
ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ФОРМЫ И ЦВЕТА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ю.А. Чудина

Лаборатория физических методов коррекции нейрокогнитивных процессов
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, Россия, 123182

Д.А. Шляхта

Кафедра социальной и дифференциальной психологии
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В работе описаны результаты экспериментального исследования зрительного восприятия изображений разной формы и цвета. Целью эксперимента было определение набора зрительных модулей, участвующих в различении комплексных признаков изображения. Достижение поставленной цели обеспечивалось построением сферической модели стимулов и интерпретацией ее формальных и содержательных характеристик в рамках векторного подхода. Установлено, что различение таких стимулов осуществляется специфической комбинацией конфигуративных и энергетических двухканальных модулей, моделью которой является многомерная сфера.

Ключевые слова: многомерное шкалирование, субъективные оценки попарных различий, надпороговые различия, двухканальный сенсорный модуль, сферическая модель различения стимулов, сферическая модель цветоразличения, зрительное восприятие цвета и формы.

Согласно модулярной концепции зрительной системы [1; 2], предложенной в рамках векторного подхода [4], было показано, что восприятие зрительных сигналов осуществляется с помощью типичных конфигуративных и энергетических сенсорных модулей [1; 6]. Энергетические модули реагируют на изменения интенсивности светового потока и спектрального состава излучения, а конфигуративные модули активируются в ответ на временную и пространственную динамику отношений освещенности разных участков поля зрения [1]. Среди энергетических модулей различают хроматический и ахроматический, а среди конфигуративных — модуль ориентации и величины угла.

На основе психофизических, электроэнцефалографических и нейрофизиологических данных [6] было показано, что моделью и энергетических, и конфигуративных двухканальных модулей является универсальное двумерное сферическое пространство [1]. В этом пространстве стимулы представлены в виде двумерных равнодлинных векторов, направленность которых определяется динамикой субъективной характеристики стимулов [4]. Субъективная характеристика является тем признаком, на основе которого изображение специфицируется как адекватное для анализа тем или иным двухканальным модулем. Активация энергетических модулей позволяет «увидеть» изображение как имеющее определенный цветовой тон и яркость, а при активации конфигуративных модулей стимул воспринимается как имеющий некоторую ориентацию и величину угла.

В случае различения комплексных стимулов, воспринимаемых как набор различных субъективных характеристик, происходит взаимодействие двухканальных модулей [2; 5]. Моделью результата их взаимодействия является многомерное сферическое пространство, в котором двухканальные модули представлены в виде двумерных подпространств.

Настоящий эксперимент направлен на исследование взаимодействия двухканальных модулей и построение его сферической модели. Для решения этой задачи использовали комплексные стимулы, представляющие сочетания таких видимых характеристик, как цвет, яркость, ориентация, величина угла и форма изображения. Исследование проводили в рамках векторного подхода, полученные результаты интерпретировали в терминах сферической модели различения стимулов [4] и модулярной концепции устройства зрительной системы [1; 2].

В качестве стимулов использовали фигуры разной формы: линии, углы и кресты, которые отличались цветом, яркостью, ориентацией и величиной угла (для углов и крестов) между образующими их линиями. Набор стимулов составляли 30 изображений, среди которых были представлены по 10 изображений каждой формы (табл. 1).

Характеристики комплексных стимулов

Таблица 1

№ стимула	Физические характеристики стимула						
	форма	Величина угла, град.	цветовые координаты		длина волны, нм	яркость, кд/м ²	ориентация, угол наклона, град.
			X	Y			
1	Линия	—	406	476	570	40	0
2	Линия	—	333	346	—	45	0
3	Линия	—	557	331	610	12	30
4	Линия	—	333	346	—	45	30
5	Линия	—	166	174	480	9	60
6	Линия	—	406	476	570	40	60
7	Линия	—	557	331	610	12	90
8	Линия	—	313	548	560	30	90
9	Линия	—	166	174	480	9	120
10	Линия	—	313	548	560	30	120
11	Крест	10	166	174	480	9	0
12	Крест	10	313	548	560	30	0
13	Крест	20	166	174	480	9	65
14	Крест	20	333	346	—	45	65
15	Крест	42	557	331	610	12	15
16	Крест	42	406	476	570	40	15
17	Крест	60	406	476	570	40	105
18	Крест	60	333	346	—	45	105
19	Крест	90	557	331	610	12	0
20	Крест	90	313	548	560	30	0
21	Угол	20	166	174	480	9	0
22	Угол	20	557	331	610	12	0
23	Угол	45	313	548	560	30	110
24	Угол	45	333	346	—	45	110
25	Угол	90	166	174	480	9	0
26	Угол	90	406	476	570	40	0
27	Угол	120	557	331	610	12	300
28	Угол	120	333	346	—	45	300
29	Угол	150	313	548	560	30	330
30	Угол	150	406	476	570	40	330

