

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА СЕГОДНЯ

Е. Н. Соколов

ОЧЕРКИ ПО ПСИХОФИЗИОЛОГИИ СОЗНАНИЯ

ЧАСТЬ I. СФЕРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Глава 2. От карты детекторов — к карте памяти и карте семантических единиц

В главе 2 делается попытка перенести принцип векторного кодирования информации с перцептивного уровня на семантический. С этой целью вводятся и тщательно обосновываются новые понятия: «карта памяти», «карта семантических единиц», «вектор возбуждения памяти», «семантическое различие», «семантический вызванный потенциал». Подробно разбираются экспериментальные данные психофизиологических исследований восприятия цветов и эмоций, иллюстрирующие принципиальное сходство перцептивных и семантических субъективных пространств. Обсуждаются нейронные механизмы, обеспечивающие согласование перцептивных и семантических процессов.

Ключевые слова: карта памяти, карта семантических единиц, перцептивные сферические пространства эмоций и цвета, семантические сферические пространства названий цветов и эмоций, семантическая компонента вызванного потенциала.

Chapter 2 is devoted to comparative analysis of vector encoding of information at perceptual and semantic levels. With this purpose new concepts are entered and carefully proved: «a memory map», «a map of semantic units», «an excitation vector of memory», «a semantic difference», «a semantic evoked potential». Experimental psychophysiological researches of color and emotion perception are analyzed to illustrate the basic similarity of perceptual and semantic subjective spaces. The neural mechanisms providing the coordination of perceptual and semantic processes are discussed.

Key words: memory map, map of semantic units, perceptual spherical color and emotional spaces, semantic spherical color and emotional spaces, semantic component of evoked potential.

Соколов Евгений Николаевич (1920—2008) — всемирно известный ученый, действительный член РАО, Академии медико-технических наук РФ, Академии наук Финляндии, Национальной академии наук США, Академии наук и искусств США, заведующий (1971—1999) кафедрой психофизиологии ф-та психологии МГУ.

2.1. Векторный код в негативности рассогласования

Сферическое перцептивное пространство строится на основе анализа вербальных оценок межстимульных различий или амплитуд вызванных потенциалов, зарегистрированных при мгновенной замене одного стимула другим. Переход к построению сферической модели памяти требует введения оценок различий между следами памяти и соответственно использования вызванных потенциалов на замену одного следа памяти другим (Соколов, 2003). Начнем с потенциалов, зависящих от формирования следов памяти. Таким потенциалом является «негативность рассогласования» (НР).

Термин «негативность рассогласования» (mismatch negativity) был введен в употребление профессором Университета Хельсинки Р. Наатаненом и получил развитие в его монографии «Внимание и функции мозга» (Näätänen, 1992). Негативность рассогласования означает негативную волну в составе вызванного потенциала мозга, возникающую в ответ на редкие, отличающиеся от стандартных девиантные стимулы. Экспериментальная процедура получения НР сводится к нанесению двух стимулов: одного, предъявляемого с низкой вероятностью (девиантного), и другого, предъявляемого с высокой вероятностью (стандартного). Регистрация вызванных потенциалов у человека показывает, что кроме раннего негативного пика с латенцией 100 мс девиантные стимулы вызывают в интервале 100—250 мс еще и дополнительную негативную волну, амплитуда которой определяется величиной различия девиантного и стандартного стимулов (ibid).

Как объяснить прогрессивное возрастание амплитуды НР с увеличением различия между стандартным и девиантным стимулами? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо еще раз коротко рассмотреть принципы кодирования информации в нейронных сетях.

Возбуждения рецепторов, вызываемые действием стимула, поступают на ансамбль нейронов-преддетекторов, представляющий локальный участок рецептивной поверхности. Говоря о нейронах-преддетекторах, имеют в виду нейроны, лежащие между рецепторами и селективными нейронами-детекторами коры. Ансамбль преддетекторов характеризуется наличием общих входов от рецепторов и общим выходом, действующим параллельно на популяцию селективных детекторов. Такая популяция образует нейронную карту, на которой вектор возбуждения преддетекторов создает локальный фокус активности. Комбинация возбуждений ансамбля преддетекторов представляет собой вектор возбуждения, компонентами которого являются возбуждения независимых преддетекторов.

Субъективное различие между стимулами, последовательно действующими на ансамбль преддетекторов, определяется абсолютной величиной разности кодирующих эти стимулы векторов возбуждения (Фомин, Соколов, Вайткявичюс, 1979; Соколов, Вайткявичюс, 1989).

Справедливость этого положения была подтверждена описанными выше исследованиями цветового зрения (Izmailov, Sokolov, 1991). Эти исследования показали, что все множество цветовых оттенков размещается на сферической поверхности, расположенной в четырехмерном евклидовом пространстве, так, что каждому цвету соответствует специфический четырехкомпонентный вектор. При этом отдельные цвета представлены векторами возбуждения постоянной длины, а субъективные цветовые различия измеряются абсолютными значениями разностей векторов возбуждения, кодирующих эти цвета.

Выявленные при многомерном анализе компоненты цветовых векторов, кодирующих монохроматические цвета, совпадают с реакциями на эти цвета четырех типов цветокодирующих нейронов ЛКТ: «красно-зеленых», «сине-желтых», «яркостных» и «темных». Такое совпадение нейрофизиологических данных с результатами многомерного анализа психофизических показателей позволило заключить, что для цветового зрения векторный код представлен возбуждениями нейронов-предетекторов ЛКТ. Учитывая тесную положительную корреляцию компонент цветовых векторов возбуждения с соответствующими возбуждениями «красно-зеленых», «сине-желтых», «яркостных» и «темных» нейронов ЛКТ, можно предположить, что цветовые различия в нейронной сети вычисляются в виде абсолютных величин разностей этих векторов.

Как реализуется «нейронное» вычисление цветовых различий?

Вывод о том, что цветовые различия определяются абсолютными величинами разностей векторов возбуждения цветовых нейронов-предетекторов ЛКТ, предполагает существование фазических нейронов, «вычисляющих» абсолютные величины изменений возбуждений в каждом из предетекторов, а также нейронов, «вычисляющих» сумму этих величин как модуль разности векторов возбуждения.

Прямая проверка этого предположения достигается регистрацией активности отдельных нейронов у животных. При внезапной замене цветовых стимулов в зрительной коре кролика были обнаружены нейроны, генерирующие спайковый разряд в интервале 40—90 мс. Плотность спайков этого начального разряда была тем больше, чем больше было цветовое различие заменяемых стимулов. Воспринимаемые кроликом цветовые различия были определены ранее в поведенческих опытах методом выработки инструментальных рефлексов на цветовые стимулы (Полянский, Евтихин, Соколов, 1999).

Косвенная проверка предположения о существовании нейронов, «вычисляющих» цветовые различия, в опытах на человеке возможна при существовании связи спайковых разрядов с амплитудой вызванного потенциала. Такая связь утверждается теорией Галамбоса, согласно которой негативные компоненты вызванного потенциала рассматриваются как результат деполяризации клеток глии ионами калия, выходящими из

нейронов при генерации потенциалов действия. Роль глии в генерации волн ЭЭГ подчеркивается также в обобщающей работе Дж.Г. Николлса и др. (2003). С этой точки зрения амплитуда негативных компонент вызванного потенциала прямо пропорциональна мгновенной частоте генерации спайков, а его продолжительность — длительности спайкового разряда. Позитивные компоненты при этом соответствуют торможению спайковой активности.

Исходя из этих соображений можно допустить, что амплитуда негативного пика вызванного потенциала является мерой спайковой активности. Это, в частности, относится к нейронам, «вычисляющим» векторные цветовые различия. Экспериментально показано, что при замене одного цвета другим у человека возникает негативный пик вызванного потенциала с латентностью 87 мс (N87). Амплитуды N87 на замену цветов тесно положительно коррелируют как с субъективными цветовыми различиями, так и с абсолютными величинами разностей векторов возбуждения, представляющих эти цветовые стимулы (Izmailov, Sokolov, 2004). Полученные данные позволили сделать следующие выводы.

