
ЗРИТЕЛЬНОЕ РАЗЛИЧИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СТИМУЛОВ

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

Статья содержит описание результатов экспериментального исследования различения комбинированных стимулов, характеризующихся изменениями спектрального состава излучения, интенсивности светового потока и угла наклона объекта в видимом поле. Полученные данные интерпретировали в рамках векторного подхода и модулярной концепции, согласно которым восприятие осуществляется однотипными сенсорными модулями зрительной системы, детектирующими разные характеристики стимулов. Результатом объединения сенсорных модулей является многоканальная нейронная сеть, представленная в виде многомерного сферического пространства.

Ключевые слова: многомерное шкалирование, субъективные оценки попарных различий, надпороговые зрительные различия, двухканальный сенсорный модуль, сферическая модель различения стимулов, сферическая модель цветоразличения, модель различения ориентации линий, многоканальная нейронная сеть.

Настоящее исследование было проведено в рамках векторного подхода [5], основанного на векторном принципе кодирования сенсорного сигнала в зрительной системе, реализованном в виде сферической модели различения стимулов. В рамках векторного подхода разрабатывается модулярная концепция устройства зрительной системы [1; 2], согласно которой восприятие внешних воздействий осуществляется путем активации типичных сенсорных модулей. В зависимости от особенностей видимых характеристик, субъективно выделяемых из потока внешней информации, различают два типа сенсорных модулей: энергетические и конфигуративные [1; 8]. Модули первого типа анализируют интенсивность светового потока и его спектральный состав, а модули второго типа — соотношение интенсивностей световых стимулов в разных участках поля зрения, изменяющихся во времени и пространстве. Детектирование энергетических характеристик осуществляется непосредственно элементами зрительной системы и представлено в виде ответов фоторецепторов и зрительных нейронов. Детектирование соотношения интенсивностей требует сравнения разных участков видимого поля, что является логической операцией и требует активации более сложной нейронной сети. В качестве входных квазирецепторов такой нейронной сети рассматриваются многочисленные детекторы ориентации линий первичной зрительной коры, которые анализируют изменения яркости в форме границ, отделяющих одну часть ви-

димого поля от другой [7; 8]. Геометрическим представлением сенсорного модуля любого тип является двухмерное сферическое пространство, в котором декартовы координаты отражают активацию нейронных каналов, а сферические координаты — субъективные признаки анализа изображения.

В рамках модулярной концепции были изучены закономерности взаимодействия однотипных [1; 9] и разнотипных [2; 6] модулей. Эти исследования основывались на единой методологии построения сферической модели зрительного восприятия путем анализа надпороговых различий между стимулами. Экспериментально было показано, что обработка цветовых и графических особенностей изображения осуществляется двухканальными сенсорными модулями, объединяющимися в единую нейронную сеть. Настоящее исследование посвящено изучению особенностей комбинации двух энергетических и одного конфигуративного модуля. Для этого было проведено экспериментальное исследование различения стимулов, варьирующих по интенсивности, спектральному составу и наклону в видимом поле.

В качестве стимулов использовали линии разной ориентации, цвет и яркость которых изменялись. Выбрали 6 вариантов ориентации и по 5 вариантов цветовых и яркостных характеристик, в результате получили 30 стимулов. Изменения характеристик стимулов фиксировали на основе динамики таких физических параметров стимуляции, как длина волны, яркость и угол наклона линии в видимом поле (табл. 1).

Таблица 1

Номера стимулов, используемых в эксперименте, и их физические характеристики (указаны в заголовках строк и столбцов)

Угол линии, измеренный относительно горизонтали (градусы)	Обозначение цвета линии: Яркость (кд/м ²) — Длина волны (нм)				
	B: 9—480	R: 12—610	G: 30—560	Y: 40—570	W: 45- -
0	1	2	3	4	5
30	6	7	8	9	10
60	11	12	13	14	15
90	16	17	18	19	20
120	21	22	23	24	25
150	26	27	28	29	30

В эксперименте приняли участие 6 испытуемых женского пола с нормальным цветовым зрением в возрасте от 35—40 лет. В ходе эксперимента на экране компьютера последовательно предъявляли пары стимулов, каждая пара предъявлялась по два раза. Задачей испытуемого было оценить попарные различия между объектами, используя все значения шкалы от 1 до 9, где 1 соответствовали минимальные различия, а 9 — максимальные.

