом – 10 стимулов в диапазоне от 0 до 162 градусов. Матрицы попарных различий, усредненных по предъявлениям и испытуемым обрабатывали одним и тем же методом метрического многомерного шкалирования.

На рис 11а показаны конфигурации точек-стимулов в двумерном евклидовом пространстве, полученные в экспериментах с разными наборами стимулов-линий, а в таблице 1 приведены данные, показывающие степень соответствия полученных конфигураций сферической модели различения стимулов.

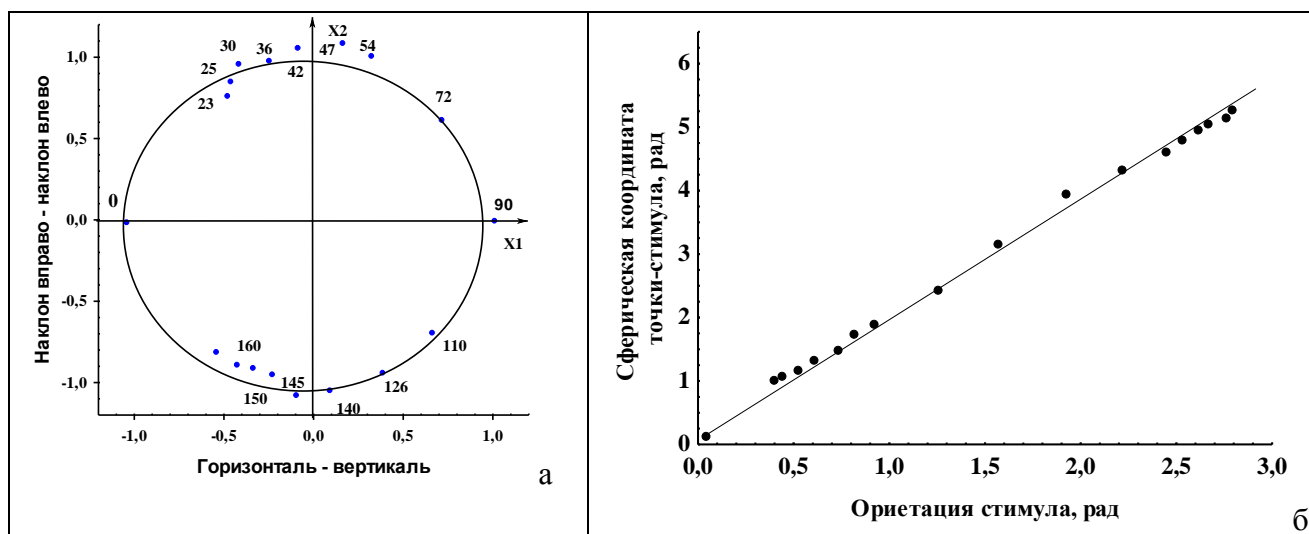


Рис. 11. а) Положение 18 точек, репрезентирующих линейные стимулы на двумерной плоскости X_1X_2 . Окружность, проведенная через точки, показывает сферичность полученной конфигурации точек-стимулов. Числа рядом с точками обозначают угол наклона стимула-линии к горизонтали в зрительном поле. Психофизическая функция ориентации приведена на рис. 11б. По оси абсцисс здесь отложено отношение угла наклона линии, а по оси ординат сферическая координата точки на плоскости X_1X_2 , характеризующая воспринимаемую ориентацию стимула.

В соответствии со сферической моделью детектируемая ориентация представлена сферической координатой точки-стимула в данном пространстве. Это демонстрирует приведенный на рис. 11б график психофизической функции ориентации. Две декартовы оси характеризуют два оппонентных канала: вертикаль-горизонталь (X_1) и остроугольность-тупоугольность (X_2) [7; 12; 20].

На рис 12а,б эти же данные приведены совместно с данными другого эксперимента [7].