1. Амплитуда негативных вызванных потенциалов на замену цветов является мерой цветовых различий.

2. Амплитуды этих вызванных потенциалов являются абсолютными величинами разностей векторов возбуждения.

Вывод о том, что амплитуда N87 равна абсолютной величине разностей цветовых векторов возбуждения, был подвергнут дополнительной проверке. Был проведен многомерный анализ матрицы амплитуд N87 на замену цветов. Оказалось, что каждый цвет представлен четырехкомпонентным вектором возбуждения, совпадающим с вектором возбуждения предетекторов ЛКТ. Это означает, что амплитуда N87 является модулем разности векторов возбуждения нейронов-предетекторов ЛКТ. Действительно, вычисление таких модулей показало их совпадение с исходными амплитудами N87. Таким образом, устанавливается параллелизм субъективных цветовых различий, амплитуд N87 и модулей разностей исходных векторов предетекторов. Эти результаты косвенно подтвердили гипотезу о нейронах, «вычисляющих» абсолютные величины векторных разностей.

Теперь рассмотрим формирование векторов возбуждения памяти.

Можно предположить, что при повторении раздражителя возникающие векторы возбуждения предетекторов формируют следы в виде векторов возбуждения памяти. По аналогии с восприятием сформированный след в виде вектора возбуждения памяти сравнивается с новым вектором возбуждения путем вычисления абсолютной величины их разности. Если повторяются одинаковые стимулы, то модули разностей векторов возбуждения памяти равны нулю и вызванный потенциал состоит только из раннего пика, зависящего от перцептивного различия

стимула и фона. Если же предъявляются два разных стимула, то формируются два следа памяти в виде двух векторов возбуждения

При повторении двух стимулов с равной вероятностью вызванный потенциал на каждый из них состоит из начального негативного пика с латентным периодом 100 мс, зависящего от степени различия стимула и фона, и более позднего пика. Поздняя негативность, возникающая с латентным периодом около 200 мс, предположительно определяется абсолютной величиной разности векторов возбуждения следов памяти. Этот потенциал одинаков для каждого стимула вследствие того, что его амплитуда равна абсолютной величине разности векторов следов кратковременной памяти. Чтобы проверить это утверждение, можно было бы вычестить величину вызванного потенциала, зарегистрированного при изолированном действии каждого стимула, из величины вызванного потенциала, полученной при совместном их применении. Следует ожидать, что разность этих потенциалов позволит определить вклад абсолютной величины разности векторов возбуждения памяти. Однако на практике используется другой прием: один стимул (стандартный) наносится с высокой вероятностью, а другой (девиантный) — с низкой. При этом различия следов памяти высоковероятного (стандартного) стимула при повторении за счет вычитания убывают, а различия следов памяти стандартного и девиантного стимулов накапливаются. При вычитании вызванного потенциала стандартного стимула из вызванного потенциала девиантного выделяется абсолютная величина разности векторов памяти.

По аналогии с вычислением перцептивных различий можно предположить, что векторы возбуждения памяти стандартного и девиантного стимулов сравниваются покомпонентно в фазических «ON»- и «OFF»-нейронах различия. Эти нейроны сравнивают компоненты векторов следов памяти, а комбинация «ON»—«OFF»-нейронов «вычисляет» абсолютные величины векторных разностей, генерируя спайковые ряды. Чем больше различие векторов возбуждения и следов памяти, тем выше частота спайков, а соответственно выше и амплитуда негативной волны рассогласования. Теперь вызванный потенциал на девиантный стимул состоит из раннего пика, зависящего от разности векторов возбуждения фона и стимула, и негативной волны рассогласования, возникающей в интервале 100—250 мс и зависящей от различия векторов возбуждения памяти стандартного и девиантного стимулов. На основании вышеизложенного можно заключить, что негативность рассогласования равна абсолютной величине разностей векторов возбуждения памяти стандартного и девиантного стимулов. Следует учитывать, что эти стимулы предъявляются с разными промежутками за счет разной вероятности нанесения, поэтому при равной вероятности нанесения абсолютные различия в следах кратковременной памяти оказываются одинаковыми.

Итак, чтобы экспериментально обнаружить негативность рассогласования, необходимо вероятность подачи стандартного стимула увеличить, а девиантного — уменьшить. Тогда при замене стандартного стимула девиантным возникает негативность рассогласования, равная абсолютной величине разности векторов возбуждения. Поскольку векторы возбуждения памяти равны векторам возбуждения предетекторов, кодирующих стимулы, негативность рассогласования косвенно отражает различие векторов возбуждения стандартного и девиантного стимулов путем различия следов памяти. При высокой вероятности подачи стандартного стимула вклад негативной волны в вызванный потенциал на стандартный стимул уменьшится, а вызванный потенциал на девиантный стимул возрастет. Величину негативности рассогласования можно определить, вычитая из вызванного потенциала на девиантный стимул вызванный потенциал на стандартный стимул.

Составляя матрицу амплитуд негативности рассогласования для разных комбинаций стандартного и девиантного стимулов и используя многомерный анализ, можно найти векторы возбуждения кратковременной памяти и равные им исходные векторы возбуждения предетекторов. Таким образом, принцип расчета различий между векторами возбуждения при замене одного стимула другим можно перенести на механизм расчета различий между следами кратковременной памяти. При перцептивных различиях находят абсолютную величину их векторной разности. При расчете различий между следами кратковременной памяти находят абсолютную величину разности векторов возбуждения, представленных в кратковременной памяти.

Можно заключить, что по аналогии с перцептивным вызванным потенциалом негативность рассогласования является краткосрочным мнемическим вызванным потенциалом, определяясь разностью следов кратковременной памяти. Возникает вопрос о применимости модели краткосрочного вызванного потенциала к механизму долговременной памяти.

2.2. Операция узнавания: векторное преобразование в нейронных сетях

Долговременная память связана с работой нейронов, удерживающих следы стимуляции неограниченно долгое время. Такими нейронами являются гностические единицы (Конорски, 1967). При действии внешнего стимула прежде всего возникает перцептивный вызванный потенциал, измеряющий различие между стимулом и фоном. За ним следует негативность рассогласования, измеряющая различие между следами кратковременной памяти для стандартного и девиантного стимулов. Аналогичным образом возникает вызванный потенциал долговременной памяти, измеряющий разницу между ее следами. Принцип

векторного кодирования позволяет перейти от вычисления перцептивных различий к вычислению различий между следами кратковременной и долговременной памяти, представляя вызванный потенциал в виде комбинации трех абсолютных величин векторных разностей: векторов возбуждения преддетекторов, векторов следов кратковременной, а также долговременной памяти. С этой точки зрения негативность рассогласования определяется абсолютными величинами разностей не только векторов кратковременной, но и долговременной памяти, сохраняющей следы стандартного и девиантного стимулов. Это подтверждается при исследовании негативности рассогласования в отношении заменяемых в эксперименте гласных, следы которых удерживаются в долговременной памяти (Näätänen, 1992).

Восприятие сложного стимула связано с переходом от комбинации возбуждений нейронов-преддетекторов к избирательной активации определяющей это восприятие специфической гностической единицы. Такая активация является результатом скалярного умножения двух векторов: вектора возбуждения преддетекторов и вектора синаптических весов гностической единицы. Вектор возбуждения преддетекторов определяется действующим в данный момент стимулом. Синаптические веса разных гностических единиц формируются в ходе научения. Вектор возбуждения действует параллельно на целую популяцию гностических единиц, реализуя в каждой из них скалярное произведение вектора возбуждения на вектор весов синаптических контактов. Максимальная реакция возникает в той гностической единице, вектор синаптических весов которой совпадает с действующим вектором возбуждения.