Для каждого испытуемого была получена треугольная матрица оценок, элементом которой было среднее по двум предъявлениям значение различия между парой стимулов. Индивидуальные матрицы проверяли на коррелированность и схожие (p не более 0,05) усредняли, в результате получили матрицу усредненных по 6 испытуемым оценок различий между стимулами (табл. 2).

Таблица 2

Матрица попарных субъективных различий между 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	5,6																													
3	5,8	5,3																												
4	5,6	5,5	5																											
5	4,9	5	5,7	4,9																										
6	5,4	7,7	7,6	7,5	7,5																									
7	7,9	4,8	7,3	7,3	7,4	5,8																								
8	7,7	7,7	4,6	7,4	7,3	6,4	6,2																							
9	7,6	7,4	7,6	4,3	7,2	6,2	6,2	6																						
10	7,4	7	7,3	7,7	4,7	6,7	5,8	5,5	5,4																					
11	5,5	8	7,8	7,9	7,7	5,4	7,8	7,4	7,7	7,5																				
12	8,3	5,7	8,4	7,6	7,5	7,7	5	7,9	7,5	7,2	6,3																			
13	8	8,4	5,4	7,6	7,4	7,5	7,7	5,2	7,5	7,7	6,2	6,3																		
14	7,9	7,9	7,6	5,2	7,5	7,8	7,4	7,5	5,4	7,2	6,5	6,5	6,1																	
15	7,6	7,7	7,7	7,5	5,3	7,3	7,4	7,3	7,4	5,4	5,8	5,8	6	6,3																
16	6,7	8	7,8	7,8	7,6	5,6	8,5	7,8	8	7,5	5,2	8	7,4	7,8	7,4															
17	7,9	5,7	7,8	7,7	7,7	8,3	5,5	7,9	7,8	7,6	7,9	4,9	7,9	7,4	7,4	5,8														
18	7,9	7,9	5,7	7,7	7,6	8,1	8,2	5,4	7,6	7,9	8	7,9	4,8	7,7	7,5	6	6,2													
19	7,8	7,8	7,7	5,8	7,5	8,4	8	7,7	5,7	7,6	7,7	7,4	7,5	5,5	7,2	5,6	5,9	5,6												
20	7,3	7,8	7,7	7,7	5,4	7,7	7,4	8	7,7	5,7	7,4	7,5	7,1	7,7	4,9	5,8	6	6	5,3											
21	5,5	7,9	7,9	7,9	7,9	6,2	8,5	8,1	8,4	8	5,8	8	7,6	7,7	7,7	5,7	7,6	7,6	7,8	7,2										
22	8,2	5,4	8	7,8	7,3	8,3	6,3	8,2	8,1	7,4	8	6,2	7,9	7,3	7,5	7,7	5,2	7,7	7,2	7,5	6									
23	7,8	8	5,4	7,6	7,6	8,1	8,3	5,8	7,9	8,7	7,8	7,9	5,9	7,2	7,7	7,8	8	4,7	7,7	7,1	6,1	6,3								
24	7,7	7,8	7,7	5,4	7,5	8,2	8	8,1	5,9	8,7	7,9	7,4	7,4	5,9	7,4	7,9	7,7	7,5	5,2	7,3	6,3	6,2	5,9							
25	7,7	7,8	7,7	7,7	4,9	7,6	7,8	7,6	7,9	5,8	7,5	7,5	7,4	7,1	5,3	7,4	7,4	7,2	7	4,5	6	5,9	5,8	5,3						
26	4,7	7,3	7,7	7,2	7,3	6,4	8,2	8,4	8,7	7,8	5,8	8,5	8	8,6	7,9	5,8	8,3	7,8	7,9	7,4	5,4	7,8	7,6	7,4	7,4					
27	7,4	4,7	7,7	7,3	7,4	8,3	6,4	8,2	8,7	7,5	8,4	5,8	8,5	8	8,4	8,7	5,7	7,8	8,7	7,7	7,8	5,3	7,7	7,4	7,2	6,1				
28	7,7	7,6	4,5	7,3	7,4	7,8	7,9	5,8	7,9	7,7	7,9	8,2	5,9	7,7	7,9	8	7,9	5,7	7,9	7,7	7,7	7,7	4,7	7,5	7,2	6,4	5,9			
29	7,5	7,4	7,3	4,4	7,2	8,3	7,8	8	6,2	7,5	8,4	7,7	7,9	5,8	7,9	8,2	7,8	7,9	5,4	7,7	7,7	7,5	7,5	4,9	7	6,7	6,6	5,7		
30	6,9	7,3	7,5	7,7	4,4	7,5	7,7	7,4	7,4	5,8	8	7,9	7,9	7,9	5,7	7,5	7,6	7,7	7,5	5,3	7	7,3	7,1	7,7	4,4	6	5,7	6	5,4	