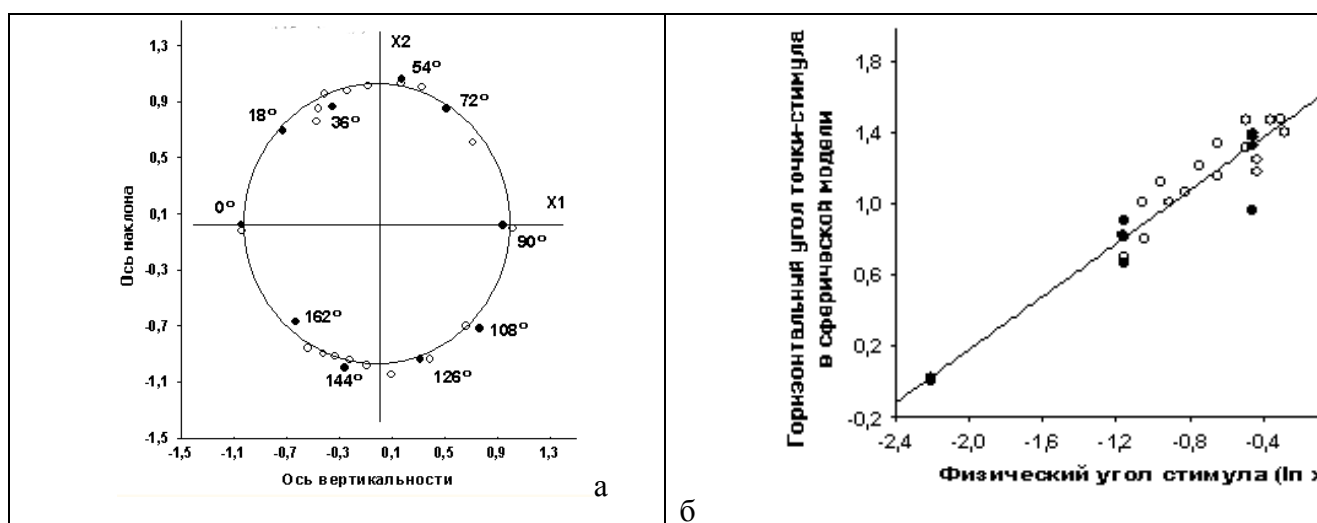


Рис. 12. а. Двумерное пространство ориентации линий, построенное для 18 стимулов (темные кружки) и для 10 стимулов в [7]. Около каждой точки на графике приводится значение угла наклона стимула по отношению к линии горизонта. Оси координат представляют два канала нейронной сети, детектирующей ориентацию во фронтальной плоскости зрительного поля. Горизонтальный угол каждой точки (по часовой стрелке от отрицательного направления оси X_1) характеризует субъективную величину ориентации. (б). График психофизической функции ориентации линий построенный по тем же данным, что и на рис. 11а. По оси абсцисс отложены значения физического угла ориентации линии в радианах (логарифмическая шкала), а по оси ординат – субъективного угла, измеренного как горизонтальный угол точки на рис. 12а. в логарифмах радиана. Величины углов измерялись в пределах одного квадранта по данным рис. 12а.

Формальные показатели размерности и сферичности моделей различения трех характеристик проксимального стимула (интенсивность и спектральный состав света, и граница между участками зрительного поля), в таблице 1, позволяют оценить, насколько полученные данные согласованы между собой по отношению к единой сферической модели различения стимулов, предполагаемых в качестве физического носителя зрительного языка.

Таблица 1.

Показатели, характеризующие пространственную модель различения для трех характеристик проксимального стимула, по данным субъективных оценок из разных экспериментов

	Интенсивность	Спектральный состав	Ориентация линий
Число стимулов	21	9-23	10-18
Стресс	0,03-0,05	0,01-0,08	0,03-0,05
Кoeff. корреляции	0,973-0,978	0,941-0,994	0,933-0,973
Кoeff. вариации, %	9,6-10,1	7,11-10,6	4,2-5,3

Итак, все три характеристики проксимального стимула (интенсивность света, спектральный состав, и граница между участками зрительного поля) могут быть представлены единой сферической моделью в двумерном евклидовом пространстве, координаты которого одинаковым образом представляют двухканальный нейрофизиологический модуль, который может рассматриваться как нейрофизиологический

носитель зрительного языка. В следующей главе мы приведем данные, нейрофизиологических экспериментов, обосновывающие этот вывод.

Литература:

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике // М.: Изд. Мир. 1978.
2. Измайлов Ч.А. Сферическая модель цветоразличения. М.: Изд-во МГУ, 1980.
3. Измайлов Ч.А. Многомерное шкалирование ахроматической составляющей цвета // Нормативные и дескриптивные модели принятия решений. М., 1981. С. 98–110.
4. Измайлов Ч.А. Геометрическая модель различения пигментных цветов. // Сенсорные системы. 2010. Т. 24. № 1. С. 27-40.
5. Измайлов Ч.А., Зимачев М.М. Детекция бимодальных стимулов в сетчатке лягушки // Журн. ВНД им. И.П. Павлова. 2007. 57(1). С. 105–120.
6. Измайлов Ч.А., Зимачев М.М. Различение интенсивности света сетчаткой лягушки в условиях темновой и световой адаптации // Журн. ВНД им. И.П. Павлова. 2010. Т. 60. № 5, 615-631.
7. Измайлов Ч.А., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н., Чудина Ю.А. Геометрическая модель различения ориентаций линии, основанная на субъективных оценках и зрительных вызванных потенциалах // Физиология ВНД. 2004. Т. 54 (2). С. 237-249.
8. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н. Метрические характеристики сферической модели цветоразличения // Вестн. МГУ. Сер. 14. Психология. 1978. № 2. С. 47—61.
9. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. Изд-во МГУ, 1989.
10. Измайлов Ч.А., Шехтер Е.Д., Зимачев М.М. Сознание и его отношение к мозговым информационным процессам // Вестн. МГУ. Серия 14. Психология. 2001. № 1. С. 34-50.
11. Измайлов Ч.А., Черноризов А.М. Язык восприятия и мозг // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2005. Т. 2. С. 22-52.
12. Максимова Е.М. Последние достижения в области восстановления зрения при сетчаточной недостаточности у млекопитающих // Сенсорные системы. 2010. Т. 24 (3). С. 188-197.
13. Соколов Е.Н., Измайлов Ч.А. Цветовое зрение // М.: Изд-во МГУ. 1984.
14. Соколов Е.Н., Измайлов Ч.А. Трехстадийная модель цветового зрения // Сенсорные системы. 1988. Т. 2 (4). С. 400-407.
15. Соколов Е.Н., Измайлов Ч.А., Завгородняя В.Л. Многомерное шкалирование знаковых конфигураций // Вопросы психологии. 1985. № 1. С. 131–140.
16. Стивенс С.С. Математика, измерения и психофизика // Экспериментальная психология. Т. 1. Под ред. С.С. Стивенса. М., 1960.
17. Уолд Д. Интерпретация контурных рисунков, изображающих сцены с тенями // Психология машинного зрения / Под ред. П.П. Уинстона. М.: Мир, 1978. С. 30-111.
18. Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. Искусственные органы чувств. М.: Наука, 1979.
19. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир. 1990.
20. Шелепин Ю. Е. Фильтрационные свойства рецептивных полей нейронов зрительной коры // Доклады АН СССР. 1981. Т. 261 (6). С. 1506–1509.
21. Шиффман Х.Р. Ощущение и восприятие. (5-е изд.) СПб.: Питер. 2003.
22. Gibson J.J. An Ecological Approach to Visual Perception. Boston: Houghton Mifflin. 1979.
23. Guzman A. Decomposition of a visual scene into three-dimensional bodies // Automatic interpretation and classification of images / Ed. A. Grasselli. N.Y.: Acad. Press, 1969. 161-180.

24. Heggelund P. Achromatic color vision. I. Perceptive variables of achromatic colors. *Vision Research*. 1974. V. 14. P. 1071-1079
25. Hurvich L.M., Jameson D. An opponent-process theory of color vision // *Psychological Review*. 1957. V. 64. P. 384-404.
26. Izmailov Ch.A. Uniform color space and multidimensional scaling (MDS). // H.G. Geissler and F. Petsold (Eds.). *Psychophysical Judgment and the Process of Perception*. Berlin: VEB Deutcher Verlag der Wissenschaften. 1982. P. 52-62.
27. Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Multidimensional scaling of lines and angles discrimination // *Psychophysical Explorations of Mental Structures*. H.G. Geissler (ed.). Toronto, Bern, Stuttgart: Hogrefe and Huber Publishers. 1990. P. 181–189.
28. Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Spherical model of color and brightness discrimination // *Psychol. Sci*. 1991. V. 2. P. 249–259.
29. Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. A semantic space of color names // *Psychol. Sci*. 1992. V. 3. P. 105–111.
30. Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Subjective and objective scaling of large color differences // *Psychophysics beyond sensation* / Ed. by Ch. Kaernbach, E. Schroger, H. Muller. Mahwah, NJ, 2004. P. 27–43.
31. Izmailov Ch.A., Zimachev M.M. Detection of bimodal stimuli in the frog retina // *Neurosci. Behav. Physiol*. 2008. V. 38. P. 103-114.
32. MacAdam D.L. Nonlinear relations of psychometric scale values to chromaticity differences // *J. Opt. Soc. Amer*. 1963. V. 53. P. 754.
33. Maffei L., Fiorentini A., Bisti S., Hollander H. Pattern ERG in the monkey after section of the optic nerve // *Exp. Brain Res*. 1985. V. 59. P. 423–430.
34. Maffei L., Fiorentini A. Pattern visual evoked potentials and electroretinograms in man and animals // *Visual Evoked Potentials*. Ed. J.E. Desmedt. N. Y.: Elsevier Sci. Publ., 1990. P. 25–33.
35. Shepard R.N., Carroll J.D. Parametric representation of nonlinear data structures. // *Multivariate Analysis*. Ed. Krishnaian. N.Y.: Acad. Press. 1966.
36. Tomita T. Microelectrode study of the physiology of neurons in the fish retina // *Vision in fishes. New approaches in research*. N.Y.-Lond. 1975. P. 69-79.
37. Wyszecki G., Stiles W.S. *Color science: concepts and methods, qualitative data and formulae*. 2nd ed. N.Y. Wiley, 1982.
38. Zeki S.M. The representation of colours in the cerebral cortex // *Nature*. 1980. V. 284. P. 412-422.

Поступила в редакцию: 10.07.2011 г.

Сведения об авторе

Ч.А. Измайлов (26 марта 1944, Дербент — 28 сентября 2011, Москва) — психофизик и психофизиолог, заслуженный профессор МГУ им. М.В. Ломоносова.