Ориентация углов изменялась в пределах от 0 до 330°, а ориентация линий и крестов варьировалась от 0 до 120°. Угол наклона крестов измеряли относительно диагонального креста, который принимали за нулевое значение. Величина угла между линиями для фигур в форме угла и креста изменялась от 10 до 150°. Фигуры изменялись по цвету и яркости, для эксперимента выбрали пять вариантов та-

ких сочетаний (см. табл. 1). Синие фигуры имели длину волны 480 нм и яркость 9 кд/м², красные — 610 нм и 12 кд/м², зеленые — 560 нм и яркостью 30 кд/м², желтые — 570 нм и яркостью 40 кд/м² и белые фигуры, характеризующиеся только яркостью 45 кд/м². Таким образом, по два стимула одинаковой формы имели одинаковую ориентацию, но отличались цветовыми характеристиками и, наоборот, по два стимула одинаковой формы имели одну характеристику цвет-яркость, но разную ориентацию.

В эксперименте участвовали 15 здоровых испытуемых, среди которых были мужчины и женщины в возрасте 20—35 лет с нормальным цветовым зрением.

Испытуемым на экране компьютера стимулы предъявляли парами, их требовалось сравнить и оценить различия между ними по шкале от 1 до 9, согласно которой 1 соответствовала минимальным различиям, 9 — максимальным, а все остальные значения использовались для фиксации промежуточных значений.

Оценки различий каждой пары стимулов фиксировались нажатием на соответствующую цифровую клавишу компьютерной клавиатуры. Каждая пара стимулов предъявлялась испытуемому по два раза. Оценки каждого испытуемого заносились в сводную таблицу. Таблицы индивидуальных данных всех испытуемых проверяли на коррелированность, отбирали схожие (*p* не более 0,05) и их усредняли. В результате получили матрицу усредненных по 15 испытуемым субъективных оценок различий между стимулами, представленную в табл. 2.

