# \_\_\_\_\_ ЗРИТЕЛЬНАЯ \_\_ СИСТЕМА

УДК 612.821

# НЕЙРОННЫЙ МЕХАНИЗМ КОДИРОВАНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ КРЕСТОВ В ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

© 2018 г. Ю.А. Чудина\*

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Россия, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1 \*E-mail: renyxa4@yandex.ru Поступила в редакцию 26.11.2017 г.

Сопоставление результатов психофизического эксперимента, интерпретируемых в терминах модели векторного кодирования сигнала в нервной системе, с данными представленных в литературе исследований свойств нейронов зрительной коры позволило выявить нейронный механизм детектирования симметричных крестов. Зрительное восприятие симметричных крестов осуществляется путем выделения двух сенсорных характеристик: формы креста и его положения в видимом поле. Нейронная сеть кодирования симметричных крестов является результатом взаимодействия двух типов нейронов-детекторов линий зрительной коры с разными детекторными свойствами.

*Ключевые слова:* зрительное восприятие симметричных крестов, субъективные оценки различий между парами изображений, многомерное шкалирование, модель векторного кодирования в нервной системе, блок-схема нейронной сети кодирования симметричных крестов

**DOI:** 10.1134/S0235009218040042

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Зрительное восприятие объектов окружающего мира осуществляется путем анализа ограниченного набора характеристик, к которым относят форму и цвет (Измайлов, 2010). Распознавание конфигурации видимой сцены осуществляется путем выделения границ, первоначально реализуемое на уровне зрительных рецепторов и подкорковых структур. Ганглиозные клетки сетчатки и нейроны латерального коленчатого тела (ЛКТ) нечувствительны к равномерному освещению всего видимого поля. Ганглиозные клетки связаны друг с другом двухсторонними тормозными связями, на основе которых осуществляется латеральное торможение соседних элементов (Hartline, 1940; Hartline, Ratliff, 1957), обеспечивающее выделение или подчеркивание контуров. Информация о контурах дублируется нейронами ЛКТ и передается корковым нейронам, избирательно настроенным на контуры определенной ориентации, длины и ширины, которые были названы детекторами линий (Hubel, 1988). Наряду с распознаванием прямолинейных границ. современными исследователями были найдены корковые нейроны, избирательно настроенные на выделение линий, имеющих дуговую, круговую, Ү-образную, крестообразную и Т-образную форму (Шевелев, 2010). Было показано, что принципиально важным для распознавания формы изображения является выделение "узловых элементов",

представленных пересечением линий (Shevelev et al., 2003).

Психофизические эксперименты показали, что распознавание узловых элементов изображения, представленных двух-, трех- и четырехлинейными фигурами, осуществляется путем выделения таких субъективных характеристик изображения, как ориентация фигуры и величина угла между линиями (Чудина, 2012; Чудина, Измайлов, 2011; Измайлов и др., 2008; Измайлов, Чудина, 2004; Izmailov, Sokolov, 1990). Использование методологии векторного подхода и интерпретация результатов в терминах векторной модели различения стимулов (Соколов, 2003) позволили показать, что распознавание узловых элементов изображения выполняется нейронной сетью, являющейся результатом взаимодействия двухканальных модулей, представленных набором корковых колонок (Izmailov, Zimachev, 2008; Измайлов и др., 1998; Шевелев, 1992; 1984) и осуществляющих детектирование субъективных зрительных характеристик. Однако остаются неясными нейронные механизмы, при помощи которых в зрительной системе осуществляется выделение узловых элементов изображения.

Цель настоящей работы — продолжение исследования распознавания узловых элементов изображения, представленных крестами, состоящими из двух прямых пересекающихся линий (симметричные кресты), и поиск нейронного механизма



**Рис. 1.** Кресты с прямой и наклонной ориентацией, состоящие из двух линий, пересекающихся в центре стимула и образующих крест с равными противоле-жащими углами. Номера стимулов обозначены цифрами.

кодирования таких изображений в зрительной системе. В предыдущем психофизическом эксперименте были исследованы различения наклонных симметричных крестообразных фигур (Чудина, Измайлов, 2011). В настоящем исследовании в качестве стимулов использовали кресты прямой и наклонной ориентации, образованные двумя пересекающимися линиями (рис. 1). Достижение обозначенной цели осуществляли путем построения сферической модели различения крестов, которую получили в результате обработки попарных оценок различий между стимулами методом многомерного шкалирования (Shepard, 1987; Терехина, 1985; Фомин и др., 1979). Полученная модель позволила представить кресты в виде точек, расположенных в сферическом пространстве, расстояния между которыми соответствовали субъективным воспринимаемым различиям между стимулами, оси полученного пространства интерпретировать как характеристики нейронных каналов зрительной системы, анализирующих данные стимулы (Измайлов и др., 1998; Izmailov, Sokolov, 1991; Измайлов, 1980; Фомин и др., 1979).

# МЕТОДИКА

Экспериментальную процедуру провели на 12 здоровых испытуемых в возрасте 20–35 лет, среди которых было шесть женщин и шесть мужчин.

В качестве стимулов использовали 28 изображений, представляющих собой кресты, нарисованные белыми контурами на черном фоне. Кресты были составлены из двух прямых линий одинаковой длины, пересекающихся в центре и образующих пары равных противолежащих углов (рис. 1). Величина меньшего угла между линиями варьировалась от 10 до 90° с шагом 10°, исключения составляли стимулы № 7, 8, 21 и 22, величина меньшего угла которых составляла 45°. Кресты имели горизонтальную (стимулы № 1, 3, 5, 7, 9, 11), вертикальную (стимулы № 2, 4, 6, 8, 10, 12) или наклонную ориентацию (стимулы с 14 по 28) в видимом поле. Угол наклона крестов с наклонной ориентацией изменялся в пределах от 15 до 82°. Исключение составляли стимул № 13, образованный горизонтальной и вертикальной линиями, и стимул № 14, представляющий крест, образованный двумя наклонными линиями, пересекающимися под прямым углом. Размер каждого стимула составлял  $10 \times 10$  см.

