

Векторный код и ритмическая активность мозга

Е.Н.Соколов

Факультет психологии МГУ им. М.В. Ломоносова

1. Вектор возбуждения — это комбинация возбуждений ограниченного числа нейронов-предетекторов, образующих нейронный ансамбль.
2. Вектор возбуждения характеризуется постоянством своей длины при всех стимулах, воздействующих на данный ансамбль предетекторов.
3. Вектор возбуждения предетекторов воздействует параллельно на множество нейронов-детекторов, образующих детекторную карту, на которой отображаются стимулы, воздействующие на ансамбль предетекторов.
4. Отображение стимулов на детекторной карте достигается синаптической специализацией детекторов: каждый детектор характеризуется особым набором разных по «весу» синапсов, образующих уникальный вектор синаптических контактов данного детектора.
5. Все векторы синаптических связей детекторов, получающих входы от данного ансамбля предетекторов, равны по своей длине.
6. Каждый детектор умножает пресинаптическое возбуждение на «вес» соответствующего синапса и суммирует эти произведения, выполняя формально операцию вычисления скалярного произведения вектора предетекторов и вектора синаптических связей данного детектора.
7. Скалярное произведение равных по длине векторов зависит только от угла между ними и достигает максимума, когда векторы совпадают по направлению.
8. Вектор синаптических связей данного детектора определяет его избирательную чувствительность в отношении определенного вектора возбуждения предетекторов, а, следовательно, и в отношении того стимула, который этот вектор возбуждения порождает.
9. Постоянство длины векторов синаптических связей детекторов означает, что детекторная карта представляет собой сферическую поверхность в пространстве, размерность которого определяется числом синапсов, связывающих детектор с предетекторами.
10. Максимальное возбуждение определенного детектора как элемента детекторной карты соответствует специфическому ощущению.
11. Кроме спецификации стимула, векторный код позволяет «вычислять» межстимульные различия, равные абсолютной величине разности тех векторов возбуждения, которые эти стимулы вызывают.
12. Предъявление двух разных стимулов, следующих друг за другом без промежутка между ними, приводит к развитию негативной волны вызванного потенциала, являющейся мерой межстимульного различия.
13. У человека амплитуда негативного пика вызванного потенциала на смену одного стимула другим (в пределах данного ансамбля предетекторов) в высокой степени положительно коррелирует с восприятием величины межстимульного различия.
14. «Вычисление» различий между сменяющимися друг друга стимулами осуществляется в каждом предетекторе при участии фазических «ON» и «OFF» нейронов.

15. Фазический нейрон «ON» отвечает возбуждением при возрастании активности данного предетектора; фазический нейрон «OFF» отвечает возбуждением при снижении активности этого предетектора.
16. Комбинация возбуждений «ON» и «OFF» нейронов данного ансамбля предетекторов образует вектор, равный разности векторов возбуждения, генерируемых сменой стимулов.
17. Сумма возбуждений, представленных компонентами вектора различия, определяет межстимульное различие, выражающееся в амплитуде негативного пика вызванного потенциала и величине субъективного восприятия межстимульного различия.
18. Фазические реакции «ON» и «OFF» нейронов возникают в результате конвергенции на каждом из них двух входов от данного предетектора: возбуждающего и тормозного, различающихся крутизной нарастания фронтов возбуждающего и тормозного постсинаптических потенциалов.
19. Фоновые изменения уровня возбуждения предетекторов, поступая на фазические нейроны «ON» и «OFF», определяют ритмическую активность в локальных участках мозга.
20. При усреднении вызванных потенциалов на повторяющиеся стимулы реакции «ON» и «OFF» нейронов, совпадая по фазе со стимулом, определяют амплитуду усредненного вызванного потенциала.
21. Таким образом, фоновая ритмика мозга и вызванные потенциалы определяются общим механизмом работы фазических нейронов «ON» и «OFF», функционирующих при «вычислении» межстимульных различий.
22. Доказательством общности фоновой ритмики мозга и конфигурации усредненного вызванного потенциала служит совпадение их спектральных характеристик.

Психогенетика и пересмотр психологических постулатов.

Е.А. Сергиенко *

Институт психологии РАН

Генетика поведения — это одна из недавно возникших областей наук о человеке, которая объединяет интересы психологии, медицины, биологии. Данные этой бурно развивающейся области науки уже заставили пересмотреть многие кардинальные представления о природе человеческого поведения, индивидуальных различиях и причинах возникновения отклонений. Например, аутизм связывали с разными причинами, в том числе и с эмоциональной холодностью матери. Однако работы в области генетики поведения показали решающую роль генетических факторов в развитии аутизма [20]. Широкомасштабные исследования в области генетики поведения показали высокую степень генетического влияния на алкоголизм мужчин и женщин, на уровне 70% [16].

Генетику поведения (Behavioral genetics) вернее будет называть психогенетикой, что отражает психологическую часть данной междисциплинарной области знаний. Она использует два основных метода исследования, признанных наиболее надежными. Это классическое близнецовое исследование, сравнивающее сходство между монозиготными (МЗ), или идентичными близнецами, имеющими одинаковый генотип -1,0, и дизиготными близнецами (ДЗ), имеющими сходство на уровне сибсов -0,5. Другой основной метод психогенетики — сравнение приемных детей с их приемными и биологическими родителями, включая разные варианты этих методов: лонгитюдные исследование и использование метода срезов. Наиболее распространенной моделью в психогенетике являются близнецовые исследования — эксперимент, поставленный самой природой.

В нашей стране в настоящее время известны лишь единичные исследования близнецов, а лонгитюдные проекты, ценность которых несравненно наиболее высока, представлены московским исследованием близнецов, начатым в лаборатории Психологического института РАО И.В. Равич-Щербо более десяти лет назад, на детях от 6 до 16 лет и наше младенческое исследование детей от 4 до 42 месяцев. Психогенетические лонгитюдные исследования на детях младенческого и раннего возраста у нас в стране вообще не проводились.

Наш близнецовый лонгитюд был дополнен лонгитюдным исследованием одиночно рожденных (ОР) детей того же возраста, которые представляют контрольную выборку для сравнения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ, грант № 02 –06 –00180а.

Целью нашего лонгитюдного исследования детей раннего возраста были выделение генетических и средовых составляющих когнитивного, психомоторного развития, изучение становления индивидуальности, исследование особенностей близнецового развития в указанных направлениях, а также совмещение задач психогенетического исследования с задачами психологии развития — анализ тенденций и закономерностей психического развития на близнецовой модели.

Лонгитюдное исследование выполняется сотрудниками лаборатории когнитивных процессов Института психологии РАН.

В настоящее время в близнецовой части исследования принимает участие 60 пар близнецов. Среди них 28 пар МЗ (15 пар мальчиков и 13 пар девочек) и 32 пары ДЗ близнецов (однополых: 16 пар мальчиков и 16 пар девочек). Выборка одиночнорожденных (ОР) детей насчитывает 70 детей. Среди них 37 мальчиков и 33 девочки. Дети обследуются в тех же возрастных срезах, что и близнецы. Для диагностики уровней ментального и психомоторного развития младенцев применяется тест «Шкалы развития младенца» Н. Бейли. При обработке результатов тестирования осуществляется вычисление шкальных индексов — ментального, психомоторного и поведенческого развития (MDI, PDI, BSI) и субшкальных показателей, отражающих различные линии развития внутри психической и моторной сферы. Принципы группировки проб теста Бейли в субшкалы представлены в работе [10].

В психологии классическими постулатами стали представления о нарастании значения социально-культурной среды для развития высших психических функций в процессе развития человека. Экспериментальные исследования А.Р. Лурия, проведенные еще в 30-е годы, показали, что на разных этапах онтогенеза влияние генетических факторов оказывается различным на развитие одной и той же психической функции, что связано с качественной перестройкой психической деятельности ребенка. При этом полагалось, что генетические, природные факторы являются ведущими в начале развития психической функции, тогда как социально-культурная среда — детерминирует, опосредует развитие высших психических функций у более старших детей.

Особенно большой вклад культурная среда оказывает на развитие мышления, общей интеллектуальной способности, речи.

Когда оцениваются эффекты наследуемости, то важным является представление о том, возрастает ли роль наследственности в процессе жизненного цикла, или она становится менее значительна. Большинство людей и даже специалистов, ответят, что роль наследственности становится менее важной в жизни человека с возрастом. Кажется, что

жизненные события, образование, работа и другой опыт аккумулируются в течение жизни. Это предполагает, что окружающая среда, особенности образа жизни оказывают возрастающее влияние на фенотипические различия, что с необходимостью ведет к уменьшению роли наследуемости. Большинству людей наследуемость представляется раз и навсегда заданной, а генетические эффекты — неизменными от начала жизни до ее конца. С ответами именно на эти вопросы связаны революционные шаги в психологии.

Психогенетика заставляет пересмотреть устоявшиеся положения в психологии. Рассмотрим некоторые из них.

1. Генетические факторы становятся возрастающе важными, особенно для общей когнитивной способности в течение жизни [4; 6; 10; 13; 15; 17–23]. Например, лонгитюдное исследование приемных детей в Колорадском проекте (Colorado Adoption Project) представило данные для общей когнитивной способности в диапазоне от младенчества до подросткового возраста [21]. Корреляции между биологическими родителями и их родными детьми, которые живут от них отдельно, увеличивается на 0,18 — у младенцев, 0,20 — у 10-летних детей и 0,30 — у подростков. Корреляции между приемными родителями и приемными детьми равнялись 0. Данные означают, что семейная среда не так важна для общей когнитивной способности. Различие между МЗ и ДЗ близнецами увеличивалось особенно сильно во взрослом периоде. Значение наследуемости МЗ близнецов, выросших раздельно, оценивалось на уровне 75% по сумме пяти исследований [14]. В недавнем шведском исследовании близнецов в возрасте 60 лет, выросших вместе или врозь (Swedish Adoption-Twin Study of Ageing), наследуемость оценивалась на уровне 80% [18], тогда как в младенчестве эти данные колеблются от 0 до 20%. По нашим данным на сегодняшний момент проведения лонгитюдного исследования в возрасте 1 года генетические влияния оцениваются на уровне 7%.

2. В нашем исследовании было показано неравномерное изменение общей когнитивной способности в первые три года жизни ребенка и **значительное увеличение генетических влияний в возрасте от 1,5 до 2 лет**. Резкое повышение генетического влияния мы связываем с **переходным периодом раннего детства**. В этот период происходят изменения структуры психометрического интеллекта — снижаются показатели интеллекта, изменяется его факторная структура, происходят существенные колебания вариативности процесса. Аналогичная перестройка наблюдается и в психомоторной способности, только начинается раньше, с 12 мес.

Мы предположили, что именно в этот возрастной диапазон происходит реорганизация ментальных и психомоторных способностей.

Приведем аргументы в пользу нашей гипотезы.

- Возрастной точке снижения средних показателей развития (MDI, PDI) по выборкам (МЗ, ДЗ и ОР детей) предшествует падение вариативности, а при возрастании показателей вариативность начинает расти. Особенно сильно данная тенденция выражена у МЗ и ДЗ близнецов по сравнению с ОР детьми. Эти периоды падения показателей развития являются начальными периодами становления в развитии новых функциональных систем психической организации.
- Факторный анализ ментальных и психомоторных составляющих развития показал, что в переходные периоды наблюдается диффузность факторных структур, которая сменяется дифференцированными структурами ментальных и психомоторных способностей.
- При проверке статистической значимости различий между средними индексами выявлены значимые различия у ОР детей (центром различий являются возрасты 4 и 18 месяцев). У МЗ — значимые различия ментальных индексов только в возрастах 18 и 42 мес. У ДЗ — различия между 24 мес. и более старшими. Данные хорошо согласуются с нашей гипотезой о переходном периоде 18–24 мес.

Анализ динамики изменений средних показателей ментального и психомоторного развития и их стандартных отклонений при сравнении размерности состава факторных структур трех групп детей показывает, что возраст 18–24 недели — это возраст существенных изменений в структуре психической организации. При этом изменениям дифференциации и реорганизации когнитивных и психомоторных способностей предшествует период снижения дифференциации, снижение общего уровня ментального и психомоторного развития, снижение вариативности. Эта общая картина перехода дополняется индивидуальными вариантами развития, которые мы наблюдали у трех групп детей, при более растянутых, «размазанных» процессах изменений и перестроек в развитии близнецов, особенно МЗ.

Наша гипотеза хорошо согласуется с данными многих авторов о существенном, качественном изменении психической организации именно в возрасте 1,5— 2 лет. Ж. Пиаже считал, что этот возраст становится рубежом в интеллектуальном развитии, что связано с появлением способности к репрезентации, как результата сенсомоторного развития. Дж. Кармилофф-Смит полагает, что именно в этом возрасте ребенок приобретает способность удерживать в уме одновременно две репрезентации [по 25]. Э. Мелтзофф с коллегами указывают на принципиальное изменение в качестве организации репрезентаций: они становятся более гибкими, пластичными и генерализованными, что позволяет запоминать, воспроизводить действия модели при значительной отсрочке и

широко переносить их на новые условия. Дж. Каган отмечает проявление качественных изменений в концепции Я. Дети 2-летнего возраста распознают зеркальный образ (фото или видеоизображение) себя как собственную ментальную схему. В этом возрасте происходит и речевой взрыв, когда происходит стремительный рост словаря и становление грамматики. Речевая революция раннего детства совпадает также с качественными изменениями в категоризации: спонтанная категоризация объектов становится и пространственно локализованной (дети не только относят разные объекты к разным категориям, но размещают их раздельно) [по 25]. Значительный скачок совершается и в организации действий. Ребенок начинает выполнять последовательные и взаимодополнительные, целенаправленные действия, в которых явно выражено планирование, программирование и регуляция [8].

Следовательно, наша гипотеза о том, что возраст 1,5–2 года является переходным периодом психической реорганизации, находит широкое подтверждение. Резкое усиление генетических влияний в данном возрастном диапазоне согласуется с данными лонгитюдного исследования близнецов 6–16 лет М.С. Егоровой с коллегами [3]. Именно в критические периоды развития возрастает роль генетических факторов. Что это означает? Это означает, что кризисные периоды развития связаны с новыми генетическими влияниями, приводящими к перестройке психических функций. Это означает признание природной детерминации этого процесса.

Приведенные данные о генетических влияниях в переходные периоды заставляют пересмотреть также представление о периодизации психического развития и его движущих силах. Так, в отечественной литературе общепринятым стало представление Л.С. Выготского о социальной ситуации развития как движущей силе в становлении личности, психических новообразований в целом. Он писал: «Социальная ситуация развития представляет собой исходный момент для всех динамических изменений, происходящих в развитии в течение данного периода. Она определяет целиком и полностью те формы и тот путь, следуя по которому ребенок приобретает новые и новые свойства личности, черпая их из социальной действительности, как из основного источника развития, тот путь, на котором социальное становится индивидуальным.» [2, 903]. С точки зрения А.Н. Леонтьева и Л.И. Божович качественные преобразования состоят в смене ведущей деятельности, что ведет к новой системе отношений. При этом суть кризиса понимается как несоответствие нового отношения к окружению со старой системой отношений, возникшей в предшествующей ведущей деятельности. Более того, кризисным переходным периодом в периодизации Л.С. Выготского, Д.Б. Эльконина, А.Н. Леонтьева

выделен возраст трех лет, где суть кризиса состоит в борьбе за самостоятельность — «Я сам». Психическое развитие опосредовано только средовыми факторами, а никак не затрагивает генетические основы поведения. В моей работе 1990 года предлагалось отойти от жесткой дихотомии в понимании детерминации психического развития, ее гиперсоциализации, формулировался принцип эпигенетического развития [7].

Современные данные психогенетики, психологии развития подтверждают, что внешним проявлениям возрастных кризисов предшествуют внутренние изменения динамических систем психики, обусловленные новыми влияниями генетических факторов.

Открытым остается вопрос о соотношении понятий: сензитивный период, критический и переходный период, возрастной кризис. Вопрос этот предполагает более детальное рассмотрение, но я могу предложить некоторое собственное видение данного соотношения.

Поскольку сензитивные периоды человека описаны только для отдельных функций, например, перцептивных (острота зрения, бинокулярность, цветовое зрение и другие), речевых, то возникает вопрос о детерминации сензитивных периодов как механизмов перехода от одной стадии развития к другой. Универсальность многих сензитивных периодов наталкивает на предположение о главной роли генетики в данном процессе. Однако, следуя эпигенетическому принципу развития, генетическое — это только возможность развиваться в определенном направлении, реализация этого потенциала возможна лишь при средовом адекватном опыте и зависит от типа генетико-средового взаимодействия (модель Готтлиба, подробнее см. [9]). В ней сензитивный период рассматривается как фильтр средовых воздействий, определяющий меру селективности приема внешних влияний. Отмечается, что сензитивный период приходится на время до, в течение или после перехода от нижнего к более высокому уровню развития фенотипа.

Сензитивный период от критического отличается только степенью соответствия генотипа и среды. Сензитивные периоды — более либеральны и не предполагают столь жесткого соответствия. «Можно и лучше сейчас, чем в другое время»; при рассогласовании генотип-средового взаимодействия возможны широкие варианты адаптации. Критический же период означает, что «только теперь и только это», и вариативность развития строго ограничена. При этом в человеческом развитии наблюдаются немногочисленные критические и множественные сензитивные периоды. Возрастные кризисы возникают при множественности одновременно протекающих сензитивных периодов в развитии разных психических функций, которые и появляются столь очевидно на поведенческом уровне из-за множественности изменений. Трудно согласиться, что кризисные периоды — это всегда

революционный, а не эволюционный путь, где происходит отмирание старого и порождение нового [5]. Не отмирание, а иерархическая реорганизация дает наблюдаемый эффект появления нового. Это чисто эволюционный путь развития. В модели динамических систем к реорганизации системы может привести постепенное накопление взаимодействия старых компонентов и включение новых, даже незначительных звеньев [11]. Динамические системы изменяются во времени, достигая нового оптимального состояния систем. Поведение и его развитие являются результатом функционирования сложных систем, включающих психологические, биологические и физические компоненты. Развитие может быть понято только в терминах сложного взаимодействия компонентов единой системы, без редукции к одному элементу или одной причине. Ключевая характеристика динамической системы — самоорганизация. При непрерывном изменении в одном или нескольких параметрах, новое состояние системы может появиться спонтанно как функция нелинейных взаимодействий между компонентами системы. Например, при реализации поведения оно может казаться дискретным и неупорядоченным, тогда как на уровне динамики систем — оно непрерывно и упорядоченно само по себе. Так происходит развитие словаря — через отдельные повторения слов, фонем, интонаций, что не может сначала быть реализовано как ясное проявление речи. Однако шаг за шагом происходит непрерывное упорядочение компонентов системы, и это приводит через процесс самоорганизации к образованию динамической системы, реализующей речь. Маленькие изменения могут стать причиной больших изменений. Данная модель позволяет понять логику рассогласования между уровнем непрерывных изменений системы и дискретного перехода ее в новое состояние, к новому уровню функционирования. Динамическая модель открывает путь анализа одновременно изменяющихся влияний (гены, созревание, опыт) для понимания мультиуровневой причинности.

В отечественной психологии выделяются два основных кризиса раннего детства, которые нас особенно интересуют, это – кризис одного года и трех лет [2; 5]. При этом в классификации Ж. Пиаже, З. Фрейда, Э. Эриксона, А. Валлона и других, выделяется возраст 2-х лет как возраст важных переходов в психическом развитии. В нашей работе мы обнаружили именно в этом возрасте существенные изменения в динамике и структуре психического развития. Мы полагаем, что именно возраст 1,5–2 лет является переходным периодом в психическом развитии ребенка. В переходные периоды должны меняться генетико – средовые соотношения в развитии функций, изменяться структура в системе когнитивных и психомоторных способностей, то есть происходить иерархическая реорганизация динамической системы поведения. Используя принципы системно-

динамического подхода можно предположить, что расхождение в выделении переходных периодов развития лежат в ограничениях понимания причинности этих переходов. Проявления на поведенческом уровне кризиса 3-х лет возможно оказывается следствием перестроек и динамической реорганизации систем в 1,5–2 летнем возрасте. Полагаем, что возможность решения данной задачи лежит на пересечении психогенетического и общепсихологического подходов.

Еще одно представление психологии, на наш взгляд, настоятельно требует корректировки в свете достижений психогенетики.

3. Генетический вклад в развитие высших психических функций (речи, вербального интеллекта) менее значителен, чем в непосредственные психические функции. По представлениям Л.С. Выготского существуют два ряда психических функций: природные, низшие, непосредственные, и высшие, опосредованные, имеющие разную детерминацию. Низшие психические функции детерминированы в основном природой, тогда как высшие — социумом. Поскольку ребенок как личность развивается только в процессе его социального развития, то вклад природных функций важен только для самых ранних этапов онтогенеза, не имеющих значение для понимания психики человека. Л.С. Выготский так объяснял тот факт, что эмбриональное развитие ребенка изъято из схемы периодизации психического становления: «Эмбриональное развитие представляет собой совершенно особый тип развития, подчиненный другим закономерностям, чем начинающееся с момента рождения развитие личности ребенка. Эмбриональное развитие изучается самостоятельной наукой — эмбриологией, которая не может рассматриваться в качестве одной из глав психологии» [2, 900]. В настоящее время существует целое направление — пренатальная психология, заставляющая, наряду с психогенетикой, пересмотреть принятые отечественной психологией постулаты.

В близнецовых исследованиях продемонстрирован значительно больший генетический вклад в развитие вербальных способностей, чем невербальных [6; 14; 15; 18; 19–23]. Так, в Норвежском исследовании взрослых близнецов (по 40 пар МЗ и ДЗ) внутрипарные корреляции вербального интеллекта МЗ составляли 0,88, тогда как ДЗ — 0,42. Следовательно, коэффициент наследуемости h^2 составлял 0,92, тогда как внутрипарное сходство по невербальному интеллекту для МЗ — 0,79, ДЗ — 0,51, соответственно, $h^2 = 0,56$. В Шведском лонгитюдном исследовании близнецов 12 и 18 лет вербальные тесты также демонстрировали большую генетическую обусловленность, чем невербальные, причем обусловленность эта увеличивалась с возрастом (0,20 — в 12 лет до 0,70 в 18 лет). Оказалось также, что невербальные способности более чувствительны к влияниям среды [по 6]. Оценка

интеллекта при помощи невербальных заданий задумывалась при создании интеллектуальных тестов как более культурно независимая, подчиненная только природе человека. Психогенетические исследования опровергают эту посылку. Можно предположить, что большая генетическая обусловленность вербального интеллекта связана с реализацией генетически детерминированной у человека способности к речи. Если это предположение верно, тогда исследования речевой способности должны выявить высокую генетическую детерминированность. В исследовании Ф. Дейла с коллегами (Twins Early Development Study-TEDS) [12], выполненных на 3039 парах близнецов (1044 МЗ и 1006 ДЗ одного пола и 986 ДЗ разного пола), измерялось развитие речи в 2-летнем возрасте с помощью опроса родителей по коммуникативной шкале МакАртура (MacArthur Communicative Development Inventory (MCDI). Данная шкала позволяла оценить развитие активного словаря у детей — употребление слов и развитие грамматики. Анализ результатов показал, что конкордантность МЗ была 81% и 42% — ДЗ одного и разного пола. Эти данные указывают на высокий уровень генетических влияний и незначительный — средовых для развития речи. Однако более удивительные данные были получены при сопоставлении генетико-средового соотношения при среднем и низком уровне развития речи. При низком уровне речевых достижений коэффициент наследуемости оценивался в 73%, а вклад общей среды составлял 18%, тогда как для всей выборки наследуемость индивидуальных различий была 28%, а средовые влияния — 69%. В группе с низким уровнем развития речи были обнаружены значительные половые различия. Вклад наследуемости для мальчиков составлял 90%, а для девочек — 40%. Более умеренные значения были получены в работе Дж. Резника с коллегами [25], выполненной в рамках МакАртуровского лонгитюдного исследования близнецов. Прослеживалось развитие экспрессивной и импрессивной речи у детей 14, 20 и 24 мес., при помощи коммуникативного опросника (Sequenced Inventory of Communication Development), оценивалось развитие интеллекта тестом Бейли (BSID). Оказалось, что доля генетических влияний в развитии экспрессивной речи особенно велика и изменяется очень быстро (14 мес. — 0,01, 20 мес. — 0,25 и 24 мес. — 0,38). Для импрессивной речи самый существенный вклад генетических факторов наблюдается только в 14 мес. (0,28, а в 20 мес. — 0,13, в 24 — 0,18). Средовые влияния в данном исследовании — очень существенны для речевого развития (средовой вклад для экспрессивной речи — 0,40, а для импрессивной — 0,51 в 24 мес.). Речевое развитие испытывает более сильные генетические влияния у мальчиков, чем у девочек. У мальчиков $h^2 = 52\%$ для вербальной экспрессии и 33% для импрессивной речи в 24 мес., тогда как у девочек $h^2 = 18\%$ и 0 соответственно в том же возрасте.

В исследовании близнецов-подростков Д. Роув (D. Rowe) с коллегами [26] нашел, что генетико-средовые соотношения показателя словарного развития связаны с уровнем образования семей. Образовательный уровень выступает как модератор вкладов наследуемости и общей среды. По всей выборке вклад наследуемости (h^2) составлял 0,57, а вклад вариативности общей среды (c^2) только 0,13. Среди высоко образованных семей величина генетического вклада в словарное развитие подростков была больше 74%, а вклад общей среды — 0%; у менее образованных семей вклад наследуемости уменьшался, а вклад общей среды увеличивался (26% — h^2 и 23% — c^2).

Приведенные данные, несмотря на некоторую их несогласованность, что характерно для психогенетических исследований, проводимых разными методами и анализируемых разными статистическими моделями, обнаруживают общую картину достаточно высокого генетического влияния на речевое развитие; при этом происходит увеличение наследственных факторов в 20–24 мес., в возраст наибольшей сензитивности речевой функции. Таким образом, самая специфичная для человека, высшая психическая функция — речь, испытывает значительное влияние генетических факторов, хотя влияние среды для ее развития необходимо. Значительный вклад наследственности в функцию, детерминация которой считалась исключительно социальной, указывает на необходимость пересмотра сложившихся представлений в отечественной психологической науке.

Таким образом, развитие психогенетики, междисциплинарной науки, обуславливает целый ряд революционных изменений в понимании природы человека, организации психического.

Революционными для психологии стали факты нарастания генетического вклада в интеллектуальные способности с возрастом, увеличение генетического вклада в сензитивные периоды развития ребенка, существенный вклад наследственности в развитие речи, высшей психической функции.