Таблица 2

Матрица усредненных субъективных различий между комплексными стимулами

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1																														
2	3,5																													
3	4,3	4,6																												
4	4,5	3,6	3,5																											
5	5,1	5,4	4,3	5,8																										
6	4,6	5,1	5,8	5,3	4																									
7	4,9	4,9	4,6	6	4,5	4,9																								
8	4,5	5	5,4	5,3	5,8	4,8	3,8																							
9	5,3	5,3	4,9	5,3	3,7	4,3	5,3	4,8																						
10	5	5,6	5,5	5,3	4,4	4,6	5,3	3,7	3,8																					
11	5,8	6,8	7	6,5	5,3	6,4	6,9	6,5	5,4	6,6																				
12	6,5	5,5	6,5	6,3	7,3	7,3	6,4	5,7	6,9	5,3	3,8																			
13	7,8	6,9	6,4	6,8	5,2	6,6	6,7	6,8	5,5	6,3	4,8	4,8																		
14	7	5,8	6,7	5,3	6,2	6,3	6,8	7,8	6,6	6,6	5,5	4,9	3,8																	
15	7,3	6,8	5,6	7,3	7,3	7,6	5,8	7,3	6,5	7,4	5,7	5,5	5,9	5,3																
16	5,8	6,8	7	6,7	7,3	5,5	7,3	7,8	7,3	7,4	5,6	5,3	5,4	4,9	4,4															
17	5,6	6,6	7,4	7,4	7,3	6,3	6,5	7,8	6,8	7,3	5,8	5,8	5,1	5	4,6	4,2														
18	7,4	5,9	6,9	5,3	7,8	6,9	7	7	6,5	6,5	5,5	6,3	5,3	4,8	5,3	4,6	4,1													
19	7,5	6,9	6,5	7,3	7	7,3	5,9	7,3	6,6	6,9	6,3	5,5	5,5	5,4	4	4,9	4,8	4,8												
20	7,5	7,5	7,3	7,4	6,6	6,8	7,3	5,9	7,8	5	5,4	4,8	5	5,9	4,7	5,8	5,5	5,8	3,8											
21	7,1	6,8	7,3	6,9	6,4	7	7,3	7,5	6	7,8	5,4	7,3	5,8	7,8	7,4	6,6	6,5	7,4	7,4	7,5										
22	6,7	7	5,4	7,3	7	7,8	6	7,5	7,4	7,5	7,8	7	7,3	7	5,8	6,7	6,8	6,7	5,1	6,9	4,5									
23	7,6	7,3	7,4	6,7	7,8	7,4	7,1	6,3	7,6	5,5	7,5	5,6	7,4	7	7,3	6,6	6,7	7	7,3	5,7	5,6	5,3								
24	7,5	5,5	7,6	5,3	7,4	7,4	7,6	7,5	7	7,8	7,6	7,1	7,3	5,8	6,9	6,8	6,8	5,8	6,9	6,8	6,1	5,4	4,4							
25	6,8	7,3	7,4	7,3	5,9	6,8	7,8	7,5	6,4	6,3	6,2	7,1	6,2	7,4	7,4	7	7,2	6,8	7,8	7,4	4,6	5,3	6,7	6,9						
26	5,5	7,1	7,2	7,3	7,6	5,7	7,6	7,1	6,9	7,8	6,9	7,8	7,3	7,3	7,3	5,5	6	7,5	7,4	6,6	6,3	5,5	7,4	6,6	4					
27	7,3	6,9	5,3	6,9	6,9	7,2	5,4	7,3	7,4	7,3	7,3	6,7	7,1	7,6	5,9	7,3	7,3	6,8	5,2	7,3	6,1	4,9	6,4	7,3	6,2	6,5				
28	6,8	5,3	6,8	5,3	6,5	7	7	6,7	6,8	7,2	7,5	7,1	6,8	5,9	7	7,3	7,2	5,4	7,5	7,8	6,6	7,4	5,9	4,8	6,8	6,5	5			
29	7,4	7,8	6,7	7,4	7,8	7,8	7,5	5,3	6,6	5,5	7	6,4	7,5	7,4	7,4	7,4	6,9	7,3	6,9	6,4	6,9	6,4	5	6,8	6,5	6,2	5,3	5,8		
30	6,4	6,9	6,8	7	5,9	6,3	6,5	6,8	7,4	6,5	7,3	6,9	7,2	6,6	7	6,4	5,2	7,5	7,3	6,8	6,6	7,8	7	6,5	6,4	5,3	5,3	5,3	5,3	

Примечание. Номера строк и столбцов матрицы соответствуют номерам стимулов в табл. 1.

Матрицу различий обработали неметрическим методом многомерного шкалирования по алгоритму Гутмана [3]. Получили множество пространственных решений, среди которых выбрали пространство с оптимальной структурой на основе показателей «стресса» и коэффициента корреляции между исходными и обработанными данными, а сферичность пространств определили по коэффициенту вариации (табл. 3).

Таблица 3

Значения показателей пространственных решений различения комплексных стимулов

Показатель	Размерность пространства					
	1	2	3	4	5	6
Стресс, s	0,55	0,34	0,23	0,17	0,13	0,10
Коэффициент корреляции, r	0,26	0,56	0,62	0,68	0,75	0,81
Коэффициент вариации, %	—	4,03	4,47	3,71	2,65	2,27

Анализ этих показателей позволил считать оптимальным шестимерное решение, а в качестве модели различения комплексных стимулов рассматривать шестимерную сферу.