Примечание: номера строк и столбцов соответствуют номерам стимулов в табл. 1.

Матрицу попарных различий обработали методом многомерного шкалирования [4]. В результате получили множество пространственных моделей с разной размерностью. Выбор модели, являющейся оптимальным представлением полученных данных, осуществлялся на основе показателей необходимой и достаточной размерности (стресс, коэффициент корреляции) и сферичности (коэффициент вариации).

Таблица 3

Значения показателей пространственных моделей

Показатель	Размерность модели					
	1	2	3	4	5	6
Стресс, s	0,57	0,35	0,24	0,17	0,12	0,09
Коэффициент корреляции, r	0,15	0,43	0,46	0,58	0,71	0,82
Коэффициент вариации, %	—	10,57	8,11	6,88	4,46	2,01

Показатели размерности и сферичности достигают допустимых значений при шестимерном решении (табл. 3), что является формальным основанием выбора шестимерного пространства. Интерпретация полученной модели в терминах модулярной концепции зрительного восприятия позволит выявить двухканальные модули и их комбинацию [8].

Сферическая модель различения цветных линий. Построили проекции стимульных точек на двухмерную плоскость, образованную первой (X1) и второй (X2) декартовыми координатами (рис. 1). На этой плоскости все точки, соответствующие стимулам с одинаковым цветом, образовали группы, а эти группы расположились в зависимости от цветового тона. Это подтверждает линейная зависимость первой сферической координаты, вычисленной как угол в плоскости X1X2, от длины волны стимула, изображенная в виде графика на рис. 2. Расположение стимульных точек вдоль декартовых осей соответствует модели цветоразличения [9]: ось X1 отражает активность красно-зеленого, а X2 — сине-желтого оппонентных нейронных каналов. Проведенный анализ показал, что двухмерное сферическое подпространство X1X2 является геометрической моделью хроматического модуля [1; 6; 8].

Проекция точек на плоскость третьей (X3) и четвертой (X4) декартовых координат пространства цветных линий представлена на рис. 3.