Если генетический вклад в сензитивные периоды нарастает, это не означает, что среда не имеет значения. Эпигенетический принцип позволяет снять это противоречие. Усиление генетического влияния — это готовность к новому средовому специфичному опыту, который необходим для реализации генетических возможностей.

Модель динамических систем открывает новый путь к пониманию мультиуровневой причинности поведения и развития человека. А.В. Брушлинский развивал субъектно-деятельностный подход в психологии, состоящий в максимально системном изучении

человека, непрерывной динамики его развития. Он подчеркивал, что «Субъект – это человек, люди на высшем (индивидуализированно для каждого из них) уровне активности, целостности (системности), автономности и т.д... Субъект — это всеохватывающее, наиболее широкое понятие человека, обобщенно раскрывающее неразрывно развивающееся единство всех его качеств: природных, социальных, индивидуальных и т.д.» [1, 9]. Подобное понимание открывает путь к современному целостному анализу человека на основе междисциплинарного его изучения, чему и была посвящена данная статья.

Все приведенные соображения имели своей целью подчеркнуть, что психогенетика, особенно через анализ развития субъекта, обладающего психикой, позволяет пересмотреть постулаты психологии и, действительно системно, изучать субъекта как единство природного и социального.

Литература

1. *Брушлинский А.В.* О критериях субъекта // Психология индивидуального и группового субъекта / Под ред. А.В. Брушлинского. М., 2002.
2. *Выготский Л.С.* Вопросы детской психологии // Психология. М., 2000.
3. *Егорова М.С., Зарянова Н.М., Пьянкова С.Д.* Возрастные изменения генотип-средовых соотношений в показателях интеллекта // Генетика поведения: количественный анализ психологических и психофизиологических признаков. М., 1995. С. 104–118.
4. *Малых С.Б., Егорова М.С., Мешкова Т.А.* Основы психогенетики. М., 1998.
5. *Поливанова Е.Н.* Особенности психического развития в периоды возрастных кризисов // Психология развития. Гл. 9 / Под ред. Т.Д. Марцинковской М., 2001. С. 264–307.
6. *Равич – Щербо И.В., Марютина Т.М., Григоренко Е.Л.* Психогенетика. М., 1999.
7. *Сергиенко Е.А.* Некоторые проблемы психологии развития и пути их решения // Психол. журн.. 1990. Т. 11. № 1. С. 150–160.
8. *Сергиенко Е.А.* Влияние ранней зрительной депривации на интерсенсорное взаимодействие // Психол. журн. 1995. Т. 16. № 5. С. 32–49.
9. *Сергиенко Е.А.* Антиципация в раннем онтогенезе человека. М., 1992.

10. Сергиенко Е. А., Рязанова Т.Б. Младенческое близнецовое лонгитюдное исследование: специфика психического развития // Психол. журн. 1999. Т. 20. № 2. С. 39–53.
11. *Courage M.L., Howe M. L.* From infant to child: the dynamics of cognitive change in the second year of life // *Psychological bulletin.* 2002. V. 128. № 2. P. 250–277.
12. *Dale P.S., Rutter M., Simonoff E., Bishop D.V.M., Eley T., Oliver B., Price T. S., Purcell S., Stevenson J., Plomin R.* // *Nat. Neuroscience.* 1998. V. 1. P. 324–328.
13. *DeFries J.C., Plomin R., Fulker D.W.* Nature and nurture during middle childhood. Cambridge, MA: Blackwell, 1994.
14. *McCartney K., Harris M.J., Bernieri F.* Growing up and growing apart: A developmental meta—analysis of twin studies // *Psychological Bulletin.* 1990. № 107. P. 226–237.
15. *McGue M., Bouchard T.J., Iacono W.G., Lykken D.T.* Behavior genetics of cognitive ability: A life—span perspective // *Nature, nurture and psychology.* 1993. Eds. Plomin R., McClearn, Washington, DC: American Psychological Association. P. 59–76.
16. *McGue M.* Genes, environment and the etiology of alcoholism // *Development of alcohol—related problems: Exploring the biopsychosocial matrix of risk.* National Institute on Alcoholism and Alcohol abuse research monograph., Eds. Zucker R., Boyd G., Howard J., Rockvill, MD: National Institute on Alcoholism and Alcohol Abuse. 1994. № 26. P. 1–40.
17. *Petril S.A., Sandino K., Cherny S., Emde R.N., Fulker D.W., Hewitt J., Plomin R.* Exploring the genetic and environmental etiology of high general cognitive ability in fourteen-thirty-six-month-old twins // *Child Development.* 1998. V. 69. № 1. P. 68–74.
18. *Pedersen N.L., Plomin R., Nesselrode J.R., McClearn G.E.* A quantitative genetic analysis of cognitive abilities during the second half of the life span // *Psychological Science.* 1992. № 3. P. 346–353.
19. *Pedersen N.L., Plomin R., McClearn G.E.* Is there G beyond g? (Is there genetic influence on specific cognitive abilities independent of genetic influence on general cognitive abilities?) // *Intelligence.* 1994. № 18. P. 133–143.
20. *Plomin R.* Development, genetics and psychology. 1986/ Hillsdale, NJ: Erlbaum.
21. *Plomin R., DeFries J.C.* Origins of individual differences in infancy: the Colorado Adoption Project. N.Y.: Academic Press, 1985.
22. *Plomin R., DeFries J.C., Fulker D.W.* Nature and Nurture during Infancy and early Childhood. Cambridge, 1988.
23. *Plomin R, DeFries J.C., McClearn G.E., Rutter M.* Behavioral genetics. (Third edition). W.H. Freeman and Company. N.Y., 1997.

24. *Price T.S., Eley T.C., Dale P.S., Stevenson J., Saudina K., Plomin R.* Genetic and environmental covariation between verbal and nonverbal cognitive development in infancy // *Child development*. 2000. V.71. № 4. P. 948–959.
25. *Reznick J.S., Corley R., Robinson J.* A longitudinal twin study of intelligence in the second Year. *Monographs of society for research in child development*. 1997. V. 62. 1 serial. № 249. 166 p.
26. *Rowe D., Jacobson K.C., Van den Oord E. J.* Genetic and environmental influences on vocabulary IQ: parental education level as moderator // *Child development*. 1999. V. 70. № 5. P. 1151–1162.

2
2
2
2
2
2
2

Осцилляторная активность мозга и информационные процессы¹

Н.Н. Данилова, Н.Б. Быкова

Факультет психологии МГУ им.М.В. Ломоносова

Основные ритмы электроэнцефалограммы (ЭЭГ) являются предметом пристального внимания многих исследователей, которые рассматривают их как возможный механизм кодирования и декодирования информации. Особый интерес у исследователей вызывает высокочастотная ритмическая активность мозга: гамма-ритм, включающая колебания от 30 до 900 Гц. Наличие гамма-ритма в различных структурах мозга не только у человека, но и у животных, в том числе у беспозвоночных, дает основания относить его к функциональным строительным блокам, включенным во все когнитивные и сенсорные процессы [4; 5].

Гамма-ритм связывают с когнитивной деятельностью человека. Во многих публикациях сообщается об увеличении мощности гамма-ритма при привлечении внимания к стимулу [1; 2; 3; 11; 13]. Вспышки гамма осцилляций наблюдали при детекции стимула [9; 10] и возникновении иллюзий [12], при работе с семантической информацией [7; 8].

Широкое распространение получило представление о когерентных гамма осцилляциях как механизме коммуникации между нейронами, обеспечивающего связывание (binding) различных сенсорных, когнитивных и исполнительных процессов [6].

Вместе с тем многое остается неясным. В том числе не известен сам механизм связывания, интеграции нейронных сетей в единую функциональную систему. Какую роль при этом играет частота осцилляций? Существует ли связь частоты гамма осцилляций с функцией, с выполняемой деятельностью? Как выглядит картина пространственного распределения гамма активности в структурах мозга в зависимости от выполняемой деятельности и частоты осцилляций?

Пытаясь получить ответы на эти вопросы, мы исследовали функции вызванного гамма-ритма в процессах сенсорного кодирования., то есть гамма-ритма, синхронизированного со стимулом не только во времени, но и по фазе. Объектом исследования был выбран ранний ответ гамма-ритма, возникающий в составе усредненного вызванного потенциала (УВП) на интервале 0–100 мс после стимула или так называемый сенсорный ответ гамма-ритма. Исследовалось поведение гамма

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-06-80202)

осцилляторов с узкой настройкой на определенную частоту. С этой целью к УВП был применен метод узкополосной фильтрации с шагом в 1 Гц, что позволяло исследовать поведение 15 осцилляторов, настроенных на узкую частотную полосу шириной в 1 Гц в пределах частотной шкалы от 30 до 45 Гц.

Цель работы — исследовать поведение узкополосных гамма осцилляторов, характеризующихся острой настройкой, в составе сенсорного ответа УВП в зависимости от выполняемой субъектом деятельности в отношении звукового стимула: при пассивном прослушивании звуковых стимулов и при привлечении к ним внимания.

МЕТОДИКА

Эксперимент состоял из индифферентной серии с пассивным прослушиванием повторяющегося звукового стимула и сигнальной, или моторной, серии с двигательной реакцией на выключение звука. В каждой серии повторялось 120 звуковых стимулов длительностью по 150 мс с фиксированным межстимульным интервалом в 1,5 с. В опытах приняло участие 5 человек (3 женщины и 2 мужчины) в возрасте 18–24 лет.

15-канальная регистрация ЭЭГ производилась по международной системе 10–20 с отведениями в O2, O1, P4, P3, C4, C3, Cz, T6, T5, T4, T3, F4, F3, F8, F7 с использованием компьютерной системы «Brainsys» фирмы НМФ «Статокин». В качестве референтного применялся объединенный ушной электрод. Заземление осуществлялось через электрод Fpz. Частота оцифровки ЭЭГ 400 Гц. Полоса пропускания сигнала 0,3–45 Гц.

Сенсорный ответ вызванного гамма-ритма извлекали из УВП, полученных для 120 звуковых стимулов для каждого из 15 отведений ЭЭГ, которые затем фильтровались как в широкой полосе частот (от 30 до 45 Гц), так и с шагом 1 Гц в пределах той же частотной шкалы.

Использовалась процедура нахождения источников гамма осцилляторов в мозге — расчет эквивалентного диполя тока (модель одного подвижного диполя, программа Brainloc). С шагом в 2,5 мс при значении коэффициента дипольности (КД), равном 0,95, определялось наличие и локализация в трехмерном объеме мозга дипольного источника гамма осцилляций. Алгоритм локализации основан на гипотезе о том, что в мозге существуют точечные источники электрической

активности, локально распределенные по его структурам. Электрическая активность, в каждый момент времени регистрируемая многими электродами от скальпа, рассматривается как результат пространственной суммации электрических полей этих источников, пассивно распространяющихся по мозгу, как объемному проводнику. Решение обратной задачи и позволяет находить с некоторой степенью достоверности пространственное положение соответствующих источников.

Для более точного установления структур мозга, вовлекаемых в процессы сенсорного кодирования, расчетные координаты источников осцилляций проецировались на изображения аксиальных томографических срезов мозга конкретных испытуемых. Изображения были получены методом магнитно-резонансной томографии (МРТ) в Центре магнитной томографии и спектроскопии МГУ (ТОМІКОН S50, BRUKER). Использовалась методика 3D-градиентного эха, которая позволила обеспечить высокое пространственное разрешение до 1 мм в пределах всего объема головного мозга.

Для измерения величины гамма - ритма подсчитывалось суммарное число его дипольных источников, локализованных в различных структурах мозга, на определенном временном интервале. Такой метод имеет существенное преимущество перед измерением гамма-ритма по спектру его мощности, так как использует информацию, получаемую от множества электродов для принятия решения о наличии или отсутствии дипольного источника, что повышает надежность выделения из ЭЭГ мало амплитудных сигналов гамма-ритма. Кроме того, метод позволяет измерять реакции гамма-ритма короткой длительности, такие как сенсорный ответ (на интервале 0–100 мс) с высоким разрешением по шкале частот.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Широкополосная фильтрация звукового УВП, полученного для 120 звуковых стимулов, в полосе частот от 30 до 45 Гц у всех испытуемых выявляет наличие так называемого сенсорного ответа – вспышки гамма осцилляций на интервале 0–100 мс после стимула. На рис. 1 представлен сенсорный ответ гамма-ритма в составе УВП у одного из испытуемых.

Использование частотной фильтрации УВП в узкой полосе частот дало неожиданный результат. В составе сенсорного ответа и УВП в целом резко увеличилось число выявляемых дипольных источников гамма осцилляторов с острой настройкой в сравнении с результатами, полученными при широкополосной фильтрации. При сужении полосы фильтрации с 15 Гц до 1 Гц (на шкале частот 30–45 Гц) у всех испытуемых число активно работающих гамма осцилляторов увеличивалось как в индифферентной, так и моторной сериях. На рисунке 2 представлены постстимульные гистограммы (ПСГ) для усредненных ЭЭГ длительностью в 1,5 с, характеризующие временное распределение числа локализованных в мозге узкополосных и широкополосных гамма осцилляторов в двух сериях у одного из испытуемых. Видно, что число осцилляторов с острой настройкой в десятки раз превосходит количество диполей, получаемых при широкополосной фильтрации усредненной ЭЭГ. При этом ПСГ, полученные двумя методами, обнаруживают значительное сходство: фазы активации и инактивации возникают на одних и тех же временных участках. За исключением того, что у осцилляторов с острой настройкой заметнее выражена фаза активности непосредственно перед стимулом, или реакция антиципации.

Анализ активности 15 осцилляторов с острой настройкой в составе сенсорного ответа показал, что при КД, равном 0,95, только часть осцилляторов находится в активном состоянии, что подтверждается нахождением только для них эквивалентных дипольных источников в мозге. Дискретный характер активности гамма осцилляторов хорошо виден в гистограммах, отражающих зависимость количества дипольных источников от частоты настройки узкополосного гамма осциллятора, которые можно рассматривать в качестве аналогов частотного спектра. Такой дискретный спектр активности гамма осцилляторов с острой настройкой, полученный для сенсорного ответа одного испытуемого, показан на рисунке 3. В индифферентной серии активны только два осциллятора на частотах 34–35 Гц и 38–39 Гц. В моторной серии состав активированных гамма осцилляторов меняется при сохранении дискретности их частотного спектра. Пропадает активность гамма осциллятора на частоте 38–39 Гц, но сохраняется активность осциллятора на частоте 34–35 Гц, к которому добавляется активность трех новых осцилляторов на частотах 31–32, 33–34, 35–36 Гц.

Дискретный тип частотного спектра гамма осцилляций выявлен не только для начального участка УВП (0–100 мс). Частотный состав активных узкополосных

гамма осцилляторов, определенный для усредненных ЭЭГ длительностью в 1,5 с, так же характеризуется дискретностью.

У всех испытуемых в моторной серии, при задаче реагировать на выключение звука движением, меняется состав активированных узкополосных гамма осцилляторов. В частотном составе сенсорного ответа при выполнении моторной реакции увеличивается вклад осцилляторов более низкой частоты (30–35 Гц) при ослаблении осцилляторной активности на более высоких частотах (38–45 Гц).

Активность узкополосных гамма осцилляторов в составе усредненной ЭЭГ на интервале 1,5 с возникает не случайно. Наиболее часто активность осцилляторов приходится на начало ПСГ, середину и на участок перед стимулом. Привязка их активности к участку ПСГ связана с частотой их осцилляций. Одна группа осцилляторов возбуждается как на интервале сенсорного ответа, так и непосредственно перед стимулом. Имеются осцилляторы, которые возбуждаются только в составе сенсорного ответа. Еще одна группа гамма осцилляторов активируется только перед стимулом, другая группа возбуждается в середине межстимульного интервала. На рисунке 4 представлено несколько вариантов временного распределения активности узкополосных гамма осцилляторов на интервале усредненной ЭЭГ длительностью в 1,5 с, каждый из которых был активирован и во время сенсорного ответа. Видно, что в моторной серии осцилляторы с частотой 33–34, 34–35 и 35–36 Гц возбуждаются как после стимула, так и перед ним, а осциллятор 32–33 Гц — только в составе сенсорного ответа. В индифферентной серии гамма осциллятор, настроенный на частоту 34–35 Гц и сохраняющий свою активность в обеих сериях, вовлекается в более сложную функцию. На это указывает увеличение числа и удлинение периодов его активности. В целом в моторной серии ПСГ активности гамма осцилляторов с острой настройкой имеет более простую структуру, чем в индифферентной.

Моменты появления локализованных в мозге эквивалентных дипольных источников для осцилляций разной частоты на протяжении сенсорного ответа часто совпадают. Это указывает на существование эффекта временной синхронизации их активности. В результате такого взаимодействия на интервале 0–100 мс формируется общий ритм в виде регулярного чередования периодов их активации и инактивации.

Анализ локализаций в структурах мозга дипольных источников узкополосных гамма осцилляторов, активированных во время сенсорного ответа, показывает, что в индифферентной серии источники появляются достаточно локально в модально-специфической, височной коре. При реагировании на звук движением меняется карта локализаций, выявляемых гамма осцилляторов в составе сенсорного ответа. К очагу активности в височной коре добавляется второй очаг в лобной коре. Отмечается попеременное появление дипольных источников осцилляций одной частоты то в одной зоне мозга, то в другой. На рисунке 5 показана проекция расчетных координат эквивалентных дипольных источников гамма осциллятора, работающего на частоте 34–35 Гц, на томографические аксиальные срезы мозга испытуемого М.С, полученные методом МРТ. Видно, что в моторной серии в отличие от индифферентной выделяются два локуса активности: в правой височной доле и нижней лобной. На рисунке 6 показана ориентация влияний на кору, исходящих от двух зон расположения гамма осциллятора на частоте 34–35 Гц. Картирование зон проекции влияний осциллятора из нижней части лобной доли показывает наличие фокуса в районе центрального отведения, макушки головы в виде достаточно широкого пятна. Влияния, исходящие из правой височной доли, проецируются на правую височную кору более локально.

ОБСУЖДЕНИЕ

Метод наложения результатов расчета координат эквивалентных дипольных источников узкополосных гамма осцилляторов на структурные магнитно-резонансные томограммы мозга испытуемых позволил выявить структуры мозга, вовлеченные в процесс сенсорного кодирования при восприятии звукового стимула. В условиях привлечения внимания к звуку сенсорный ответ возникает за счет дополнительного очага активности в передних областях мозга, который взаимодействует в модально-специфической коре с очагом активности, присутствующим и в условиях пассивного восприятия звуковых стимулов. Такое взаимодействие, по-видимому, отражает участие процессов памяти и вовлечение функции префронтальной коры, которая в частности проявляет себя в формировании у гамма осцилляторов реакций антиципации, обнаруживаемой в нашей работе по активности многих узкополосных гамма осцилляторов, различающихся частотой своей настройки. Подобный процесс взаимодействия присутствует уже на самых ранних стадиях восприятия звукового стимула — на интервале 0–100 мс после его предъявления. Наиболее очевидно, что функцию

коммуникации, связывания модально-специфической височной коры с лобной во время сенсорного ответа выполняют гамма осцилляторы, избирательно настроенные на узкие полосы частот. Вовлечение структур мозга в совместную деятельность обеспечивается через появление в них когерентных гамма колебаний. На причастность узкополосных гамма осцилляторов к процессу сенсорного кодирования указывает и привязка периодов их активности к определенным временным интервалам усредненной ЭЭГ. В том числе об этом говорит связь активности одних гамма осцилляторов только с сенсорным ответом, других только с реакцией антиципации, и третьих с тем и другим. Таким образом, узкополосные гамма осцилляторы, выполняя коммуникативную функцию, объединяют сенсорные процессы с процессами в памяти уже в составе сенсорного ответа, обеспечивая слияние двух потоков информации: «bottom-up» и «top-down».

Полученные результаты об изменении состава активированных гамма осцилляторов со сменой деятельности испытуемого — вытеснение высокочастотных гамма осцилляторов более низкочастотными при выполнении сенсомоторной реакции — склоняют к положительному ответу на вопрос о связи частоты гамма осцилляций с исполняемой мозгом функцией. При этом гамма осцилляции одной частоты в зависимости от выполняемой субъектом деятельности в отношении звукового стимула меняют карту своих локализаций в мозге.

Таким образом, по-видимому, существует частотно-специфический механизм кодирования информации, который возможно базируется на частотной избирательности пейсмекерной активности нейронов, обуславливающих процесс связывания (binding) структур мозга для реализации психической функции. Можно выделить две формы связывания структур мозга в единую систему: 1) за счет сходства резонансных частот и 2) за счет механизма временной синхронизации активности группы разночастотных узкополосных гамма осцилляторов, создающих общий ритм чередования периодов активации/инактивации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительное изучение вызванного широкополосного и узкополосного гамма – ритма показало, что только узкополосные гамма осцилляторы могут рассматриваться в качестве частотно-специфического механизма кодирования информации. Метод расчета координат эквивалентных дипольных источников узкополосных гамма осцилляций по многоканальной ЭЭГ и наложения их на структурные томограммы мозга испытуемых предоставляет большие возможности

для изучения роли осцилляторной активности мозга в процессах обработки информации.

Литература

1. Данилова Н.Н., Ханкевич А.А. Гамма-ритм в условиях различения временных интервалов // Вестник Московского ун-та. Серия 14. Психология. 2001. № 1. С. 51–64.
2. Данилова Н.Н., Быкова Н.Б., Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А., Соколов Е.Н. Гамма-ритм электрической активности мозга человека в сенсорном кодировании // Биомедицинская радиоэлектроника. 2002. № 3. С. 34–42.
3. Данилова Н.Н. Роль частотно-специфических кодов в процессах внимания // Вторая международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения А.Р. Лурии. М., 2002. С. 43–44.
4. Basar E. Brain function and oscillations. II: Integrative brain function. Neurophysiology and cognitive processes. Springer, 1999.
5. Basar E., Basar-Eroglu C., Karakas S., Schurman M. Brain oscillation in perception and memory // International Journal of Psychophysiology 35. 2000. P. 95–124.
6. Eckhorn, R., Reitboeck, H.J., Arndt, M. And Dickt, P. Feature linking via synchronization among distributed assemblies: Simulations of results from cat visual cortex // Neural Computetion 1990. 2. P. 293–307.
7. Lutzenberger W., Pulvermuller F., Birbaumer N. Words find pseudowords elicit distinct patterns of 30-Hz activity in humans // Neurosci. Lett. 1994. 176. P. 115–118.
8. Pulvermuller F., Preissl H., Lutzenberger W. and Birbaumer N. Spectral responses in the gamma-band: physiological signs of higher cognitive processes? // NeuroReport. 1995. V.6. P. 2057–2064.
9. Singer W. Response synchronization of cortical neurons: an epiphenomenon or a solution to the binding problem? // Ibro News. 1991. V.19. № 1. P. 6–7.
10. Singer W. and Gray C.M. Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis // Annu. Rev. Neurosci. 1995. V.18. P. 555–586.
11. Spydel J.D., Ford M.R., and Sheer D.E. Task dependent cerebral lateralization of the 40 Hz EEG rhythm // Psychophysiology. 1979. V.16. P. 347–350.
12. Tallon-Baudry C., Bertrand O., Bouchet P. and Pernier J. Gamma-range activity evoked by coherent visual stimuli in humans // J. Neurosci. V.7. P. 1287–1291.

13. *Tiitinen H., Sibkkonen J., Reinkainen K., Alho K., Lavikainen J., Naatanen R.* Selective attention enhances the auditory 40-Hz transient response in humans // *Nature*. 1993. V.364. P. 59–60.

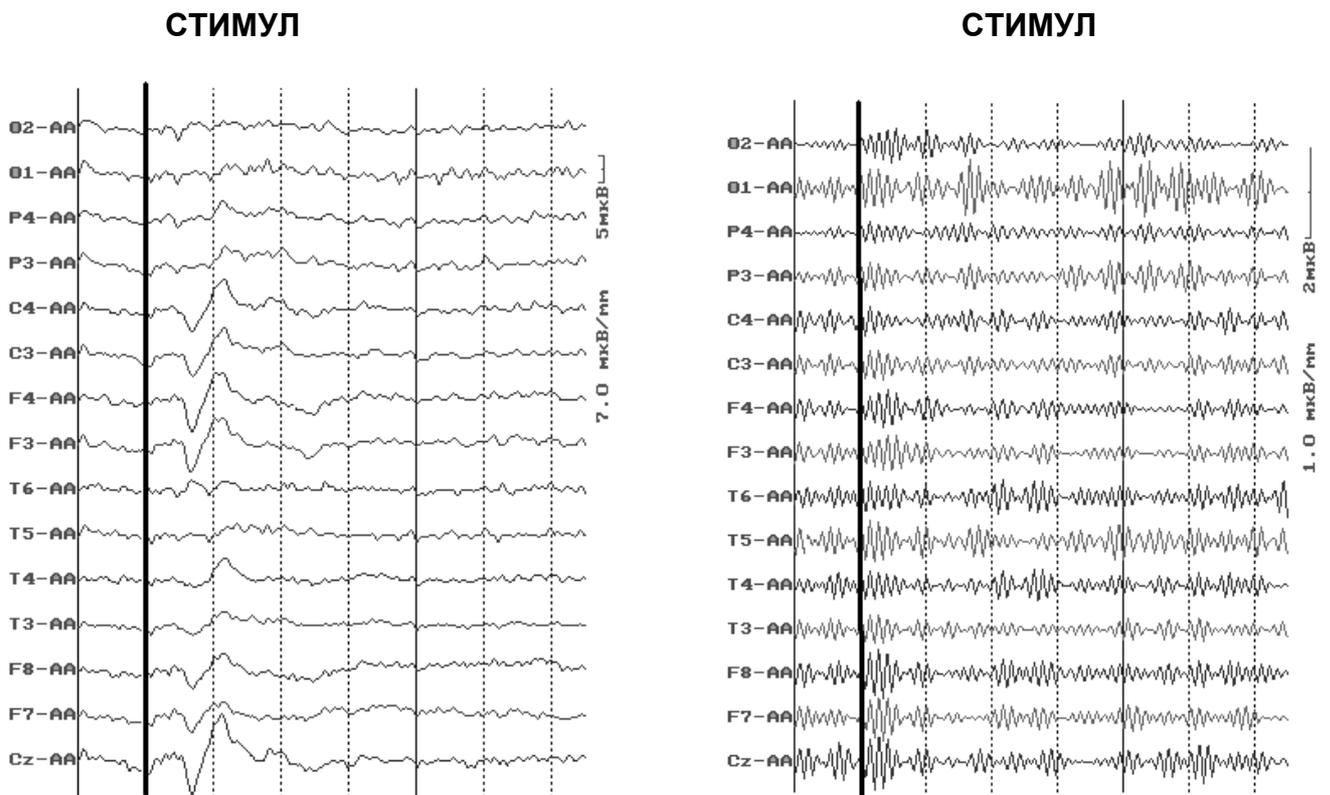


Рис. 1. Звуковой УВП (слева) и его широкополосная фильтрация в полосе гамма-ритма от 30 до 45 Гц (справа). Видна вспышка гамма-ритма на интервале 0-100 мс (сенсорный ответ).