Модель различения комплексных стимулов. Для выявления модулярной структуры различения данных стимулов построили проекции стимульных точек на двухмерные плоскости. На проекции, образованной первой и второй декартовыми координатами (рис. 1), видно, что точки, соответствующие стимулам одного цвета, образовали группы, упорядоченные по длине волны стимула. Это демонстрирует график линейной зависимости сферической координаты точки-стимула в плоскости X_1X_2 от длины волны (рис. 2). Особенности расположения точек вдоль первой и второй декартовых координат указывают на то, что оси отражают активность цветоопponentных каналов. Полюса первой оси занимают стимулы, субъективно воспринимаемые как красные и зеленые, а полюса второй оси — желтые и синие. Эти особенности являются основанием полагать, что плоскость X_1X_2 является моделью двухканального хроматического модуля цветоразличения.

Третья и четвертая декартовые координаты образуют вторую плоскость шестимерного пространства различения комплексных стимулов. Стимульные точки на плоскости X_3X_4 (рис. 3) сформировали три группы.

Одна группа, расположенная на положительном полюсе оси X_3 , включает точки, представляющие стимулы белого цвета с самым большим значением яркости, остальные точки расположились на отрицательном полюсе этой оси. Положительный полюс оси X_4 заняли точки, представляющие «зеленые» и «красные» фигуры, отрицательный — точки, представляющие стимулы «желтого» и «синего» цвета. Расположение стимульных точек на плоскости X_3X_4 , сходное с моделью цветоразличения, позволяет обозначить третью и четвертую декартовые координаты как световой и темновой каналы. Однако линейная зависимость сферической координаты в плоскости X_3X_4 с яркостью стимула не обнаруживается. В связи с этим каждая декартовая координата была проанализирована отдельно. Оказалось, что световой канал различает данные стимулы, разделяя их на две группы «белые» и «цветные», что показывает график на рис. 4.

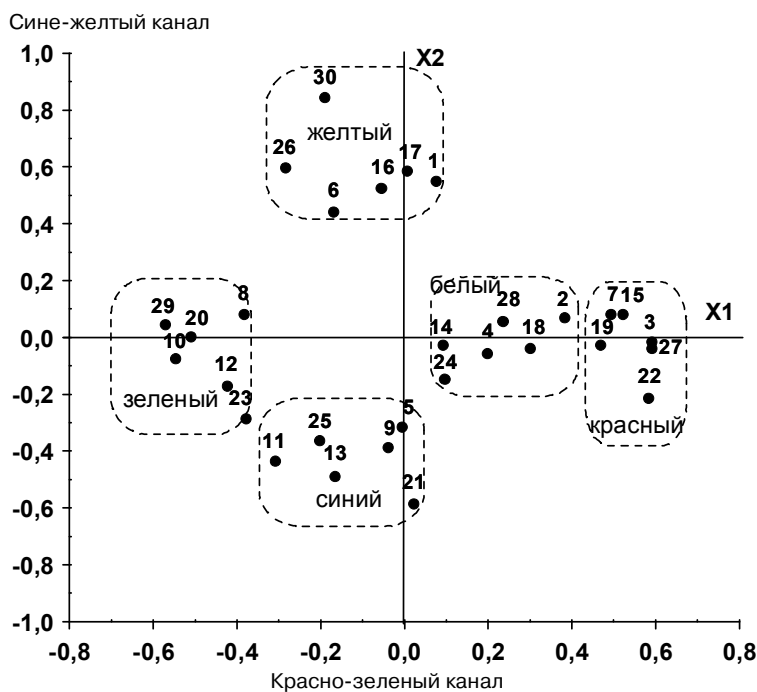


Рис. 1. Проекция точек-стимулов на двухмерную плоскость X1X2 пространства различения комплексных стимулов