Эксперимент проводили в условиях световой адаптации при искусственном освещении (уровень освещенности в помещении составлял около 400 лк). Экран компьютера, на котором предъявлялись стимулы, располагался на расстоянии 45 см от глаз испытуемого. Стимулы предъявлялись парами в течение 0.5 с, расстояние между парой стимулов 1 см. После предъявления каждой пары экспонировался темный фон, во время предъявления которого испытуемые оценивали попарные различия между стимулами по девятибалльной шкале, на которой единица соответствовала минимальному различию, девять - максимальному различию, остальные значения соответствовали промежуточным различиям. Испытуемые давали оценку различий путем нажатия на соответствующую цифровую клавишу на клавиатуре компьютера. Кажлый испытуемый оценивал различия между 378 парами стимулов, каждая пара стимулов предъявлялась на экране компьютера по 2 раза. Порядок предъявления пар стимулов был квазислучайным.

Результаты оценки различий для всех испытуемых усреднили, предварительно проверив корреляции индивидуальных оценок, и упорядочили в виде треугольной матрицы (табл. 1), где в каждой ячейке представлена усредненная оценка различия между соответствующими стимулами по 24 предъявлениям, номера которых обозначены в заголовках столбцов и строк, они соответствуют номерам стимулов на рис. 1.

Матрицу усредненных оценок различий между крестами обработали неметрическим методом многомерного шкалирования по алгоритму Гутмана (Терехина, 1985; Shepard, 1987). Результатом обработки является конфигурация точек, обозначающих использованные для различения стиму-

№	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
1																												
2	4.3																											
3	2.4	4.7																										
4	5.6	2.8	4.8																									
5	2.9	5.4	1.9	4.3																								
6	5.6	3.5	5.6	2.0	4.0																							
7	4.2	6.7	3.8	5.5	3.6	5.3																						
8	6.8	5.0	5.5	3.8	4.5	2.8	4.8																					
9	6.6	6.3	4.8	5.8	3.9	5.9	3.8	4.8																				
10	6.8	6.0	6.9	4.9	5.7	3.7	4.7	2.2	4.8																			
11	7.3	7.0	6.3	6.5	5.7	4.8	5.2	5.0	3.0	4.7																		
12	6.9	5.3	6.5	5.4	5.4	5.6	5.8	4.2	4.4	3.8	3.8																	
13	7.7	7.5	7.3	6.5	6.5	6.4	6.6	7.0	6.8	7.0	6.3	6.5																
14	6.9	7.4	5.8	6.6	5.9	5.7	4.9	4.5	4.0	4.8	2.8	1.8	5.3															
15	2.3	2.5	3.5	3.8	4.8	4.9	5.4	5.8	6.8	5.8	6.3	5.6	7.8	7.8														
16	2.4	2.0	4.2	3.5	5.8	4.8	6.0	4.5	6.6	5.6	6.0	5.9	7.3	6.9	2.7													
17	3.7	3.5	3.4	3.5	3.3	4.3	4.6	4.5	5.3	5.0	5.9	5.8	6.6	6.5	3.7	3.4												
18	3.8	2.5	4.3	2.8	5.8	3.8	5.7	4.5	5.3	4.5	6.4	5.8	6.5	7.3	3.0	3.3	3.7											
19	3.7	4.8	3.0	4.3	2.9	3.9	4.0	4.3	5.3	5.7	5.5	5.5	6.8	5.8	3.8	5.7	4.8	3.8										
20	5.6	3.7	4.8	3.5	4.7	2.5	4.9	3.3	6.8	4.3	6.3	6.8	6.6	5.7	3.4	4.7	4.8	1.7	3.6									
21	4.9	6.5	3.9	5.3	3.5	5.4	2.7	3.4	3.8	4.4	5.0	4.8	6.4	4.9	6.3	5.8	3.9	5.8	4.3	5.8								
22	6.3	5.3	5.3	4.6	4.2	4.3	4.8	2.8	5.3	4.8	5.2	5.0	6.8	5.6	6.0	4.8	3.7	5.0	3.8	3.8	3.3							
23	6.7	7.0	5.4	6.0	4.2	4.9	3.8	5.2	2.4	4.0	4.8	4.4	5.8	4.8	6.3	5.9	5.5	5.5	4.0	5.4	3.6	4.8						
24	7.2	5.7	5.2	5.2	5.8	3.7	4.3	2.8	3.8	2.5	4.9	3.8	7.2	4.6	5.9	6.0	4.8	4.9	4.9	3.7	4.9	4.3	5.2					
25	6.3	7.3	6.8	6.9	5.6	5.9	5.2	5.2	4.0	4.7	2.4	4.8	6.8	2.5	6.2	6.8	6.4	6.6	5.3	6.5	5.3	5.3	4.3	4.7				
26	6.8	6.8	6.8	5.3	6.8	5.2	4.8	4.2	4.3	3.5	4.3	1.7	6.2	2.8	5.5	6.6	5.6	4.8	5.6	5.8	5.8	4.9	5.8	3.8	4.3			
27	6.8	7.3	6.9	5.9	6.4	6.0	5.6	6.3	5.8	6.2	4.2	4.7	1.4	4.9	7.3	6.3	6.5	5.9	6.6	6.8	6.2	6.3	5.2	5.4	4.3	4.5		
28	7.8	6.0	5.8	6.3	5.8	4.9	4.6	5.2	4.0	4.8	2.8	2.3	5.3	1.9	6.8	6.3	5.9	5.4	5.3	5.8	6.8	5.2	4.9	4.4	3.2	2.5	5.0	

**Таблица 1.** Матрица субъективных различий между крестами. Номера строк и столбцов матрицы соответствуют номерам стимулов на рис. 1

лы, расположенная в *n*-мерном геометрическом пространстве. Для построения модели различения крестов необходимо определить минимальную размерность пространства и сферичность конфигурации точек.