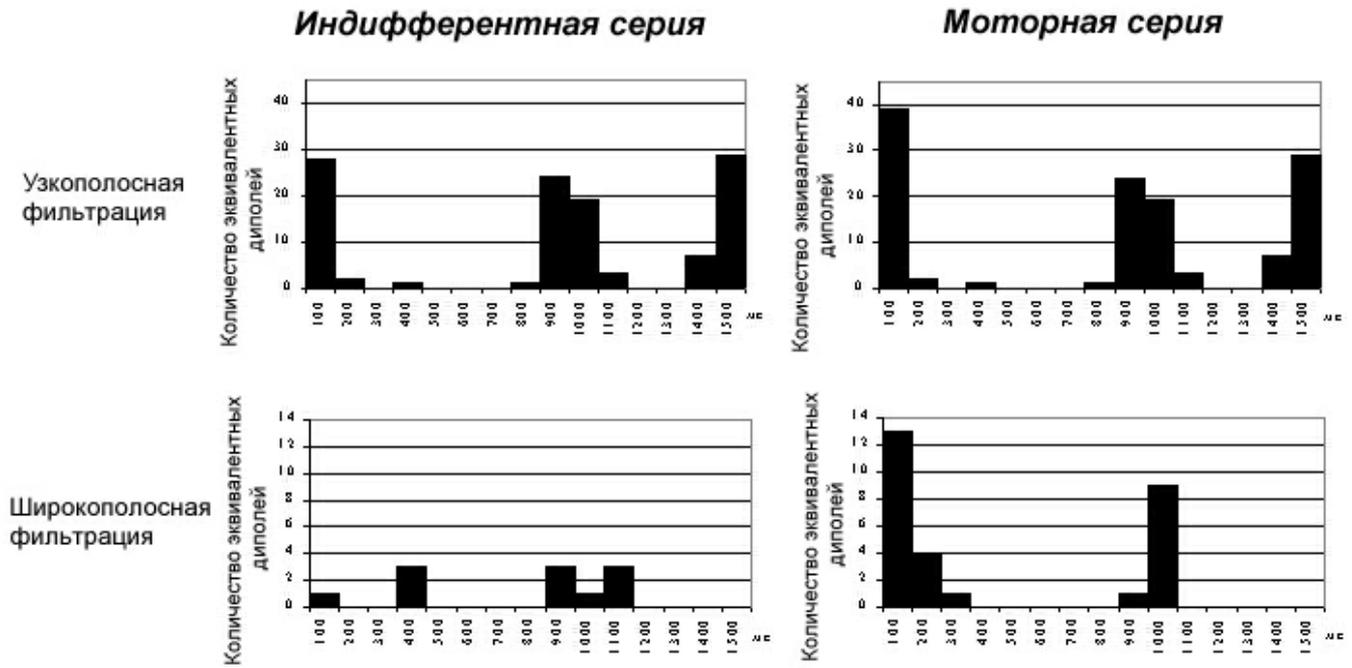
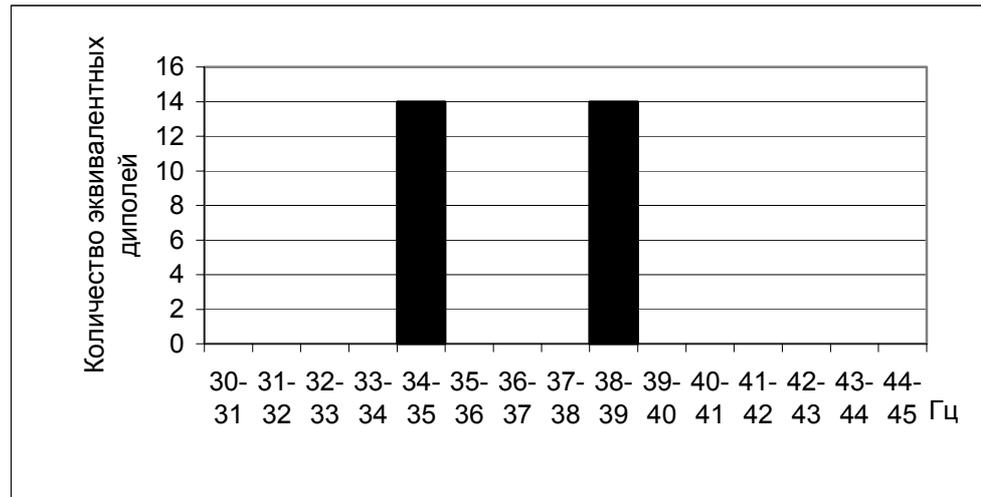


Рис.2. Увеличение числа эквивалентных дипольных источников гамма осцилляций при сужении полосы фильтрации звукового УВП с 15 до 1 Гц в пределах частотной шкалы 30-45 Гц. ПСГ показывают зависимость числа дипольных источников от кванта времени у исп. М.С.

**Индифферентная
серия**



Моторная серия

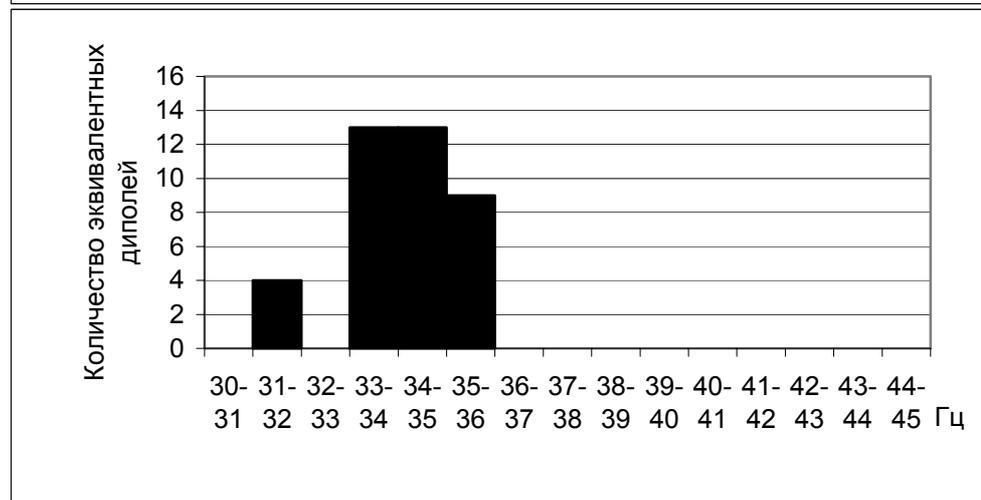


Рис.3. Дискретный характер аналога частотного спектра сенсорного ответа, отражающего активность узкополосных гамма осцилляторов в пределах шкалы 30-34 Гц в двух сериях у исп. М.С.

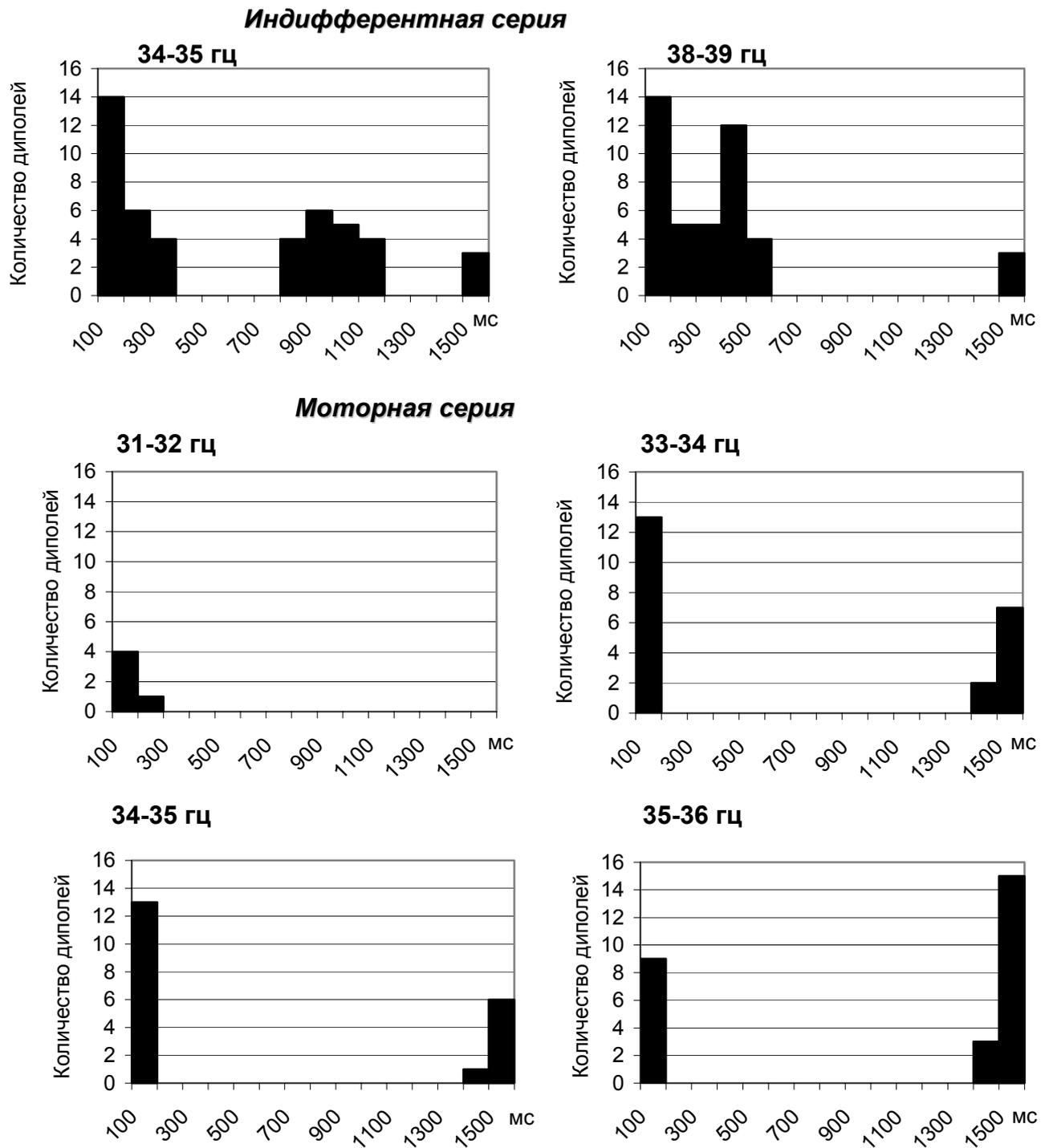


Рис.4. ПСГ распределения числа эквивалентных дипольных источников узкополосных гамма осцилляторов разной частоты на интервале 1,5 с шагом 100 мс в двух сериях у исп. М.С. Представлены ПСГ только тех осцилляторов, которые были активированы в составе сенсорного ответа.

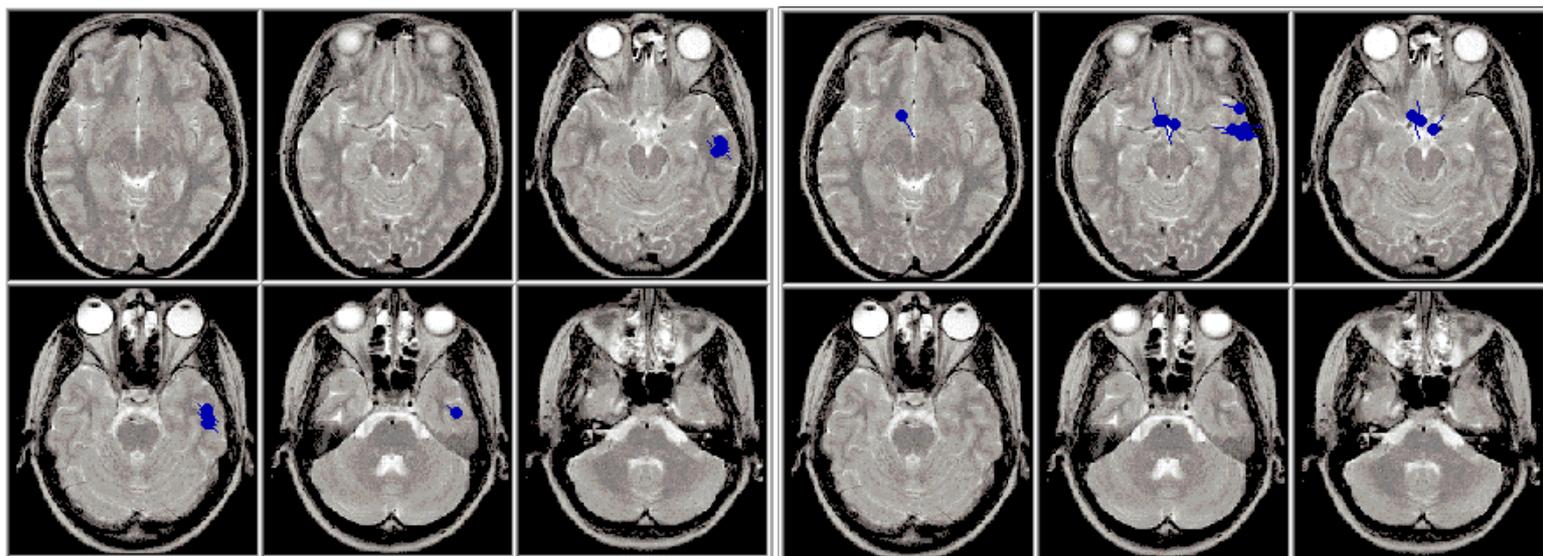
ИнDIFFерентная серия**Моторная серия**

Рис. 5. Проекция дипольных источников гамма осцилляций (34-35 Гц) сенсорного ответа на томографические срезы мозга исп.М.С. в двух сериях.

Индиifferentная серия

Моторная серия 15

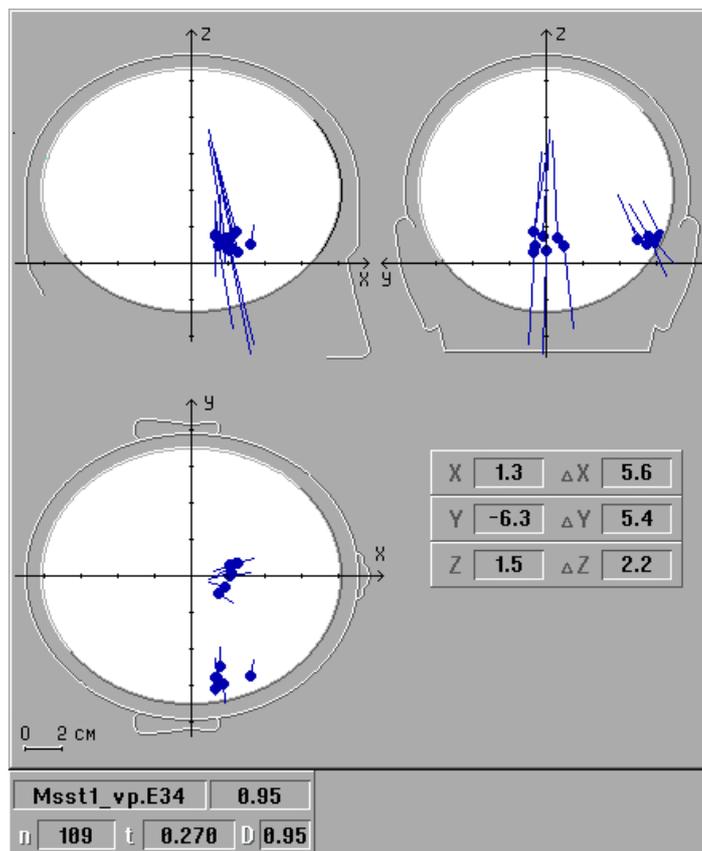
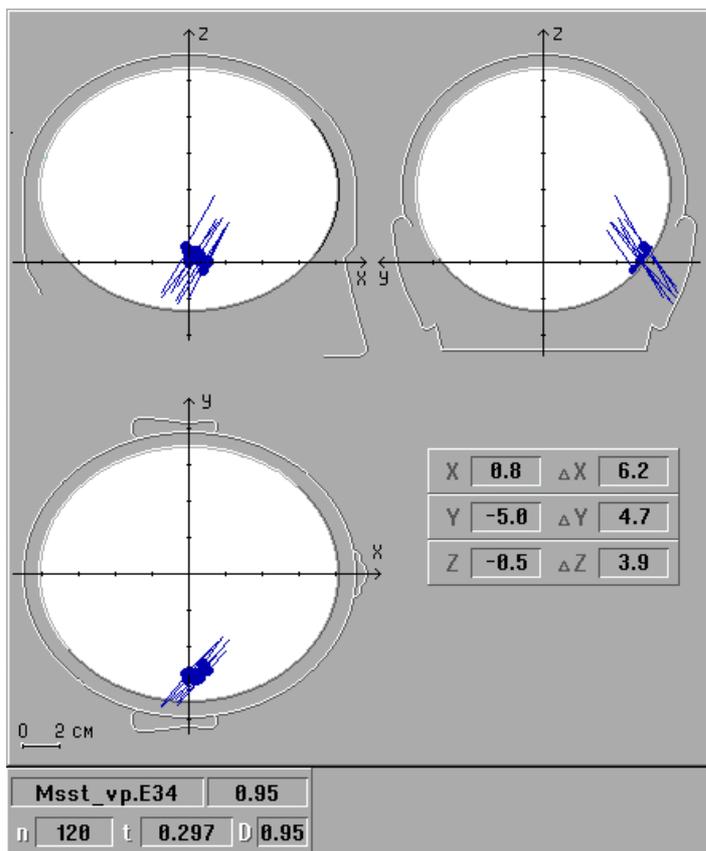


Рис. 6. Позиция дипольных источников гамма осцилляций (34-35 Гц) у исп. М.С. на трех ортогональных проекциях головы. Стрелки – дипольные моменты, отражающие направление влияний и интенсивность источников.

Пейсмекеры и функциональные состояния¹

Т.Н. Греченко, С.Ф. Терехова

Институт психологии РАН

Роль функциональных состояний в жизни живых организмов общеизвестна [3; 4]. В многочисленных исследованиях накоплен экспериментальный материал, который показывает, что для сна и бодрствования существуют «свои» доминирующие ритмы-фазы сна, уровни сознания и внимания характеризуются ритмами мозга определенной частоты и амплитуды. Каким же образом происходит изменение функционального состояния, какие нейроны определяют характерные ритмы?

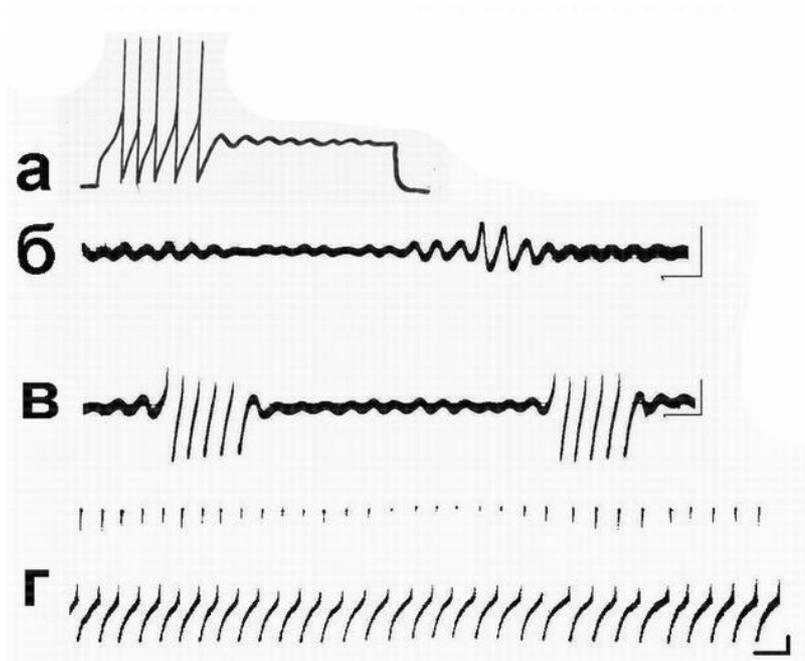
Анализ внутриклеточной электрической активности нервных клеток показал, что ритмическая работа нейронов основана на различных механизмах [7]. Ритмичность разрядов нейронов многих структур мозга (таламуса, гипоталамуса и т.д.) связана с поступлением к клетке ритмических синаптических влияний (сетевая основа ритмичности) [8; 9; 17; 18]. Однако многие подкорковые структуры, и прежде всего ретикулярная формация, содержат нервные клетки, ритмические разряды которых задаются специальным внутриклеточным механизмом (эндогенная основа ритмичности) [15; 16; 17; 19]. Этот механизм, названный **пейсмекерным**, является универсальным, и обнаружен у нейронов животных разного эволюционного уровня. Возникает предположение, что в процессе эволюции сформировался класс нейронов, имеющих встроенный пейсмекерный механизм, и именно эти нервные клетки являются носителями определенных ритмов мозга [7; 8]. Новые исследования, выполненные при помощи регистрации ЭЭГ, позитронно-эмиссионной томографии, магниторезонансной томографии позволяют выдвинуть гипотезу о

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 00-06-80060) и РГНФ (грант № 02-06-00011)

роли нейронов - генераторов в генезе основных ритмов мозга, и в качестве одного из возможных источников возникновения суммарных ритмов мозга роли нейронов-генераторов в генезе основных ритмов мозга, и в качестве одного рассматривается пейсмекерная активность нейронов [4]. Так, в работе Н.Н. Даниловой [3] на основе регистрации многоканальной ЭЭГ человека исследована функция узкополосных осцилляторов гамма-ритма (30–45 Гц) в процессах произвольного и непроизвольного внимания. В опытах изучали гамма-ритм в составе звукового ВП на звук во временном интервале 0–100 мс после стимула. Спектр ВП характеризовался дискретностью и менялся в зависимости от внимания. В составе ВП на анализируемом интервале преобладала активность ограниченного набора узкополосных гамма-осцилляторов, источники которых локализованы в модально-специфической коре. Результаты опытов свидетельствуют о том, что частотно-специфический механизм кодирования информации основан на частотной избирательности пейсмекерной активности нейронов, реализующих функции внимания.

Микроэлектродные эксперименты дают возможность подробно изучить класс нейронов, которые могли бы претендовать на выполнение функции генераторов ритмов. Это качество связано с наличием у них эндогенной пейсмекерной активности, которая превращает такие нейроны поистине в дирижеров смены состояний мозга и источники генерации ритмов определенной частоты. Они наделены функциональными возможностями, которые определяют их особую роль в работе нервной системы [8]. Представленная работа содержит описание этих качеств.

Пейсмекерная активность нейронов. Пейсмекерными потенциалами в собственном смысле этого слова называют близкие к синусоидальным колебания с частотой 0,1–10 Гц, амплитудой 5–10 мВ (рисунок 1).



Именно эта категория эндогенных потенциалов, связанных с активным транспортом ионов, образует механизм внутреннего генератора нейрона, обеспечивающего периодическое достижение порога генерации ПД в отсутствие внешнего источника возбуждения. В самом общем виде нейрон представляется состоящим из электровозбудимой мембраны, химически возбудимой мембраны и локуса генерации пейсмекерной активности. Пейсмекерный потенциал, взаимодействующий с хемовозбудимой и электровозбудимой мембраной, делает нейрон устройством со «встроенным» управляемым генератором. Эндогенная внутриклеточная природа пейсмекерных потенциалов подтверждается их сохранением после полной изоляции нейрона и независимостью их частоты от сетевых эффектов. Такие синусоидальные эндогенные осцилляции мембранного потенциала лежат в основе ритмической спайковой активности многих нейронов.

Классификация пейсмекерных нейронов. По соотношению пейсмекерных и синаптических механизмов нейроны подразделяются на пейсмекерные, синаптические и пейсмекерно-синаптические [5; 11]. Нейроны, обладающие фоновой ритмикой, разделяются на две большие группы:

ритмические и аритмические. Среди ритмических нейронов имеется группа нервных клеток с устойчивой и регулярной фоновой ритмикой. Пейсмекерные нейроны, в свою очередь, подразделяются на нейроны с монотонной фоновой ритмикой, когда на деполяризационной волне возникает только один спайк, и нейроны с ритмическим возникновением группы спайков на волне пейсмекерного потенциала — пачковые нейроны (рисунок 1). Наиболее часто встречается регулярный пейсмекерный потенциал с амплитудой 5–25 мВ и периодом колебаний 1–2 с.

Кроме фоновоактивных существуют нейроны, у которых фоновая спайковая активность отсутствует. Однако в результате активации такой клетки в ней возникает, и в течение длительного времени может поддерживаться, ритмическая спайковая активность, обусловленная деятельностью пейсмекерного механизма. Такой нейрон принято называть латентным пейсмекерным нейроном в отличие от нейрона с выраженной пейсмекерной активностью, который называется актуальным пейсмекерным нейроном [10]. Потенциальным пейсмекерным нейроном называют тот нейрон, у которого в опыте пейсмекерная активность отсутствует и ее не удается вызвать, но при известных условиях (например, сезонных) она все же может наблюдаться.

Пейсмекер и уровень мембранного потенциала. С самых первых экспериментов исследователи обратили внимание на чрезвычайную чувствительность пейсмекерных потенциалов к уровню мембранного потенциала нейронов. Мы отмечаем две особенности: во-первых, уровень актуализации латентного пейсмекера может находиться выше или ниже потенциала покоя нейрона. Во-вторых, актуальный пейсмекер наиболее чувствителен к гиперполяризационным смещениям МП – в некоторых случаях достаточно сдвига на -0,3 мВ для того, чтобы полностью выключить генерацию пейсмекерной активности [5; 12]]. В нейронах с пейсмекерными фоновыми ПД искусственная гиперполяризация приводит к подавлению соматического

компонента ПД, однако не изменяет частоты генерации оставшихся разноамплитудных компонентов.

