

Конфигуративные и категориальные характеристики зрительного восприятия

Ч. А. Измайлов
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

1. Цель доклада — показать, что анализ конфигуративных и категориальных характеристик зрительного стимула осуществляется разными механизмами. Это служит основанием для формулировки следующего положения:

Механизм категориальной спецификации зрительных стимулов (как целостных, предметных образов, гештальтов), не имеет генетической связи с механизмом спецификации стимульных конфигураций (как паттернов, образованных линиями и плоскостями разной ориентации и кривизны).

Это положение основывается на двух особенностях нейронных сетей, которые выявились в наших исследованиях по различению зрительных стимулов. Первая особенность состоит в том, что в иерархической структуре нервной сети, осуществляющей построение конфигуративной основы зрительного образа (паттерна), как результата последовательных преобразований проксимального стимула, **формирование вышележащего уровня из нижележащих модулей в значительной степени произвольно. Комбинацию этих модулей можно выявить апостериорно, путем исследования связей данного конкретного уровня сети с нижележащими модулями, но выявленное правило не будет общим.**

Второе положение состоит в том, что эта конфигуративная сеть и нервная сеть, осуществляющая категоризацию зрительного образа, превращение паттерна в целостную, константную, предметную форму, полностью независимы. **Категориальная нервная сеть не является высшим уровнем конфигуративной сети, как это обычно предполагается в**

значительном большинстве психологических и нейрофизиологических теориях восприятия формы. Более того, категориальная сеть существенно проще устроена, чем конфигуративная.

Для обоснования этого положения я приведу результаты экспериментов с различением простых (линий, углов) и сложных (схематических изображений человеческого лица и циферблата часов) конфигураций.

(СЛАЙДЫ 3, 4, 5 И 6)

2. Процедуры эксперимента и математической обработки исходных данных во всех случаях одни и те же. Испытуемому предъявляется пара стимулов, последовательно сменяющих друг друга. Испытуемый либо оценивает степень субъективного различия между стимулами в баллах от 0 (полная идентичность) до 9 (максимальное различие), либо просто смотрит на мгновенно сменяющие друг друга два стимула, и в каждый момент смены регистрируется вызванный потенциал, который мы называем вызванный потенциал различения (ВПР).

(СЛАЙД 7)

3. На слайде приводится пример зрительного вызванного потенциала различения, полученного в ответ на мгновенную смену стимулов (ВПР). Наиболее выраженными в данном потенциале являются два позитивных и два негативных среднелатентных пика. В наших работах показано, что а) амплитуда компонента N1(N87) монотонно увеличивается с увеличением как хроматического различия между стимулами, так и ахроматического, б) пиковая амплитуда компонента N1 высоко коррелирует с межпиковой амплитудой N1P1 (N87-P120). Пиковая амплитуда компонента P1 коррелирует с межпиковой амплитудой P1N2 (P120-N180), а пиковая амплитуда компонента N2 коррелирует с межпиковой амплитудой N2P3 (N180-P230). Эти два компонента монотонно связаны с субъективными оценками конфигуративных и категориальных различий между стиму-

лами, представляющими собой отдельную линию или комбинацию нескольких линий (линейный паттерн). В связи с этим, в наших работах мы обычно анализируем межпиковые амплитуды, которые более устойчивы и по латенции, и по амплитуде.

4. В результате попарного предъявления набора стимулов образуется матрица больших различий, которая анализируется методом многомерного шкалирования .