Минимальная размерность или минимальное количество осей (декартовых координат) пространства, при котором расстояния между точками соответствуют исходным оценкам в матрице различий (Shepard, 1987), была определена на основе двух критериев: "стресса" — меры отличия полученных в результате шкалирования данных от исходных оценок различий и коэффициента корреляции — меры их сходства. Предпочтительным считается такое количество осей, при котором дальнейшее увеличение размерности не приводит к существенным изменениям значений "стресса" и коэффициента корреляции (изменения менее, чем на 5%), а функция зависимости этих показателей от размерности выходит на плато. Динамика значений "стресса" и коэффициента корреляции, представленная в табл. 2, указывает на то, что оптимальным является трехмерное решение. Дополнительным критерием правильности выбора минимальной размерности является возможность содержательной интерпретации осей полученного пространства (Shepard, 1987; Терехина, 1985).

Сферичность полученной конфигурации точек оценивали на основе коэффициента вариации, с помощью которого определяют степень отклонения экспериментальных данных от уравнения сферы. Значение коэффициента вариации не должно превышать 14% (Shepard, 1987; Терехина, 1985). Такое значение коэффициента вариации достигается при трехмерном решении (табл. 2),

Показатели	Размерность пространства											
Tiokasaro,m	1	2	3	4	5	6						
Стресс, s	0.39	0.21	0.14	0.12	0.09	0.08						
Коэффициент корреляции, r	0.61	0.75	0.86	0.88	0.91	0.92						
Коэффициент вариации, %	—	0.21	0.09	0.08	0.07	0.06						

Таблица 2. Показатели пространственной модели попарных различий между крестами

следовательно, полученная конфигурация точек представлена в виде трехмерной сферы.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведенный выше анализ формальных критериев размерности и сферичности позволил определить, что точки, обозначающие стимулы, расположились на поверхности трехмерной сферы, которая, в рамках векторного подхода (Sokolov, 1998; Измайлов и др., 1998; Измайлов, 1980) будет рассмотрена нами как модель нейронной сети детектирования симметричных крестов.

Сферическая модель различения крестов. В терминах сферической модели различения стимулов (Измайлов и др., 1998; Izmailov, Sokolov, 1991; Фомин и др., 1979), согласно которой интерпретировали полученную трехмерную сферу, декартовы координаты соответствуют характеристикам нейронных каналов, а сферические координаты субъективным признакам различения стимулов.



**Рис. 2.** Проекция точек, обозначающих стимулы, на горизонтальную плоскость трехмерного сферического пространства различения крестов. Декартовы координаты пространства представлены осью X1 (расположена горизонтально) и осью X2 (расположена вертикально). Номера точек соответствуют номерам стимулов на рис. 1.

При этом каждая значимая сенсорная характеристика стимулов обрабатывается двухканальным модулем (набором колонок корковых нейронов), который в сферической модели представлен плоскостью, образованной двумя декартовыми координатами (Измайлов и др., 1998).

Содержательное описание осей полученного сферического пространства осуществляли путем анализа проекции точек на двухмерные плоскости, образованные парами трех декартовых координат или осей, условно обозначенных X1, X2, X3. Проекция точек, обозначающих стимулы, на двухмерную плоскость, образованную осями Х1 и Х2, представлена на рис. 2. На рисунке видно, что точки расположились так, что максимальное значение по оси X1 принимают кресты, образованные горизонтальной и вертикальной и наклонными линиями, пересекающимися под углом 90°. Минимальное значение по оси X1 принимают кресты, образованные наклонными линиями, меньший угол между которыми составляет 10°. Нулевое значение по оси Х1 принимают кресты, образованные наклонными линиями, меньший угол между которыми составляет 60°. По-видимому, ось X1 отражает изменение величины меньшего угла между линиями, образующими крест, вне зависимости от того наклонными линиями он образован или парой линий вертикаль-горизонталь. В терминах векторной модели ось Х1 может быть представлена как предетектор крестов, который максимально активируется при предъявлении крестов, образованных линиями, пересекающимися под прямым углом, максимально тормозится при предъявлении креста, образованного наклонными линиями, образующими малый угол (10°), и не реагирует на кресты, у которых меньший угол между наклонными линиями составляет 60°.

На рис. 2 видно, что ось X2 имеет только положительный полюс. Максимальное значение по оси X2 принимают кресты, образованные наклонными линиями, меньший угол между которыми равен 60°. Кресты, образованные наклонными линиями, у которых значение меньшего угла между линиями изменяется от 20 до 90°, располагаются вдоль оси X2, при этом кресты, образованные наклонными линиями меньший угол между которыми составляет 80 и 45° (что пример-

но на  $20^{\circ}$  меньше или больше угла  $60^{\circ}$ ), принимают почти одинаковые значения по этой оси. Нулевое значение по оси Х2 принимают кресты, образованные наклонными линиями, меньший угол между которыми составляет 10°, или крестом, образованным горизонтальной и вертикальной линиями. На основе расположения точек вдоль оси Х2 можно предположить, что ось Х2 представляет предетектор крестов, который максимально активируется крестами, состоящими из наклонных линий, меньший угол между которыми равен 60°, и не реагирует на кресты, образованные наклонными линиями, меньший угол между которыми составляет  $10^{\circ}$ , а также на крест, образованный пересекающейся парой линий горизонталь-вертикаль.