Локализация пейсмекерного механизма в нейроне. Относительно локализации пейсмекерного механизма до сих пор не существует единой точки зрения. Нейрофизиолог Б. Альвинг (1968) провела эксперименты на нейронах моллюска *Aplysia*, применив перевязку аксона шелковой нитью (метод наложения лигатуры, который позволяет ограничить синаптические влияния и тем самым функционально изолировать нервные клетки) [7]. Опыты показали, что нейроны, демонстрировавшие пейсмекерную активность до перевязки аксона, сохраняли ее и после этого. Эндогенное происхождение пейсмекерного потенциала подтверждается полной механической изоляцией нейрона обработкой ганглия одним из проеолитических ферментов (трипсином, сахарозой, проназой и т.д.). В изолированном нейроне остается только пейсмекерная активность, сохраняя тот же уровень колебаний, что и в интактном ганглии [12]. Способность к длительной ритмической активности сохраняется у некоторых клеток в течение длительного времени после их полной физической изоляции из нервной системы [12]. Следовательно, в основе последней действительно, лежат эндогенные процессы, приводящие к периодическому изменению ионной проницаемости поверхностной мембраны.

Структурой, обеспечивающей пейсмекерную активность, считается ограниченный электрически активный участок мембраны - локус. Из опытов А. Арванитаки и Х. Шилазонитис (1956) следует, что размер локуса пейсмекерной активности на мембране нейрона равен 50—100 мкм [7]. Таких участков на соме нейрона может быть несколько. Изучение эндогенной активности нейронов *Aplysia* показало, что локус пейсмекерной активности может локализоваться и на отростке [14]. Важную роль играют изменения ионной проницаемости мембраны под действием некоторых цитоплазматических факторов, например, системы обмена циклических нуклеотидов. Изменения активности этой системы

при действии на соматическую мембрану некоторых гормонов или других внесинаптических химических влияний могут модулировать ритмическую активность клетки (эндогенная модуляция).

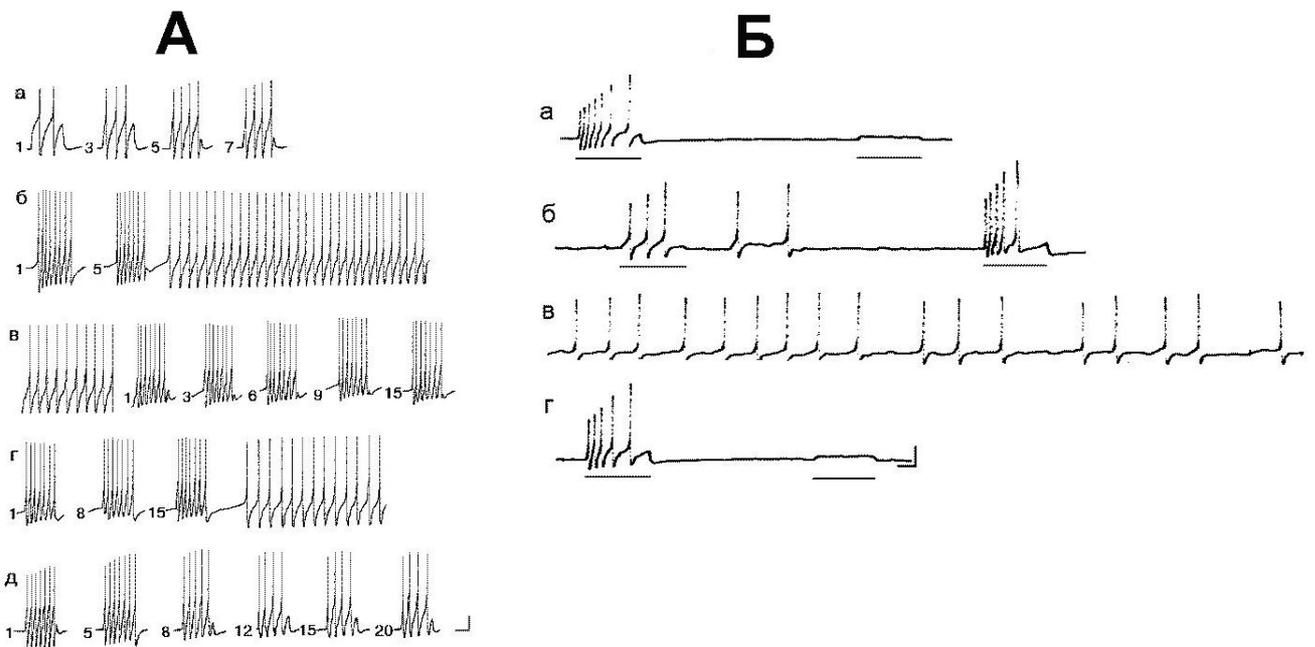
Пейсмекер и синаптические потенциалы. Запускать генерацию колебаний мембранного потенциала могут синаптические и внесинаптические влияния [6; 9; 11]. Л. Тауц и Х. Гершенфельд (1960) обнаружили, что соматическая мембрана нейронов моллюсков, не имеющая на своей поверхности синаптических окончаний, обладает высокой чувствительностью к медиаторным веществам и, следовательно, имеет молекулярные хемоправляемые структуры, свойственные постсинаптической мембране [7]. Наличие внесинаптической рецепции свидетельствует о возможности модуляции пейсмекерной активности диффузным действием выделяющихся медиаторных веществ.

В опытах на нейронах, находящихся в системе (полуинтактный препарат), было показано, что активация некоторых синаптических контактов приводит к запуску пейсмекерной активности [2; 5; 6; 18]. В зависимости от вида и особенностей синаптической передачи активированная пейсмекерная активность может генерироваться в течение более или менее длительного времени. Замечателен тот факт, что однократный синаптический потенциал может приводить к актуализации пейсмекерных осцилляций в течение длительного времени. Если они достигают порога генерации, то пейсмекерный ответ может продолжаться в течение многих минут и даже часов. Впервые такое явление было описано в работе Е.Г. Литвинова и П.М. Балабана [6]. В дальнейшем такие же результаты были получены в наших опытах на полностью изолированных нейронах виноградной улитки (рисунок 2) [2].

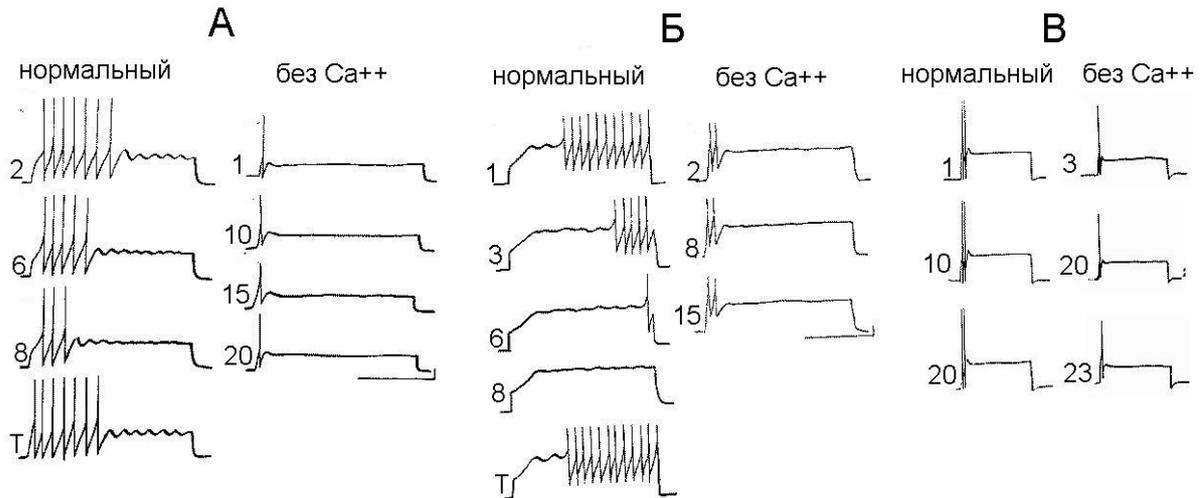
Другим вариантом взаимодействия пейсмекера с синаптическими потенциалами является постепенная активация пейсмекерного локуса по мере прихода синаптических сигналов (рисунок 2). Развившийся пейсмекерный ответ также может сохраняться в течение многих минут [11] и даже часов. На

представленной нейрограмме запущенные пейсмекерные разряды сохранялись в течение более 30 мин.

Пейсмекер в ответе и в фоне. Пейсмекерная активность может быть модифицирована, если она присутствует до нанесения воздействия в фоновой активности. Например, приход синаптических сигналов полностью выключает генерацию ритма. Может быть и обратное - воздействие запускает работу пейсмекерного механизма (рисунок 3).



Пейсмекер и ионы кальция. Эксперименты показывают, что состояние нейрона и возможность пейсмекерной активности участвовать в его регуляции зависит от наличия кальция во внеклеточной среде (рисунок 4) [12, 13].

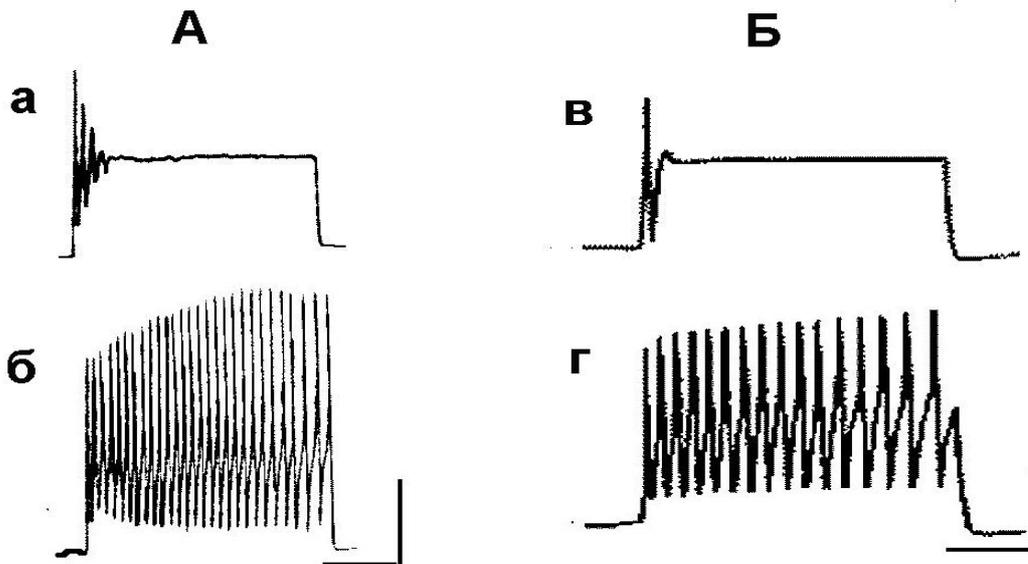


В опытах было показано, что фактически любой нейрон, проявляющий активность пейсмекерной природы, в бескальциевой среде не мог генерировать пейсмекерную активность. Тестирование пластических возможностей нейрона также показало, что такие следовые эффекты, как привыкание или фасилитация требуют участия кальция — в бескальциевой среде предъявление даже большого количества стимулов не производило каких-либо следовых преобразований (рисунок 4). Особенное внимание мы обращаем на тот факт, что изменение функционального состояния, возникшее как при помещении клетки в искусственную бескальциевую среду, так и возникшее естественным образом по причине неконтролируемых экспериментатором событий, приводило к отсутствию эффективности используемого вещества, например, этанола.

Пейсмекер и чувствительность нейронов к веществам в сверхмалых дозах. Наиболее замечательным свойством пейсмекера является то, что он чувствителен к широчайшему спектру воздействий — от естественных, приход которых связан с активностью специфических рецепторов, например, тактильных, до экзогенных, не имеющих четкой адресации к определенным рецепторным образованиям. В частности, это свойство пейсмекеров обеспечивает их участие в ответах на биологически активные вещества самого широкого спектра — от этанола до нейромедиатора ГАМК в сверхмалой концентрации (рисунки 3 и 5). Интересно, что в сверхмалой дозе вещества, по-видимому, теряют

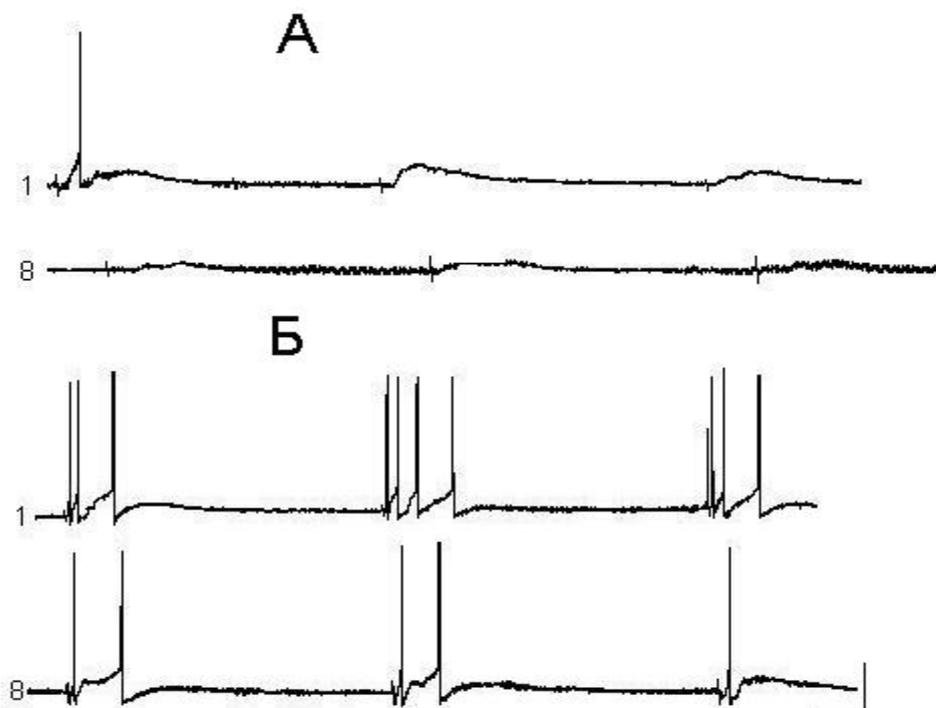
специфичность, так как ответ нервной клетки становится одинаковым для различных видов биологически активных веществ [1].

В экспериментах мы применяли биологически активные вещества в непривычно малых концентрациях, значительно ниже обычно используемых — от 10^{-15} М и ниже. Такие опыты выполнялись в работах, которые проведены совместно с Институтом химической физики, и целью их было исследование биологических эффектов от применения веществ в сверхмалых дозах [1]. Результаты показали, что все испытанные вещества в названных концентрациях эффективны и вызвали развитие пейсмекерных ответов на тестовые стимулы, которые ранее были подпороговыми (рисунок 5).



Следовательно, основной мишенью для действия веществ в столь малых дозах, когда фактически в применяемом растворе сохраняется не более одной-двух молекул вещества, является локус пейсмекерной активности (опыты выполнялись на изолированных нейронах). Такие опыты были выполнены и на клетках, которые находились в системе (опыты проведены на полуинтактном

препарате и препарате изолированной нервной системы). Мы обнаружили, что некоторые нейроны отвечали включением пейсмекерного механизма. Другие же нейроны обнаруживали значительное изменение как фоновой активности, так и ответов на периферические (тактильные) раздражения (рисунок 6).



Заключение

Сложившаяся концепция о двух типах мембранных структур — электровозбудимой и электронеозбудимой, но химически возбудимой, заложила основу представлений о нейроне как пороговом устройстве, обладающем свойством суммации возбуждающих и тормозных синаптических потенциалов. Принципиально новое, что вносит эндогенный пейсмекерный потенциал в функционирование нейрона, заключается в том, что пейсмекерный потенциал превращает нейрон из сумматора синаптических потенциалов в генератор [5; 7; 8]. Представление о нейроне как управляющем и управляемом

генераторе заставляет по-новому взглянуть на организацию многих его функций.

Выполненные эксперименты показывают, что: 1) пейсмекер обладает высокой чувствительностью к изменениям уровня мембранного потенциала; 2) актуализация пейсмекера связана с достижением определенного уровня мембранного потенциала; 3) пейсмекер взаимодействует с синаптическими потенциалами и может быть включенным (или выключенным) через определенный синаптический вход; 4) пейсмекерный механизм может запускаться действием биологически активных веществ в сверхмалых концентрациях. Это предполагает существование ранее неизвестного механизма влияния на пейсмекерный механизм и демонстрирует нетривиальный путь воздействия экзогенных факторов на функциональное состояние живых существ. Пейсмекерная активность обладает свойствами, которые дают возможность этому механизму выполнять особые функции в регуляции функциональных состояний.

Литература

1. Бурлакова Е.Б., Греченко Т.Н., Соколов Е.Н., Терехова С.Ф. Влияние ингибиторов радикального окисления липидов на электрическую активность изолированных нейронов *Helix pomatia* // *Биофизика*. 1986. Т. 31, № 5. С. 921.
2. Греченко Т.Н., Кондратьева С.И. О механизме кратковременной памяти // *Психол. ж.* 1981. Т.2. № 3. С. 95.
3. Данилова Н.Н. Роль частотно-специфических кодов в процессах внимания // *Конференция «А. Р. Лурия и психология 21 века»*. 2002. Октябрь. МГУ. С. 43.

4. Данилова Н.Н., Быкова Е.С., Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А., Соколов Е.Н. Гамма-ритмическая электрическая активность мозга человека в сенсорном кодировании // Биомедицина и радиоэлектроника. 2002. № 3. С. 34.
5. Крылова А.Л. Эндонейрональное привыкание // Дис.... канд. биол. наук. М., 1976.
6. Литвинов Е.Г., Балабан П.М. Изучение реакций идентифицированных нейронов виноградной улитки на тактильное раздражение поверхности тела // Структурно-функциональный анализ деят. мозга. М.: Наука, 1974. С. 43.
7. Пейсмекерный потенциал нейрона / Под ред. Е.Н. Соколова, Н.Н. Тавхелидзе. Тбилиси, 1975.
8. Соколов Е.Н. Пейсмекерный потенциал в нейронной организации // Системный анализ интегративной деятельности нейрона. М.: Наука, 1974. С. 41.
9. Соколов Е.Н., Тавзарашвили Т.А. Особенности ортодромного торможения в нейроне ритмоводителе виноградной улитки // Нейрофизиология, 1971. Т.3. № 4. С. 426.
10. Соколов Е.Н., Ярмизина А.Л. Пейсмекерный потенциал в процессах кратковременной памяти // Механизмы формирования и торможения условных рефлексов. М.: Наука, 1973. С. 163.
11. Соколов Е.Н., Ярмизина А.Л. Соотношение синаптических и пейсмекерных потенциалов у моллюсков. Ж. ВНД, 1972. Т.21. № 3. С. 536–547.
12. Соколов Е.Н., Греченко Т.Н., Хлудова Л.К. Вклад натриевых и кальциевых каналов в пейсмекерную активность командных нейронов виноградной улитки // Всесоюзн. конф. нейронаук. Киев, 1986. С. 42.
13. Khalsa S.B., Michel S., Block G.D. The role of extracellular sodium in the mechanism of a neuronal in vitro circadian pacemaker // Chronobiol Int. 1997. Jan + ADs-14 (1).P. 1.

14. *Maratou E., Theophilidis G.* An axon pacemaker: diversity in the mechanism of generation and conduction of action potentials in snail neurons // *Neuroscience*, 2000 + ADs-96 (1). P.1.
15. *Medanic M., Gillette M.U.* Serotonin regulates the phase of the rat suprachiasmatic circadian pacemaker in vitro only during the subjective day // *J. Physiol (Lond)*, 1992. May. V.450. P. 629.
16. *Meijer J.H., Rietveld W.J.* Neurophysiology of the suprachiasmatic circadian pacemaker in rodents // *Physiol. Rev.*, 1989. V. 69. № 1. P. 671.
17. *Moortgat K.T., Bullock T.H., Sejnowski T.J.* Precision of the pacemaker nucleus in a weakly electric fish: network versus cellular influences // *J. Neurophysiol.* 2000. V.83. № 2. P. 971.
18. *Parnas I., Sturmwasser Z.* Prolonged excitatory and inhibitory synaptic modulation of a bursting pacemaker neuron // *Neurophys.* 1975. V.37. P. 594.
19. *Prosser R.A., McArthur A.J., Gillette M.U.* cGMP induces phase shifts of a mammalian circadian pacemaker at night, in antiphase to cAMP effects // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1989. Sep. V.86 (17). P. 6812.

Семантический компонент вызванного потенциала различения¹

Ч.А. Измайлов, С.Г. Коршунова, Е.Н. Соколов, А. Кадик

МГУ им. М.В. Ломоносова

Произнесенное или написанное слово, как речевая категория, имеет наименее выраженную связь с физическими (энергетическими) характеристиками слова-стимула. Более того, семантика слова так же мало связана с конфигурационными (перцептивными) характеристиками стимула. Изменения шрифта или ориентации, которые могут радикально изменить геометрическую форму слова, не сказываются на понимании его значения. В связи с этой отчужденностью семантической характеристики слова от материального носителя, вопрос о возможности специфицировать электрическую активность мозга по отношению к этой высшей степени абстрактной характеристике стимула вызывает особый интерес исследователей.

Традиционный подход к этой проблеме основан на предъявлении одиночных стимулов с контролируемыми энергетическими, конфигурационными и семантическими характеристиками. Уже первая работа, в которой было показано появление позднего позитивного компонента при изменении такой когнитивной характеристики, как неопределенность стимула, привлекла внимание исследователей. Этот компонент получил обозначение P300 или P3 в связи с несколькими особенностями. Во-первых, он был максимально выражен в биполярном отведении vertex-префронтальный центр, или монополярном отведении от электродов Pz и Cz (с нейтральными электродами на мочках ушей). Во-вторых, он появлялся в ответ на слуховые и зрительные стимулы, и при этом обнаруживалась его минимальная выраженность именно в проекционных областях коры. В-третьих, он возникал на звучание слова, так же как и на его изображение.

Однако, последующие исследования показали, что в содержательном смысле P300 скорее связан с вероятностью появления стимула, чем с семантикой [1]. Мульти-modalность и широкое распределение P300 по скальпу, с одной стороны, и реакция на новизну и эмоциональность с другой, позволяли соотносить генерацию P300 скорее с такими подкорковыми структурами, как гиппокамп и таламус, чем кора [13].

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ (грант № 01-08-00176а)

Особенно четко это было показано в работах Руделя (1991), который сопоставил два типа потенциалов, полученных в ответ на предъявление значимых (распознаваемых) и незначимых слов с разной вероятностью [10]. Один потенциал

регистрировался биполярно по центральной линии: от электродов vertex-forehead,

где обычно регистрируется P300, другой — в затылочной области, от электродов,

смещенных вверх (4–5 см) и влево (3–4 см) от точки inion, то есть в ассоциативной

зоне зрительной коры. Сравнение этих ВП показало, что P300 регистрируется в ответ только на предъявления со сдвигом, причем на распознаваемые слова и на контрольные одинаково, а на предъявление слов в центре экрана, которые имели большую вероятность появления, P300 не регистрируется. Тогда как затылочное отведение показало совершенно другую картину. В этом отведении регистрировался потенциал P240 в ответ только на распознаваемые стимулы, независимо от вероятности их появления. На контрольные стимулы этот потенциал не регистрируется, а регистрируется обычный зрительный ВП на паттерн. На этом основании Рудель отвергает P300, как компонент категориального распознавания стимула, а вместо этого предлагает новый компонент P240, который регистрируется в затылочном отведении.

Последующие исследования Рудель и Сиа (1995); подтвердили связь этого потенциала распознавания (RP) с категориальной характеристикой стимулов [11]. Однако, остается вопрос: в какой степени RP специфицирует семантическую категорию?

В данной работе излагается новый подход к спецификации семантического компонента ВП, основанный на регистрации различительного потенциала (dissimilarity potential), который появляется в ответ на мгновенную смену стимулов [4; 9]. В этом случае амплитуда компонентов ВП соответствует воспринимаемому испытуемым различию между стимулами. При этом выявлено, что, как и в случае ВП на одиночные предъявления стимула, можно выделить компоненты, специфичные к энергетическим и конфигурационным характеристикам стимула [5,6]. В то же время, метод регистрации ВП на смену стимулов имеет значительные преимущества, поскольку не связан с жестким контролем априорно выделяемой характеристики стимула, когда в сложном зрительном стимуле надо отделить семантическую категорию (значение слова) от перцептивной. Потенциал различия, регистрируемый на мгновенную смену одного слова другим, характеризует интегральное различие между стимулами. Проблема разделения его на составляющие решается на уровне анализа потенциалов различия между всеми парами стимулов методом многомерного

шкалирования, аналогично тому, как это делается с оценками попарных субъективных различий между стимулами.

С этой целью в данной работе использовались 7 слов, обозначающих базисные эмоции – радость, удивление, страх, печаль, отвращение, гнев, спокойствие [2]. Геометрическая модель этих названий в виде круговой траектории на плоскости хорошо известна в психофизической литературе [2; 8; 12]. Исходя из психофизических опытов с этими стимулами, мы должны ожидать три варианта возможных решений.

а) Компоненты ВП, специфические к энергетическим или конфигурационным характеристикам стимулов, будут монотонно меняться с изменением длины слова, независимо от его семантического (эмоционального) содержания.

б) Компоненты ВП, специфически связанные только с семантической характеристикой слова, не должны зависеть от длины слова, а только от семантического различия между словами.

Например, слова «радость» и «печаль» должны иметь минимальную амплитуду конфигурационного компонента ВП, поскольку имеют минимальные различия в конфигурации, и максимальную – семантического компонента. Напротив, слова «страх» и «удивление» должны иметь небольшую амплитуду в семантическом компоненте и большую – в компоненте конфигурационном

в) Конфигурационные и семантические различия отражаются в одних и тех же компонентах. В этом случае амплитуда компонентов ВП будет всегда объединением двух типов различий, и решение можно получить путем построения интегрального категориального пространства, где две категории: «длина слова» и «семантика слова» будут представлены разными системами координат общего пространства.

МЕТОДИКА.

Подробное описание методики регистрации и описание установки можно найти в работах [4; 9].. Стимулы-слова были составлены из букв средней яркости и предъявлялись на темном фоне в центре экрана монитора. Все слова имели одинаковую высоту букв, но отличались по длине слова и по эмоциональному значению. Предъявление состояло из пары случайно выбранных слов, которые последовательно сменяли друг друга 50 раз. Длительность предъявления каждого слова варьировалась от 800 до 1200 мс, чтобы избежать эффекта навязывания ритма.