(СЛАЙД 8 И 9)

В результате анализа строится геометрическая модель различения стимулов в виде координатного пространства минимальной размерности, в котором точки-стимулы располагаются так, чтобы межточечные расстояния максимально точно соответствовали экспериментальным оценкам попарных различий в исходной матрице. Пространственная модель различения стимулов определяется двумя параметрами: минимальной размерностью пространства и конфигурацией точек-стимулов. Для оценки минимальной размерности используются разные формальные критерии, суть которых заключается в оценке соответствия межточечных расстояний в полученном пространстве исходным мерам межстимульных различий. В наших работах мы используем для оценки размерности такие показатели как “стресс” и коэффициент корреляции Пирсона. Далее, в соответствии со сферической моделью различения стимулов, для каждой полученной конфигурации точек определяется оптимальное положение начала осей координат (геометрический центр конфигурации) так, чтобы радиус-векторы всех точек были равны. Вследствие случайных ошибок длина радиус-вектора имеет разброс в некотором диапазоне, который оценивается по дисперсии всех радиус-векторов. Для числовой оценки этого разброса используется коэффициент вариации, как отношение одного стандартного отклонения к средней длине

радиус-вектора. Таким образом, чем меньше коэффициент вариации и стресс при максимально возможном коэффициенте корреляции, тем лучше соответствие полученного решения сферической модели. В наших работах принимается вывод о том, что **данное множество стимулов может быть представлено сферической моделью различения, если эти показатели не выходят за пределы 10 %.** (Т.е. стресс и коэффициент вариации не превышают величину 0.1, а значение коэффициента корреляции не менее 0.9.)

5. На следующих слайдах представлены результаты многомерного шкалирования различения ориентаций линии, различение линий разной ориентации и различения углов разной величины.

(СЛАЙДЫ 10,11,12,13,14,15)

В каждом случае пространственное положение точек-стимулов имеет явно выраженную циркулярность, обосновывающую сферическую модель различения для этих стимулов, и определяется одной и той же системой уравнений

(СЛАЙД 16)

Первое уравнение выражает пространственную характеристику модели, то есть представление стимулов, как точек окружности в пространстве X_1X_2 , а второе уравнение выражает метрику модели, - что воспринимаемое различие между ориентациями линий измеряется как евклидово расстояние между точками этой окружности. Психофизическая функция, связывающая воспринимаемую ориентацию - φ и физический угол α между данной линией и горизонталью на фронтальной плоскости наблюдения, выражается уравнением (4). Эти выражения совершенно аналогично уравнениям, связывающим светлоту стимула с фотометрической яркостью в сферической модели цветоразличения. Обратите внимание, что **структура субъективного пространства опреде-**

ляется не сложностью конфигурации стимульного паттерна (одна линия, или комбинация двух линий), а субъективной переменной (ориентация линии или величина угла).

В соответствии со сферической моделью различения стимулов декартова система координат субъективного пространства представляет двухканальную нейронную сеть зрительной системы, которая осуществляет различение данной субъективной переменной.

6. Теперь обратимся к слайдам, которые представляют результаты анализа ВПР для таких простых стимулов, как ориентация линии.

(СЛАЙДЫ 17 И 18)

Данные для амплитуды компонента N180-P230, зарегистрированные как в затылочных, так и в задне-височных отведениях обоих полушарий, показывают хорошую согласованность с данными субъективных оценок. Это означает, что **нейронная сеть обрабатывает субъективную переменную, а не физические характеристики стимула**. Обратите внимание, что пространство, соответствующее субъективным оценкам, получено для более позднего из средне-латентных компонентов ВПР, а более ранний компонент P120-N180, характеризующий энергетическую яркость стимула, показывает редуцированное решение, в котором представлена только одна из осей двумерного пространства.

(СЛАЙДЫ 19 И 20)

5. А теперь обратимся к стимулам, в которых эти две субъективные переменные меняются одновременно — схематическому изображению циферблата часов. В первом эксперименте с этими стимулами испытуемые оценивали различие между фигурами, состоящими из двух пересекающихся линий внутри овала, а испытуемым другой группы указывалось, что это схематические циферблаты часов с линиями-стрелками, и нужно оценить различия во времени, которое они показывают.

(СЛАЙД 21)

После анализа двух этих матриц методом многомерного шкалирования были получены следующие результаты.

7. Для данных конфигуративного различения было получено трехмерное пространство, в котором две сферические координаты точки-стимула задают соответственно ориентацию угла, образованного двумя линиями-стрелками, и величину этого угла.