Проекция точек, представляющих стимулы на двухмерную плоскость, образованную осями Х2 и Х3, представлена на рис. 3. На рисунке видно, что ось ХЗ имеет два полюса, максимальное значение по оси ХЗ (положительный полюс) занимают кресты, образованные наклонными линиями, с вертикальной ориентацией, а минимальное значение по оси ХЗ (отрицательный полюс) – кресты, образованные наклонными линиями, с горизонтальной ориентацией. Кресты с наклонной ориентацией в видимом поле расположились вдоль оси ХЗ в зависимости от ориентации всего креста в целом, а не его отдельных элементов. Ориентацию креста определяли по наклону биссектрисы его меньших углов к горизонтальной оси. Кресты, образованные пересекающимися вертикальной и горизонтальной линиями, и кресты, образованные двумя наклонными линиями, пересекающимися под углом 90°, на оси X3 занимают нулевое значение. На основе особенностей расположения точек вдоль оси ХЗ эту ось можно рассматривать как предетектор крестов, который максимально активируется крестами, образованными наклонными линиями. с вертикальной ориентацией в вилимом поле и максимально тормозится крестами, образованными наклонными линиями, с горизонтальной ориентацией в видимом поле. Данный предетектор крестов не реагирует на кресты, образованные парой линий горизонталь-вертикаль и двумя наклонными линиями, образующими прямой угол.

Каждая точка в полученном сферическом пространстве, представляющая детектор креста определенной формы и ориентации, характеризуется тремя декартовыми координатами, особенности которых рассмотрены выше, и двумя сферическими координатами. Для полученной конфигурации точек вычислили первую и вторую сферические координаты: первая сферическая координата или горизонтальный угол стимула в полученном пространстве вычисляется как arctg отношения X2 к X1, вторая сферическая координата или вертикальный угол стимула вычисляется



**Рис. 3.** Проекция точек, обозначающих стимулы, на вертикальную плоскость трехмерного сферического пространства различения крестов. Декартовы координаты пространства представлены осью X2 (расположена горизонтально) и осью X3 (расположена вертикально). Номера точек соответствуют номерам стимулов на рис. 1.

как arcos X3. Оказалось, что первая сферическая координата точек отражает изменение величины меньшего угла между линиями, образующими крест, что демонстрирует график на рис. 4. Значение второй сферической координаты изменяется в зависимости от ориентации биссектрисы меньшего угла между линиями, образующими крест, что показано на рис. 5. Величина угла между линиями, образующими крест, является количественной мерой формы этой фигуры, а ориентация биссектрисы этого угла — количественной мерой расположения креста в видимом поле.

Сходство полученного пространства с пространством крестообразных фигур (Чудина, Измайлов, 2011) позволило утверждать, что сферической моделью различения симметричных крестов является трехмерное пространство стимулов, точки в котором представляют детекторы симметричных крестов, три декартовы оси пространства отражают характеристики трех предетекторов этих фигур, две сферические координаты – субъективные признаки их зрительного анализа. Нейрофизиологическим аналогом полученной сферической модели симметричных крестов является часть зрительной системы, представленная иерархически организованной нейронной сетью, включающей последовательно соединенные блоки рецепторов, предетекторов и детекторов (Измайлов и др., 1998; Izmailov, Sokolov, 1991; Измайлов, 1980; Фомин и др., 1979), и преобразующей внешние сигналы в субъективный образ.



Рис. 4. График корреляционной связи первой сферической координатой пространства крестов (вертикальная ось графика) с величиной угла между линиями (горизонтальная ось графика). Наличие тесной корреляционной связи (r = 0.953) указывает на то, что с ростом величины угла между линиями увеличивается значение горизонтального угла точек, обозначающих стимулы.

Результатом активации этой нейронной сети является представление симметричных крестов в виде субъективного образа креста, характеризующегося формой, которая вычисляется как величина меньшего угла между линиями, образующими крест, и положением креста в видимом поле, которая вычисляется как ориентация биссектрисы этого угла. Нейронная сеть различения симметричных крестов использует иерархическую возбудительную конвергенцию от блока предетекторов крестов на блоке детекторов (Салтыков, 2001; Соколов, 1995; 1996), которые, по-видимому. представлены детекторами крестов. Основной вопрос, который встает, как именно осуществляется обработка сигнала блоком предетекторов. Поиск ответа связан с рассмотрением свойств предетекторов, представленных особенностями интерпретации декартовых осей полученной нами пространственной модели, и сопоставлением их с данными нейрофизиологических исследований.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нейронный механизм кодирования симметричных крестов. Нами было показано, что различение симметричных крестов осуществляется путем определения двух сенсорных характеристик: формы креста и его расположения в видимом поле. Согласно векторной модели детектирования стимулов в нервной системе (Соколов, 2003;



Рис. 5. График корреляционной связи второй сферической координатой пространства симметричных крестов (вертикальная ось графика) с биссектрисой угла между линиями (горизонтальная ось графика). Наличие тесной корреляционной связи (r = 0.921) указывает на то, что с ростом значения биссектрисы угла между линиями увеличивается значение вертикального угла точек, обозначающих стимулы.

Sokolov, 1998: Измайлов и др., 1998), для кодирования одной сенсорной характеристики необходима активация двухканального модуля. В случае различения симметричных крестов, результатом активации двухканальных модулей, использующихся для кодирования двух сенсорных характеристик, является трехканальная нейронная сеть. Другими словами, для кодирования формы и ориентации креста необходимо и достаточно участие трех предетекторов. Выявленные нами с применением сферической модели свойства предетекторов оказались сопоставимыми с характеристиками нейронов, обнаруженных в зрительной коре животных при помоши нейрофизиологических экспериментов (Кожухов, 2014; Шевелёв, 2010).

Нейрофизиологическим аналогом предетекторов крестов являются нейроны, обнаруженные в первичной зрительной коре кошки и обезьяны, с бимодальной ориентационной настройкой (Шевелёв, Шараев, 1985; Лазарева и др., 1986; 1992; 2013; Shevelev et al., 1993; 1994) и нейроны со смешенной динамической реакцией (Кожухов, 2014), которые можно обозначить как нейроны с мультимодальной (по аналогии с бимодальной ориентационной настройкой) ориентационной настройкой. Нейроны с бимодальной ориентационной настройкой максимально активируются двумя разными ориентациями одиночной линии, а нейроны с мультимодальной ориентационной настройкой активируются несколькими ориентациями линии.