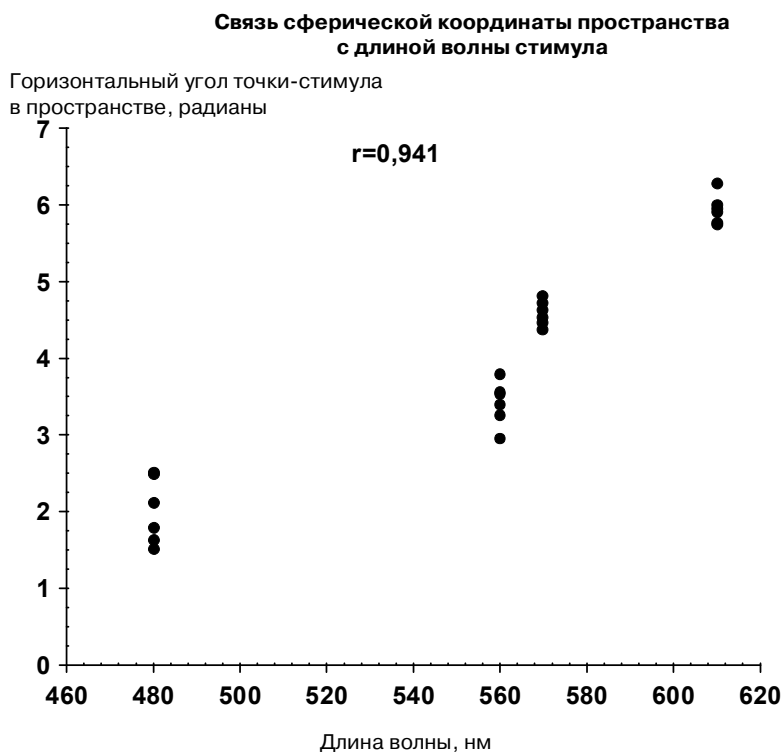
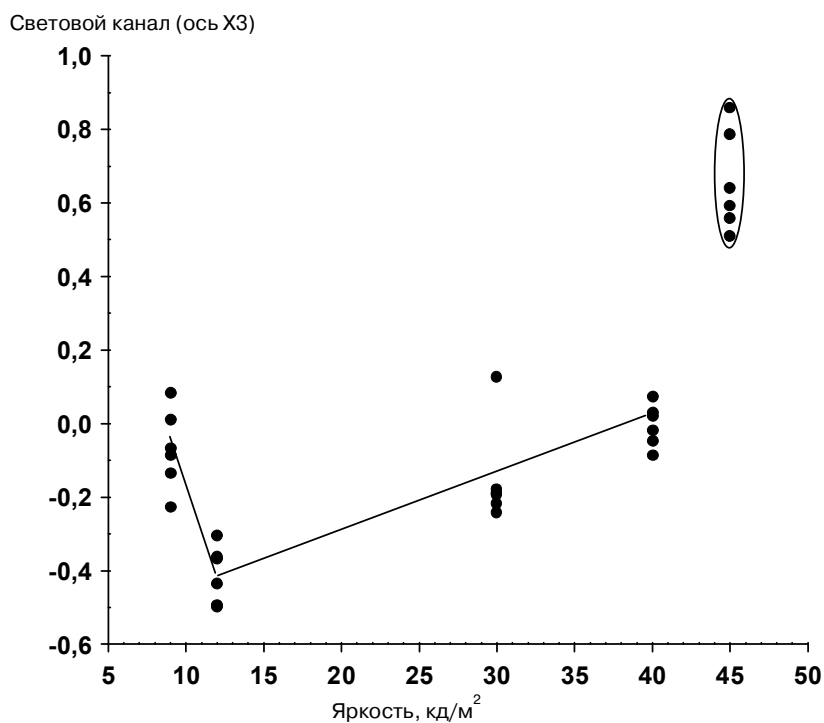
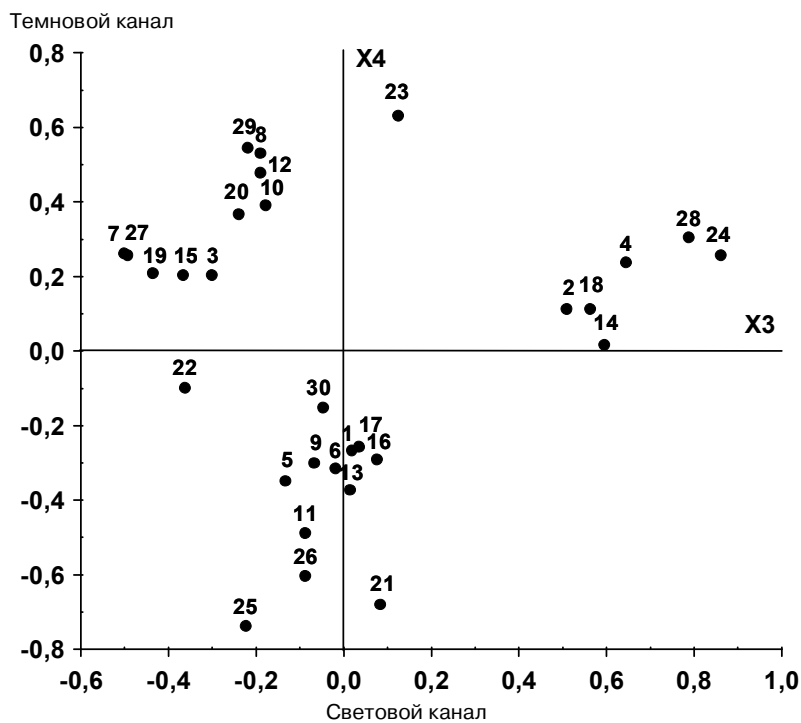