(СЛАЙДЫ 22 И 23)

На горизонтальной плоскости трехмерного пространства видно, что точки-стимулы сгруппированы в четыре кластера в соответствии с ориентацией угла во фронтальной плоскости, независимо от величины угла между стрелками. Но график зависимости сферической координаты точки от ориентации биссектриссы угла показывает, что внутри кластера точки располагаются в строгом соответствии с ориентацией стимула.

(СЛАЙД 24)

Это означает, что горизонтальная плоскость различения данных стимулов представляет тот же самый двухканальный механизм различения ориентации, который был получен в экспериментах с ориентацией линий, и который был представлен выше системой уравнений пространственной и метрической спецификации стимулов.

На вертикальной плоскости трехмерного пространства видно, что точки-стимулы располагаются относительно оси X3 в соответствии с величиной угла, независимо от его ориентации.

(СЛАЙД 25)

График зависимости второй сферической координаты точки от величины угла показывает, что точки-стимулы располагаются в вертикальной плоскости в строгом соответствии с величиной угла между стрелками.

(СЛАЙД 26)

Если спроецировать данную сферу на вертикальную плоскость полученного трехмерного пространства, мы получим подпространство, которое представляет двухканальный механизм различения величины угла.

(СЛАЙД 27)

Сравнивая это подпространство с пространством, полученным для стимулов-углов, различаемых только по величине угла, мы обнаруживаем их полную идентичность.

(СЛАЙД 28)

Таким образом, полученное трехмерное пространство конфигуративного различения схематических циферблатов часов, состоит из двух двумерных пространств.

8. В терминах сферической модели различения зрительных стимулов, представленной двухканальным нейронным механизмом, это означает, что два двухканальных механизма детекции простых одномерных субъективных признаков — ориентации и величины угла — объединяются в общую трехканальную сеть таким образом, что детекция сложного двумерного признака происходит по принципу аддитивной комбинации исходных составляющих.

Я обращаю ваше внимание на то, что этот вариант соединения двух простых двухканальных механизмов в общую сеть никак не следует из их свойств. Это один из многих возможных вариантов образования сети. Например, общая сеть различения цветовых стимулов — излучений разного спектрального состава и интенсивности — также образуется путем комбинации двух двухканальных механизмов, хроматического, детектирующего цветовой тон стимула путем анализа спектрального состава излучения, и ахроматического, детектирующего светлоту стимула путем анализа интенсивности излучения.

(СЛАЙД 29)

Однако, здесь они соединяются в четырехканальную сеть, в результате чего образуется новая независимая переменная в сети (третья сферическая координата) которая представлена в субъективном образе, как насыщенность цвета. Эта субъективная характеристика стимула не имеет никакого отношения к излучению, она является чистым артефактом строения общей нейронной сети цветового зрения, результатом специфического объединения двух базисных двухканальных механизмов. Если бы конфигуративная сеть составлялась бы также как цветовая, в нашем субъективном опыте различение двух пересекающихся линий во фронтальной плоскости характеризовалось бы не только ориентацией и величиной, но еще каким-то дополнительным признаком. Такое устройство сети можно определить как механизмическое, а не генетическое.

9. Рассмотрим теперь результаты эксперимента с этими же стимулами — схематическими циферблатами часов — когда испытуемые различают их по такой категории, как время дня. В этом случае мы получаем двумерное пространство, в котором точки располагаются по окружности в соответствии с показанием времени.

(СЛАЙД 30)

Данная локализация точек уже никак не связана с конфигуративным пространством этих же стимулов. Если между общим конфигуративным пространством различения данных стимулов и образующими его двухканальными модулями существует механизмическая связь, которую можно выявить апостериори, то между категориальным пространством различения данных стимулов и образующими стимульную конфигурацию двухканальными модулями нет и такой связи.