Рассмотренная нами трехканальная нейронная сеть различения симметричных крестов является результатом взаимодействия всех ее элементов, и в свойствах предетекторов отражен интегральный результат срабатывания нейронов с бимодальной или мультимодальной ориентационной настройкой. Предполагается, что общий принцип срабатывания предетекторов крестов основан на том, что нейрон с бимодальными или мультимодальными свойствами сначала максимально активируется линией с одной ориентацией, затем – с другой, затем – с третьей ориентацией и так далее, потом цикл повторяется. В результате предетекторы крестов передают детекторам крестов сигналы о двух или более ориентациях одиночной линии, которые распознаются детекторами крестов как информация о пересечении двух линий.

Предетектор, соответствующий в полученной модели оси X1, представлен нейронами с бимодальной ориентационной настройкой, у которых два максимума настройки ортогональны (90°). Такие нейроны активируются при предъявлении двух линий, угол между которыми составляет 90°, и тормозятся при предъявлении двух линий с малым углом между ними (по нашим данным угол меньше или равен 10°). Наличие нейронов с такими свойствами подтверждается экспериментально, они обнаружены в коре кошки и встречаются в 37% случаев (Шевелев, 2010). Данный предетектор крестов может быть обозначен как предетектор наибольшего угла между составляющими его линиями. Такой предетектор передает информацию сначала об одной ориентации линии, затем о другой ориентации линии (затем цикл повторяется) детекторам крестов, избирательно настроенным на форму креста. Последние в свою очередь активируются не отдельными ориентациями линии, а в ответ на предъявление определенного угла, образованного пересечением линий с разной ориентацией.

Предетектор, соответствующий оси X2, представлен нейронами с бимодальной ориентационной настройкой, у которых угол между двумя максимумами настройки равен примерно 60°. Такие нейроны активируются двумя линиями, расположенными под углом 60° друг к другу, и не реагируют соответственно на линии, расположенные ортогонально друг другу или под углом от 0 до 10°. Были найдены нейроны с бимодальной ориентационной настройкой, у которых угол между максимумами настройки составлял 67°. Такие нейроны оказались самыми многочисленными, в зрительной коре кошки они составляют примерно 46% среди нейронов с бимодальной настройкой (Шевелев, 2010). Этот предетектор крестов на основе его свойств обозначим как предетектор среднего угла между линиями. Здесь встает вопрос, почему средний угол составляет  $60^{\circ}$  (почти  $70^{\circ}$  по результатам нейрофизиологических экспериментов), а не  $45^{\circ}$ . Очевидно, это связано с особенностями зрительной среды, в которой кресты с углом  $45^{\circ}$  встречаются реже, чем кресты с углом  $70^{\circ}$ , являющиеся более многочисленными элементами трехмерной сцены. Однако нейроны с бимодальной ориентационной настройки равен  $45^{\circ}$ , так же обнаружены в зрительной коре и составляют примерно 17% бимодальных нейронов (Шевелев, 2010).

Предетектор, соответствующий оси Х3, представлен нейронами со смешанной динамической реакцией на предпочитаемую ориентацию. В ответах таких нейронов периоды стабильной настройки сменяются периодами нестабильности, когда клетка начинает генерировать в ответ на другую предпочитаемую ориентацию, затем следует смещение избирательной чувствительности на следующую ориентацию и так далее (Кожухов, 2014). Такие нейроны, обозначенные нами как нейроны с мультимодальной ориентационной настройкой, сначала максимально реагируют на определенным образом ориентированную линию, затем на линию другой ориентации, затем на линию третьей ориентации и так далее. Получается последовательное сканирование нескольких ориентаций линии. В частности, обнаружены нейроны со смешенной динамикой ориентационной настройкой, которые сначала максимально реагируют на линию с ориентацией 45°, затем на линию с ориентацией 90°, затем на линию с ориентацией 135°, а затем снова на линию с ориентацией 45° (Кожухов, 2014). Такие нейроны передают информацию детекторам крестов, избирательно настроенным на разные ориентации креста конкретной формы. Обязательным условием для этого является способность нейронов со смешенной динамической настройкой активироваться наклонной линией, ориентация которой изменяется с одинаковым шагом. Константность шага при сканировании ориентированных линий позволяет предетекторам передавать сигнал детектору о стабильности формы креста и, одновременно, об изменении его наклона в видимом поле. Предетекторы, выполняющие такую функцию, можно обозначить как предетекторы ориентации креста.

Предетектор ориентации креста, по нашим данным, не реагирует на прямоугольные кресты, образованные парой линий горизонталь-вертикаль или двумя наклонными линиями, пересекающимися под прямым углом. Такая особенность связана с тем, что прямоугольные кресты являются фигурами исключениями, ориентация которых в видимом поле определена как нулевая. По-

#### ЧУДИНА



Рис. 6. Блок-схема нейронной сети детектирования в зрительной системе симметричных крестов, представленная тремя уровнями нейронных элементов: рецепторами, предетекторами и детекторами.

видимому, прямоугольные кресты, являются фигурами, идентификация которых необходима для структурирования видимой сцены, как в случае распознавания объемного изображения, так и плоскостного.

Три предетектора крестов (предетектор наибольшего угла, предетектор среднего угла и предетектор ориентации креста) взаимодействуют и образуют трехканальную нейронную сеть, результатом срабатывания которой является избирательная активация соответствующих детекторов крестов, избирательно настроенных на зрительное распознавание симметричных крестов определенной формы и определенным образом расположенных в видимом поле. Форма креста вычисляется по величине угла между образующими его линиями, расположение креста определяется по ориентации биссектрисы этого угла.