Испытуемый должен был читать мысленно предъявляемые на экране слова. Потенциалы регистрировались на каждую смену стимулов монополярно, с референтными электродами А1 и А2 по системе 10/20. Длительность записи для каждой смены стимулов была 400 мс. Числовую форму записи осуществляли

аналого-цифровым преобразователем с шагом 5 мс (200 Гц). До начала каждой смены в течение 60 мс записывалась фоновая ЭЭГ, и с момента смены запись продолжалась 340 мс. Запись проводили в диапазоне частот 0,3–30 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В этой работе приводятся только предварительные результаты по затылочным отведениям O1, O2, и центральному отведению Fz в связи с обсуждением роли вертексного потенциала P300 и затылочного RP (P240) в анализе семантической информации. В ответ на смену каждой пары стимулов по каждому отведению было получено два набора ВП. Один набор представлял потенциалы, зарегистрированные при смене, например, слова «гнев» словом «спокойствие», а другой набор — при обратной замене слова «спокойствие» словом «гнев». ВП для каждой пары усреднялись как по числу предъявлений, так и по порядку смены. В качестве меры межстимульных различий использовались две межпиковые амплитуды P120–N180 и N180–P240. Таким образом, исходным материалом для анализа служили шесть треугольных матриц попарных различий (две амплитуды по каждому из трех отведений).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ.

Каждая матрица амплитуд анализировалась неметрическим методом многомерного шкалирования по алгоритму Гуттмана. В результате анализа для каждой из шести матриц были получены координаты точек, представляющих слова-названия эмоций в четырехмерном евклидовом пространстве. Четыре измерения рассматривались в связи с последней из трех гипотез, рассмотренных в теоретическом введении. В соответствии с концепцией о двухканальном кодировании каждой характеристики в зрительной системе и сферической модели различения стимулов [3; 7], полученные пространства центрировались так, что начало системы координат устанавливалось в центр единичной сферы.

На рисунках 1–2 приведены проекции слов-стимулов на плоскости, образованные двумя парами осей четырехмерного пространства, полученного для двух межпиковых амплитуд P120–N180 (рисунок 1 а, б) и N180–P240 (рисунок 2 а, б). На рисунке 1 а положение точек, представляющих названия эмоций, полностью согласуется с их положением в базисном эмоциональном пространстве Вундта-Шлоссберга, Плутчека и др. [3; 7]. Это означает, что межпиковая амплитуда P120–N180 затылочного отведения O1 (левое полушарие) полностью отражает семантическое содержание слов-стимулов. В то же время проекция этих же точек-стимулов на плоскость двух других осей пространства амплитуд P120–N180 (рисунок 1 б) дает структуру, которая хорошо согласуется с такой конфигурационной характеристикой стимулов как длина слова. Все слова (за исключением одной инверсии слов «отвращение» и «удивление») располагаются так, что горизонтальный угол радиус-вектора точки, начиная от самого короткого

слова «гнев», монотонно увеличивается по часовой стрелке в соответствии с длиной слова. Отсюда следует, что амплитуда P120–N180 содержит в себе не только информацию о семантических различиях между словами, но и о конфигурационных различиях также.

Рассмотрим теперь другую, более позднюю амплитуду N180–P240 для этого же отведения (рисунок 2 а). Здесь на первой плоскости точки располагаются уже в полном соответствии с длиной слова, которая характеризуется в сферической модели горизонтальным углом (измеряемым по часовой стрелке). В то же время, на плоскости третьей и четвертой координат пространства точки располагаются случайным образом, что показывает незначимость этих измерений для содержательного анализа данных.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что в затылочной области левого полушария можно зарегистрировать потенциалы с латенцией 120–180 мс, амплитуда которых отражает как семантические, так и графические (конфигурационные) различия между словами, тогда как более поздний потенциал, с латенцией 180–240 мс, отражает только конфигурационные различия.

Рассмотрим далее отведение O2, которое представляет затылочную область правого полушария. На рисунке 3 а, б показаны проекции точек-стимулов (названий эмоций) на плоскости X1X2 и X3X4 четырехмерного пространства, полученного для межпиковых амплитуд P120–N180. Точки на обоих графиках расположены хаотично, их нельзя упорядочить ни по длине слова, ни по эмоциональному значению. Это означает, что изменения этой амплитуды ВП никак не связаны с использованными стимулами. Другая, более поздняя межпиковая амплитуда N180–P240 (рисунок 4 а, б) обнаруживает связь только с графической характеристикой стимулов. На рисунке 4 а видно, что на плоскости X1X2 точки-слова в целом упорядочены по часовой стрелке в соответствии с длиной слова, хотя в подгруппе трех длинных слов эта упорядоченность нарушена.

Для отведения Fz, которое представляет центр теменно-префронтальной области, данные представлены на рисунке 5 а, б (амплитуда P120–N180) и на рисунке 6 (амплитуда N180–P240). Амплитуда P120–N180 центрального отведения (рисунке 5 а, б) дает картину, похожую на такую же амплитуду отведения O1 (рисунок 1 а, б). Положение точек на плоскости X1X2 в целом соответствует структуре семантического эмоционального пространства, за исключением инверсии слов «отвращение» и «печаль». Аналогичным образом, вторая плоскость X3X4 характеризует длину слова. Слова на ней, в целом, упорядочены по направлению часовой стрелки от коротких до длинных. Что же касается более позднего компонента (амплитуда N180–P240), то здесь нет

никакого соответствия структуре эмоционального пространства, но графическая структура слов, в целом, отражается также правильно, как и для амплитуд P120–N180 (рисунок 6).

На основе полученных данных можно сделать вывод, что семантическая составляющая слова наиболее точно отражается в активности левой затылочной области (амплитуда P120–N180), и совершенно игнорируется затылочной областью правого полушария. Вертексно-фронтальное отведение также отражает семантическую информацию, хотя и с некоторыми искажениями, и это можно объяснить больше удаленностью центра генерации семантических потенциалов от префронтальной коры по сравнению с левой затылочной областью. Таким образом, наши данные больше согласуются с данными Рудель [10], который связывает кодирование семантической информации с потенциалом распознавания P240, регистрируемым в левой затылочной области, чем с вертекс-потенциалом P300.

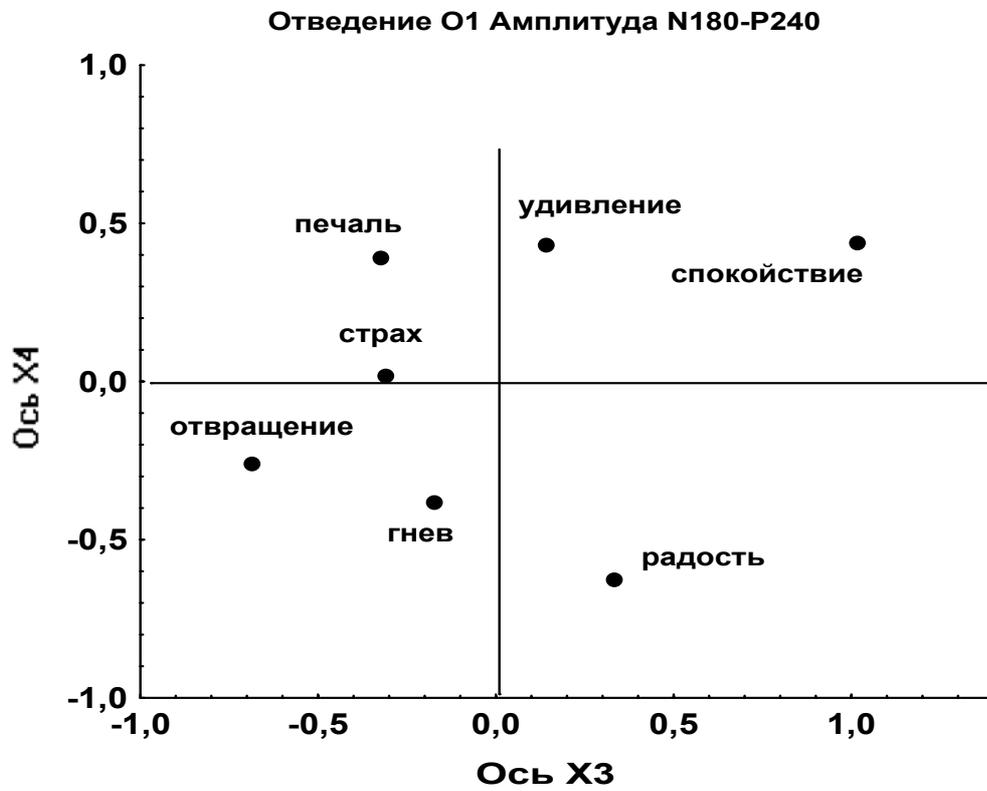
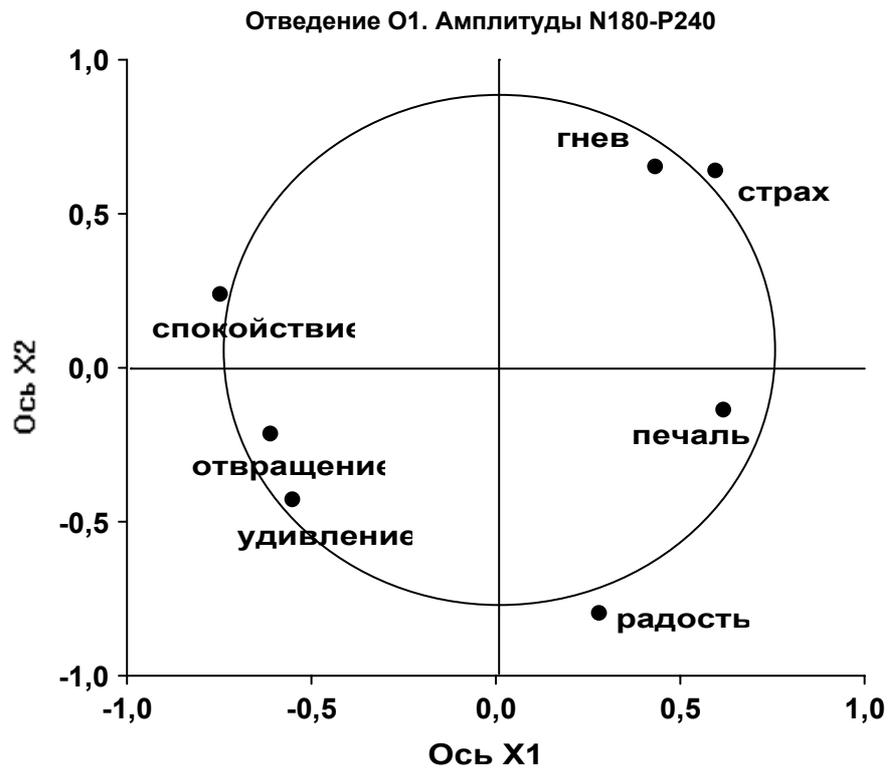
В то же время, амплитуда более позднего компонента N180–P240 лучше согласуется с конфигурационным различием по длине слова для всех рассмотренных отведений. И здесь также наилучшее решение, с точки зрения максимальной круговой упорядоченности точек-слов на плоскости в соответствии с длиной слова, получено для отведения O1, тогда как для отведений O2 и Fz в целом такое соответствие тоже проявляется, но с локальными искажениями. Это также хорошо согласуется с данными Рудель [10; 11] по локализации электродов в затылочной области левого полушария для регистрации потенциала распознавания.

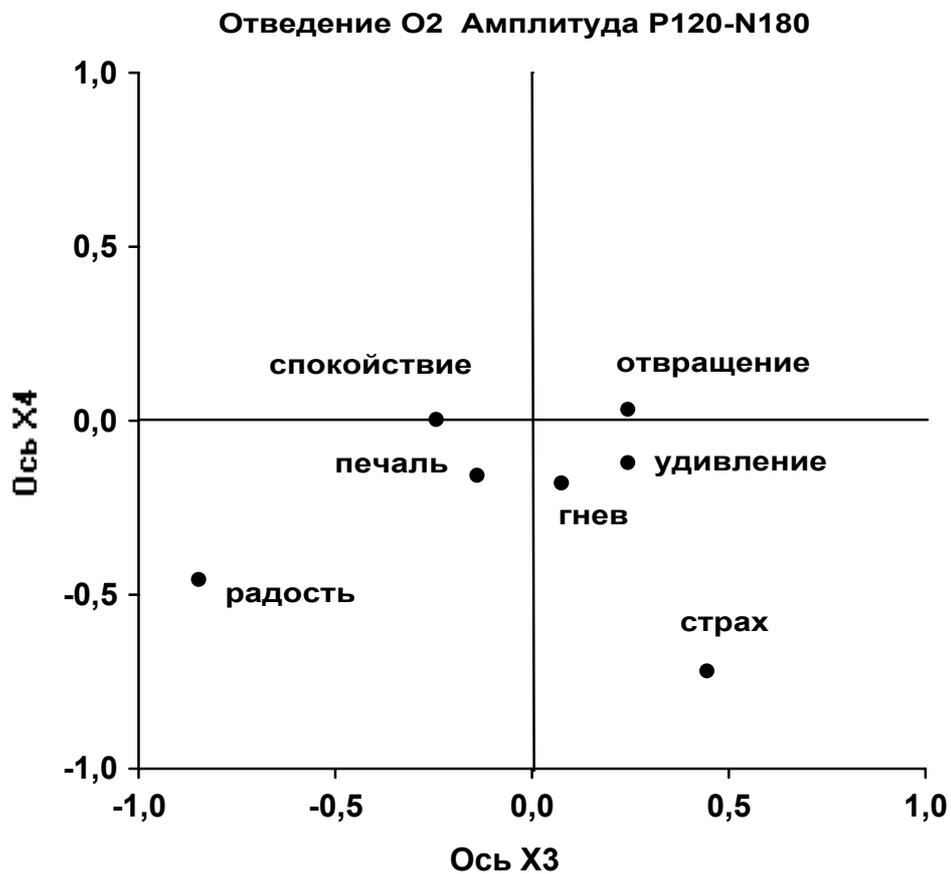
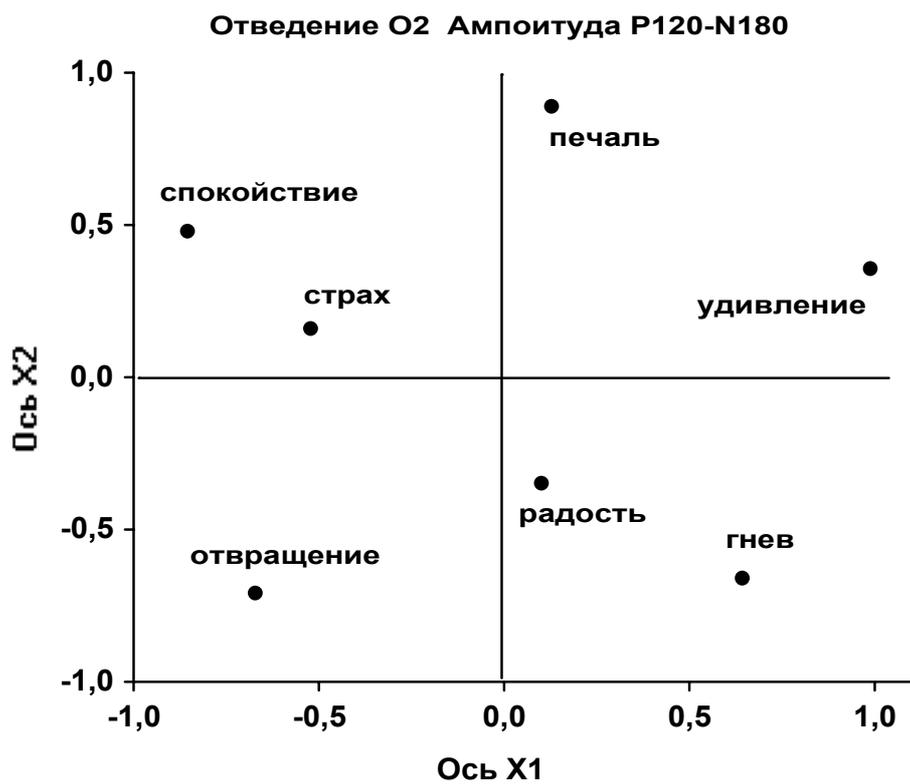
Таким образом, регистрация потенциалов различения в ответ на мгновенную смену стимулов позволяет специфицировать не только сенсорные и перцептивные (конфигурационные) процессы переработки информации в зрительной системе, как это было показано в предыдущих работах [4; 5], но и семантическую информацию.

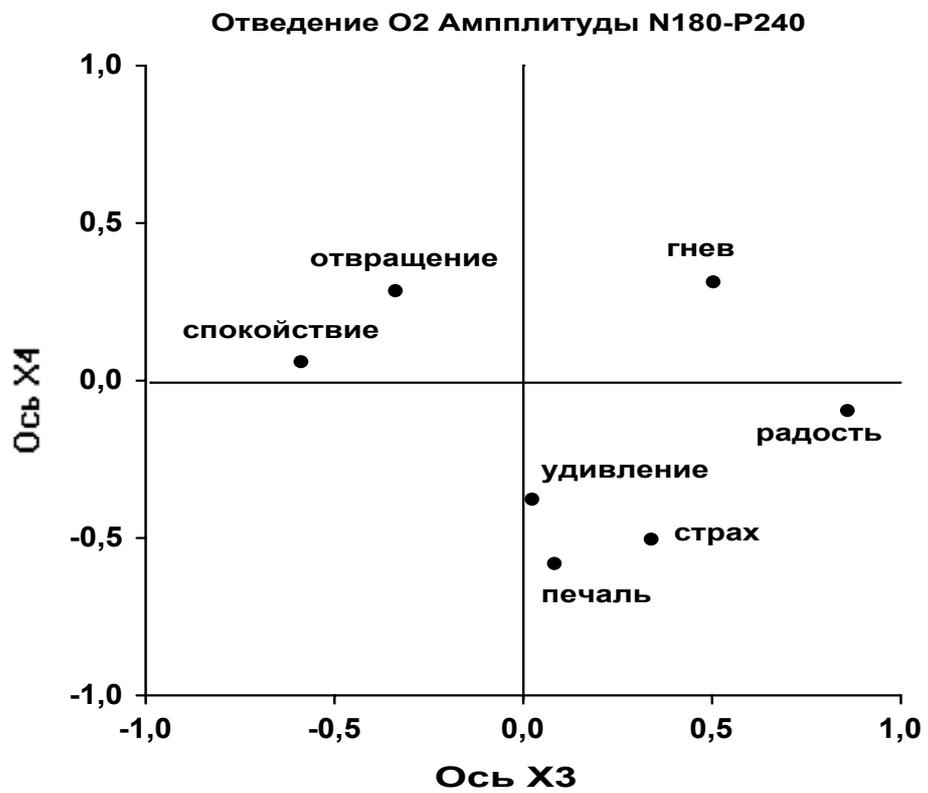
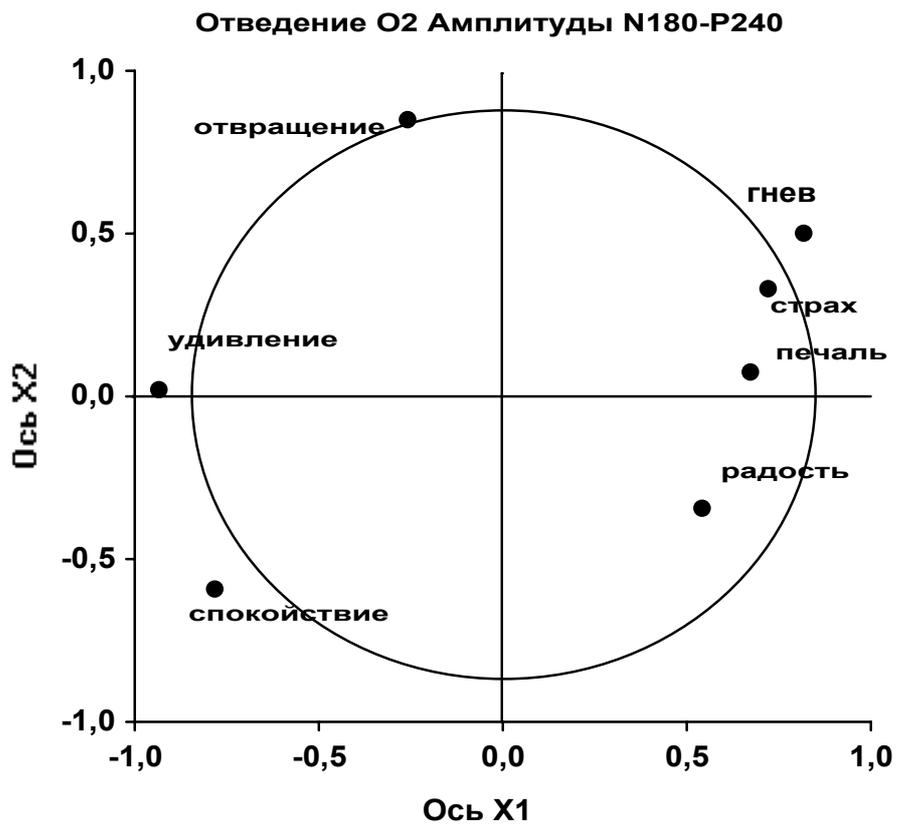
Интересно отметить, что наилучший конфигурационный ответ вызванного потенциала различения имеет латентность большую (N180–P240), чем семантический ответ (P120–N180). Гипотетически это может быть связано с тем, что конфигурационная сеть состоит большей частью из нейронов таламуса, и меньшей частью из нейронов первичной проекционной зоны зрительной коры левого полушария, тогда как семантическая сеть состоит в основном из нейронов вторичной и третичной проекционных зон. Такая гипотеза объясняет как пространственные и временные особенности зарегистрированных ВП, так и содержательные.

Литература

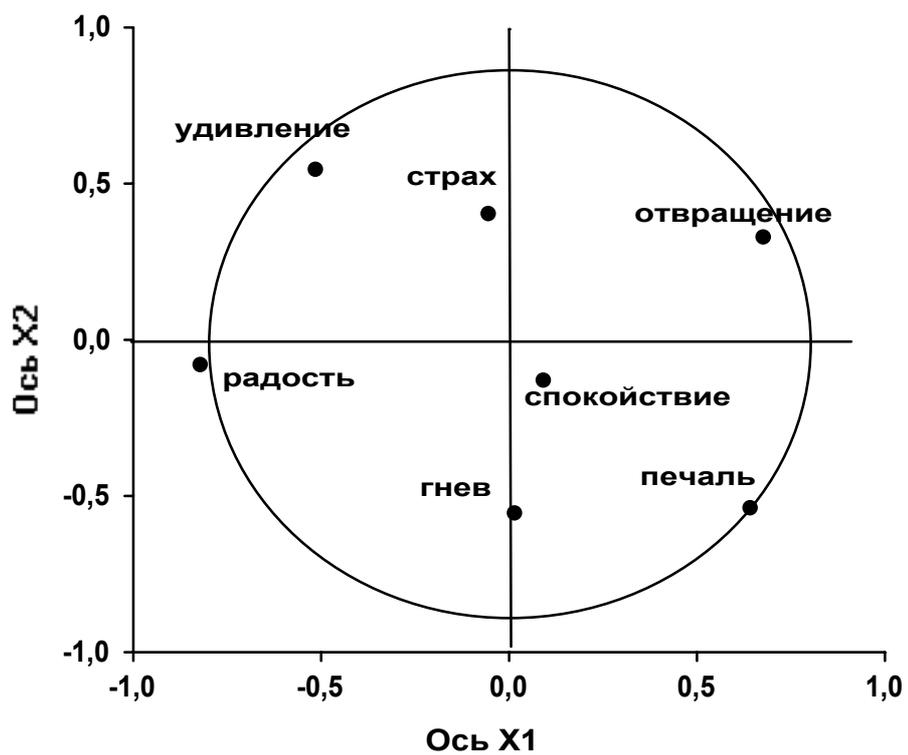
1. *Гнездицкий В.В.* Вызванные потенциалы мозга в клинической практике. Таганрог, Изд-во ТГРУ, 1997.
2. *Изард К.* Эмоции человека. М.: Изд-во МГУ. 1978.
3. *Измайлов Ч.А., Исайчев С.А., Шехтер Е.Д.* Двухканальная модель различения сигналов в сенсорных системах. Вестник МГУ. Сер.14. Психология 1998. № 3. С. 29–40.
4. *Измайлов Ч.А., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н.* Связь зрительных вызванных потенциалов с субъективными различиями между эмоциональными выражениями схематического лица // Журнал ВНД, 2000. Том 50. Вып. 5. С. 805–818.
5. *Измайлов Ч.А., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н.* Цветовое пространство человека, основанное на данных корковых вызванных потенциалов. Сенсорные системы. 2003. Том 1. № 1.
6. *Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Коршунова С.Г., Чудина Ю.* Геометрическая модель различения ориентаций линии, основанная на субъективных оценках и зрительных вызванных потенциалах // Журнал ВНД. 2003. Том 53. Вып.1.
7. *Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичюс Г.Г.* Искусственные органы чувств. М., Наука, 1979.
8. *Фрумкина Р.М.* Цвет, смысл, сходство. М.: Наука, 1984. –174 с.
9. *Izmailov Ch.A., Korshunova S.G., Sokolov E.N.* Relationship between visual evoked potentials and subjective differences between emotional expressions in «face diagrams»// Neuroscience & Behavioral Physiology, 2001. V. 31. P. 529–538.
10. *Rudell A.P.* The recognition potential contrasted with the P300// International Journal of Neuroscience. 1991. V.60. P. 85–111.
11. *Rudell A.P. and Hua I.* The recognition potential latency and word image degradation // Brain and language, 1995. V. 51. P. 229–241.
12. *Strongman K.T.* The psychology of emotion. N.-Y., Wiley, 1978. P. 303.
13. *Yingling C.D. and Hosobychi Y.* Subcortical correlation of P300 in human // EEG and Clinical Neurophysiology, 1984. V. 59. P. 72–76.