В ходе приобретения жизненного опыта происходит формирование новых гностических единиц, и таким образом расширяется круг воспринимаемых объектов. Накопление следов долговременной памяти в первом приближении можно представить как появление новых гностических единиц, фиксирующих отдельные события. Оформление этих единиц заключается в том, что не полностью дифференцированная нервная клетка под влиянием нового вектора возбуждения приобретает веса синаптических связей, равные пресинаптическим возбуждениям, представляющим собой компоненты действующего вектора возбуждения. Таким образом, не полностью дифференцированный нейрон становится полностью дифференцированным. Приобретенный этим нейроном вектор синаптических весов делает его потенциально настроенным на определенный вектор возбуждения. Поскольку последний определяется действующим стимулом, то и гностическая единица становится избирательно настроенной на этот стимул. Такой стимул «находит» соответствующую ему гностическую единицу среди множества других. Это достигается тем, что скалярное произведение вектора

возбуждения и вектора синаптических весов достигает максимума именно в этой гностической единице.

Ошибки в узнавании стимула появляются в тех случаях, когда синаптические веса другой гностической единицы оказываются близкими к действующему вектору возбуждения. Трудности в узнавании объекта возникают в результате того, что вектор возбуждения не оказывает действия на релевантную гностическую единицу. Оптимизировать узнавание объекта можно путем сканирования поля гностических единиц «прожектором» внутреннего внимания.

2.3. Ассоциация следов памяти по времени и сходству

Формирование гностических единиц в качестве механизмов долговременной памяти дополняется образованием связей между ними при совпадении событий во времени и пространстве. Отдельный механизм определяет ассоциации событий по сходству.

Термин «ассоциация» имеет много значений, в частности он относится к связям между образными следами долговременной памяти. На уровне антеровентральной височной коры связи между следами, зависящими от совпадения их возникновения по времени, выражены слабо. Этот ассоциативный механизм представлен в периринальной коре — на следующем уровне образования зрительных образов. Нейроны ассоциативного уровня характеризуются тем, что реагируют на каждый из пары ассоциируемых образов. Они представляют собой категориальные нейроны, для которых категорию образуют разные по виду, но совпадающие по времени стимулы. Эти ассоциативно-категориальные нейроны имеют нисходящие связи с нейронами, представляющими конкретные образы. Активация такого нейрона отдельным представителем группы позволяет представить других ее представителей (Miyashita et al., 1991).

Ассоциации по сходству требуют обращения к тем категориальным нейронам, которые активируются в силу получения входов от одних и тех же преддетекторов. Такое объединение нейронов в пределах одного ансамбля преддетекторов может быть распространено на следующие уровни преддетекторов, позволяя подчеркивать сходство между наглядно разными объектами. В качестве примера можно рассмотреть восприятие эмоциональных выражений лиц. Каждое эмоциональное выражение определяется вектором весов синаптических связей соответствующей гностической единицы, которая активируется при совпадении с вектором возбуждения эмоциональных преддетекторов. Чем ближе сходство векторов весов синаптических контактов двух гностических единиц, тем ближе сходство эмоциональных выражений лица, которое они кодируют. С этой точки зрения ассоциация по сходству гностических единиц определяется близостью их векторов синаптических связей (Измайлов и др., 2003а, б).

2.4. Соотношение перцепции и семантики

При замене без промежутка одного стимула другим в мозге человека возникает вызванный потенциал, представляющий собой последовательность негативных и позитивных волн. При действии невербальных стимулов амплитуда такого вызванного потенциала прямо пропорциональна их перцептивному различию. Чем больше амплитуда вызванного потенциала, тем больше воспринимаемое различие между заменяемыми стимулами. Если заменяемые стимулы одинаковы, то вызванный потенциал отсутствует, а различие между стимулами не обнаруживается. Примером перцептивного вызванного потенциала может служить негативный пик с латентностью 87 мс (N87), возникающий при внезапной замене одного цветового стимула другим.

При замене одного вербального стимула другим вербальным стимулом вызванный потенциал, возникая с латентным периодом 180 мс (N180), усложняется и состоит из двух наложенных друг на друга субкомпонент: перцептивной и семантической, разделяемых последующим анализом. Примером такой суперпозиции перцептивной и собственно семантической компонент может служить вызванный потенциал на замену одного названия цвета другим. Перцептивная компонента отражает смену «оболочки» слова, прежде всего различное число букв, входящих в название цвета. Семантическая компонента тем больше, чем больше смысловое различие цветовых названий.

На основе амплитуд вызванных потенциалов на замену цветовых стимулов можно построить объективное цветовое пространство — геометрическую модель, в которой расстояния между точками-цветами соответствуют воспринимаемым цветовым различиям. Для этого матрица амплитуд компоненты N87 подвергается многомерному анализу с целью выделения базисных векторов и расчета координат заменяемых цветовых стимулов. Как уже говорилось, многомерный анализ показал, что базис перцептивного цветового пространства образуют четыре типа нейронов — два хроматических («красно-зеленый» и «сине-желтый») и два ахроматических («яркостный» и «темновой»). Каждый цветовой стимул представлен комбинацией возбуждений таких базисных нейронов, образующих цветовые векторы возбуждения равной длины. Это означает, что все множество цветов лежит на сферической поверхности (гиперсфере) в четырехмерном пространстве. Таким образом, каждый цветовой стимул представлен вектором, компоненты которого равны возбуждениям четырех базисных нейронов. Многомерный анализ позволяет получить координаты векторов, представляющих отдельные цвета, и рассчитать расстояния между концами этих векторов, равные абсолютным величинам их разностей. По этим значениям можно составить матрицу и сопоставить ее с исходной матрицей амплитуд вызванных потенциалов. Совпадение этих матриц означает, что вычисление цветовых различий в нейронных сетях осуществляется путем

нахождения абсолютных величин разностей векторов, представляющих заменяемые цвета.

При замене одного цвета другим в фазических нейронах сетчатки возникают потенциалы действия, количество которых определяется степенью изменения возбуждения в каждом из базисных нейронов. Суммарное возбуждение фазических нейронов соответствует абсолютной величине разности векторов возбуждения, порождаемых сменяющими друг друга стимулами. Поступая в зрительную кору, суммарный разряд фазических нейронов приводит к выходу в межклеточную среду ионов калия, которые, воздействуя на глиальные клетки (астроциты), вызывают деполяризацию, регистрируемую в качестве негативного пика вызванного потенциала. Чем больше цветовое различие, тем большее число потенциалов действия генерируют фазические нейроны, тем больше выход ионов калия и тем выше негативный пик N87 вызванного потенциала, определяющего цветовое различие. Выявление связи амплитуд вызванных потенциалов на смену стимулов с количеством спайков, генерируемых фазическими нейронами, открывает новые возможности диагностического использования вызванных потенциалов.

Матрицы амплитуд семантических вызванных потенциалов на замену одного вербального стимула другим содержат информацию относительно перцептивной компоненты (различия в длине сменяемых слов) и собственно семантической компоненты (различия в смысловом содержании слов). Так, заменяя цветовые названия, можно получить матрицу амплитуд, содержащую данные о различиях в количестве букв и в смысловом содержании слов. Это достигается применением многомерного анализа. Обнаружено, что длина слова кодируется равными по длине векторами возбуждения, имеющими две компоненты, так как слова размещаются на полуокружности в порядке увеличения их длины. Значения цветовых терминов также образуют двухмерное пространство, размещаясь по окружности в соответствии с обозначаемыми цветами. Сопоставление цветового круга реальных цветов в перцептивном цветовом пространстве с расположением названий цветов в семантическом цветовом пространстве обнаруживает близкое совпадение этих пространств. Возникновение семантического вызванного потенциала можно объяснить по аналогии с возникновением перцептивных вызванных потенциалов. Но теперь различие между цветовыми терминами вычисляется как различие следов цветовой памяти, активированных при замене одного слова другим. Сходство перцептивных и семантических вызванных потенциалов дает основание заключить, что нейроны долговременной цветовой памяти также активируют фазические нейроны, разряды которых и определяют амплитуду семантического вызванного потенциала. Чем больше различие в составе словесно активированных нейронов долговременной цветовой памяти, тем больше потенциалов действия генерируют фазические нейроны и тем больше амплитуда

семантического вызванного потенциала. Совпадение перцептивных и семантических траекторий цветовых стимулов объясняется тем, что следы долговременной цветовой памяти формируются под влиянием цветовых перцептивных процессов, так что мнестическое цветовое пространство является репликой перцептивного.