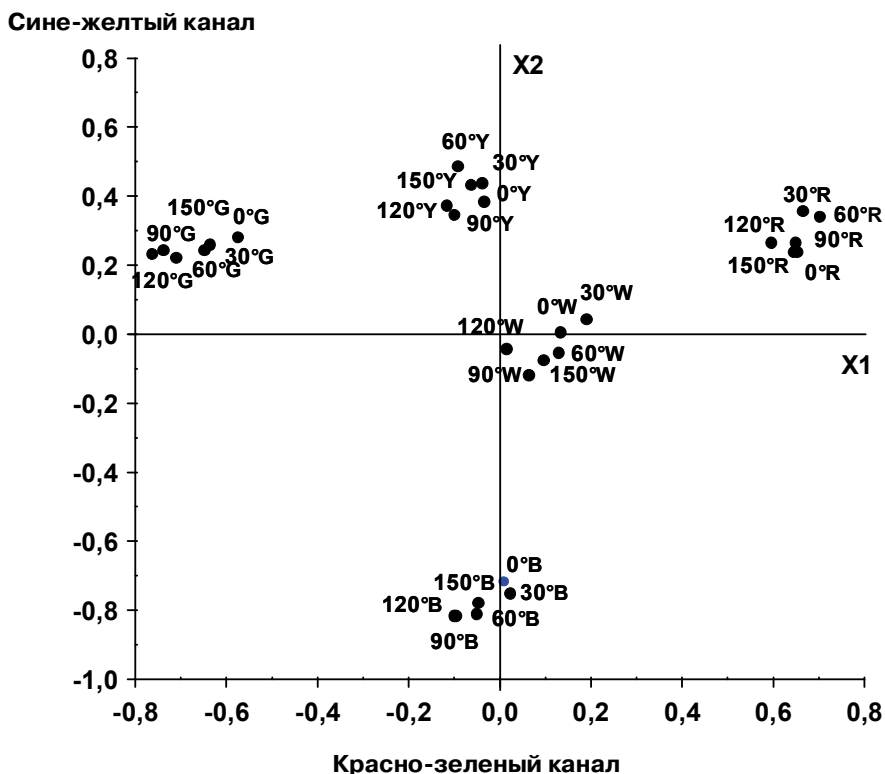


Рис. 1. Проекция стимульных точек на двухмерную плоскость X1X2

Горизонтальный угол
точки-стимула в пространстве,
радианы

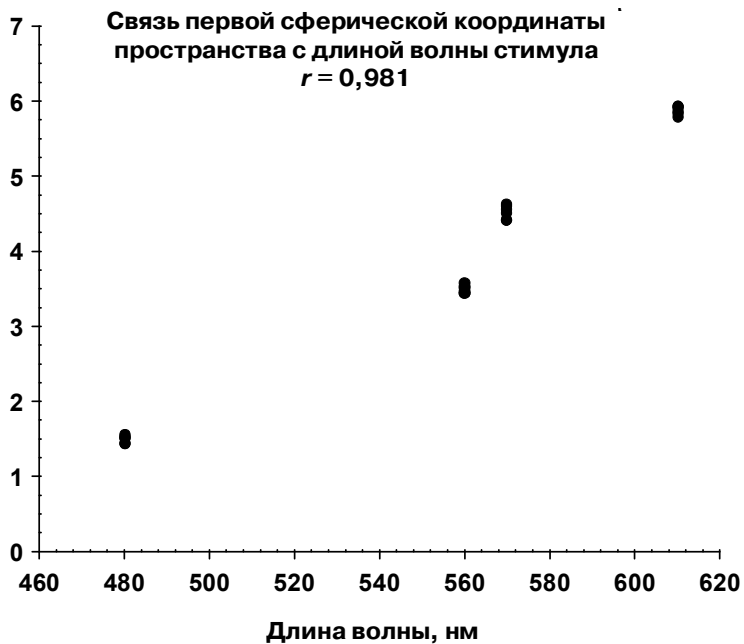


Рис. 2. График зависимости сферической координаты плоскости X1X2 от длины волны

Темновой канал

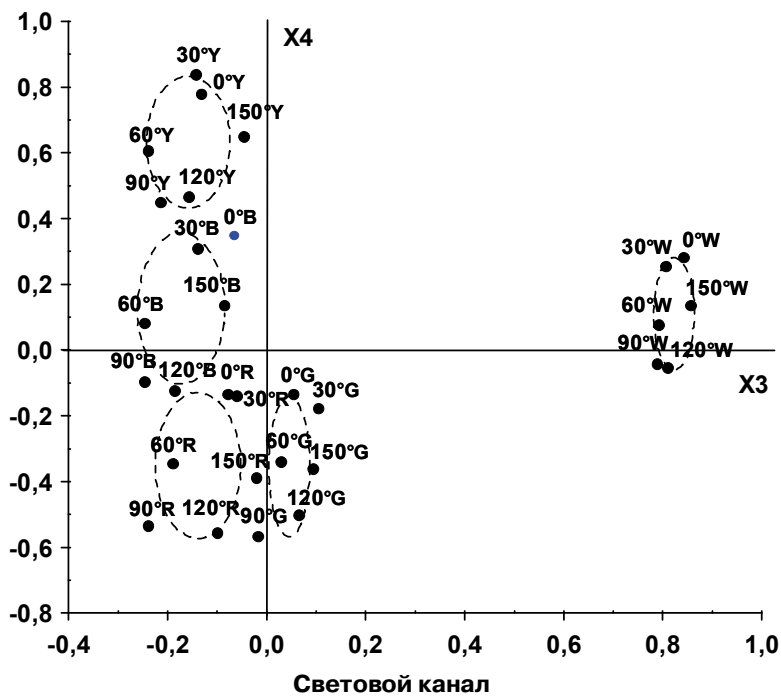


Рис. 3. Проекция стимульных точек на двухмерную плоскость X3X4

На этой проекции точки упорядочились по яркости стимула, что показывает график зависимости второй сферической координаты пространства от физической яркости стимула (рис. 4). Вторую сферическую координату вычисляли как вертикальный угол точки-стимула в плоскости X3X4. График на рис. 4 показывает некоторое отклонение от линейности для точек с малыми значениями яркости (9 и 12 кд/м²), выпадающими из общей линейной зависимости. Причиной таких отклонений может быть использование устойчивых комбинаций цвета и яркости, искажающие восприятие субъективной