10. С усложнением зрительного стимула его категориальная характеристика еще более отделяется от конфигурации стимульного паттерна.

Обратимся к результатам различения эмоциональной экспрессии схематического изображения человеческого лица

(СЛАЙД 31)

Многомерное шкалирование оценок субъективных различий между эмоциональными выражениями схематических лиц выявило для анализируемых стимулов четырехмерное пространство, с достаточно высокой сферичностью ($r = 0,97$ и $k_v = 9,7 \%$). Анализ локализации точек-стимулов в сферическом пространстве выявил следующие конфигуративные характеристики для четырех декартовых осей координат. Первая ось пространства различения схематических лиц, как механизм детектирования линии рта. Ось X1 ориентирована так, что проекции точек-стимулов на эту ось (значение координаты X1 для каждой точки) соответствует по знаку и величине кривизне рта на схематическом лице. Вторая ось этого пространства интерпретируется как механизм детектирования наклона бровей. Ось X2 ориентирована так, что проекции точек-стимулов на эту ось (значение координаты X2 для каждой точки) соответствуют по знаку и величине наклону бровей на схематическом лице. Ориентация оси X3 определяется по таким конфигурационным характеристикам, как минимальная (горизонтальное расположение бровей и линии рта) и максимальная (суммарный изгиб рта и бровей) кривизна черт лица. Ось X3 ориентирована так, что точка 5, представляющая лицо с нулевой кривизной рта и горизонтальным положением бровей, располагались на максимальном удалении по этой оси от точек 1, 3, 7, 9, представляющих стимулы с максимальной кривизной рта и максимальным наклоном бровей. Кроме того, остальные точки (2, 4, 6, и 8), представляющие стимулы с промежуточными значениями суммарной кривизны паттерна, расположены по оси X3 между этими двумя локусами. Это значит, что эту ось координат можно рассматривать как механизм зрительной системы, детектирующий степень суммарной кривизны черт

лица, независимо от их локализации на верхней или нижней части лица и независимо от знака кривизны. В отличие от канала, представленного осью X3, где все изгибы черт лица суммируются независимо от того, какую часть лица они характеризуют, в канале, представленном осью X4, абсолютное значение кривизны рта вычитается из абсолютного значения наклона бровей. Справедливость этих положений демонстрируют графики зависимости соответствующих координат точек-стимулов от конфигуративных характеристик стимулов.

(СЛАЙД 32)

Рассмотрим теперь сферические координаты точек в этом пространстве. Четырехмерное евклидово пространство в котором расположена данная сфера эмоциональной экспрессии предусматривает три независимые сферические координаты, аналогично цветовой сфере. Это математическое сходство двух моделей привело Е.Н. Соколова к идее представить эмоцию по аналогии с цветом в терминах трех субъективных переменных: эмоциональный тон, эмоциональная насыщенность и эмоциональная интенсивность. В нашей работе (Измайлов, Соколов, Коршунова, 1999) мы предприняли попытку удостовериться в такой интерпретации сферических координат пространства эмоциональной экспрессии схематического лица. С моей точки зрения она оказалась неубедительной.

(СЛАЙД 33)

Рассмотрим данные результаты с этой точки зрения. На слайде приводится проекция точек-стимулов на плоскость двух первых координат четырехмерного евклидова пространства — плоскость эмоционального тона. Схематические лица с выражениями соответствующими базисным эмоциям «радость, удивление, печаль, гнев» располагаются на этой плоскости в соответствии эмоциональным кругом Шлоссберга, что позволяет рассматривать сферическую координату точек на этой плоско-

сти, как первую базисную эмоциональную характеристику лица. Следующая сферическая координата точек-стимулов может быть проиллюстрирована на плоскости, образованной декартовыми осями X_1X_3 четырехмерного пространства.

(СЛАЙД 34)

Здесь также хорошо видно, что точки-стимулы располагаются так, что вертикальный угол каждой точки согласуется со степенью эмоциональной интенсивности, выраженной на схематическом лице. Однако следующие 8 возможных комбинаций декартовых осей по разным плоскостям не дают какой-либо осмысленной интерпретации для третьей сферической координаты точек-стимулов, чтобы наполнить ее эмоциональным содержанием.