Чтобы объяснить, как «оболочка» слова наполняется смысловым содержанием, приходится предположить наличие ассоциативного процесса между следами цветовой памяти и следами в памяти от «оболочки» слова. Эти связи являются двухсторонними. При активации следа цветовой памяти по схеме «снизу-вверх» включается след названия цвета. При активации символа, обозначающего цвет, по схеме «сверху-вниз» включаются соответствующие следы цветовой памяти. Если одно название цвета заменяется иным, то на смену одному комплексу нейронов цветовой долговременной памяти приходит другой, приводя в действие фазические нейроны, вычисляющие различие между следами. Чем больше различие в составе следов цветовой памяти, включаемых цветовыми символами, тем больше амплитуда семантического вызванного потенциала. Если два цветовых названия активируют одни и те же следы цветовой памяти, то семантическая компонента вызванного потенциала отсутствует, хотя перцептивная компонента (различие в «оболочке» цветовых терминов) сохраняется.

Предложенная схема генерации семантического вызванного потенциала была подвергнута экспериментальной проверке. Для этого использовались зрительно предъявляемые трехбуквенные искусственные слова (согласная-гласная-согласная), сменявшие друг друга на экране компьютера. Параллельно производилась регистрация вызванных потенциалов на замену одного слова другим. Из амплитуд вызванных потенциалов формировалась матрица, подвергнутая многомерному анализу. Слова были одинаковой длины, поэтому длина слова не отражалась. Пространство этих слов характеризовалось высоким уровнем шума, хотя в нем можно было выделить вклад представленных в словах гласных. Затем следовала процедура обучения, в которой разные трехбуквенные слова ассоциировались с разными цветами. Эффективность обучения проверялась путем предъявления реальных цветов, которые следовало называть соответствующими искусственными цветовыми названиями. Заключительный этап исследования состоял в изучении семантических вызванных потенциалов и построении на их основе семантического цветового пространства. Теперь в структуре семантического пространства были выделены две координаты, определяющие положение искусственного цветового названия на окружности в соответствии с обозначаемым им цветом. Сравнение с перцептивным цветовым пространством показало наличие общих осей: «красно-зеленой» и «сине-желтой». Это дало основание полагать, что следы цветовой памяти упорядочены в соответствии с перцептивными цветовыми характеристиками.

Перцептивные и семантические вызванные потенциалы объединяет общий принцип их генерации — смена одного вектора возбуждения другим. Только перцептивный потенциал возникает при замене одного актуального вектора возбуждения другим актуальным вектором возбуждения, а семантический вызванный потенциал определяется сменой одного вектора следов памяти другим вектором следов памяти. Векторы следов памяти активируются ассоциативными связями вербальных или других символов с релевантными следами памяти. Общность механизмов генерации перцептивных и семантических вызванных потенциалов иллюстрирует тот факт, что при замене одного символа другим перцептивный потенциал замены «оболочки» слова накладывается на семантическую компоненту вызванного потенциала, совпадая с ним по форме. В то же время многомерный анализ позволяет разделить перцептивное пространство, представляющее «оболочки» заменяемых слов, и семантическое пространство, в котором слова размещены в соответствии с их значениями, определяемыми ассоциированными с ними следами памяти. Общей характеристикой перцептивных и семантических потенциалов является их форма в виде последовательности негативной и позитивной волн в определенном временном окне, отсчитываемом от момента смены стимулов. Так, перцептивный цветовой негативный пик возникает с латентным периодом 87 мс, а комбинация потенциалов на смену «оболочек» слов и семантического содержания имеет пик с латентностью 180 мс.

Кроме семантического потенциала на смену разных по значению слов, при смене более сложных семантических групп возникают поздние семантические потенциалы с латентностью 400 мс (N400). Так, если после группы слов, принадлежащих к одной категории, следует другая семантическая группа, то в зависимости от их различия возникает N400. Амплитуды N400 определяются различием семантических групп. Если вместо «семантически контрастной» группы слов следуют слова той же категории, то N400 не возникает. Можно предположить, что N400 измеряют различия между семантическими категориями.

Схематически генерацию N400 можно представить следующим образом. При повторении группы семантически близких слов происходит суммация связанных с ними следов памяти. При переходе к другой группе семантически различных слов формируется другой обобщенный след памяти. Разность этих следов и определяет амплитуды поздних семантических потенциалов, которые являются мерой категориальных различий. Таким образом, в последовательности слов выделяются семантические группы и устанавливается степень различия между ними. В механизме возникновения поздних семантических потенциалов предположительно участвуют также фазические нейроны. Количество генерируемых ими потенциалов действия служит мерой категориального различия. Связь числа спайков, возникающих в

фазических нейронах, с амплитудой негативного пика семантического вызванного потенциала основана на тех же механизмах, что и механизмы перцептивных вызванных потенциалов. Последние включают выход ионов калия при генерации потенциалов действия и деполяризацию клеток нейроглии. Итак, перцептивный вызванный потенциал при замене одного стимула другим служит мерой воспринимаемого различия. Ранний семантический потенциал определяет семантическое различие слов. Наконец, поздний семантический потенциал является мерой категориального различия.

Возникает вопрос: как объяснить тот факт, что амплитуды перцептивных и семантических вызванных потенциалов в высокой степени положительно коррелируют с субъективными перцептивными и семантическими различиями, представленными вербальными (численными) оценками наблюдателя? Для ответа на этот вопрос вспомним механизм генерации цветового перцептивного вызванного потенциала. При замене одного цвета другим в фазических нейронах сетчатки возникают спайки, частота которых тем больше, чем больше один цвет отличается от другого. Этот фазический разряд различия далее трансформируется в речевую реакцию — название числа. Рассмотрим механизм этого преобразования на примере кодирования интенсивности света. В данном случае работает пара нейронов: «яркостный» и спонтанно активный «темновой». При этом возбуждение «яркостного» нейрона вычитается из возбуждения спонтанно активного «темнового» нейрона таким образом, что сумма возбуждений этих нейронов при всех значениях светового стимула остается постоянной. За счет механизма адаптации длина вектора, образованного вкладками «яркостного» и «темнового» нейронов, не изменяется. Вектор, кодирующий интенсивность света, поступает на множество селективных детекторов интенсивности, обладающих разным набором синаптических весов. В результате возбуждается только тот детектор интенсивности, комплект синаптических весов которого совпадает с поступающим вектором возбуждения. Отдельные детекторы в ходе обучения ассоциируются с отдельными командными нейронами речевых реакций. Таким образом, определенная интенсивность света включает ее релевантную вербальную (численную) оценку.