яркости [3]. Декартовы координаты X3 и X4 соответствуют световому и темновому нейронным каналам. Двухмерная плоскость X3X4 пространства различения цветных линий, соответствует двумерной сферической модели яркости и является геометрическим представлением ахроматического двухканального модуля [1; 2].

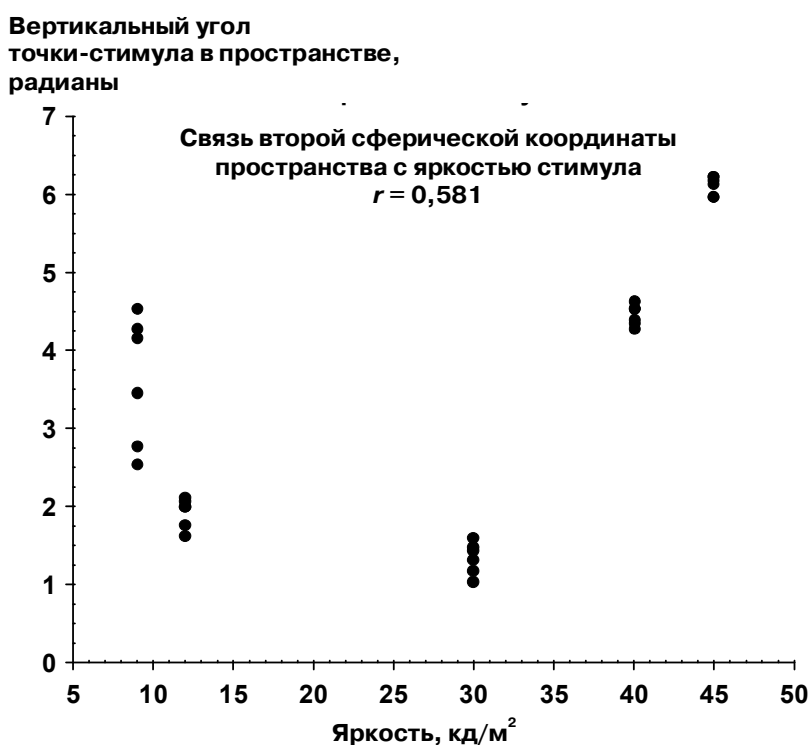


Рис. 4. График зависимости сферической координаты плоскости X3X4 от яркости стимула

Согласно сферической модели цветового зрения [9], цветоразличение характеризуется тремя субъективными характеристиками: цветовым тоном, яркостью и насыщенностью. Для анализа насыщенности построили двухмерное цветовое подпространство, координаты которого (Y1 и Y2) являются производными от четырех декартовых осей и вычисляются по формулам (1) и (2):

$$Y1 = \sqrt{(X1^2 + X2^2)}, \quad (1)$$

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

где X1, X2, X3, X4 — оси шестимерного пространства различения цветных линий.