Рис. 2. График зависимости сферической координаты плоскости X1X2 от длины волны фигуры



Темновой канал сходным образом разделяет все «цветные» стимулы на красно-зеленые и желто-синие фигуры. Несмотря на своеобразную кластеризацию стимульных точек, плоскость, образованная третьей и четвертой декартовыми координатами, может быть интерпретирована как модель ахроматического двухканального модуля.

Известно, что результатом взаимодействия хроматического и ахроматического модулей является насыщенность [7]. Для выявления этой субъективной характеристики построим подпространство, оси которого являются производными от координат, представляющих хроматический и ахроматический двухканальные модули, и вычисляются по следующим формулам:

$$Y1 = \sqrt{(X1^2 + X2^2)}, \tag{3}$$

$$Y2 = \sqrt{(X3^2 + X4^2)}, \tag{4}$$

где Y1 и Y2 — оси двухмерного подпространства, а X1, X2, X3 и X4 — оси четырехмерного пространства цветоразличения.

Полученная проекция (рис. 5) показывает, что точки расположились в правом верхнем квадранте плоскости Y1Y2 и образовали две группы. В первую группу вошли точки, представляющие стимулы с минимальной насыщенностью, это «белые» фигуры, а вторая группа образована всеми остальными точками. График зависимости сферической координаты цветового подпространства от насыщенности стимула показывает несколько искаженную линейную зависимость (рис. 6). Это указывает на то, что различение данных стимулов осуществляется на основе субъективной насыщенности.

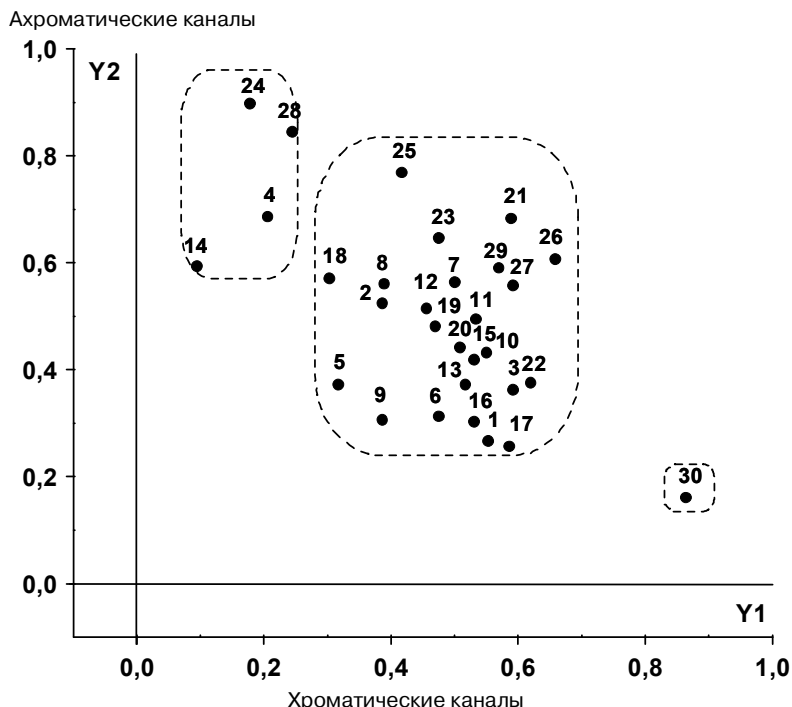


Рис. 5. Проекция точек-стимулов на двухмерное подпространство различения цветных линий, углов и крестов