Такой механизм перехода от восприятия интенсивности света к численной его оценке аналогичен механизму численной оценки любых перцептивных различий. Фазический разряд различия вычитается из активности фоновоактивного нейрона, приводя к появлению вектора возбуждения, состоящего из двух компонент: фазического разряда и разряда фоновоактивного нейрона, из которого этот фазический разряд вычитается. Возникающий в результате этого вектор возбуждения постоянной длины адресуется к селективным детекторам различий, активируя один из них. Поскольку каждый детектор величины различия связан со «своим» командным нейроном, детектируемое различие вклю-

чают соответствующие артикуляции. Важным элементом этой схемы являются нейроны, детектирующие численные значения возбуждений. Такие детекторы, селективные, в частности, к числу объектов в поле зрения, обнаружены в височной коре обезьян (Николлс и др., 2003). Таким образом, амплитуды перцептивных и семантических потенциалов определяются спайковым разрядом различия, инициирующим избирательную активность командных нейронов. Это в свою очередь приводит к адекватной численной оценке данных различий.

Каковы функции перцептивного и семантического потенциалов? Рассмотрим три операции: слияние мельканий, дифференциальный порог и сегментацию речи.

Световые вспышки, следующие с частотой выше 50 Гц, сливаются в непрерывное световое ощущение. Отдельная вспышка состоит из светового импульса и последующего темнового промежутка. Смена светового импульса темновым промежутком вызывает сигнал различия, препятствующий слиянию мельканий. С уменьшением темнового промежутка при возрастании частоты следования световых импульсов сигнал различия уменьшается и перестает разделять световые вспышки, которые сливаются в непрерывном ощущении.

Дифференциальный порог характеризуется величиной различия двух сменяющих друг друга стимулов. Если при замене одного стимула другим сигнал различия не возникает, то различие стимулов оказывается подпороговым. Можно предположить, что дифференциальный порог определяется сигналом различия, который равен абсолютной величине разности векторов возбуждения. Когда эта величина перестает вызывать сигнал различия, стимулы не различаются. Это имеет место в случае, когда возбуждение не переходит на другой детектор.

Реакция детекторов определяется вкладом преддетекторов. Простейшим случаем является детектор с двумя преддетекторами, имеющими синусно-косинусные характеристики. Такие детекторы образуют двухмерное пространство в форме окружности. Другой набор детекторов с двумя другими преддетекторами образует другое двухмерное пространство. Оба набора преддетекторов, суммируясь на детекторах более высокого уровня, образуют четырехмерное пространство детекторов, реагирующих на сложные стимулы.

Мгновенная замена одного стимула другим вызывает реакцию на их различие, выражающуюся группой спайков и последующей тормозной паузой в нейронах-детекторах коры. По частоте спайков этот разряд в высокой степени положительно коррелирует с негативным пиком раннего вызванного потенциала. Можно предположить, что нейрональный ответ на замену стимулов определяет перцептивную сегментацию, а семантический сигнал различия выполняет функцию семантической сегментации.

2.5. Вычисление семантических различий в нейронных сетях

Семантическое различие между двумя символами, такими как произнесенные или напечатанные слова, — это различие их значений. При исследовании механизмов вычисления семантических различий проводились эксперименты, в которых субъективные семантические различия сопоставлялись с амплитудами вызванных потенциалов мозга (Измайлов и др., 2003а, б). В качестве прототипов были выбраны две категории печатных слов: названия цветов и эмоций.

Наблюдатель, которому предъявляют два цветовых названия, может оценить их семантическое различие и выразить его в баллах. Цветовое семантическое пространство, выявленное с помощью многомерного шкалирования этих различий, представляет собой гиперсферу в четырехмерном евклидовом пространстве. Это семантическое пространство изоморфно перцептивному цветовому пространству, полученному из матрицы различий между цветовыми стимулами (Izmailov, Sokolov, 1991; Измайлов и др., 2003а, б).

Те же результаты были получены и для названий эмоций. Семантическое пространство названий эмоций также представляет собой четырехмерную гиперсферу, изоморфную относительно пространства эмоций, полученного на основе субъективных оценок различий между эмоциональными выражениями лиц.

Регистрация суммарной электрической активности мозга в той же экспериментальной парадигме выявила следующее. Внезапная смена на экране компьютера одного названия цвета другим приводит к возникновению вызванного потенциала, состоящего из двух субкомпонент: перцептивной, зависящей от различия слов по длине, и семантической, определяемой различием слов по содержанию. Эти субкомпоненты накладываются, попадая в одно временное окно. Их разделение достигается многомерным шкалированием матрицы амплитуд вызванных потенциалов. При этом выделяются два двухмерных пространства: круговая конфигурация для цветовых названий и полуокружность для разных по длине слов. Цветовое семантическое пространство, основанное на вызванных потенциалах, совпадает с цветовым семантическим пространством, основанным на субъективных оценках цветовых названий.

Внезапная смена названий эмоций также приводит к генерации вызванных потенциалов, амплитуды которых зависят от двух переменных: семантического различия названий эмоций и перцептивного различия слов по длине (Измайлов и др., 2003а, б).

Семантическое пространство эмоций, основанное на вызванных потенциалах на замену названий эмоций, совпадает с семантическим пространством эмоций, основанным на вызванных потенциалах на внезапную замену эмоциональных выражений лица, а также с про-

странством эмоций, полученным из субъективных оценок различий эмоциональной экспрессии лица (Измайлов и др., 2000).

Здесь возникают два вопроса.

1. Почему балльные оценки различий названий цветов и названий эмоций положительно коррелируют с амплитудами семантических субкомпонент вызванного потенциала, возникающего при внезапной замене цветowych или эмоциональных названий?

2. Почему цветовой семантическое пространство и эмоциональное семантическое пространство имеют сферическую структуру?

Чтобы приблизиться к ответам на эти вопросы, необходимо перенести принцип векторного кодирования с перцептивного уровня на семантический. Начнем с перехода от карты памяти к карте семантических единиц. Предварительно напомним, как происходит процесс обработки цветовой информации. Он начинается с генерации вектора возбуждения в ансамбле, состоящем из четырех нейронов-преддетекторов. Векторы возбуждения равны по длине, образуя гиперсферу в четырехмерном пространстве. Цветовые детекторы, обладая четырьмя синаптическими контактами, характеризуются равными по длине векторами синаптических связей. Таким образом, множество цветowych детекторов также образует гиперсферу. Цветовой стимул создает вектор возбуждения преддетекторов, который вызывает рельеф возбуждения на карте детекторов с максимумом на том из них, вектор синаптических связей которого коллинеарен действующему вектору.

В процессе онтогенетического развития выходные сигналы детекторов достигают нейронов памяти, из которых формируется карта единиц, избирательно настроенных на специфические цвета. Эндогенная активация цветowych нейронов памяти составляет основу цветowych представлений. В ходе образования ассоциаций «цвет — цветовой символ» специфические нейроны памяти связываются с нейронами, представляющими цветowych символы. Семантический нейрон, представляющий цветовой символ, в свою очередь образует синапсы с нейронами памяти в соответствии с величиной возбуждения каждого из них. Связи между цветowymi нейронами памяти и нейронами, кодирующими цветowych символы, являются двухсторонними. Это позволяет осуществлять две операции: символизацию цвета (называние цветowego стимула) и припоминание цветowego стимула при его предъявлении.

Воспоминание о цвете возникает в результате индуцирования цветowym символом вектора возбуждения на карте цветовой памяти. Когда один цветовой символ внезапно заменяется другим, создаваемые ими векторы возбуждения на карте цветовой памяти также соответственно изменяются. Возбуждения, возникающие в нейронах цветовой памяти при смене символов, направляются к «вычитающим» нейронам, «вычисляющим» изменение возбуждения в отдельных нейронах цветовой памяти. Возбуждения «вычитающих» нейронов складываются

в «суммирующих» нейронах, которые «вычисляют» общую величину семантического различия. Эти «суммирующие» нейроны дополняются «шумящими» нейронами, максимально активными при молчании «суммирующих». Из комбинации возбуждений этих нейронов возникает двухкомпонентный вектор возбуждения, кодирующий семантическое различие. Он воздействует на детекторы различий. Балльная оценка семантического различия достигается при участии детекторов различий, связанных с семантическими нейронами наименования числа, которые далее связаны с командными нейронами артикуляции.