На проекции точек-стимулов на подпространство насыщенности (рис. 5) все стимульные точки заняли правый верхний квадрант в зависимости от насыщенности стимула. Связь между насыщенностью и третьей сферической координатой, измеренной как угол точки-стимула в двухмерном подпространстве против часовой стрелки, приближается к линейной ($r = 0,702$). Это указывает на то, что различение цветных линий характеризуется насыщенностью, которая является результатом взаимодействия хроматического и ахроматического двухканальных модулей, представленных в виде двухмерных плоскостей.

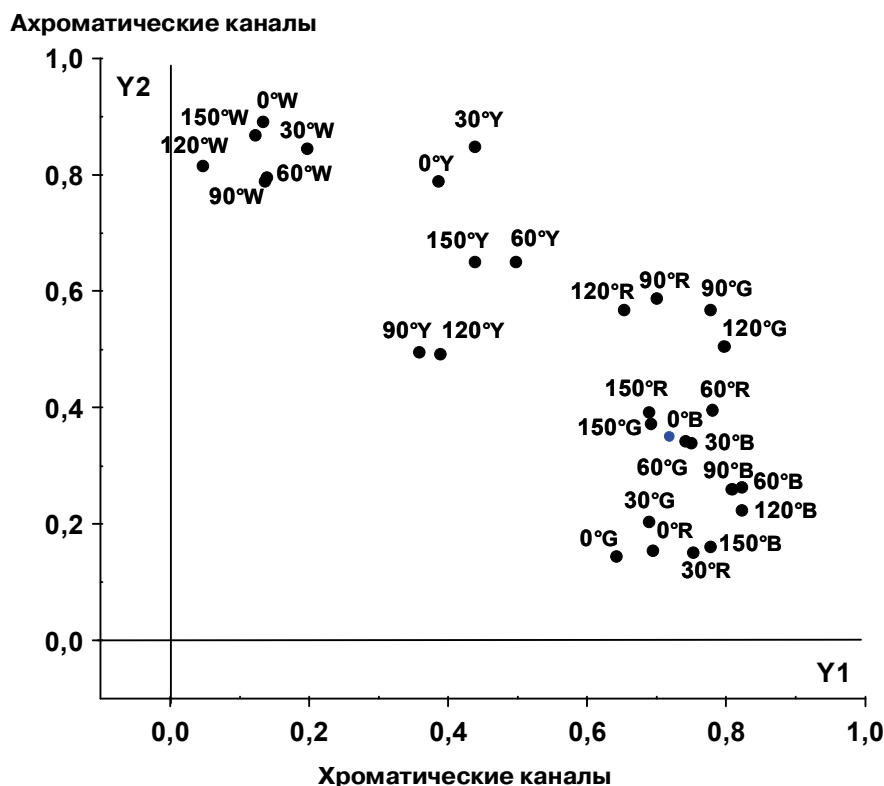


Рис. 5. Проекция точек-стимулов на двухмерное подпространство цветных линий

Проекция точек-стимулов на третью двухмерную плоскость, образованную пятой (X5) и шестой (X6) декартовыми координатами, показана на рис. 6. На этой проекции точки образовали группы, объединяющие стимулы с одинаковым углом наклона линии в видимом поле, эти группы расположились в зависимости от величины угла наклона, определяющей ориентацию линии.

Это демонстрирует линейная зависимость четвертой сферической координаты пространства от величины угла наклона, показанная на графике (рис. 7). Четвертая сферическая координата была вычислена как угол точки-стимула в двухмерной плоскости X5X6. Положительный полюс оси X5 занимают точки, представляющие стимулы с вертикальной ориентацией, а отрицательный полюс — точки, представляющие стимулы с горизонтальной ориентацией.