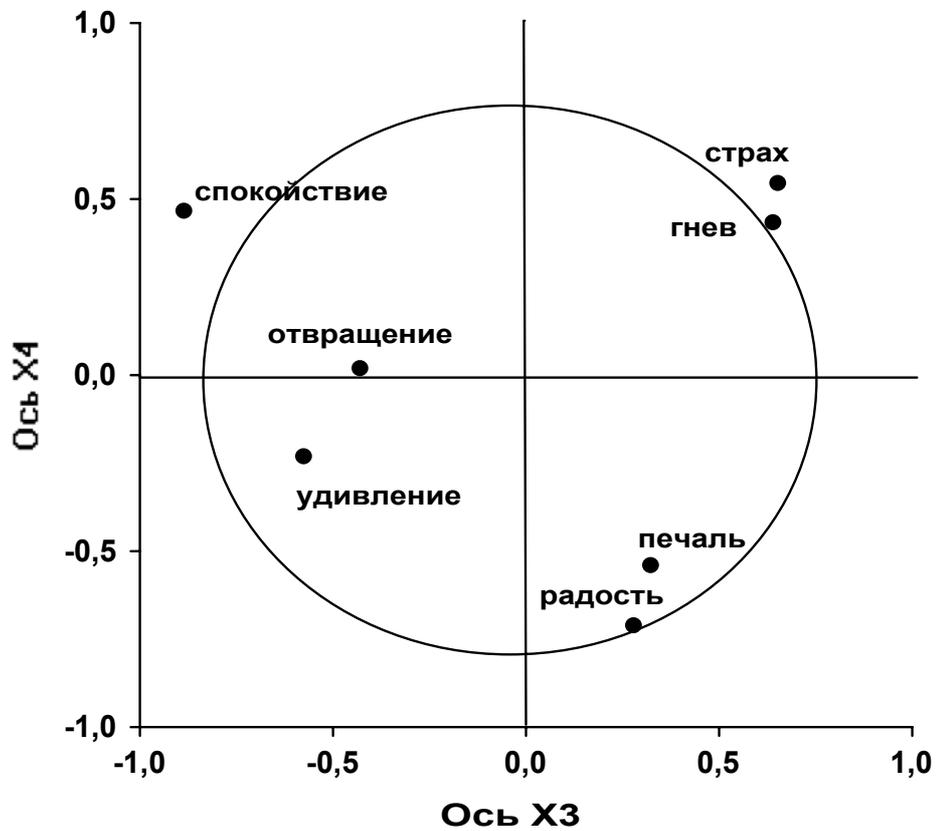




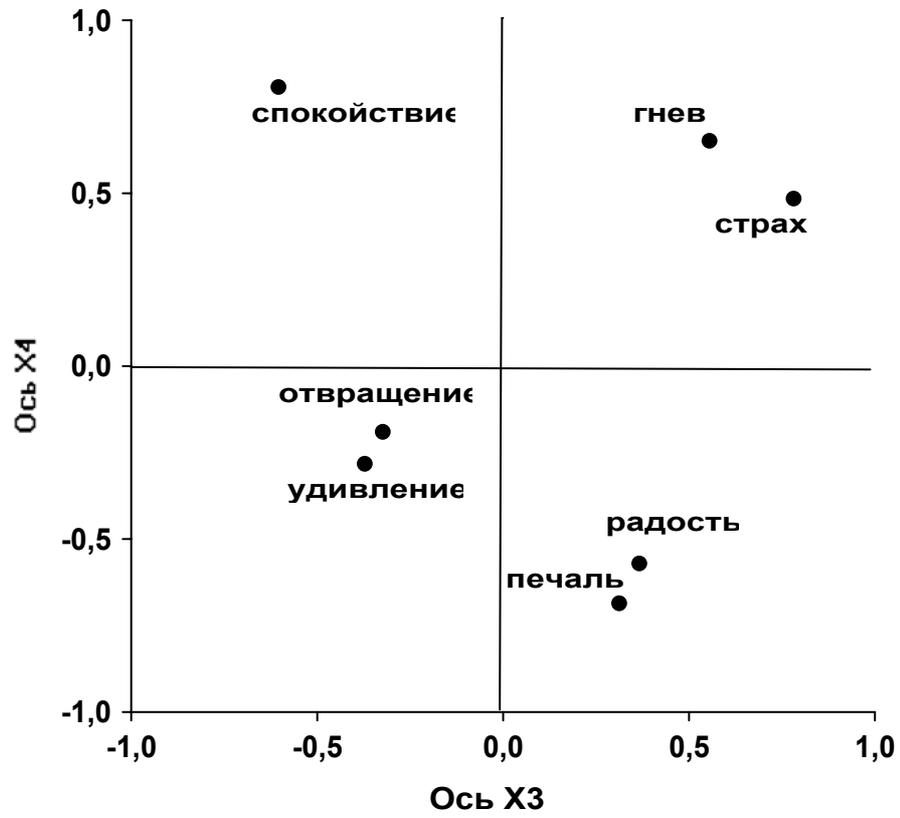
Отведение Fz. Амплитуда P120-N180



Отведение Fz Амплитуда P120-N180



Отведение Fz Амплитуда N180-P240



Определение объема и быстродействия кратковременной памяти по параметрам электроэнцефалограммы¹

А.Н. Лебедев, Н.А. Скопинцева, Л.П. Бычкова

Институт психологии РАН

Много лет спустя после пионерских работ Эббингауза концепция кратковременной памяти закрепились в психологии благодаря обобщающей статье «Магическое число семь плюс или минус два» Дж. Миллера [12]. Аналогия кратковременной памяти человека с оперативной памятью компьютера очевидна. Заметим, что в конце XIX и начале XX века психологи использовали менее определенный, но более емкий и отвечающий сути дела термин «объем сознания» вместо привычных ныне операциональных обозначений для объемов долговременной, кратковременной, оперативной, рабочей памяти и объема внимания.

Предпосылки

Понятие памяти — ключевое не только в области когнитивной или инженерной психологии, но и вообще в психологии в целом. Это понятие не разработано досконально несмотря на большие усилия многих исследователей [13; 11]. Поражает несоответствие между небольшим объемом кратковременной памяти (около 30 бит) и кажущимся бесконечным объемом долговременной памяти. Как связаны оба показателя? Зависит ли объем кратковременной памяти от разнообразия запоминаемых стимулов? Вместе с группой сотрудников лаборатории психофизиологии Института психологии РАН, а также двух кафедр Ярославского госуниверситета, возглавляемых физиологом И.Ю. Мышкиным и математиком В.В. Майоровым, мы нашли весьма вероятные ответы на оба вопроса с учетом достижений последнего времени в области нейрофизиологии, психофизиологии, математического моделирования, то есть достижений в той синтетической области на стыке многих наук, которая называется сейчас нейронаукой [7; 8].

Волновая концепция памяти

Согласно нашей концепции информация в памяти человека закодирована пакетами волн, образуемых согласованной активностью множества центральных нейронов. Периоды и фазы таких колебаний различаются ступенчато. Величина «ступеньки» (R) впервые была вычислена академиком М.Н. Ливановым [4]. Размер (N) алфавита элементарных единиц памяти определяется частотой доминирующего альфа-ритма ($F = 10$ Гц) и размером «ступеньки», то есть относительной рефрактерности, составляющей десятую часть ($R = 0.1$) периода

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ, грант № 00-06-00054а

альфа колебаний, $N = 1/(FR)-1$. Емкость (С) долговременной памяти в этих обозначениях не превышает величины $C = N^{**}N$ нейронных единиц памяти. Двойная звездочка означает операцию возведения в степень. В каждый текущий момент времени лишь ограниченное число (М) единиц памяти, равное объему внимания, обусловлено активностью максимально большого числа нейронов. Ранее опытным путем мы нашли, что объем внимания пропорционален размеру (А) алфавита воспринимаемых стимулов $M = kA$. Коэффициент пропорциональности (k) зависит от конкретных условий восприятия, изменяясь от единицы до максимально возможного числа (Н) правильно воспроизводимых после однократного восприятия стимулов. Число (Н) служит известной мерой емкости кратковременной памяти. Физиологическая константа (N), указанная выше, размер алфавита воспринимаемых стимулов (А), показатель концентрации внимания (k) и емкость кратковременной памяти (Н) связаны в простом уравнении

$$N^{**}N = (kA)^{**}N, \quad (1)$$

в котором по-прежнему две звездочки означают операцию возведения в степень. В общем, при усреднении многообразных условий опыта, значение показателя (k) концентрации внимания равно половине емкости кратковременной памяти $k = N/2$

Еще одно уравнение выражает временные соотношения при запоминании и воспоминании образов памяти. Мощность колебаний активности нейронных ансамблей распределена по оси частот неравномерно. Распределение линейно. Расстояние между соседними пиками на спектре мощности в диапазоне альфа-ритма равно произведению двух констант Бергера и Ливанова (FR). Обратная величина $T = 1/FR$ равна периоду биений — волнообразных вздутий и спадов амплитуды суммарных колебаний. Биения хорошо известны электрофизиологам как веретена альфа ритма. Если гребни волн одного из ансамблей, хранящих информацию о стимулах, случайно совпадают с гребнями волн, вызванных идентичным стимулом, то захват колебаний в общий ритм происходит мгновенно. Переменная часть задержки восприятия в этом случае равна нулю. Если такого совпадения не происходит, то возникает задержка. Ее длительность зависит от разности по времени между гребнями волн одноименных ансамблей. Один из них хранился в памяти до момента стимуляции. Второй образован самим воспринимаемым стимулом. Время до момента совпадения перцептивного образа стимула и его эталона, хранящегося в памяти, равно, в среднем, половине остающейся до встречи части периода биений (Т). В случае восприятия одного стимула из числа (А) равновозможных разных стимулов, ожидаемых испытуемым, это время находится по формуле

$$t = 0,5T(1-(1-R)/A)^{**}2. \quad (2)$$

Двойная звездочка указывает, как и прежде, на операцию возведения в степень. Вместе с постоянным временем, необходимым для возбуждения рецепторов, продвижения импульсов от рецепторов к центральным нейронам и вспять от центральных нейронов до мотонейронов и возбуждения мышечных клеток, найденное по формуле (2) время определяет величину скрытого времени реакции выбора, то есть в общепринятых терминах скорость обработки информации человеком.

Найденные уравнения послужили основанием для вывода производных формул для расчета скорости извлечения стимулов из памяти, зависимости времени простых сенсомоторных реакций (без выбора) от интенсивности стимулов, уравнения для расчета величины ощущений от интенсивности стимулов, а также уравнения для распределения интервалов между моментами появления одинаковых слов в потоке речи, для расчета емкости словаря по числу всех слов, встречающихся в связном тексте.

Перечисленные выше уравнения были многократно проверены, начиная с середины шестидесятых годов по настоящее время в разнообразных опытах [1; 2; 3; 9; 10; 5]. По результатам проверки защищено около двух десятков диссертаций, в том числе докторских, в области психологии, психофизиологии, медицины и прикладной математики.

Цель исследования

Однако до настоящего времени оставалось неясным, связано ли с психологическими измерениями объема памяти и ее быстродействия множество иных электрофизиологических показателей деятельности мозга, кроме отмеченных выше относительной рефрактерности (R) и длительности биений (T) доминирующих частот альфа ритма, от значения которых зависит точность расчетов с показателями объема и быстродействия памяти человека. Легко предположить, что такие связи существуют. Выявить их - цель нашей работы.

Это поможет не только разобраться глубже в физиологических механизмах функционирования памяти, но и существенно облегчит решение практических задач по оценкам объема оперативной памяти и ее быстродействия с учетом легко доступных измерению параметров электроэнцефалограммы.

Методы исследования

1. Измерение психологических показателей памяти

Нами были разработаны компьютерные программы по измерению многих психологических характеристик кратковременной памяти и ее быстродействия. Для измерения объема кратковременной памяти использовали наборы цифровых символов, двоичных и десятичных. Длина предъявленной для запоминания строки, составленной из случайного набора таких символов (каждый был равновероятен), возрастала, если воспроизведение двух последовательных строк подряд было точным. Время экспозиции — до 500 мсек на цифру. Если в строке было шесть символов, она экспонировалась максимум в течение трех секунд. Испытуемый приступал, как правило, к воспроизведению строки до истечения этого времени, и строка тотчас гасла. После двух неверных воспроизведений подряд длина строки сокращалась на один символ, после двух безошибочных ответов она возрастала на один символ. Всего предъявляли 15 строк.

Быстродействие памяти измеряли двумя способами.

Первый способ заключался в том, что с интервалом, колеблющимся случайно в диапазоне 2–4 секунд предъявлялся один единственный символ, выбранный случайно из набора, указанного перед опытом испытуемому. В одном наборе были

все десять цифр, от нуля до девяти. В другом наборе были всего две цифры — нуль и единица, а в третьем — всего лишь одна цифра. Третий случай представлял собой процедуру измерения простой зрительно-моторной реакции: испытуемый нажимал на одну и ту же клавишу как можно быстрее после каждого стимула. В первых двух случаях — (реакции выбора) задача испытуемого нажать на клавишу «нуль» после предъявления любой четной цифры и на клавишу «1» после предъявления любой нечетной цифры. Измеряли время от момента предъявления стимула до момента нажатия. Стимул появлялся в центре экрана и гас тотчас после ответного нажатия. Учитывали число правильных ответов. Правильными считались, по инструкции, нажатия на клавишу, соответствующую стимулу, не слишком ранние, не слишком поздние и не опережающие стимул. Временное окно для правильных ответных реакций находилось в диапазоне от 150 мсек до 1500 мсек.

Второй способ для оценки быстродействия памяти состоял в том, что в центре экрана предъявлялась матрица из 12 символов, по четыре в каждой строке. Символы были в одной серии двоичными (нули и единицы), в другой — десятичными (от нуля до десяти). Все символы высвечивались в течение трех секунд, а затем один из них закрывался шторкой, становился невидимым. Следовало нажать на клавишу с изображением такого символа после его маскировки. Требования нажимать как можно быстрее не выставляли. Нужно было, по инструкции, лишь точно воспроизвести погашенный символ.

Измеряли точность ответов и время от гашения стимула до момента нажатия на клавишу. Матрица гасла в момент нажатия. Частное от деления полученного времени на число символов в матрице служило мерой времени поиска закрытого символа в памяти.

2. Измерение электрофизиологических показателей

На втором этапе после измерения психологических показателей у 62 человек, студентов вуза, вычисляли по формулам (1) и (2) искомые электрофизиологические параметры - период биений альфа-волн (T) и относительную величину «ступеньки» Ливанова (R).

После расчета найденных показателей исследовали их связь с реальными многообразными параметрами электроэнцефалограммы, мощностью колебаний в разных частотных диапазонах и в топографически разных областях, коэффициентами корреляции между колебаниями потенциалов в разных зонах мозга, частотой пересечения нулевой линии волнами ЭЭГ в разных пунктах отведения и т.п. Электроэнцефалограмму записывали, как правило, по окончании опытов у каждого испытуемого, сидящего в удобном мягком кресле, в состоянии полного покоя при закрытых глазах, в отсутствие каких-либо стимулов в течение 10–15 минут при визуальном контроле качества записи на экране компьютера. Использовали шесть пунктов регистрации, в симметричных зонах лобных (F3, F4), центральных (C3, C4) и затылочных (O1, O2) областей мозга, согласно Международной классификации 10/20 зон отведения. Запись осуществляли на многоканальном электроэнцефалографе венгерского производства с аналого-цифровым преобразователем фирмы «Медтехника».

На третьем, заключительном этапе выполняли расчет множества психологических показателей у каждого испытуемого непосредственно по реальным параметрам

рам электроэнцефалограммы, используя технику множественного линейного регрессионного анализа и другие виды статистической обработки данных.

Программы инструментальной оценки психологических показателей, а также программы ввода и обработки электрофизиологических характеристик написаны А.Н. Лебедевым.

Результаты исследования.

Основной результат — относительно высокие коэффициенты корреляции между электрофизиологическими параметрами и разнообразными психологическими показателями. В таблице 1 предьявлены коэффициенты корреляции (в тысячных долях) между каждым из психологических показателей и тремя электрофизиологическими параметрами. Для каждого психологического показателя существует свой особый набор электрофизиологических параметров — предикторов. Чаще всего значения коэффициентов между предсказанными величинами психологических показателей и их реальными значениями лежали в пределах 0,4–0,7. Подчеркнем, что психологические показатели мы использовали лишь на этапе обучения нашей экспертной системы, то есть на этапе выработки уравнений множественной линейной регрессии. Проверка точности прогноза в чистом виде осуществлялась не только для испытуемых, участвовавших в обучении экспертной системы, но также и для испытуемых, не принимавших участия в обучении, то есть «слепым методом».

Набор электрофизиологических показателей находился опытным путем посредством множественного линейного регрессионного анализа для 62 испытуемых. Найдены, в целом, довольно высокие значения коэффициентов корреляции, сравнительно с известными типичными значениями коэффициентов между психологическими показателями и какими-то иными валидными показателями, например, показателями успешности обучения или экспертными оценками. Следовательно, предполагаемые нейронные коды памяти проявляются в разных показателях ЭЭГ, не только в частоте альфа-ритма или относительной рефрактерности.

Ниже, в таблице 2, показан перечень электрофизиологических показателей, наиболее тесно связанных с индивидуальными психологическими данными. Этот список выбран из 22-х уравнений множественной регрессии. В каждом уравнении — набор из трех электрофизиологических параметров, предикторов соответствующих психологических показателей объема и быстродействия памяти.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции (КОР, в тысячных долях) между электрофизиологическими и психологическими показателями (КОД) емкости и быстродействия кратковременной памяти, вычисленные на выборке из 62 испытуемых (пояснение в тексте, список электрофизиологических предикторов см. в следующей таблице).

КОД	КОР	Смысл минимальных и максимальных значений показателя
-----	-----	--

YCS	715	Неточный выбор из десяти, % ...
YEF	704	Точный выбор из десяти, %;
Y8S	676	Малая рефрактерность, мс ...
YFS	640	Большая рефрактерность, мс;
Y5S	640	Малый разброс выбора из двух, мс ...
Y4S	606	Большой разброс выбора из двух, мс;
YHS	565	Неточный поиск при алфавите [A2], % ...
Y7S	548	Точный поиск при алфавите [A2], %;
Y6S	546	Малый разброс простой реакции, мс ...
YIS	545	Большой разброс простой реакции, мс;
YGS	538	Быстрая простая реакция, мс ...
YPI	520	Медленная простая реакция, мс;
YAS	510	Малый разброс времени поиска [A10], мс ...
YJS	508	Большой разброс времени поиска [A10], мс;
YDS	501	Быстрый выбор из двух, мс ...
Y2S	423	Медленный выбор из двух, мс;
Y9S	404	Неточная простая реакция, % ...
YNS	378	Точная простая реакция, %;
YBS	347	Неточный поиск при алфавите [A10], % ...
YLS	321	Точный поиск при алфавите [A10], %;
Y1S	270	Краткое время поиска [алфавит A10], мс ...
YKS	173	

Сокращения:

мс — миллисекунда, эл — элемент, % — проценты, [A2] — двоичный алфавит, [A10] — десятичный алфавит.

Таблица 2

Перечень электрофизиологических показателей — предикторов объема и быстродействия кратковременной памяти, их абсолютное число (ВСЕГО) в 22-х уравнениях регрессии и относительная частота (ЧАСТОТА) в тысячных долях.

КОД ВСЕГО ЧАСТОТА Краткая характеристика ЭЭГ предикторов

AM1	5	76	Амплитуда, в среднем, мкВ, отведение F3;
AS2	4	61	Амплитуда, std. откл. мкВ, отведение F4;
24D	4	61	Кв.мкВ/Гц, центр справа, частота 24 Гц;
20A	3	45	Кв.мкВ/Гц, лоб слева, частота 20 Гц;
AS6	3	45	Амплитуда, std. отк. мкВ, отведение O2;
AS1	3	45	Амплитуда, std. отк. мкВ, отведение F3;
Z01	3	45	Мощность, кв. мкВ, Гц, отн. ед., частота 1 Гц;
ZS5	3	45	Стд. отк. частоты, зона O1, Гц, (0,2–25,6 Гц);
ZZM	2	30	Частота пересечений нуля, в целом, Гц;
B2A	2	30	Мощность бета2, 19–24 Гц, лоб слева;
ZS2	2	30	Стд. отк. частоты, зона F4, Гц, (0,2–25,6 Гц);
21E	2	30	Кв.мкВ/Гц, затылок слева, частота 21 Гц;
LTF	2	30	Мощность тета ритма слева, лоб, %;
17F	2	30	Кв.мкВ/Гц, затылок справа, частота 17 Гц;
ZM1	2	30	Частота колебаний в зоне F3, Гц, (0,2–25,6 Гц);
AM5	2	30	Амплитуда, в среднем, мкВ, отведение O1;
23E	2	30	Кв.мкВ/Гц, затылок слева, частота 23 Гц;
ZS3	1	15	Стд. отк. частоты, зона C3, Гц, (0.2-25.6 Гц);
ZS6	1	15	Стд. отк. частоты, зона O2, Гц, (0.2-25.6 Гц);
ZS4	1	15	Стд. отк. частоты, зона C4, Гц, (0.2-25.6 Гц);
ZM2	1	15	Частота колебаний в зоне F4, Гц, (0.2-25.6 Гц);
T1C	1	15	Мощность тета1, 4-5 Гц, центр слева;
R46	1	15	Коэффициент корреляции, отведения C4-O2,%;
R36	1	15	Коэффициент корреляции, отведения C3-O2,%;
P56	1	15	Совпадение фаз, отведения O1-O2,%;
LDC	1	15	Мощность дельта+бета слева, центр, %;
B2F	1	15	Мощность бета2, 19-24 Гц, затылок справа;
B2E	1	15	Мощность бета2, 19-24 Гц, затылок слева;
B1A	1	15	Мощность бета1, 14-18 Гц, лоб слева;
AM6	1	15	Амплитуда, в среднем, мкВ, отведение O2;
AM4	1	15	Амплитуда, в среднем, мкВ, отведение C4;
AM3	1	15	Амплитуда, в среднем, мкВ, отведение C3;
A2E	1	15	Мощность альфа2, 10-11 Гц, затылок слева;
23B	1	15	Кв.мкВ/Гц, лоб справа, частота 23 Гц;
22A	1	15	Кв.мкВ/Гц, лоб слева, частота 22 Гц;
07C	1	15	Кв.мкВ/Гц, центр слева, частота 7 Гц;
05C	1	15	Кв.мкВ/Гц, центр слева, частота 5 Гц;

Сокращения: мкВ — микровольт, Гц -герц, Кв. —квадратный, Стд. отк. — стандартное отклонение.

Примером диагностического уравнения служит следующая формула для расчета емкости (код YJS) кратковременной памяти на десятичные цифры с учетом опытных значений электрофизиологических показателей (коды 20А, 17F и В2А)

$$YJS = 71,556 - 0.180*20A + 0,263*17F - 0,072*В2А, \quad (3)$$

смысл кодовых обозначений в которой раскрыт выше в таблицах 1 и 2, а примеры расчета можно видеть ниже в таблице 3. Коэффициент корреляции, по Пирсону, между вычисленными и реальными значениями объема памяти более 0,5. Это довольно высокое, по психологическим меркам, значение. Еще выше, около 0,7, как видно из таблицы 1, коэффициент корреляции между предсказанными и реальными данными для относительного числа безошибочных реакций в ситуации выбора одного символа из десяти равновозможных (код YCS).

Таблица 3. Опытные (YJS) и вычисленные (YJ') величины объема кратковременной памяти, умноженного на 10, в цифровых символах, по уравнению (3) множественной регрессии с учетом значений электрофизиологических предикторов (коды 20А, 17F и В2А).

Код испытуемого YJS 20А 17F В2А YJ'

M17FRA_F91308	43	37	1	78	60
F40RISH_01181	51	31	0	50	62
F15NOSCP02021	56	27	2	51	64
F15JASEP02021	61	33	3	76	61
M17SCU_F9B171	63	40	2	73	60
M17BIBIF91322	70	7	2	22	69
M17MAXIF91322	71	3	1	52	68
M16SMIRP02021	66	5	12	20	72
M17OZE_F9B241	73	9	19	46	72
M16EWS_79B22	75	3	10	47	70
1					
F15RODCP02021	80	5	12	15	73
M21MOD_F9132	76	6	28	16	77
3	75	4	31	15	78
M20ALI_F91309	83	5	12	19	72
M17MIS_F9B241	79	9	47	30	80
M17MSH_F91315					

Примечание.

В коде испытуемого — данные о поле, возрасте, фамилии испытуемого и времени измерения. Коды параметров раскрыты выше в таблицах 1 и 2. Горизонтальными линиями разделены начало, середина и конец списка из 62 испытуемых. Показано одно из 22-х уравнений, предсказывающих характеристики кратковременной памяти по параметрам ЭЭГ.

Из 62 испытуемых мы отобрали 7 человек с наивысшими реальными значениями объема кратковременной памяти. Разумеется, по определению, средняя величина объема памяти для этой группы отличалась от среднего значения по всей выборке в целом. При этом ряд электрофизиологических показателей для этой группы также достоверно отличался от генеральных средних по выборке в целом. В таблице 4 приводятся соответствующие данные.

Таблица 4

Величина объема кратковременной памяти (код YJS) на десятичные цифры для группы (M1) из 7 человек с наибольшими его значениями в сравнении со средними значениями прочих показателей для всей выборки (M2) из 62 человек.

КОД M1 M2 Групповые показатели

YJS	8.1	6.8	Большой объем памяти, цифры;
YEF	10.5	12.6	Малая рефрактерность,мс;
Z17	46.0	10.1	Мощность, отн. ед., в целом, частота 17 Гц;
YKS	1.1	1.0	Большой разброс объема памяти, цифры;
23E	4.0	22.0	Мощность, отн.ед., частота 17 Гц; затылок слева;
12A	87.0	131.0	Мощность, отн.ед., частота 12 Гц; лоб слева;
Y4S	337.9	314.6	Медленная простая реакция, мс

Примечание. В таблицу вошли показатели отобранной группы, достоверно при уровне значимости 0,05 отличающиеся от средних значений таких же показателей по всей выборке. Смысл кодовых обозначений раскрыт в таблицах 1 и 2 (см. выше).

Меньшую амплитуду колебаний в полосе альфа-ритма у таких испытуемых следует, по-видимому, объяснить индивидуальной особенностью, — более высокой настороженностью, активированностью даже в состоянии покоя, сравнительно с другими несколькими десятками испытуемых, если учитывать известные данные о депрессии альфа-ритма как проявлении активированности. Однако следует остерегаться простых аналогий и объяснений.

Выделили еще одну группу из семи человек с наименьшими значениями скрытого времени (код Y7S) реакции выбора из двух альтернатив. Время определялось скоростью перебора образов памяти в процессе сличения воспринимаемого стимула с двумя равновозможно ожидаемыми. Оказалось, что эта группа испытуемых достоверно отличается от общей массы из 62 испытуемых по ряду показателей, приведенных в таблице 5.

Таблица 5

Скрытое время (код Y7S) реакции выбора из двух альтернатив (цифры 0 или 1) для группы (M1) из 7 человек с наименьшими его значениями в сравнении со средними значениями прочих показателей для выборки (M2) из 62 человек.