Амплитуда вызванных потенциалов на смену цветовых названий определяется двумя источниками: перцептивным различием конфигурации символов (различием длины слов) и семантическим различием цветовых символов. Представленные в вызванных потенциалах, они перекрываются, совпадая по времени. Разделение вкладов этих двух источников достигается многомерным шкалированием матрицы амплитуд вызванных потенциалов. Выделяются два двумерных пространства. Одно из них (перцептивное двумерное пространство) представляет разные по длине цветовые названия. Другое (семантическое двумерное пространство) представляет названия цветов в соответствии с цветовым кругом Ньютона. Вклад каналов яркости и темноты в четырехмерное цветовое пространство может быть утерян в связи с ограниченным числом используемых в опыте цветовых названий.

В заключение повторим, что название определенного цвета как его символ, достигая уровня семантических нейронов, активирует через систему связей «сверху-вниз» популяцию нейронов цветовой памяти. Это создает на карте памяти вектор возбуждения. Следующее название цвета генерирует на карте памяти другой вектор возбуждения. Соответствующие компоненты этих двух векторов образуют разности возбуждений в фазических «вычитающих» нейронах. Совместно «вычитающие» нейроны «вычисляют» абсолютную величину векторной разности, представленную возбуждением «суммирующего» нейрона. Она равна семантическому различию цветовых названий и определяет семантическую компоненту вызванного потенциала. В то же время изменение конфигурации слов в качестве сенсорного события определяет перцептивный вызванный потенциал, зависящий от различия слов по длине. Появляясь вместе, семантический и перцептивный вызванные потенциалы создают перекрывающиеся негативности. Разделить их позволяет многомерное шкалирование матрицы их амплитуд.

Аналогичные механизмы действуют и при назывании эмоций. Для большей конкретности рассмотрим результаты экспериментов с заменой эмоциональных выражений лиц, а также данные, полученные при замене соответствующих названий эмоций. Черты лица на входе кодируются детекторами ориентаций линий в поле 17 зрительной коры. Комбинации детекторов ориентаций линий создают четыре

нейрона-детектора, представляющие наклоны бровей и углов рта, а также их суммарные характеристики. Детекторы специфических выражений эмоций, известные под названием «гностических единиц», локализируются в зрительной области височной коры, образуя карту памяти эмоций. В процессе обучения специфические экспрессии эмоций ассоциируются с их символическими репрезентациями (названиями эмоций). Нейроны памяти экспрессии эмоций связываются с нейронами символов двухсторонними связями. Названия эмоций активируют семантические нейроны и через связи, идущие «сверху-вниз», возбуждают нейроны эмоциональной памяти, относящиеся к соответствующему названию эмоций. Этот процесс составляет основу эмоционального воспоминания. При внезапной смене одного названия эмоции другим два последовательно возникающих вектора возбуждения покомпонентно вычитаются в «разностных» нейронах. Эти разности складываются в «суммирующих» нейронах, генерирующих спайки, в соответствии с абсолютной величиной разности векторов возбуждения на мнемической карте эмоций. Спайковый разряд в «суммирующих» нейронах является мерой семантического различия названий эмоций. Это соответствие достигается путем формирования вектора различий с последующим возбуждением детектора различия и командного нейрона артикуляции. В это же время семантический спайковый разряд «суммирующих» нейронов создает негативный пик вызванного потенциала в ответ на внезапную смену названий эмоций. Это означает, что амплитуда вызванного потенциала содержит в себе информацию о семантическом различии названий эмоций. Вызванный потенциал семантического различия осложняется вкладом перцептивного различия, связанного с различной конфигурацией слов и вызывающего независимый вызванный потенциал, совпадающий по времени с семантическим вызванным потенциалом. Общая амплитуда вызванного потенциала равна сумме семантической и перцептивной компонент. Разделение семантического и перцептивного вкладов в вызванный потенциал достигается применением многомерного шкалирования, которое выявляет два двумерных пространства: круговое семантическое пространство эмоций и пространство длины слова в форме полуокружности.

Основываясь на электрофизиологических экспериментах, предложим модель вычисления семантических различий в нейронных сетях. В общем виде вычисление субъективных различий и амплитуд вызванных потенциалов на внезапную смену символов можно представить следующей последовательностью операций.

1. *Избирательная настройка детектора.*

$$d_{ij} = (\vec{F}_i, \vec{C}_j) = |\vec{F}_i| |\vec{C}_j| \cos A_{ij},$$

где d_{ij} — возбуждение j -го детектора, равное скалярному произведению i -го вектора возбуждения \vec{F}_i и вектора синаптических связей \vec{C}_j j -го детектора.

Внешние стимулы кодируются равными по длине векторами возбуждения предетекторов. Вектор возбуждения предетекторов, воздействуя на детекторы с равными по длине векторами синаптических связей, вызывает в каждом детекторе реакцию, равную скалярному произведению действующего вектора возбуждения на вектор его синаптических связей.

Детектор, вектор синаптических связей которого совпадает по направлению с вектором возбуждения, оказывается максимально активированным и представляет внешний стимул на карте детекторов.

2. *Вычисление перцептивного различия при внезапной смене стимулов.*

$$d_{ij} = |\vec{F}_i - \vec{F}_j|,$$

где d_{ij} — воспринимаемое различие между стимулами S_i и S_j ,

\vec{F}_i — вектор возбуждения, вызванный в предетекторах стимулом S_i ,

\vec{F}_j — вектор возбуждения, вызванный в предетекторах стимулом S_j ,

$|\vec{F}_i - \vec{F}_j|$ — абсолютная величина разности векторов возбуждения.

Различия между пространственно разделенными, но одновременно действующими стимулами равно абсолютной величине разности представляющих их векторов возбуждения предетекторов. Изменения возбуждения в каждом предетекторе измеряются в тонических разностных нейронах.

3. *Вычисление перцептивного различия в фазических «ON»- и «OFF»-нейронах при замене.*

$$\langle ON_p \rangle = |f_{ip} - f_{jp}| [(1 - \exp(-k_1 t)) - (1 - \exp(-k_2 t))], k_1 > k_2,$$

$$\langle OFF_p \rangle = |f_{ip} - f_{jp}| [(1 - \exp(-k_1 t)) - (1 - \exp(-k_2 t))], k_1 < k_2,$$

$$p = 1, 2, \dots, n,$$

где $\langle ON_p \rangle$ и $\langle OFF_p \rangle$ — фазические нейроны в p -м предетекторе, реагирующие на различие стимулов S_i и S_j .

Различие между последовательно сменяющимися стимулами вычисляется в фазических нейронах. Изменение возбуждения в каждом предетекторе измеряется при помощи двух фазических нейронов. «ON»-нейрон генерирует спайки, когда возбуждение в предетекторе возрастает, а «OFF»-нейрон отвечает спайковым разрядом при снижении уровня возбуждения в данном предетекторе. Форма реакций «ON»- и «OFF»-нейронов представлена колоколообразной кривой, следующей за изменением стимула. «ON»- и «OFF»-нейроны работают по принципу «или-или», совместно измеряя абсолютную величину изменения возбуждения предетектора.

4. *Вычисление суммарного различия «суммирующим» нейроном.*

$$SUM = \sum_{p=1}^n (\langle ON_p \rangle + \langle OFF_p \rangle),$$

где SUM — общее число спайков, генерируемых во всех «ON»- и «OFF»-нейронах ансамбля предетекторов при замене стимула S_i стимулом S_j .

Фазические «ON»- и «OFF»-нейроны, «измеряющие» изменения возбуждения в каждом предетекторе, конвергируют на «суммирующем» нейроне, который «измеряет» общее изменение возбуждения во всех предетекторах. Эта сумма изменений возбуждения предетекторов представляет собой абсолютную величину разности векторов возбуждения предетекторов, вычисленную в «сити-блок» метрике.