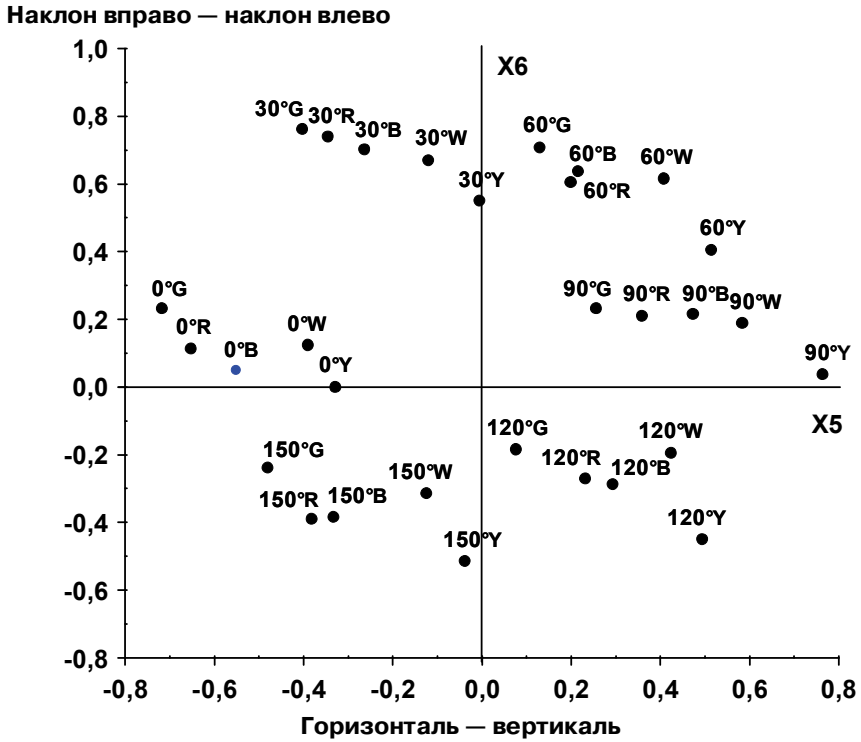


Рис. 6. Проекция стимульных точек на двухмерную плоскость X5X6

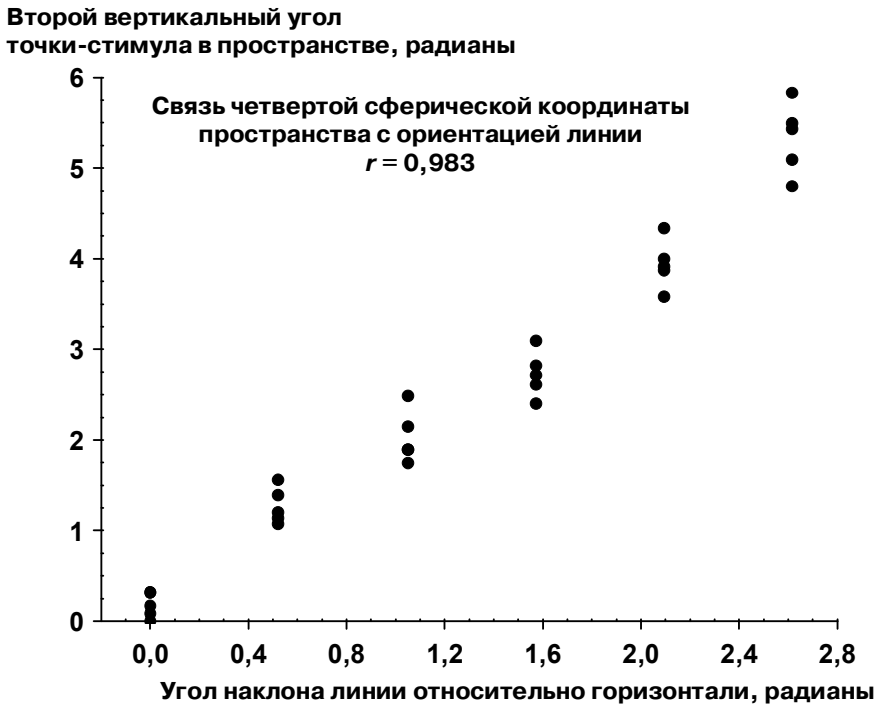


Рис. 7. График зависимости сферической координаты плоскости X5X6 от ориентации стимула