(СЛАЙД 35)

Можно предположить, конечно, что полученное решение ограничено редуцированной выборкой стимулов, как, например, подмножество равноярких цветов является частью множества цветовых стимулов. Но это должно было сказаться не только на числе сферических координат, но и на числе декартовых координат. Другое объяснение может быть связано с наличием в этих стимулах не только эмоциональной категоризации, но для данных схематических лиц, в отличие от лиц-фотографий, например, трудно увидеть, что они отличаются еще чем-то, кроме эмоционального выражения. Таким образом, остается вывод, что в данном случае, снова получено расхождение между категориальной и конфигурационной характеристиками зрительного стимула, причем, еще более существенное, чем в случае со схематическими изображениями циферблата часов.

11. Для соотнесения этого вывода с работой соответствующих нейронных сетей обратимся к результатам регистрации ВПР, в ответ на мгновенную смену этих же стимулов-схематических лиц. Мы рассмот-

рим данные для четырех отведений: затылочных и задневисочных для левого и правого полушарий.

(СЛАЙД 36)

Как уже было сказано, в ходе анализа рассматривались три компонента ВПР — межпиковые амплитуды P120-N180 и N180-P230, а также амплитуда пика N180 — связанные с конфигурационными и категориальными характеристиками стимула. Для каждого из трех компонентов и по каждому из четырех отведений было получено 12 матриц попарных различий, измеренных как амплитуды, которые анализировались также точно, как и матрицы субъективных различий. Результаты этого анализа приведены в виде графиков, аналогичных графикам, представляющим субъективное пространство схематических лиц.

(СЛАЙД 37)

Затылочные отведения O1 и O2. На слайде показаны графики, представляющие проекции точек - схематических лиц на плоскость X1X2 четырехмерного пространства, полученного многомерным шкалированием межпиковых амплитуд P120-N180 (левый столбец), N180-P230 (правый столбец) и пиковых амплитуд N180 (средний столбец) ВПР, зарегистрированного в затылочных отведениях левого (верхний ряд) и правого (нижний ряд) полушарий головного мозга. Начнем с первого из средне-латентных компонентов P120-N180 (левый столбец). Сравнение этих графиков с данными для субъективных оценок показывает, что топологически, в положении точек друг относительно друга, графики идентичны. Это означает, что они не противоречат интерпретации декартовых координат, как конфигурационных характеристик кривизны рта и наклона бровей, и сферической координаты, как эмоционального тона. Однако, метрическая картина (подобие межточечных расстояний) на графиках имеет определенные отличия. Изменяются

расстояния между точками 1, 2 и 3 по сравнению с данными субъективного пространства, и эти изменения выходят за пределы возможного сдвига точек, связанного с обычным шумом экспериментальной. При этом направление этих изменений по сравнению противоположно для правого и левого полушарий. В первом случае график показывает сближение стимулов, имеющих большее конфигуративное сходство (лица 1, 2 и 3 различаются только по кривизне рта), тогда как график для правого полушария более согласуется с эмоциональной характеристикой схематических лиц. Здесь сближаются друг к другу лица 1 и 4, а также лица 3 и 6, которые имеют попарно сходные характеристики «удивление» и «печаль» соответственно. Из этого можно заключить, что в межпиковой амплитуде P120-N180 ВПР также содержится два вида информации, как и в субъективных оценках различий между схематическими лицами, однако, на амплитуды P120-N180 в отведении O1 (левое полушарие) больше влияет конфигурационная составляющая различий между стимулами, тогда как в отведении O2 (правое полушарие) доминирует экспрессивная составляющая стимула.