5. Генерация вызванного потенциала определяется суммой спайков «ON»- и «OFF»-нейронов, «измеряемых» «суммирующим» нейроном.

$$amp = C \cdot Sum,$$

где amp — амплитуда негативного пика вызванного потенциала,

C — коэффициент преобразования спайков в негативную волну вызванного потенциала,

Sum — общее число спайков нейрона, «суммирующего» вклады фазических «ON»- и «OFF»-нейронов ансамбля предетекторов.

Реакции фазических «ON»- и «OFF»-нейронов поступают на «суммирующий» нейрон, разряд которого определяется изменением вектора возбуждения предетекторов при замене одного стимула другим. Спайковый разряд «суммирующих» нейронов на действие сменяющих друг друга стимулов определяет амплитуду вызванного потенциала.

6. Вербальная оценка перцептивного различия связана с переходом от скалярной величины Sum возбуждения «суммирующего» нейрона к векторному представлению этого различия.

Такой переход достигается введением фоновоактивного нейрона, из возбуждения которого вычитается возбуждение «суммирующего» нейрона:

$$\vec{G} = (sum, 1 - sum),$$

где \vec{G} — вектор различия,

sum — возбуждение «суммирующего» нейрона,

$1 - sum$ — остаточное возбуждение фоновоактивного нейрона.

Таким образом, различие Sum преобразуется в вектор различия \vec{G} , нормированный в «сити-блок» метрике. Переход к евклидовой метрике реализуется механизмом нейрональной адаптации.

7. Вектор перцептивного различия \vec{G} действует на набор детекторов различий, обладающих разными, но равными по длине векторами синаптических связей.

Селективный детектор различия D_i «вычисляет» скалярное произведение вектора различия и вектора синаптических связей данного детектора различия d_{ij} :

$$D_{ij}(d_{ij}) = (\vec{G}_i, \vec{H}_j),$$

где \vec{G}_i — вектор различия,

\vec{H}_j — вектор синаптических связей данного детектора различия,

$D_{ij}(d_{ij})$ — возбуждение j -го детектора различия.

Перцептивное различие специфицирует максимально возбужденный детектор различия. В процессе обучения каждый детектор различия связывается с определенным семантическим нейроном, представляющим данное различие в числовой символической форме. Семантические нейроны числовых значений потенциально связаны с разными командными нейронами, но под влиянием инструкции давать численную оценку различия семантический нейрон активирует адекватный командный нейрон артикуляции. В результате генерируется численная оценка перцептивного различия.

Перейдем теперь к вычислению семантических различий и семантического вызванного потенциала.

8. Генерация вектора возбуждения детекторов.

Вычисление семантических различий требует подключения долговременной памяти; для этого, в свою очередь, необходим анализ свойств детекторной карты. Вызывая вектор возбуждения в преддетекторах, стимул создает на детекторной карте вектор возбуждения, компонентами которого являются возбуждения отдельных детекторов.

$$\vec{D}_i = [(\vec{F}_i, \vec{C}_1), (\vec{F}_i, \vec{C}_2), \dots, (\vec{F}_i, \vec{C}_n)],$$

где \vec{D}_i — вектор возбуждения детекторов, вызванный стимулом S_i ;
 (\vec{F}_i, \vec{C}_j) — возбуждение j -го детектора, равное скалярному произведению вектора возбуждения \vec{F}_i и вектора синаптических связей \vec{C}_j .

9. Переход от детекторной карты к карте долговременной памяти.

Формирование нейронов памяти происходит под влиянием векторов возбуждения детекторов. Оно связано с образованием на нейроне памяти синаптических контактов, веса которых прямо пропорциональны компонентам вектора возбуждения детекторов.

$$\vec{K}_i = \vec{D}_i,$$

где \vec{K}_i — вектор синаптических связей на i -м нейроне долговременной памяти,

\vec{D}_i — вектор возбуждения детекторов, вызванный i -м стимулом.

Нейрон памяти хранит информацию о стимуле в форме вектора весов своих синаптических связей. Карта памяти образована нейронами с разными векторами весов синаптических контактов.

10. Запечатление стимула определяется резервным нейроном памяти, максимально активирующимся на входе.

$$M_i = \vec{D}_i \Rightarrow \vec{K}_i,$$

где M_i — нейрон памяти, приобретающий вектор синаптических связей \vec{K}_i под влиянием стимула S_i посредством вектора возбуждения детекторов \vec{D}_i .

11. Ответ нейрона памяти на предъявленный стимул.

После того как нейрон памяти сформировался, он участвует в опознании стимулов. Последнее происходит, когда стимул на входе

генерирует детекторный вектор возбуждения, совпадающий с вектором синаптических связей данного нейрона.

$$M_i = (\vec{D}_i, \vec{K}_i),$$

где M_i — возбуждение нейрона памяти, сформированное ранее стимулом S_i ,

\vec{D}_i — вектор возбуждения детекторов, вызванный повторным нанесением стимула S_i ,

\vec{K}_i — вектор синаптических связей нейрона памяти M_i , возникший при первоначальном нанесении стимула S_i ,

(\vec{D}_i, \vec{K}_i) — скалярное произведение вектора возбуждения детекторов и вектора синаптических связей нейрона памяти M_i .

Если возбуждение нейрона памяти выше порогового уровня, то стимул S_i опознается как знакомый.

12. Возникновение вектора возбуждения на карте долговременной памяти.

Вектор возбуждения детекторов действует не на один нейрон памяти, а на популяцию нейронов, образующих нейронную карту памяти. В результате действия стимула S_i на карте нейронов памяти образуется вектор возбуждения, компонентами которого являются возбужденные нейроны памяти.

$$\vec{M}_i = [(\vec{D}_i, \vec{K}_1), (\vec{D}_i, \vec{K}_2), \dots, (\vec{D}_i, \vec{K}_n)],$$

где \vec{M}_i — вектор возбуждения памяти, вызванный на карте нейронов памяти стимулом S_i ,

\vec{D}_i — вектор возбуждения детекторов, вызванный стимулом S_i ,

\vec{K}_j — вектор синаптических связей j -го нейрона памяти, $j = 1, 2, \dots, n$,

(\vec{D}_i, \vec{K}_j) — скалярное произведение вектора возбуждения детекторов, вызванного i -м стимулом, и вектора синаптических связей j -го нейрона памяти.

13. Формирование двухсторонних связей между семантическим нейроном и нейронами памяти.

Синаптические контакты на семантическом нейроне равны по своему весу возбуждениям нейронов на карте памяти. Синаптический контакт на каждом нейроне памяти, связывающий его с семантическим нейроном, равен возбуждению данного нейрона памяти в момент образования синапса. Таким образом, возбуждение семантического нейрона создает на карте памяти вектор возбуждения, равный исходному вектору возбуждения нейронов на карте памяти.

$$\vec{W}_{ij} = \vec{M}_i,$$

где \vec{M}_i — вектор возбуждения на карте памяти,

\vec{W}_{ij} — вектор синаптических связей, созданный вектором возбуждения памяти \vec{M}_i на j -м семантическом нейроне.

Одновременно вектор \vec{W}_{ij} представляет множество синаптических контактов, связывающих j -й семантический нейрон с нейронами долговременной памяти, образующими вектор возбуждения памяти \vec{M}_j . Таким образом, вектор возбуждения памяти может быть вызван по схеме «снизу-вверх» стимулом на входе посредством вектора возбуждения преддетекторов и вектора возбуждения детекторов, а также «сверху-вниз» посредством символа, активирующего семантический нейрон.

14. *Операция создания вектора возбуждения на карте нейронов памяти по схеме «снизу-вверх».*

$$\vec{M}_i = [(\vec{D}_i, \vec{K}_1), (\vec{D}_i, \vec{K}_2), \dots, (\vec{D}_i, \vec{K}_n)],$$

где \vec{M}_i — вектор возбуждения на карте памяти, вызванный i -м стимулом,
 \vec{D}_i — вектор возбуждения детекторов, вызванный стимулом S_i ,
 \vec{K}_j — вектор синаптических связей j -го нейрона памяти, $j = 1, 2, \dots, n$.