Связь сферической координаты цветового подпространства с насыщенностью стимула

Вертикальный угол точки-стимула
в цветовом подпространстве, радианы

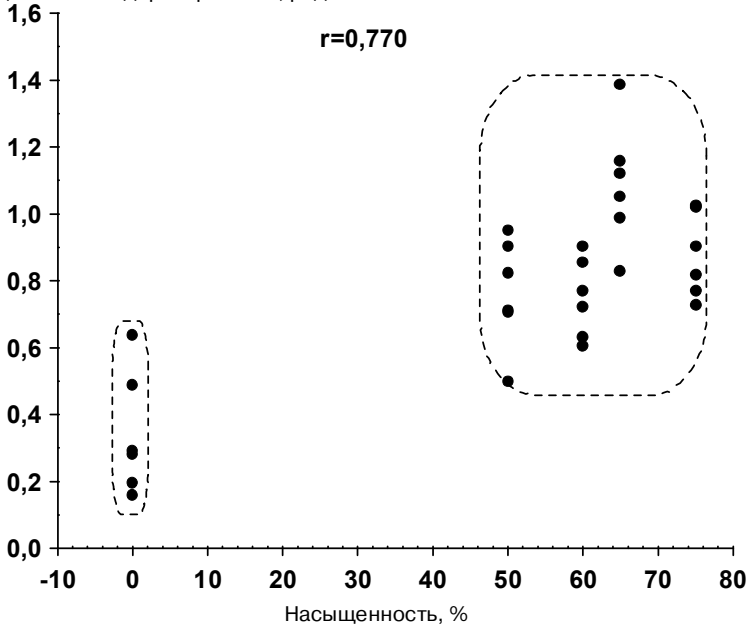


Рис. 6. График зависимости сферической координаты цветового подпространства от насыщенности стимула

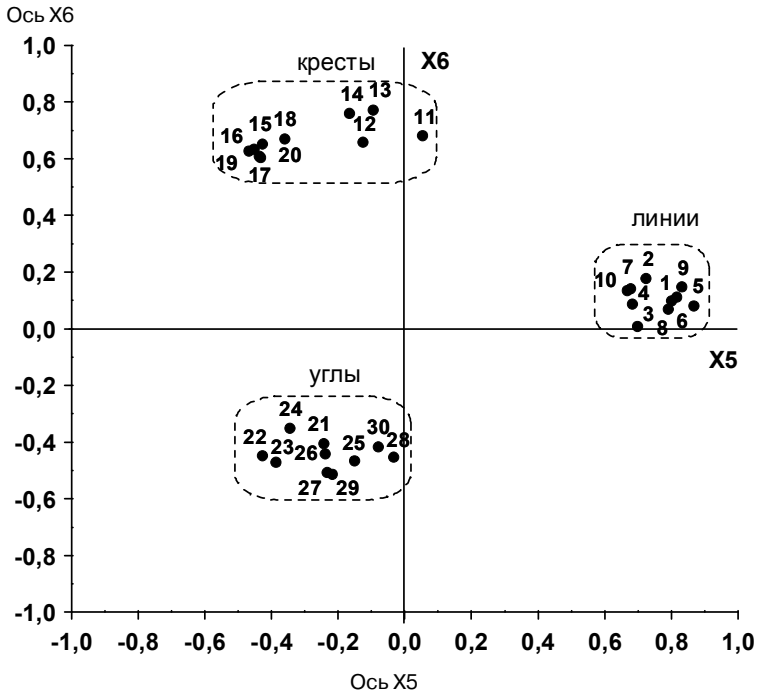


Рис. 7. Проекция точек-стимулов на двумерную плоскость X1X2 пространства различения комплексных стимулов