Следующие, более поздние компоненты ВПР в отведении O1 (пиковые амплитуды N180 и межпиковые амплитуды N180-P230) дают сдвиги, которые все сильнее искажают структуру стимулов. Для компонента N180 топология графических характеристик стимулов еще сохраняется. Тройки стимулов по отдельности упорядочены на плоскости X1X2 по горизонтали в соответствии с матрицей стимулов, но по вертикали начинаются нарушения, и, в целом, структура точек дезорганизована. А для компонента N180-P230 наступают уже топологические искажения. Таким образом, можно сказать, что информация о конфигуративных характеристиках лица в левой затылочной области коры (отведение O1) полнее всего представлена в первом из среднелатентных компонентов (P120-N180), а с увеличением латенции компоненты ВПР все более ис-

кажутся, что свидетельствует о постепенном затухании активности в нейронной сети различения конфигурации лица.

В отведении O2 картина для двух последних компонентов ВПР полностью утрачивает какое-либо сходство с субъективными оценками по конфигуративным признакам, но, что самое интересное, остается влияние эмоциональной оппонентности «удовольствие-неудовольствие». На графиках нижнего ряда хорошо видно, что лица 3, 6 и 9, выражающие негативные эмоции, сгруппированы в одном локусе пространства, и резко отделены от остальных лиц, выражающих позитивные или нейтральные эмоции. Это показывает, что в затылочной области правого полушария стимулы активируют нейроны, связанные с анализом эмоциональной экспрессии лица.

(СЛАЙД 38)

Во второй группе графиков, представляющих плоскость осей X3X4, видно усиление дифференциации в положении точек на плоскости по сравнению с субъективным пространством. Если в пространстве субъективных оценок все 9 точек располагаются в одном квадранте (учитывая, что в сферической модели различения центр системы координат фиксирован), то в пространстве ВПР точки распределяются по всей плоскости. При этом интерпретация осей координат, как декартовых, так и сферической, согласуется с данными для субъективных оценок. По оси X3 сохраняется упорядоченность точек-стимулов в соответствии с суммарной кривизной черт схематического лица, от стимулов 1, 3, 7, 9, имеющих максимальную кривизну черт, до стимула 5, с нулевой кривизной рта и бровей. С другой стороны, такое положение точек определяет вторую сферическую координату точек, как степень выраженности эмоции. Положение этих точек на плоскости X1X3, очевидно будет таким же, как и для субъективных оценок.

13. **Височные отведения T5 и T6.** Если в амплитудах ВПР для затылочных отведений наблюдается разделение между данными левого и правого полушарий, то в задне-височной коре, представленной отведениями T5 и T6, результаты также ассиметричны, но есть существенные отличия от зрительной коры. Результаты анализа данных по задне-височной коре представлены на рисунке 7. и 7 г,д,е. Графики на этих рисунках показывают, что для всех трех компонентов отведения T5 (рис. 7 а,б,в), также как для наиболее позднего компонента N180-P230 в отведении T6 (рис. 7 е), картина в значительной степени похожа на данные компонента P120-N180 в отведении O1 (рис. 5а). Здесь также сближаются точки 1, 2 и 3, и отдаляются друг от друга точки 4 и 1, и точки 3 и 6, что свидетельствует о большем влиянии на амплитуды ВПР конфигуративных различий между стимулами, чем эмоциональных. В свою очередь, графики на рис. 7 г и 7 д, представляющие данные компонентов P120-N180 и N180 отведения T6, показывают большее сходство с данными раннего компонента P120-N180 отведения O2 (рис. 5г) и, соответственно, позволяют говорить о заметном вкладе в амплитуды этих компонентов экспрессивной составляющей стимула. Другое отличие задне-височных отведений от затылочных касается времени протекания различительного процесса. В левой височной коре этот процесс представлен в одинаковом виде в течение длительного времени, захватывающего все три анализируемых компонента ВПР. В правой височной коре он прекращается для эмоциональной составляющей ВПР (рис. 7г и 7д), но, как это показывает рис. 7е, продолжается для конфигуративной составляющей ВПР.