15. *Операция создания вектора возбуждения на карте нейронов памяти по схеме «сверху-вниз».*

$$\vec{M}_i = (I_j, \vec{W}_{ij}),$$

где I_j — возбуждение j -го семантического нейрона,

\vec{W}_{ij} — вектор синаптических весов от j -го семантического нейрона к нейронам памяти,

\vec{M}_i — вектор возбуждения нейронов памяти, вызванный возбуждением i -го семантического нейрона.

16. *Вычисление семантического различия между символами в результате последовательной смены векторов возбуждения на карте памяти.*

Семантическое различие равно абсолютной величине разности векторов возбуждения памяти, создаваемых сменяемыми символами:

$$d_{ij} = |\vec{M}_i - \vec{M}_j|,$$

где d_{ij} — семантическое различие между i -м и j -м символами,

\vec{M}_i — вектор возбуждения памяти, вызванный i -м символом,

\vec{M}_j — вектор возбуждения памяти, вызванный j -м символом.

17. *Семантическое различие при внезапной смене одного символа другим осуществляется в фазических «ON»- и «OFF»-нейронах.*

Отдельный нейрон памяти при действии i -го символа характеризуется возбуждением M_{ip} , где p — номер нейрона памяти, а при действии j -го символа — возбуждением M_{jp} . Отдельный нейрон памяти связан с «ON»-нейроном параллельно через возбуждающий и тормозный синапсы таким образом, что скорость экспоненциального нарастания возбуждения больше таковой для торможения.

$$\langle \text{ON}_p \rangle = (M_{ip} - M_{jp}) [(1 - \exp(-k_1 t)) - (1 - \exp(-k_2 t))], \quad k_1 > k_2,$$

где $\langle \text{ON}_p \rangle$ — p -й отдельный «ON»-нейрон,

M_{ip} — возбуждение p -го нейрона памяти при действии i -го символа,

M_{jp} — возбуждение p -го нейрона памяти при действии j -го символа,
 $|M_{ip} - M_{jp}|$ — абсолютная величина разности возбуждений
 p -го нейрона памяти при смене i -го символа на j -й символ,

$(1 - \exp(-k_1 t))$ — экспоненциальный рост возбуждающего постсинаптического потенциала в p -м «ON»-нейроне,

$(1 - \exp(-k_2 t))$ — экспоненциальный рост тормозного постсинаптического потенциала в p -м «ON»-нейроне.

$$\langle OFF_p \rangle = (|M_{ip} - M_{jp}|) [(1 - \exp(-k_1 t)) - (1 - \exp(-k_2 t))], \quad k_1 < k_2,$$

где $\langle OFF_p \rangle$ — возбуждение «OFF»-нейрона,

M_{ip} — возбуждение p -го нейрона памяти при действии i -го символа,

M_{jp} — возбуждение p -го нейрона памяти при действии j -го символа,

$(1 - \exp(-k_1 t))$ — экспоненциальный рост возбуждающего постсинаптического потенциала,

$(1 - \exp(-k_2 t))$ — экспоненциальный рост тормозного постсинаптического потенциала.

Таким образом, «ON»-нейрон генерирует спайки, если возбуждение данного нейрона памяти возрастает. «OFF»-нейрон генерирует спайки при снижении возбуждения нейрона памяти.

18. *Трансформация спайков, генерируемых «ON»- и «OFF»-нейронами, в амплитуду семантического вызванного потенциала.*

Выходы «ON»- и «OFF»-нейронов суммируются в «суммирующих» нейронах, спайковый разряд которых является мерой семантического различия. Разряд «суммирующих» нейронов приводит к выходу из них калия и деполяризации клеток глии, определяющей амплитуду негативного пика вызванного потенциала. Таким образом, вызванный потенциал на смену символов служит мерой семантического различия:

$$Sum = \sum_{p=1}^n (\langle ON_p \rangle + \langle OFF_p \rangle)$$

где Sum — общее число спайков в «ON»- и «OFF»-нейронах, определяющих разряд «суммирующего» нейрона.

$$A = C \cdot Sum,$$

где A — амплитуда семантического вызванного потенциала,

C — коэффициент преобразования спайков сигнала различия в амплитуду потенциала семантического различия.

При этом необходимо учитывать вызванный потенциал на смену конфигураций стимулов.

Итак, численные оценки семантических различий и амплитуды семантических вызванных потенциалов на внезапную замену символов возникают из различий векторов возбуждения памяти. Последние вызываются сменяемыми символами, действующими через семантические нейроны на карту нейронов памяти по схеме «сверху-вниз». Спайковые разряды, возникающие в «ON»- и «OFF»-нейронах, складываются в «суммирующих» нейронах, спайковый разряд которых определяет се-

мантическое различие. Спайковый разряд превращается в негативный пик вызванного потенциала при участии клеток глии. Сферическая структура семантического пространства предопределена механизмом нормировки векторов возбуждения на уровне преддетекторов.

Отвечая на вопрос о том, почему субъективные балльные оценки семантических различий коррелируют с амплитудами вызванных потенциалов на замену слов, следует подчеркнуть, что и те и другие определяются работой «суммирующих» нейронов, «измеряющих» абсолютную величину разности векторов возбуждения, создаваемых семантическими нейронами на карте долговременной памяти.

Сферическая структура семантических пространств основывается на равных по длине перцептивных векторах возбуждения, которые определяют сферичность карты детекторов. Последняя в свою очередь определяет сферичность карты памяти, на которой семантические нейроны создают векторы возбуждения как основу семантических различий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Измайлов Ч.А., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н. Связь зрительных вызванных потенциалов с различиями между эмоциональными выражениями схематических лиц // Журн. ВНД им. И.П. Павлова. 2000. Т. 50. № 5. С. 805—818.

Измайлов Ч.А., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н. и др. Вызванный потенциал как мера семантических цветовых различий у человека // А.Р. Лурия и психология XXI века / Под ред. Т.В. Ахутиной, Ж.М. Глозман. М., 2003 а. С. 283—289.

Измайлов Ч.А., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н. и др. Семантический компонент вызванного потенциала различения // Современные направления междисциплинарных исследований. М., 2003 б. С. 295—308.

Конорски Ю. Интегративная деятельность мозга. М., 1967.

Николлс Дж.Г., Мартин А.Р., Валлас Б.Дж. и др. От нейрона к мозгу. М., 2003.

Полянский В.Б., Евтихин Д.В., Соколов Е.Н. Яркостный компонент зрительного вызванного потенциала на цвет // Журн. ВНД им. И.П. Павлова. 1999. № 6. С. 1046—1051.

Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс. Новый взгляд. М., 2003.

Соколов Е.Н., Вайткявичюс Г.Г. Нейроинтеллект: от нейрона к нейрокомпьютеру. М., 1989.

Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичюс Г.Г. Искусственные органы чувств. М., 1979.

Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Spherical model of color and brightness discrimination // Psychol. Sci. 1991. Vol. 2. N 4. P. 249—259.

Izmailov Ch.A., Sokolov E.N. Subjective and objective scaling of large color differences // Psychophysics beyond sensation / Ed. by Ch. Kaernbach, E. Schroger, H. Muller. Mahwah, NJ, 2004. P. 27—43.

Miyashita Y., Sakai K., Higuchi S. et al. Localization of prima long-term memory in the primate temporal cortex // Memory: Organization and locus of change / Ed. by L.R. Squire, N.M. Weinberger, G. Lynch et al. N.Y., 1991. P. 239—249.

Näätänen R. Attention and brain function. Hillsdale, NJ, 1992.