КОД	M1	M2	Групповые показатели
Y7S	326	429	Быстрый выбор из двух, скрытое время, мс;
YPI	576	886	Короткое альфа веретено, мс;
Y8S	89	121	Малый разброс времени выбора из двух, мс;
YFS	62	72	Неточный поиск в памяти при алфавите 10, частота
10E	120	270	опознаний %;
10C	96	175	Мощность, частота 10 Гц, затылок слева;
20C	8	16	Мощность, частота 10 Гц, центр слева;
B2B	23	36	Мощность, частота 20 Гц, центр слева;
Y9S	77	93	Мощность, диапазон бета2, 19-24 Гц, лоб справа;
B2A	35	23	Неточный выбор из двух альтернатив, частота правильных ответов, %; Мощность, диапазон бета2, 19-24 Гц, лоб слева

Примечание. В таблицу вошли показатели группы испытуемых, достоверно при уровне значимости 0,05 отличающиеся от средних значений таких же показателей по всей выборке. Смысл кодовых обозначений раскрыт в таблицах 1 и 2 (см. выше). Мощность колебаний ЭЭГ указана в относительных единицах.

Вывод из наблюдения за этой группой: чем больше депрессия амплитуд в диапазоне частот альфа и бета ритма, тем короче скрытое время. Налицо исходная более высокая активированность таких субъектов даже в состоянии относительного покоя при записи электроэнцефалограммы.

Уравнение множественной регрессии для расчета скрытого времени реакции выбора из двух альтернатив (Y7S) с весомым набором электрофизиологических параметров приводится здесь

$$Y7S = 354,260 + ZS5*25,116 + 24D*59,013 + AS2*12,959. \quad (4)$$

Смысл кодовых обозначений в уравнении (4) раскрыт выше в таблицах 1 и 2. Коэффициент корреляции между предсказанными по уравнению и реальными величинами времени реакции составляет 0,55 для выборки из 62 человек, в целом. Это еще один пример высокой (для психологов) связи между физиологическими и психологическими проявлениями быстрого действия кратковременной памяти. Всего таких уравнений получено 22 (по числу психологических параметров памяти).

Открытие достоверных связей между отмеченными выше в таблицах 1–5 параметрами электроэнцефалограммы в состоянии покоя испытуемых и психологическими характеристиками внимания и памяти испытуемых – один из первых этапов расшифровки нейронных кодов памяти, главной психофизиологической проблемы XXI века.

Обсуждение результатов

Две физиологические константы вошли в простые алгебраические уравнения для расчета объема и быстродействия памяти человека. Ранее было показано, что найденные закономерности объяснили фундаментальные психологические феномены, среди них границы объема и быстро действия памяти человека, разрешив существующие в литературе противоречия, а также позволили предсказать существование новых феноменов. Один из них — зависимость объема кратковременной памяти от размера алфавита воспринимаемых стимулов, по уравнению (1). Зависимость времени реакции выбора от алфавита стимулов во всем их диапазоне — также ранее неизвестная в психологии закономерность. Выведенное из нейрофизиологических предпосылок уравнение (2) действительно в широком диапазоне условий, намного превышающем узкий предел, определенный выявленным ранее законом скорости обработки информации У. Хика (Hick, 1952).

В настоящем исследовании впервые количественно показано, что круг предикторов психологических показателей памяти и ее быстродействия в действительности намного шире (табл. 1–5). Теории, объясняющей все найденные связи, не существует. Полученный результат служит стимулом для дальнейшей разработки концепции нейронного кодирования содержимого довременной и кратковременной памяти человека.

Перспективны исследования последнего времени Е.Н. Соколова (доклад на настоящей конференции, посвященной памяти А.В. Брушлинского) о колебательных нейронных процессах как одном из звеньев, может быть, решающем, в процессах актуализации сведений, хранимых в виде векторов синаптических проводимостей, специфичных для каждого из образов памяти.

Можно ли по параметрам электроэнцефалограммы рассчитать психологические особенности личности, обеспечивающие успешность ее жизненного пути, например интеллектуальную, художественную или социальную одаренность (умение быть лидером, организатором), склонность к наркотической или иной зависимости, к ненормативному поведению, можно ли объективно оценить состояние физического, психического и социального благополучия человека?

Можно ли по потенциалам электроэнцефалограммы предвосхитить действия человека в текущем времени, например, простейшие — нажатие на кнопку мышки перед экраном компьютера?

Решение этих и других подобных вопросов представляется вполне возможным в свете выполненного нами исследования.

На новом пути, в несколько ином, но близком направлении, уже найдены наборы параметров ЭЭГ, определяющие интеллектуальную и музыкальную одаренность человека с довольно высокой точностью, а также параметры, определяющие такие особенности психики, как общительность или замкнутость человека, стремление приукрасить себя или, напротив, стремление к самоуничтожению, трезвость в оценке окружающих или чрезмерная подозрительность, импульсивность в поступках и осторожность, взвешенность и т.п. в соответствии с известными шкалами ММРІ, а также другими шкалами, но без единого вопроса к испытуемому из контрольной выборки. Оказался возможным индивидуальный прогноз характеристик памяти конкретного человека только по потенциалам электроэнцефалограммы, без единого вопроса к испытуемому [3]. Такого рода оценки до нашего исследования не были известны.

Безусловно, стоит продолжить исследование нейронных механизмов памяти. Психология становится точной наукой, подобной физике и химии, и впереди виднеется возможность создания искусственного интеллекта, намного превосходящего человеческий, интеллект, состоящего, например, из всемирной сети компьютеров, напоминающих нейроны. Дело не просто в увеличении емкости и быстродействия компьютеров, образующих сеть, но в концепции функционирования такой сети, подобной концепции функционирования памяти и мышления человека.

Заключение

Основной результат выполненного исследования состоит в том, что впервые сделан прогноз (с относительно высокой для психологов точностью) длинного ряда показателей функционирования кратковременной памяти по множеству индивидуальных электрофизиологических показателей, причем, и это важно, показателей ЭЭГ, зарегистрированных в состоянии покоя испытуемого без обычного в психологии тестирования или инструментального измерения объема и быстродействия памяти. В этом заключается принципиальная, отличительная особенность нашей работы.

Литература

1. *Лебедев А.Н.* Психофизиология памяти // Психофизиология. 2-е изд. / Под ред. Ю.И. Александрова. М.: зд-во «Инфра-М», 2001. С. 128–141.
2. *Лебедев А.Н., Бычкова Л.П., Скопинцева Н.А.* Объем кратковременной памяти и прогноз успеваемости учащихся // Труды Института психологии РАН. Вып. 2. М.: Изд-во ИПРАН, 1997. С. 274–281.
3. *Лебедев А.Н., Скопинцева Н.А., Бычкова Л.П.* Связь памяти с параметрами электроэнцефалограммы // Современная психология: Состояние и перспективы исследований. Часть 1. Общая психология, психология труда и инженерная психология / Отв. ред. А.В. Брушлинский, А.Л. Журавлев. М. Изд-во «Институт психологии РАН». 2002. С. 55–68.
4. *Ливанов М.Н.* Пространственно-временная организация потенциалов и системная деятельность головного мозга. Избранные труды. М.: Наука, 1989. – 400 с.
5. *Скопинцева Н.А., Бычкова Л.П.* Перспективы исследования памяти // 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений». М., 2000. С. 184–185.
6. *Hick W.E.* On the rate of gain of information // Quart.J. Exp. Psychol., 1952, V.4. P. 14–27.
7. *Lebedev A.N.* Cyclic neural codes of human memory and some quantitative regularities in experimental psychology. // Psychophysical Exploration of Mental

Structures. New York. Hogrefe and Huber Publ. Ed. By H.-G. Geissler. 1990. P. 303–310.

8. *Lebedev A.N., Mayorov V.V., Myshkin I.Yu.* The wave model of memory // Neurocomputers and attention. Vol.1. Neurobiology, Synchronisation and Chaos. Ed. by Arun V. Holden and Vitaly I. Kryukov. Manchester University Press. 1991. P. 53–60.

9. *Lebedev A.N.* The way from Weber's constant to laws of cognitive psychology // Synergie, Syntropie, Nichtlineare Systeme. Heft 6. Verlag im Wissenschaftszentrum Leipzig, 2000. P. 323–344.

10. *Lebedev A.N.* The oscillatory mechanisms of memory //Cognitive processing. International Quarterly of Cognitive Sciences. 2001. V. 2. P. 57–66.

11. *Lisman John E., Idiart Marco A.P.* Storage 7 +/- 2 short-term memories in oscillatory subcycles // Science, 1995. V. 267. P. 1512–1515.

12. *Miller G.A.* The magical number seven: plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information // Psychol. Rev. 1956. № 63. P.81–97.

13. *Weiss Wolkmar.* The spatial metric of brain underlying the temporal metric of EEG and thouth //Gegenbaurs morphol. Jahrb.- Leipzig. 1990.V. 136. № 1. P. 79–87.

Р300 как показатель содержательной и динамических характеристик в межсистемных отношениях¹

Б.Н. Безденежных*, М.В. Бодунов*, А. А. Медынцева**, Я.Б.Нескородов**

* Институт психологии РАН, ** Государственный университет гуманитарных наук

Экспериментальные задачи выбора весьма популярны в психофизиологии. В этих задачах испытуемые дают обусловленные инструкцией быстрые дифференцированные двигательные ответы на альтернативные сигналы, предъявляемые в случайном порядке. В определенной степени выполнение задачи выбора является моделью поведения человека в реальной среде. Как и в реальной ситуации, при выполнении задачи выбора у человека имеет место «непреодолимая тенденция ожидать определенных событий, даже если это полностью иррационально, например, при вероятностном характере внешних событий» [11, 598]. Методом аддитивных факторов Стернберга было обнаружено, что при экспериментально обусловленном поведении с задачей отвечать на предъявляемые сигналы, эти ответы состоят из двух идентифицируемых перекрывающихся актов - распознавания сигнала и движения, завершающего ответное действие [9], а испытуемые прогнозируют именно сигналы, а не двигательные акты [2; 3]. Как показано в специальных экспериментах, субъективное ожидание или прогнозирование очередного сигнала $n+1$ проявляется в характеристиках позитивного компонента Р300 в многокомпонентном потенциале, связанном с ответом на сигнал n [4; 8]. Поскольку характеристики Р300 зависят от последовательности альтернативных сигналов, предшествующих ответу, с которым связан данный потенциал, то утверждается, что прогнозирование будущего сигнала основано на субъективной оценке вероятности распределения ранее предъявленных альтернативных сигналов [1; 4; 8; 13].

Зависимость характеристик Р300 не только от факторов, относящихся к прогнозированию, но и от целого ряда других внешних и внутренних факторов, стала причиной того, что разные авторы соотносят этот потенциал с разными когнитивными процессами [5].

С позиций теории функциональных систем П.К. Анохина субъективное ожидание является психическим аспектом акцептора результатов действия (АРД). На основании анализа результатов собственных исследований и исследований других авторов мы сделали вывод, что развитие Р300 отражает мозговые процессы, лежащие в основе афферентного синтеза (АС) и АРД [1]. Именно в АС учитываются разнообразные внешние и внутренние факторы для формирования АРД систем, которые обеспечивают распознавание сигнала.

Исследования показали, что развитие Р300 осуществляется в переходный период от акта распознавания сигнала к исполнительным актам [7; 9] а мозговые процессы, отражающиеся в Р300, связаны с будущими событиями [4; 7].

Есть все основания предполагать, что характеристики Р300 отражают особенности межсистемных отношений в период смены состава систем. Для проверки этой гипотезы мы применили в экспериментальной задаче выбора две формы альтернативных ответов — быстрый и задержанный ответы. В быстром ответе системы акта распознавания сигнала сменялись системами акта

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФНФ - гранты № 00-06-00057а, № 02-06-00011а и РФФИ — грант № 00-15-98838

движения, в задержанном ответе системы акта распознавания сигнала сменялись системами акта ожидания. Было обнаружено, что латентный период переднего фронта и пика P300, связанного с быстрым ответом, меньше таковых у P300, связанного с задержанным ответом [1]. Следовательно, развитие P300 зависит от составов сменяющихся систем текущего ответа в этот переходный период. Еще один факт, который был отмечен как в нашей работе, так и в ряде других работ, это — динамика показателей P300 при тренировке, которая проявляется в постепенном исчезновении влияния цепочки предшествующих сигналов (эффект последовательности) на характеристики этого потенциала и в стабилизации его латентного периода [1; 12]. Это связано с тем, что при тренировке выполнения ответных действий происходит совершенствование именно переходных процессов между системами распознавания сигнала и системами исполнительных актов, а не совершенствование выполнения актов распознавания сигнала или движения. Так, в работе ЛяБержа и Твиди на предъявление равновероятных альтернативных сигналов испытуемые давали один и тот же двигательный ответ. Оказалось, что время ответа на высоковероятный сигнал достоверно меньше, чем время ответа на низковероятный сигнал [6].

В вероятностной среде вне зависимости от степени тренировки испытуемый прогнозирует определенный сигнал, а реально предъявленный сигнал может либо соответствовать, либо не соответствовать прогнозируемому сигналу. Ясно, что в первом случае ответ будет более эффективным (быстрым и точным) нежели во втором случае. Возникает вопрос, влияет ли степень соответствия прогнозируемого сигнала предъявленному сигналу на P300, который связан с ответом на этот сигнал?

Для решения этой задачи на основании идеи, предложенной Ю.И. Александровым, была разработана экспериментальная процедура, в которой альтернативные сигналы были равновероятны, но объективно один из этих сигналов испытуемый мог прогнозировать с более высокой степенью вероятности. Благодаря равной вероятности альтернативных сигналов, и, следовательно, равному количеству ответов на эти сигналы, совершенствование переходных процессов от распознавания каждого из них к соответствующим исполнительным актам должно быть одинаковым. Прогнозирование из двух равновероятных альтернативных сигналов одного сигнала с большей вероятностью, чем другого, обеспечивается структурой этих сигналов, предъявляемых на экран монитора. Каждый сигнал (назовем их «А» и «Б») состоял из общего предупреждающего сигнала — вертикального столбика. Для сигнала «А» этот столбик уменьшался (увеличивался) на одну треть через 700 мсек, а для сигнала «Б» этот столбик увеличивался (уменьшался) на одну треть через 950 мсек. Изменение высоты столбика служило пусковым сигналом, в ответ на который нужно как можно быстрее нажать соответствующую клавишу. Предполагалось, что в случае предъявления сигнала «А» в интервале 700 мсек после предупреждающего сигнала испытуемый будет с равной вероятностью прогнозировать либо один, либо другой пусковой сигнал. При предъявлении сигнала «Б» после 700 мсек интервала испытуемый должен конкретизировать свой прогноз и ожидать конкретный пусковой сигнал. Мы не исключали и другой вариант — на предупреждающий сигнал испытуемый готовится отвечать на сигнал «А», если же пусковой сигнал не появляется через 700 мсек, то он готовится к ответу на сигнал «Б».

Эксперименты были проведены на 69 испытуемых (31- мужского и 38 — женского пола) в возрасте от 18 до 40 лет. На экран монитора с равной вероятностью предъявлялись сигналы «А» и «Б». Указательный и средний пальцы доминантной руки испытуемого находились на клавишах 1 и 2. В ответ на пусковой стимул они быстро нажимали соответствующую клавишу. У испытуемых монополярно регистрировали ЭЭГ по системе 10–20 в отведениях F3, F4, Cz, P3 и P4.

Испытуемые выполняли задачу выбора в течение четырех серий. В каждой серии предъявлялось 124 сигнала. Между сериями испытуемый отдыхал 3 минуты. ЭЭГ-потенциалы обрабатывались отдельно для ответа на каждый сигнал. Обработка осуществлялась методом усреднения мгновенных амплитуд выбранных фрагментов ЭЭГ от пускового сигнала с дробностью 4 мсек. В качестве средней линии брали усредненную амплитуду фрагмента ЭЭГ, длительностью 100 мсек перед пусковым сигналом.

Для ответа на вопрос, поставленный в данной работе, мы проводили сравнение усредненных потенциалов, полученных в 4-й (последней) серии. В этой серии испытуемые выполняли задачу без ошибок, дисперсия времени ответов была минимальной и исчез эффект последовательности на P300 и время ответа. Все это указывает на достижение совершенства в выполнении задачи выбора [1; 12].

Анализ полученных результатов показал, что время ответа на сигнал «Б» (298 ± 27 мсек) достоверно меньше, чем время ответа на сигнал «А» (330 ± 40 мсек). Отсюда можно сделать вывод, что у испытуемых не было такой стратегии — после предупреждающего сигнала готовиться к ответу на сигнал «А» и в случае отсутствия через 700 мсек пускового сигнала готовиться отвечать на сигнал «Б». В противном случае времена ответов на эти сигналы были бы одинаковыми. Согласно отчетам испытуемых, им было легче отвечать на сигнал «Б», чем на сигнал «А». По-видимому, после предупреждающего сигнала у испытуемых имел место прогноз сигнала на основании субъективной оценки вероятностного распределения этих сигналов, и пусковой сигнал «А» либо соответствовал, либо не соответствовал прогнозируемому сигналу. В случае предъявления сигнала «Б» через 700 мсек после предупреждающего сигнала осуществлялась коррекция прогноза, и испытуемый ожидал конкретный пусковой сигнал. Сравнение потенциалов, связанных с ответами на сигналы «А» и «Б», показало, что передний фронт P300, связанный с ответом на сигнал «Б», развивается раньше, и латентный период пика этого потенциала меньше, чем у P300, связанного с ответом на сигнал «А» (рисунок 1). Такая разница получена для всех испытуемых, и она, по-видимому, указывает на то, что задержка развития переднего фронта P300, соответствующего по времени развертыванию переходных процессов, связана с рассогласованием прогнозируемого и предъявленного сигналов.

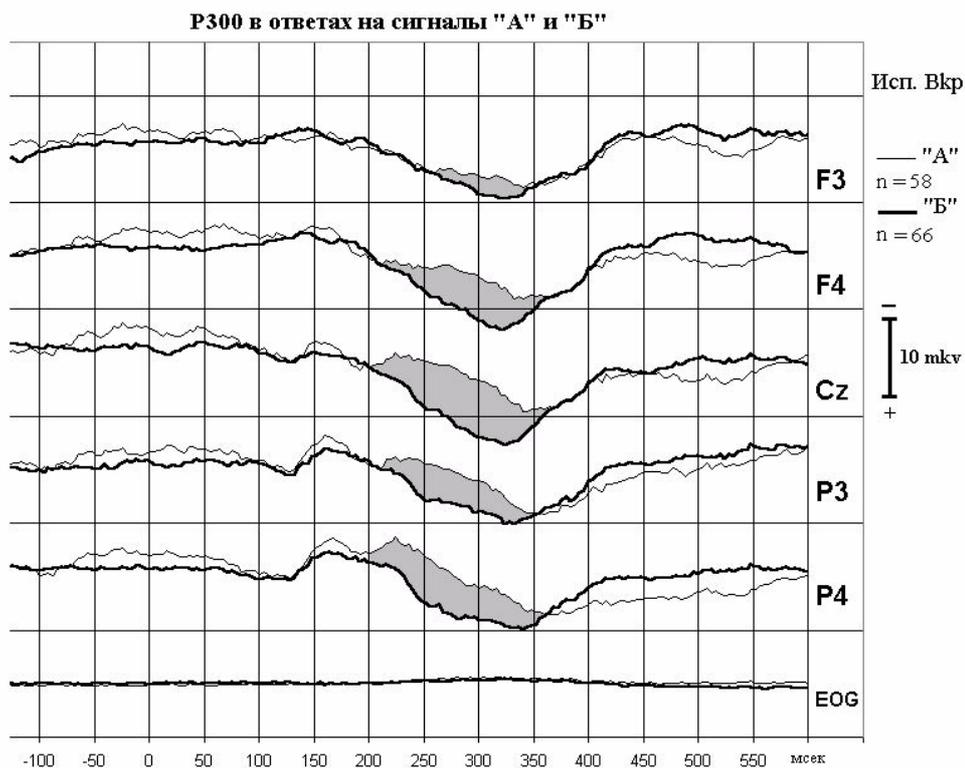


Рисунок 1. Р300, связанные с ответами на сигналы «А» и «Б».
 Заштрихованным показана область различий между передними фронтами Р300, связанными с разными ответами. Момент предъявления пускового сигнала на шкале времени обозначен как «0». Медиана времени ответа на сигнал «А» составляет 372 мсек, а на сигнал «Б» — 274 мсек. Количество усредненных реализаций указано как «n».

Для дополнительного подтверждения высказанного предположения мы усреднили потенциалы на сигнал «А» отдельно для ответов, время которых было меньше медианы времени ответа на этот сигнал во всей серии, и для ответов, время которых было больше этой медианы. Очевидно, что когда предъявленный сигнал соответствовал прогнозируемому, то время ответа было короче, чем таковое при несоответствии прогнозируемого и предъявленного сигналов. Как видно из рисунка 2, время ответа и латентный период переднего фронта Р300 находятся в прямой зависимости. Следовательно, передний фронт Р300 развивается в период развертывания переходных процессов от систем, обеспечивающих распознавание сигнала, к системам исполнительных процессов, а латентный период его развития находится в обратной зависимости от степени соответствия прогнозируемых сигналов реально предъявленным.

Р300 в быстрых и медленных ответах на сигнал "А"

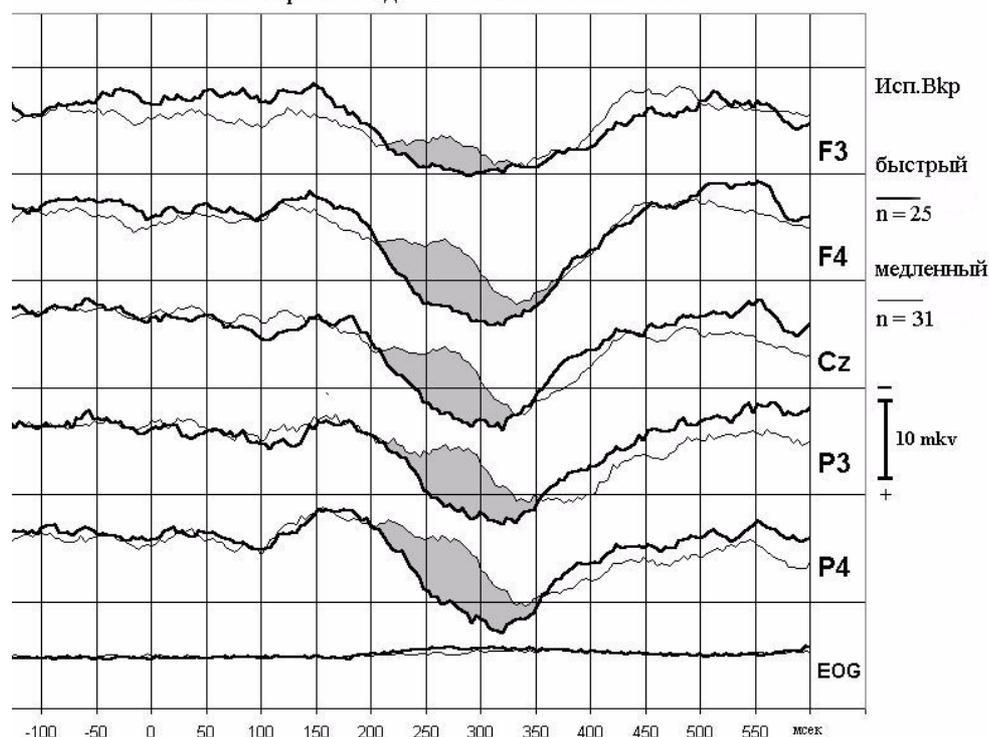


Рисунок 2. Р300, связанные с быстрыми и медленными ответами на сигнал «А». Время быстрых ответов меньше 372 мсек, время медленных ответов больше 372 мсек. Обозначения как на рисунке 1.

Литература

1. Безденежных Б.Н., Бодунов М.В. Межсистемные отношения в структуре деятельности: исследование эффекта последовательности в задаче выбора // Психологический журнал. 2001. Т.22. № 2. С. 36.
2. Bertelson P., Tisseyre F. Choice reaction time as a function of stimulus versus response relative frequency of occurrence // Nature. 1966. V. 212. P. 1069.
3. Biederman I., Zachary R.A. Stimulus versus response probability effects in choice reaction time // Perception and psychophysics. 1970. V. № 2. P. 189.
4. Donchin E., Coles M.G.H. Is the P300 component manifestation of context updating? // Behavioral and brain sciences. 1988. V.11. № 3. P. 357.
5. Gaillard A.W.K. Problems and paradigms in ERP research // Biological Psychology. 1988. V. 26. P. 91.
6. LaBerge D., Tweedy J.R. Presentation probability and choice time // Journal of experimental psychology. 1964. V.68. № 5. P. 477.
7. Leuthold H., Sommer W. Postperceptual effects and P300 latency// Psychophysiology. 1998. V.35. № 1. P. 34.
8. Munson R., Ruchkin D. S., Ritter W., Sutton S., Squires N. The relation of P-3b to prior and future behavior // Biological Psychology. 1984. V. 19. № 1. P. 1.
9. Renault B., Fiory N., Giami S. Latencies of event related potentials as a tool for studying motor processing organization // Biological psychology. 1988. V. 26. P. 217.

10. *Smulder F. Y., Kenemans J.L., Schmidt W.F., Kok A.* Effects of task complexity in young and old adults: reaction time and P300 latency are not always dissociated // *Psychophysiology*, 1999. V. 36. P. 118.
11. *Soetens E., Boer L.C., Hueting J.E.* Expectancy or automatic facilitation? Separating sequential effects in two-choice reaction time // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1985. V.11. P. 598.
12. *Sommer W., Matt J., Leuthold H.* Consciousness of attention and expectancy as reflected in event-related potential and reaction times // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 1990. V.16. № 5. P. 902.
13. *Squires K.C., Wickens C., Squires N., Donchin E.* The effect of stimulus sequence on the waveform of cortical event-related potential // *Science*. 1976. V.193. P. 1142.

Нейронные единицы внутреннего мира человека¹

А. Н. Лебедев

Институт психологии РАН

Проблема дискретности-континуальности психических процессов давно привлекает исследователей-психологов. Она постоянно была в фокусе внимания Андрея Владимировича Брушлинского, светлой памяти которого посвящена наша конференция. Ее решение позволит вывести психологию с уровня феноменов и эмпирически найденных закономерностей типа основного психофизического закона на уровень действительных законов и констант, подобных по своей точности и широкой сфере применения законам физики, химии, генетики.

Высока вероятность того, что внутренний мир человека подобно внешнему также дискретен. Требуется прежде всего найти элементы внутреннего мира, его «атомы» и «молекулы». Так понимал задачу экспериментальной психологии ее основоположник Вундт, но приемлемого решения нет до сих пор.