Блок-схема нейронной сети детектирования симметричных крестов. Обобщая полученные результаты построим блок-схему нейронной сети различения симметричных крестов (рис. 6). Детектирование симметричных крестов в зрительной системе осуществляет нейронная сеть, состоящая из трех уровней нервных элементов: рецепторов, предетекторов и детекторов. Уровни элементов этой нейронной сети имеют иерархическую организацию и связаны между собой конвергентными возбуждающими связями. Уровень рецепторов представлен нейронами сетчатки и латерального коленчатого тела. Уровень предетекторов включает три предетектора: предетектор наибольшего угла между линиями креста, предетектор среднего угла между линиями креста и предетектор ориентации креста, которые представлены двумя типами детекторов линий: детекторами линий с бимодальной ориентационной настройкой и детекторами линий с мультимодальной ориентационной настройкой. Связи от предетекторов крестов конвергируют на детекторах крестов.

Определение формы креста обеспечивается конвергенцией на детекторе крестов связей от детекторов линий с бимодальной ориентационной настройкой, а определение расположения креста в видимом поле обеспечивается конвергенцией на детекторах крестов связей от детекторов линий с мультимодальной ориентационной настройкой или смешенной динамической настройкой на предпочитаемую ориентацию. Уровень детекторов представлен нейронами-детекторами крестов, избирательно настроенными на кресты разной формы и локализации в видимом поле.

## выводы

Распознавание симметричных крестов осуществляется зрительной системой на основе векторного кодирования и путем выделения двух сенсорных признаков: формы креста, определяемой по величине угла между линиями, образующими крест, и его расположения в видимом поле, которое определяется по ориентации биссектрисы этого угла.

Детектирование симметричных крестов в зрительной системе осуществляется трехканальной нейронной сетью, которая является результатом взаимодействия трех предекторов крестов: предетектора наибольшего угла между линиями креста, предетектора среднего угла между линиями креста ста и предетектора ориентации креста. Предетекторы крестов представлены двумя типами детекторов линий: детекторами линий с бимодальной (нестабильной) ориентационной настройкой и детекторами линий с мультимодальной (смешенной динамической) ориентационной настройкой.

Набор корковых колонок, специализирующихся на детектировании формы креста, представлен взаимодействием нейронов-детекторов с бимодальной ориентационной настройкой, набор корковых колонок детектирования локализации креста в видимом поле представлен взаимодействием нейронов-детекторов линий с динамической настройкой на предпочитаемую ориентацию или с мультимодальной ориентационной настройкой.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Измайлов Ч.А. Культурная эволюция и цветовое восприятие. Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека "Дубна". 2010. № 3. С. 32-41.
- Измайлов Ч.А. Сферическая модель цветоразличения. М.: Изд-во Московского ун-та, 1980. 171 с.
- Измайлов Ч.А., Исайчев С.А., Шехтер Е.Д. Двухканальная модель различения сигналов в сенсорных системах. Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 1998. Т. 14. № 3. С. 29–40.
- Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Едренкин И.В. Интегрирование простых признаков стимула в нейронных сетях зрительной системы. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* 2008. № 5–6. С. 34–46.
- Измайлов Ч.А., Чудина Ю.А. Конфигурационные и категориальные характеристики зрительного восприятия схематических фигур. Вестник РУДН. Серия Психология и педагогика. 2004. № 2. С. 210–228.
- Кожухов С.А. Взаимосвязь динамических характеристик ответов нейронов первичной зрительной коры и кодирования признаков изображения. Дисс. ...канд. биол. наук. Москва. 2014. 161 с.
- Лазарева Н.А., Кожухов С.А., Иванов Р.В., Новикова Р.В., Тихомиров А.С., Цуцкиридзе Д.Ю., Бондарь И.В. Сравнение ориентационной настройки и ее динамики у нейронов в различных функциональных доменах первичной зрительной коры. *Журнал высш. нерв. деят.* 2013. Т. 63. № 2. С. 205– 217.
- Лазарева Н.А., Новикова Р.В., Тихомиров А.С., Шевелёв И.А. Различие свойств двух групп ориента-

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 32 № 4 2018

ционных детекторов зрительной коры кошки. *Нейрофизиология.* 1986. Т. 18. № 1. С. 85–92.

- Лазарева Н.А., Шевелев И.А., Новикова Р.В., Тихомиров А.С., Шараев Г.А. Двойная ориентационная настройка нейронов первичной зрительной коры кошки при разных уровнях бодрствования. *Нейрофизиология*. 1992. Т. 24. № 3. С. 260–269.
- Салтыков К.А. Нейрофизиологическое и модельное исследование нейронов-детекторов простых и сложных изображений в первичной зрительной коре кошки. Дисс. ...канд. биол. наук. Москва. 2001. 137 с.
- Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс: новый взгляд. М.: Изд-во УМК "Психология", 2003. 287 с.
- Соколов Е.Н. Проблема гештальта в нейробиологии. Журн. высш. нервн. деят. 1996. Т. 46. № 2. С. 229– 240.
- Соколов Е.Н. Принцип векторного кодирования в психофизиологии. Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 1995. № 4. С. 3–13.
- Терехина А.Ю. Анализ данных методом многомерного шкалирования. М.: Наука, 1985. 168 с.
- Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. Искусственные органы чувств. Л.: Наука, 1979. 180 с.
- Чудина Ю.А. Конфигурационный механизм различения изображений. Вестник РУДН. Серия Психология и педагогика. 2012. № 1. С. 85–93.
- Чудина Ю.А., Измайлов Ч.А. Конфигурационный механизм различения крестообразных фигур. Вестник РУДН. Серия Психология и педагогика. 2011. № 5. С. 7–18.
- Шевелев И.А. Нейроны-детекторы зрительной коры: ревизия свойств и механизмов. М.: Наука, 2010. 182 с.
- Шевелев И.А. Зрительная кора. Физиология зрения. Под ред. Бызова А.Л. М.: Наука, 1992. С. 263–267.
- Шевелёв И.А. Нейроны зрительной коры. Адаптивность и динамика рецептивных полей. М.: Наука, 1984. 231 с.
- Шевелёв И.А., Шараев Г.А. Таймеры и сканеры среди ориентационных детекторов зрительной коры. *Нейрофизиология*. 1985. Т. 17. № 1. С. 35–43.
- Hartline H.K. The receptive fields of optic nerve fibers. *Amer J. Physiol.* 1940. V. 130. P. 700–711.
- Hartline H.K., Ratliff F. Inhibitory interaction of receptor units in the eye of Limulus. J. Gen. Physiol. 1957. V. 40. P. 357–376.
- Hubel D.H. *Eye, brain and vision*. N.Y. Sci. Amer. Library Ser. 22, 1988. 240 p.
- Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Spherical model of color and brightness discrimination. *Psychological Science*. 1991. V. 2. P. 249–259.
- Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Multidimensional scaling of lines and angles discrimination. *Psychophysical Explorations of Mental Structures*. Ed. Geissler H.G. Toronto-Bern-Stuttgart, Hogrefe and Huber Publishers, 1990. P. 181–189.
- Izmailov Ch.A., Zimachev M.M. Detection of bimodal stimuli in the frog retina. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2008. T. 38. № 2. C. 103–114.
- Shepard R.N. Towards a universal law of generalization for psychological space. *Science*. 1987. V. 237. P. 1317– 1323.