На проекции, образованной пятой и шестой декартовыми координатами (см. рис. 7), все точки сгруппировались по форме и образовали три кластера: «линии», «углы» и «кресты». Группа «линии» расположилась на положительном полюсе оси X5, а на отрицательном полюсе этой оси расположились две другие группы. По оси X6 разные полюса заняли группы «углы» и «кресты», а точки, образовавшие группу «линии», заняли нулевое значение. Кластерная структура расположения точек на плоскости X5X6 указывает, что стимулы анализировались путем группировки изображений на основе видимой формы. При этом никаких признаков анализа ориентации и величины угла в полученной модели не обнаруживается. Вместо активации двухканальных модулей ориентации и величины угла происходит активация какого-то другого механизма. Результатом активации этого механизма, имеющего векторную природу, является представление стимулов в виде групп, объединяющих изображения разной формы. В данном случае субъективной характеристикой стимула является не сама форма, а ее некоторая типология, представляющая стимулы в виде набора зрительных категорий.

Полученная шестимерная сфера является моделью нейронной сети анализа комплексных стимулов. Эта сеть рассматривается как результат взаимодействия типичных энергетических модулей и нетипичного модуля, активация которого представляет стимулы в виде набора зрительных категорий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Измайлов Ч.А.* Проблема носителя зрительного языка: психофизиологические методы // Дубна. — 2011. — № 3. — С. 70—100. [*Izmailov Ch.A.* Problema nositelya zritel'nogo yazyka: psihofiziologicheskie metody // Dubna. — 2011. — No 3. — S. 70—100.]
- [2] *Измайлов Ч.А., Едренкин И.В.* Различение бимодальных стимулов зрительной системой человека. Математическая психология: Школа В.Ю. Крылова / Под ред. А.Л. Журавлева, Т.Н. Савченко, Г.М. Головиной. — М.: Изд-во Института психологии РАН, 2010. — С. 390—407. [*Izmailov Ch.A., Edrenkin I.V.* Razlichenie bimodalnih stimuloval zritel'noy sistemoi cheloveka. Matematicheskaya psihologiya: Shkola V.U. Krilova / Pod. red. A.L. Guravleva, T.N. Savchenko, G.M. Golovinoi. — M.: Izd-vo Instituta psihologii RAN, 2010. — S. 390—407.]
- [3] *Терехина А.Ю.* Анализ данных методом многомерного шкалирования. — М.: Наука, 1985. [*Terehina A.Y.* Analiz dannih metedom mnogomernogo shkalirovaniya. — M.: Nauka, 1985.]
- [4] *Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г.* Искусственные органы чувств. — Л.: Наука, 1979. [*Fomin S.V., Sokolov E.N., Vaytkyavichus G.G.* Iskusstvennye organi chuvstv. — L.: Nauka, 1979.]
- [5] *Bimler D.L., Izmailov Ch.A., Paramei G.V.* Processing Bimodal Stimuli: Integrality/Separability of Colour and Orientation. *Frontiers in Perception Science*. — 2013. — No 4. — P. 1—11.
- [6] *Izmailov Ch.A., Chernorizov A.M.* A geometrical approach to research into signal recognition in visual systems of human and animals // *Psychology in Russian: State of the Art*. — 2010. — P. 301—332.
- [7] *Izmailov Ch.A., Sokolov E.N.* Spherical model of color and brightness discrimination // *Psychological Science*. — 1991. — No 2 (4). — P. 249—259.

VISUAL PERCEPTION OF DIFFERENTLY SHAPED AND COLORED STIMULI

Yu.A. Chudina

Laboratory of Physical Correctional Methods of Neurocognitive Processes
National Research Centre «Kurchatov Institute»
Akademika Kurchatova Sq., 1, Moscow, Russia, 123182

D.A. Shlyakhta

Chair of Social and Differential Psychology
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The results of the experimental research of visual perception of differently shaped and colored stimuli have been described in the article. The main goal of the experiment was to identify a combination of visual modules, employed in recognizing the stimuli. The desired aim was achieved by building a spherical model of the stimuli and interpreting its formal and contentive properties in terms of vector approach. It has been observed that recognizing complex stimuli is realized as a multichannel network with a specific combination of graphic and color two-channel modules, modeled in the form of a multidimensional sphere.

Key words: multidimensional scaling, subjective estimations of pairwise perceived differences, super-threshold differences, two-channel sensory module, spherical model of differentiating stimuli, spherical model of color discrimination, visual perception of color and shape.