По оси Х6 располагаются точки, представляющие стимулы с наклонной ориентацией. Положительный полюс Х6 занимают стимулы с наклоном вправо от вертикали, а отрицательный — с наклоном влево от вертикали. Такое расположение позволяет интерпретировать пятую ось как ось вертикальности-горизонтальности, а шестую ось — как ось наклона с учетом его направления. Спецификация двухмерной плоскости Х5Х6 совпадает с двухмерной сферической моделью ориентации и является геометрическим представлением двухканального модуля ориентации [1; 2].

Восприятие линий разной ориентации, изменяющихся по цвету и яркости, осуществляется комбинацией типичных сенсорных модулей. Результатом такой комбинации является шестиканальная нейронная сеть, представленная в виде шестимерного сферического пространства стимулов. Двухканальные модули в этом пространстве представлены в виде двухмерных подпространств, сферические координаты которых соответствуют определенным субъективным характеристикам.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Измайлов Ч.А.* Проблема носителя зрительного языка: психофизиологические методы // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна». — 2011. — №3. — С.70—100. [*Izmailov Ch. A.* Problema nosatelya zritel'nogo yazyka: psihofiziologicheskie metody // *Psikhologicheskii zhurnal Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka «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 «Институт психологии РАН». — 2010. — С. 390—407. [*Izmailov Ch. A., Edrenkin I.V.* Razlichenie bimodalnih stimulov zritel'noy sistemoy cheloveka // *Matematicheskaya psikhologiya: Shkola V.U. Krilova / Pod. red. A.L. Zhuravleva, T.N. Savchenko, G.M. Golovinoi.* — M.: Izd-vo «Institut psikhologii RAN». — 2010. — S. 390—407.]
- [3] *Измайлов Ч.А., Павлова М.К., Ханмагомедова М.А.* Восприятие цветных предметов // Экспериментальная психология. — 2009. — №2(4) — С.5—25. [*Izmailov Ch. A., Pavlova M.K., Hanmagomedova M.A.* Vospriyatie cvetnih predmetov // *Experimental'naya psikhologia.* — 2009. — No 2(4). — S. 5—25.]
- [4] *Терехина А.Ю.* Анализ данных методом многомерного шкалирования. — М.: Наука, 1985. [*Terekhina A.Y.* Analiz dannykh metedom mnogomernogo shkalirovaniya. — M.: Nauka, 1985.]
- [5] *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 organy chuvstv. — L., Nauka, 1979.]
- [6] *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.
- [7] *Hubel D.H., Wiesel T.N.* Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // *Journal of Physiology.* — 1962. — No 160. — P. 106—154.
- [8] *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.
- [9] *Izmailov Ch.A., Sokolov E.N.* Spherical model of color and brightness discrimination // *Psychological Science.* — 1991. — No 2 (4). — P. 249—259.

VISUAL RECOGNITION OF COMBINED STIMULI

Y.A. Chudina

Laboratory of Correctional Physical Methods of Neurocognitive Processes
National Research Centre «Kurchatov Institut»
1 Akademika Kurchatova pl., 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 article submits the results of the experimental research of the subjective discrimination of combined stimuli, characterized by the changes of the spectral composition of the radiation, light intensity and tilt angle of the object in the visual field. The received data were interpreted in terms of vector approach and modular conception of visual perception according to which the visual perception is carried out with the help of the similar type sensory modules of visual system detecting different characteristics of the stimuli. The result of the integration of the sensor modules is a multichannel neuron network, represented in the form of the multidimensional geometrical spherical space.

Key words: multidimensional scaling, subjective estimations of pairwise perceived differences, supraliminal visual differences, two-channel sensory module, spherical model of differentiating stimuli, spherical model of color discrimination, spherical model of discrimination of lines orientation, multi-channel neuron network.