- Shevelev I.A., Kamenkovich V.M., Sharaev G.A. The role of line and corners of geometric figures in recognition performance. *Acta neurobiol. exp.* 2003. V. 63. P. 361–368.
- Shevelev I.A., Lazareva N.A., Novikova R.V., Tikhomirov A.S., Sharaev G.A. Bimodal orientation tuning and detection of crosses and angles in cat visual cortex. *Perception*. 1993. V. 22S. P. 138.
- Shevelev I.A., Lazareva N.A., Novikova R.V., Tikhomirov A.S., Sharaev G.A. Double orientation tuning of units in cat visual cortex. *Neuroscience*. 1994. V. 61. P. 965–973.
- Sokolov E.N. Model of cognitive processes. *Advances in Psychological Science*. Eds. Sagaurin M., Craik T. Sussecs, UK: Psychol Press, 1998. V. 2. P. 355–378.

# Neural encoding mechanism of the symmetrical crosses in the visual system

# Yu. A. Chudina<sup>#</sup>

National research centre "Kurchatov Institute", 123182 Moscow, PL. Akademika Kurchatova, 1, Russia <sup>#</sup>e-mail: renyxa4@yandex.ru

A comparison of the results of the psychophysical experiment, interpreted in terms of the vector model of signal encoding in the nervous system, with the data presented in the literature studies of the properties of neurons in the visual cortex helped to identify the neural mechanism of detection of symmetric crosses. The visual perception of symmetrical crosses by dedicating two sensory characteristics: shape and location of the cross in the visual field. A neural network encoding symmetric crosses is the result of the interaction of three types of neurons-detectors of lines in the visual cortex with different detector properties.

*Key words:* visual perception of symmetric crosses, subjective evaluation of differences between pairs of images, multidimensional scaling, vector coding model in the nervous system, block diagram of neural network of symmetric crosses coding

# REFERENCES

- Chudina Yu.A. Konfiguracionnyj mekhanizm razlicheniya izobrazhenij [The configuration mechanism of distinguishing the images]. *Vestnik RUDN. Seriya Psihologiya i pedagogika*. [Bulletin of RUDN. Series of Psychology and pedagogy] . 2012. № 1. P. 85–93 (in Russian).
- Chudina Yu.A., Izmajlov Ch.A. Konfiguracionnyj mekhanizm razlicheniya krestoobraznyh figure [The configuration mechanism of distinguishing cross-shaped figures]. *Vestnik RUDN. Seriya Psihologiya i pedagogika* [Bulletin of RUDN. Series of Psychology and pedagogy]. 2011. № 5. P. 7–18 (in Russian).
- Fomin S.V., Sokolov E.N., Vajtkyavichus G.G. *Iskusstvennye organy chuvstv* [Artificial senses] Leningrad. Nauka Publ, 1979. 180 p. (in Russian).
- Hartline H.K. The receptive fields of optic nerve fibers. *Amer J. Physiol.* 1940. V. 130. P. 700–711.
- Hartline H.K., Ratliff F. Inhibitory interaction of receptor units in the eye of Limulus. J. Gen. Physiol. 1957. V. 40. P. 357–376.
- Hubel D.H. *Eye, brain and vision*. N.Y. Sci. Amer. Library Ser. 22, 1988. 240 p.
- Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Spherical model of color and brightness discrimination. *Psychological Science*. 1991. V. 2. P. 249–259.
- Izmailov Ch.A., Zimachev M.M. Detection of bimodal stimuli in the frog retina. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2008. T. 38. № 2. C. 103–114.
- Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Multidimensional scaling of lines and angles discrimination. *Psychophysical Explorations of Mental Structures*. Ed. Geissler H.G. Toronto-Bern-Stuttgart, Hogrefe and Huber Publishers, 1990. P. 181–189.

- Izmajlov Ch.A. Kul'turnaya ehvolyuciya i cvetovoe vospriyatie [Cultural evolution and color perception]. *Psihologicheskij zhurnal Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna"* [Psychological journal of International University of nature, society and man "Dubna"]. 2010. № 3. P. 32–41 (in Russian).
- Izmajlov Ch.A. *Sfericheskaya model' cvetorazlicheniya* [Spherical model of color differentiation] M.: Publishing of Moscow University, 1980. 171 p. (in Russian).
- Izmajlov Ch.A., Chudina Yu.A. Konfiguracionnye i kategorial'nye harakteristiki zritel'nogo vospriyatiya skhematicheskih figur [Configuration and categorical characteristics of the visual perception of schematic figures]. *Vestnik RUDN. Seriya Psihologiya i pedagogika* [Bulletin of RUDN. Series of Psychology and pedagogy]. 2004. № 2. P. 210–228 (in Russian).
- Izmajlov Ch.A., Isajchev S.A., Shekhter E.D. Dvuhkanal'naya model' razlicheniya signalov v sensornyh sistemah [The two-channel model of discrimination of signals in sensory systems] *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psihologiya* [The Moscow University Bulletin. Series 14: Psychology]. 1998. V. 14. № 3. P. 29–40 (in Russian).
- Izmajlov Ch.A., Sokolov E.N., Edrenkin I.V. Integrirovanie prostyh priznakov stimula v nejronnyh setyah zritel'noj sistemy [Integration of simple characteristics of the stimulus in the neural networks of the visual system]. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. [Neurocomputers: development, application]. 2008. № 5–6. P. 34–46 (in Russian).
- Kozhuhov S.A. Vzaimosvyaz' dinamicheskih harakteristik otvetov nejronov pervichnoj zritel'noj kory i kodirovaniya priznakov izobrazheniya. Diss. kand. biol. nauk. Moskva [The relationship of dynamic characteristics of re-

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 32 № 4 2018

sponses of neurons in primary visual cortex and the encoding of image features. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow. 2014. 161 p. (in Russian).

- Lazareva N.A., Kozhuhov S.A., Ivanov R.V., Novikova R.V., Tihomirov A.S., Cuckiridze D.Yu., Bondar' I.V. Sravnenie orientacionnoj nastrojki i ee dinamiki u nejronov v razlichnyh funkcional'nyh domenah pervichnoj zritel'noj kory [Comparison of orientation tuning and dynamics in neurons in different functional domains of primary visual cortex]. *Zhurnal vyssh. nerv. deyat.* [I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity]. 2013. T. 63. № 2. S. 205–217 (in Russian).
- Lazareva N.A., Novikova R.V., Tihomirov A.S., SHevelyov I.A. Razlichie svojstv dvuh grupp orientacionnyh detektorov zritel'noj kory koshki [The difference in properties of two groups of orientation detectors in the visual cortex of the cat]. *Nejrofiziologiya* [Neurophysiology]. 1986. V. 18. № 1. P. 85–92 (in Russian).
- Lazareva N.A., Shevelyov I.A., Novikova R.V., Tihomirov A.S., Sharaev G.A. Dvojnaya orientacionnaya nastrojka nejronov pervichnoj zritel'noj kory koshki pri raznyh urovnyah bodrstvovaniya [Double orientation tuning of neurons in primary visual cortex of the cat at different levels of wakefulness]. *Nejrofiziologiya* [Neurophysiology]. 1992. V. 24. № 3. P. 260–269 (in Russian).
- Saltykov K.A. Nejrofiziologicheskoe i model'noe issledovanie nejronov-detektorov prostyh i slozhnyh izobrazhenij v pervichnoj zritel'noj kore koshki. Diss. kand. biol. nauk. [Neurophysiological and modeling study of neuronsdetectors of simple and complex images in primary visual cortex of the cat. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow. 2001. 137 p. (in Russian).
- Shepard R.N. Towards a universal law of generalization for psychological space. Science. 1987. V. 237. P. 1317– 1323.
- Shevelev I.A. Nejrony-detektory zritel'noj kory: reviziya svojstv i mekhanizmov [Neurons-detectors of the visual cortex: a revision of the properties and mechanisms]. Moscow. Nauka Publ, 2010. 182 p. (in Russian).
- Shevelev I.A. Zritel'naya kora. [Visual cortex]. *Fiziologiya* zreniya [Physiology of vision]. Moscow. Nauka Publ, 1992. P. 263–267 (in Russian).

- Shevelev I.A., Kamenkovich V.M., Sharaev G.A. The role of line and corners of geometric figures in recognition performance. *Acta neurobiol. exp.* 2003. V. 63. P. 361–368.
- Shevelev I.A., Lazareva N.A., Novikova R.V., Tikhomirov A.S., Sharaev G.A. Bimodal orientation tuning and detection of crosses and angles in cat visual cortex. *Perception.* 1993. V. 22S. P. 138.
- Shevelev I.A., Lazareva N.A., Novikova R.V., Tikhomirov A.S., Sharaev G.A. Double orientation tuning of units in cat visual cortex. *Neuroscience*. 1994. V. 61. P. 965–973.
- Shevelyov I.A. *Nejrony zritel'noj kory. Adaptivnost' i dinamika receptivnyh pole* [Neurons in the visual cortex. Adaptability and dynamics of receptive fields]. Moscow. Nauka Publ., 1984. 231 p. (in Russian).
- Shevelyov I.A., Sharaev G.A. Tajmery i skanery sredi orientacionnyh detektorov zritel'noj kory. [Timers and scanners among orientation detectors in the visual cortex]. *Nejrofiziologiya* [Neurophysiology]. 1985. V. 17. № 1. P. 35–43 (in Russian).
- Sokolov E.N. Model of cognitive processes. Advances in Psychological Science. Eds. Sagaurin M., Craik T. V. 2. Sussecs, UK: Psychol Press, 1998. P. 355–378.
- Sokolov E.N. Princip vektornogo kodirovaniya v psihofiziologii [The principle of vector coding in neuroscience] Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psihologiya [The Moscow University Bulletin. Series 14: Psychology]. 1995. № 4. P. 3–13 (in Russian).
- Sokolov E.N. Problema geshtal'ta v nejrobiologii [The Gestalt problem in neurobiology]. *Zhurn. vyssh. nervn. Deyat.* [I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity]. 1996. T. 46. № 2. S. 229–240 (in Russian).
- Sokolov E.N. Vospriyatie i uslovnyj refleks: novyj vzglyad [Perception and the conditioned reflex: a new look.]. M.: Izd-vo UMK "Psihologiya"; Moskovskij psihologo-social'nyj institute [Publishing of UMK "Psychology"; Moscow psychology-social Institute]. 2003. 287 p. (in Russian).
- Terekhina A.Yu. *Analiz dannyh metodom mnogomernogo shkalirovaniya* [Data analysis by multidimensional scaling]. Moscow. Nauka Publ, 1985. 168 p. (in Russian).