Самая распространенная среди нейрофизиологов и психологов позиция заключается в том, что внутренний мир человека закодирован специфическими узорами проводимостей синапсов, межнейронных контактов. Элементами служат синапсы и нервные клетки, образующие иерархию, среди них нейроны — детекторы простых и сложных признаков, а также командные нейроны [5]. Синаптическая концепция качественно объясняет ряд феноменов, например, постепенность выработки условных рефлексов, избирательность предполагаемых устойчивых межнейронных связей. Электрические колебания, импульсы и волны, отражают функционирование таких связей. Однако самая распространенная в психологии концепция не объясняет количественно ни одной психологической закономерности и не предсказывает существования ни одного нового психологического феномена.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ — грант № 00-06-0054а и РФФИ — грант № 00-06-80055а.

Существует менее распространенная, иная, на первый взгляд, альтернативная позиция, объяснявшая до сих пор однако еще меньший круг психологических феноменов. Ее авторство восходит к знаменитому английскому врачу XVIII века Дэвиду Гартли. Увлеченный открытиями своего соотечественника Исаака Ньютона, Гартли предположил, что если и есть что-то вечное в мире, так это периодичность материальных процессов, будь то движения планет и галактик или какие-то пока неведомые преобразования в структурах мозга человека. Такими периодическими устойчивыми процессами Гартли объяснил явления памяти, нравственные устои человека, его душевное равновесие, веру в Бога, надежды, устремления. Лишь два века спустя Ганс Бергер действительно обнаружил удивительную регулярность, с частотой около 10 герц ($R = 10$ Гц), колебаний биопотенциалов, отводимых через кожные покровы с поверхности головного мозга и названных им электроэнцефалограммой. Колебания прекращались в моменты концентрации внимания испытуемого на чем либо. Чуть позже сначала М.Н. Ливанов, а затем Н. Винер открыли явление захвата частот электроэнцефалограммы, близких по периоду колебаний. М.Н. Ливанов [4] вычислил величину «ступеньки», критической разности между периодами колебаний, обеспечивающей захват. Если разность периодов близких частот меньше, чем одна десятая часть от среднего значения периода ($R = 0,1$), то такие колебания объединяются, становятся одинаковыми по длительности периодов. Если разность больше критического значения, то колебания существуют одновременно. Амплитуды разночастотных колебаний, отводимых одним электродом, складываются. Внешне это проявляется в плавном волнообразном подъеме и спаде амплитуд суммарных колебаний, названных веретенами альфа-ритма. Период таких медленных колебаний легко вычислить $T = 1/FR$, и он составляет примерно одну секунду. Таковы значения нейрофизиологических констант, измеряемых экспериментально. Не только доминирующая частота (F) альфа-ритма, но и многие другие особенности электроэнцефалограммы конкретного человека удивительно постоянны, индивидуальны, и они связаны с индивидуальными особенностями психики. На это впервые обратил внимание Грэй Уолтер. Позже Рой Джон создал новое направление — нейрометрику, пытаясь связать индивидуальные особенности

электроэнцефалограммы с индивидуальными особенностями психики человека. В России основателем подобного направления, названного дифференциальной психофизиологией, стал В.Д. Небылицын. Очень многое говорило о том, что ритмичные, циклически повторяющиеся, пространственно организованные нейронные процессы составляют основу внутреннего мира человека. Невозможно переоценить вклад М.Н. Ливанова в развитие этого положения. М.Н. Ливанов впервые выявил феномен пространственной синхронизации ритмичных биоэлектрических волн как условие формирования условнорефлекторных связей у животных и протекания мыслительных процессов у человека. Не встречает никаких возражений широко распространенное среди нейрофизиологов мнение о том, что периодическая реверберация нервных импульсов, их движение в структурах головного мозга в первые минуты после стимуляции служит основой кратковременной памяти. Такая реверберация, по мнению сторонников синаптической концепции, необходима для проторения синапсов — элементов памяти, обеспечивающих ее долговременное хранение.

Разработка новой методики регистрации активности отдельных нейронов, размещенных в центральных отделах мозга, коре и подкорке, по И.П. Павлову, сместила фокус внимания множества нейрофизиологов. В узорах импульсации одиночных нейронов, периферических и центральных, физиологи увидели нейронные коды внутреннего мира человека, его ощущений, восприятий, представлений. Т. Ярвилехто [8] обнаружил, что ощущение давления на кожу в области «анатомической табакерки» возле большого пальца кисти возрастает линейно, пропорционально числу нейронных импульсов в одной пачке, возникающих в одиночном нервном волокне. Число импульсов в пачке не превышало 10, а ее длительность была не более 100 мсек. Н.П. Бехтерева [1] увидела группы импульсов, порождаемых одиночными корковыми нейронами у человека во время нейрохирургических операций, специфически связанные с понятиями, и назвала такие группы импульсов семантическими кодами. Больного просили произносить определенные слова в моменты регистрации импульсов. Число импульсов в группе также не превышало одного десятка, а длительность самой группы одной десятой секунды. Увлечение новым феноменом было настолько

сильным, что некоторые исследователи, пожалуй, даже многие, весьма критически отнеслись к методу электроэнцефалографии (ЭЭГ) как инструменту для познания внутреннего мира человека. Колебания потенциалов ЭЭГ сравнивали с колебаниями температуры возле паровоза. Попробуй, догадайся об устройстве двигателя. Метод электроэнцефалографии в нейрофизиологии на время отошел на задний план (но не в клинике, разумеется). Как связать два мира — быстрых нейронных импульсов и медленных волн электроэнцефалограммы? Неужели между ними пропасть? К решению этой проблемы мы приступили более 40 лет назад под руководством М.Н. Ливанова в Институте нейрофизиологии и высшей нервной деятельности АН СССР.

Удалось выявить два новых феномена. Во-первых, найдена зеркальная связь конфигурации усредненных вызванных потенциалов у животных, записанных макроэлектродом на поверхности зрительной области коры мозга с конфигурацией гистограммы, отражающей колебания мгновенной частоты нейронных импульсов тотчас после световой вспышки. Волны импульсации множества корковых нейронов в точности соответствуют усредненным колебаниям волн электроэнцефалограммы, вызванных тем же стимулом. Мысль о вызванных потенциалах как модификации исходных волн электроэнцефалограммы, обусловленной реактивными смещениями фаз исходных колебаний, принадлежит М.Н. Ливанову. Одновременно подобное наблюдение было опубликовано западными нейрофизиологами Фоксом и Брайаном. Во-вторых, изучение распределения межимпульсных интервалов за большие отрезки времени убедительно показало, что фоновую импульсацию центральных нейронов нельзя описать законом распределения, известным в статистике как закон Пуассона, свойственный потокам импульсов без последствия, то есть случайным потокам, в которых последующую активность нельзя объяснить предшествующей. Оказалось, что текущая частота импульсации самых разнообразных нейронов в коре мозга кролика или в ганглии беспозвоночного определенно связана с частотой в предшествующие отрезки времени. Фазы учащения импульсации закономерно сменяются фазами ее урежения. Реакция нейрона усилена, если стимулы подаются на исходе фазы урежения, и наоборот, ослаблена, если стимулы включаются на

исходе фазы усиления импульсации. Вместе с В.А. Луцким, специалистом по надежности электронной аппаратуры, мы составили дифференциальное уравнение первого порядка с запаздывающим аргументом

$$dU(t)/dt = -U(t)/a + b \cdot \exp(-U(t-c) \cdot U(t-c)), \quad (1)$$

в котором d — знак дифференциала, t — текущее время, $U(t)$ — разность электрических потенциалов между наружной средой и внутренним содержимым нейрона, нормированная с учетом ее среднего значения и стандартного отклонения. Колебания разности, обусловленные множеством неучитываемых воздействий, прежде всего синаптической бомбардировкой со стороны других центральных нейронов, подчиняются в первом приближении нормальному закону; c — задержка, названная анаболической, a — постоянная времени, названная катаболической постоянной, b — коэффициент пропорциональности. Все три параметра определяются эмпирически из анализа импульсных последовательностей. Уравнение (1) послужило предметом исследования в области моделирования нейронных процессов [3; 9]. Сеть, составленная из нейронов, активность которых подчиняется уравнению (1), способна генерировать незатухающие колебания активности, если число нейронов, ее образующих, не меньше, чем 100–300 элементов, и тем самым хранить информацию в виде комбинации волн согласованной активности множества нейронов, различающихся фазами колебаний. Множество эмпирически наблюдаемых феноменов типа усвоения ритма, полифазности волн вызванных потенциалов в нейрофизиологических исследованиях объясняются решением уравнения (1).

Какова природа выявленных колебаний нейронной активности? Стоит заметить, что нейроны происходят из наружного зародышевого листка, эктодермы, из самой быстро делящейся ткани, но сами нейроны утрачивают способность к делению. В то же время известно, что любая клетка, даже растительная, в момент деления генерирует электрический импульс — признак разрушения мембраны клетки. Можно предположить, что нейронные импульсы — признак начинающегося деления нервной клетки, однако никогда не завершающегося ее делением, то есть саморазрушением. Причина следующая. В моменты генерации импульсов нервная

клетка успевает обновиться — выбросить наружу отработанные вещества, результаты метаболизма, и вовлечь в цитоплазму из окружающей среды очередную порцию элементов, необходимых для поддержания жизнедеятельности клетки. Включение новых элементов в метаболический процесс происходит с некоторой задержкой (константа «с» в уравнении (1)). Величина задержки связана с длительностью хорошо известной физиологам относительной рефрактерности после каждого нервного импульса. Скорость деполяризации мембраны определяется константой «а», а ее реполяризации — коэффициентом «b» в том же уравнении.

Устойчивость колебаний, следующая из решений уравнения (1) при определенной комбинации его параметров, способность таких колебаний хранить информацию, дает основание предположить, что «атомами» внутреннего мира служат единичные пакеты волн согласованной нейронной активности, динамика которой подчиняется уравнению (1). Волны в пакете различаются своими фазами. Размер алфавита «нейронных букв» не превышает частного от деления периода (около 100 мсек) на относительную рефрактерность (около 10 мсек). Единицами долговременной памяти, подобными молекулам или словам, можно назвать комбинации из «нейронных букв», возникающие за один период. При этом условии запас «нейронных слов» не превышает полумиллиарда. Периодичность активности нейронных ансамблей, формирующая «буквы» и «слова» внутреннего мира человека, объясняется упомянутой тесной связью нейронных импульсов с метаболизмом клетки.

Уравнение объема памяти

Уравнение (1) объясняет циклическую повторяемость волновых узоров, являющихся кодовыми элементами. Константа Ливанова, $R = 0,1$, ступенчато разделяющая периоды и фазы колебаний активности центральных нейронов, определяет разнообразие циклически повторяющихся нейронных «букв»: $N = 1/R - 1$, и «слов», более крупных единиц информации:

$$C = N^{**}N, \quad (2)$$

где двойная звездочка - знак возведения в степень. В правой части формулы показано максимально возможное число комбинаций из нейронных

«букв». В основании степени символ (N) выражает максимальное число последовательных нейронных «залпов», порождаемых одним нейронным звеном. В показателе степени тот же самый символ (N) выражает собой максимальное число разных нейронных звеньев, формирующих своей активностью один волновой пакет, то есть одну единицу, самую простую, внутреннего мира человека.

Объем кратковременной памяти (H) зависит от размера (A) алфавита запоминаемых элементов (цифр, букв, слогов и т.п.), известного испытуемому, подчиняясь формуле

$$H = (N \cdot \ln N) / \ln(k \cdot A), \quad (3)$$

в которой ln - знак логарифма, k - коэффициент, N - размер алфавита нейронных «букв», звездочка - знак умножения. Выражение в круглых скобках в знаменателе формулы - объем внимания, равный произведению размера (A) алфавита стимулов на коэффициент концентрации внимания (k). Если внимание испытуемого рассеяно, то $k = H$, то есть равно объему кратковременной памяти. Иначе при максимальной концентрации $k=1$. В среднем, можно принять, что $k = (H + 1)/2$. Числитель в правой части формулы (2) равен логарифму константы (C), вычисленной выше. Произведение $(k \cdot A)$, возведенное в степень, равную объему кратковременной памяти (H), не может превышать значения константы (C) согласно нашему определению единицы внутреннего мира.

В таблице 1 представлены результаты сравнения объема кратковременной памяти, вычисленного по уравнению (2) и найденного в опытах с разными алфавитами стимулов [10].

Таблица 1. Зависимость объема кратковременной памяти от размера алфавита запоминаемых стимулов

Название элемента	Размер алфавита	Объем памяти (H)			Число испытуемых
		В среднем	Ст. отк.		
Цифры	2	8,7	9,7	1,1	32
Цифры	10	5,6	6,3	1,2	96
Кириллица	33	4,4	5,2	1,4	29
Латиница	26	4,6	4,3	0,9	27

Слоги _____ 3700 ____ 2,3 _____ 2,6 ____ 0,5 _____ 7

Различия между предсказанными и опытными значениями около 11%. Для психологических измерений это высокая точность. Итак, объем кратковременной памяти функционально зависит от размера алфавита запоминаемых элементов: чем больше размер (А) алфавита при постоянной концентрации внимания (к), тем меньше объем (Н) кратковременной памяти

Скорость мнемических операций

Пакеты волн нейронной активности, кодирующие число (М) образов памяти, сравниваются с пакетами волн, порождаемыми числом (К) одновременно предъявленных стимулов. Время сравнения, $t(K)$, мс/стимул, зависит от периода (Т) биений частот альфа-ритма

$$t(K) = T \cdot (1 - P^{**K}) \cdot (1 - P) \cdot K / (K + 1), \quad (4)$$

где Р - вероятность сравнения без задержки, вызванной несовпадением фаз реактивных и фоновых колебаний нейронной активности в момент воздействия стимула, $P = (1 - R) / M$ и $T = 1 / (F \cdot R) = 1000$ мс - максимальная длительность задержки. Двойная звездочка в этой формуле означает возведение в степень и одиночная - знак умножения, $F = 10$ Гц, $R = 0.1$ - константы. Если $M = N > 1$ и $K = 1$ по условиям измерения, как это имеет место в известной методике по измерению скорости мнемического поиска единственного ($K = 1$) стимула среди числа (Н) предварительно запомненных стимулов, то есть среди элементов кратковременной памяти, то время (T_c), необходимое для позитивного решения в среднем, вычисляется по формуле

$$T_c = T \cdot (N + 1) \cdot (1 - P/N) \cdot (1 - P/N) / (4 \cdot N), \quad (5)$$

с обозначениями, принятыми для равенства (4), а время, необходимое в среднем для сравнения одного элемента, хранящегося в памяти, с предъявленным

стимулом, подчиняется производной формуле

$$t = Tc/(N-1). \quad (6)$$

Вывод формул (4)–(6) был опубликован ранее [2]. Время, вычисленное по формуле (8) при $T = 1/(F \cdot R)$, $R = 0,1$, $F = 10$ Гц, как указано выше, и $M = N \gg 1$, - это константа Каваноха, равная примерно одной четверти секунды, времени, необходимому для сканирования всего содержимого кратковременной памяти. При $M = N = 1$ значение формулы (8), равное 5 мсек, приближается к константе Гайсслера, 4,5 мсек, то есть равно минимально возможному интервалу, кванту времени, имеющему психологический смысл, по Гайсслеру [7]. Скорость (t) мнемического поиска, вычисленная по формуле (6), совпадает с опытными данными, обобщенными Каванохом [6] и представленными в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость скорости мнемического поиска от объема кратковременной памяти на разные элементы

Элементы	Объем памяти, число элементов	Скорость поиска, мс/эл	
		Опыт	Расчет
Слоги	3,4	72	73
Случайные формы	3,8	68	66
Геометр. фигуры	5,3	50	48
Слова	5,5	47	46
Буквы	6,3	40	40
Цвета	7,1	38	36
Цифры	7,7	33	33

Заметим, что различия в объемах памяти, указанных в таблицах 1 и 2, объясняются условиями измерения (например, буквы и слоги в знаках кириллицы или латинского алфавита) и разной концентрацией внимания в найденных выше пределах $1 = k \leq N$ для формулы (2). Обратная связь между размером алфавита

элементов и объемом памяти, в целом, подчиняясь уравнению (2), не вызывает сомнения.

Свойства личности, зашифрованные волнами ЭЭГ

Образы памяти, переживания разного рода, процессы, состояния и свойства личности закодированы, по нашей гипотезе, когерентными колебаниями нейронной активности в разных диапазонах частот, не только в полосе альфа ритма. Напомню, что константа Ливанова, равная $R = 0,1$, впервые была вычислена для полосы колебаний в диапазоне тета-ритма (4–7 Гц) в опытах на животных [16; 17]. Логично было предположить, что многие психологические показатели как-то отражаются в характеристиках биопотенциалов мозга человека в широком диапазоне частот. Данных такого рода накоплено немало. Мы предположили, что информация, закодированная в ритмах ЭЭГ, достаточна для прогноза важных личностных особенностей, например, таких как интеллектуальная одаренность, способность к обучению. Возможно ли по параметрам электроэнцефалограммы составить психологический портрет личности, соответствующий портрету, полученному в результате обычного тестирования? Достаточно ли для этого информации содержится в волнах ЭЭГ? Предыдущий опыт позволяет надеяться, что, пожалуй, достаточно. Необходима детальная проверка нашей гипотезы в эксперименте. С этой целью мы разработали комплекс программ по выявлению ЭЭГ предикторов прежде всего тех личностных особенностей, которые определяются известными тестами ММРІ и В.М. Русалова. Использовали обычную методику множественного линейного регрессионного анализа. Первоначально были изучены связи между многообразными параметрами ЭЭГ (свыше 300) и значениями шкал, полученными в результате тестирования множества испытуемых (в целом также более 300). Наиболее тесно связанные с психическими особенностями человека параметры ЭЭГ использовали в качестве предикторов. ЭЭГ записывали в состоянии покоя испытуемого, при закрытых глазах, стремясь

создать наилучшие условия для появления ярко выраженного альфа-ритма. Использовали монополярные отведения в лобных, центральных и затылочных зонах коры больших полушарий. Запись на венгерском электроэнцефалографе с аналого-цифровым преобразователем СЭТ-2 фирмы «Медтехника». Ниже — пример прогноза психологических особенностей одного из испытуемых.

Испытуемый F18PHILM

Код	Краткое описание	Границы нормы
0SI(093)	общительный, открытый_____	+(88–110)
2DD(094)	обычно внимателен, активен_____	+(90–110)
4PD(096)	терпелив_____	+(94–104)
5MF(098)	она женственна, он мужественен____	+(86–112)
6PA(099)	уравновешен_____	+(96–104)
8SC(101)	упрямый, непрístupный_____	+(90–108)
LLL(102)	выпячивает свои достоинства_____	++(98–102)
3HY(103)	любит быть в центре внимания_____	+(84–116)
7PT(103)	тревожный, настойчивый_____	+(84–114)
1HS(104)	озабочен своим здоровьем_____	+(86–116)
KKK(106)	не признает своих недостатков____	++(97–105)
9MA(106)	предприимчивый_____	+(91–107)
FFF(107)	склонен противоречить_____	++(93–107)

В этом примере в начале строки перед скобкой - обозначение шкалы и ее краткое содержание. Подробно все шкалы описаны в пособии по ММРІ. В круглых скобках слева - вычисленное значение каждой шкалы. В скобках справа - нижняя и верхняя границы нормы. Знаки «плюс» в круглых скобках обозначают следующее:

(+) - признак в пределах нормы, $0,8 \cdot M +$ среднее — $0,8 \cdot M$;

(++) - заметная особенность, за пределами нормы;

(+++)- ярко выраженная особенность, за пределами M , где M - максимальная разность, по модулю, между действительным значением параметра и его ошибочным прогнозом вблизи среднего значения по выборке.

Регрессионные уравнения для расчета значений шкал теста ММРІ по параметрам электроэнцефалограммы рассчитывались для одной части испытуемых, а для другой части по найденным уравнениям вычислялись искомые значения параметров.

По небольшим наборам параметров электроэнцефалограммы можно судить об интеллектуальной одаренности, в частности, о способности ребенка успешно усваивать стандартную школьную программу обучения. В настоящее время ведется поиск объективных электроэнцефалографических показателей музыкальной одаренности и намечен поиск более широкого круга индикаторов разных способностей - художественных, спортивных, лингвистических.

Трудное, но перспективное новое направление исследований - поиск ЭЭГ индикаторов, позволяющих в реальном времени предвидеть переживания и действия человека. Еще одна важная задача, вполне созревшая для решения, заключается в поиске некоего общего механизма, раскрывающего связь пространственного кодирования элементов внутреннего мира человека в виде набора синаптических проводимостей с временными, циклически повторяющимися нейронными кодами. Наше представление о циклических кодах не отвергает первую гипотезу, хотя ее недостаточность и показана в экспериментах на животных. Несомненно, именно циклическая активность нейронных ансамблей влияет на изменение синаптических связей после прекращения стимуляции. Возникает предположение о том, что постоянство значений константы Ливанова, обуславливающей постоянство величины фазовых сдвигов и соотношений периодов при разной их длительности, служит основной причиной сохранения динамических циклических кодов, например, при замедлении метаболизма и замедлении ритмичной деятельности нейронов вследствие охлаждения мозга вплоть до полной остановки колебаний. Ее восстановление происходит также не хаотически. Фазовые соотношения восстанавливаются в прежнем порядке. Для сравнения, при замедлении поезда вплоть до его остановки и последующем затем движении фазовые соотношения между позициями какой-нибудь метки (определенной гайки или спицы) на каждом колесе восстанавливаются с

высочайшей точностью. Еще один простой пример. Если дыхание остановилось на вдохе или, напротив, выдохе, то оно и восстанавливается, начиная с соответствующей вполне определенной, но отнюдь не случайной фазы цикла. Ничто не мешает устойчивости фазовых соотношений, определяющих временную структуру нейронного кода до тех пор, пока число согласованно пульсирующих нейронов выше критической величины, вычисленной ранее [2], около 100–300 нейронов. При этом отдельные нейроны могут замолкать, выключаться, включаться и функционировать попеременно в составе разных ансамблей, то есть в составе разных единиц памяти.

Заключение

Концепция дискретности внутреннего мира человека, гипотеза о пакетах волн согласованной нейронной активности, порождаемых нейронными ансамблями, как единицах внутреннего мира обеспечивают возможность теоретического расчета ряда психологических показателей по параметрам электроэнцефалограммы, в том числе скорости обработки информации и зависимости объема кратковременной памяти от алфавита стимулов. Более сложные психологические показатели, включая интеллектуальную и музыкальную одаренность, а также иные личностные особенности, распознаваемые обычно по опросникам типа ММРІ, также являются функциями определенных наборов из параметров электроэнцефалограммы. Результаты выполненного исследования, поддержанного грантами РФФИ и РГНФ, опубликованы в трудах И.Ю. Мышкина, В.В. Майорова, А.В. Маркиной, Н.А. Скопинцевой, Т.С. Князевой, Л.П. Бычковой, И.В. Мальцевой, О.И. Артеменко, Ю.А. Шпатенко, И.К. Шеховцева и других. С благодарностью отмечаю вклад всех сотрудников в развитие общего дела.

Литература

1. *Бехтерева Н.П.* Здоровый и больной мозг человека. Л.: Наука, 1980.
2. *Забродин Ю.М., Лебедев А.Н.* Психофизиология и психофизика / Под ред. М.Н. Ливанова и Б.Ф. Ломова. М.: Наука, 1977.
3. *Зубов Н.В.* Исследование феноменологических уравнений нейродинамики / Автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГУ, 1980.
4. *Ливанов М.Н.* Избранные труды. М.: Наука, 1989.
5. *Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г.* Нейроинтеллект. От нейрона к нейрокомпьютеру. М.: Наука, 1989.
6. *Cavanagh, J.P.* Relation between the immediate memory span and the memory search rate / *Psychological Review*. 1972. V. 79. P. 525–530.
7. *Geissler H.-G.* Foundation of quantized processing // In: *Psychophysical explorations of mental structures* / Ed. by H.-G. Geissler. Toronto.: Hogrefe and Huber Pbl., 1990. P. 193–210.
8. *Jarvilehto T.* A new combination of methods for the study of neural mechanisms of mental activity // In: *Soviet-finnish symposium on psychophysiology*. / Ed. by Timo Jarvilehto and oth. Publication of the Finnish- Soviet Committee on Scientific-Technological Cooperation. 1982. № 15. P. 231–251.
9. *Lebedev A.N., Myshkin I.Yu., Mayorov V.V.* The wave model of memory // In: *Neurocomputers and attention. V. 1. Neurobiology, synchronisation and chaos* / Eds. A.V. Holden and V.I. Kryukov. Manchester: Manchester University Press, 1990. P. 53–59.
10. *Lebedev A.N.* The oscillatory mechanisms of memory / *Cognitive Processing, International Quarterly of Cognitive Sciences*, 2001. V.2. P.57–66.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕМПЕРАМЕНТАЛЬНЫХ И КОГНИТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В РИТМАХ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ*

А.В. Маркина, А.Х. Пашина, Н.Б. Руманова

Институт психологии РАН, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с работ И.М. Сеченова, отечественные физиологи трактуют поведение организма в единстве его физиологических и психологических проявлений. Большой вклад в мировоззрение об общих закономерностях работы мозга внес А.А. Ухтомский, предложив учение о доминанте как основе психофизиологического бытия человека.

В настоящее время актуален поиск внутренних связей, выражающих сущность соотношения «психическое-физиологическое» как целостной психофизиологической системы.

Основываясь на идеях ученика А.А. Ухтомского академика М.Н. Ливанова, А.Н. Лебедев предложил психофизиологическую теорию, связывающую психологические особенности человека с параметрами его электроэнцефалограммы. Согласно этой теории вся поступающая извне информация, также как и все образы, хранящиеся в памяти человека, а также его состояния и даже личностные смыслы содержатся в виде специальных кодов нейронной активности. Параметры импульсной активности отражаются в ритмах электроэнцефалограммы и могут быть выявлены с помощью специальных уравнений [5; 6; 13; 14].

Отличительной особенностью этой теории является то, что она не только предлагает нейрофизиологический механизм тех или иных процессов, но и количественно предсказывает некоторые их параметры. Психофизиологическая модель, выраженная в математических уравнениях, позволила с достаточной точностью предсказать количественные и временные закономерности восприятия и памяти [7; 10]. Поскольку базовые характеристики памяти, объем и скорость запечатления и извлечения информации из памяти, скорость принятия решений являются функциями нейрофизиологических параметров, удалось также осуществить прогноз и общей интеллектуальной одаренности школьников [6].

В дальнейшем было показано, что и более сложные личностные образования (например, музыкальность) также могут являться функцией параметров электроэнцефалограммы [7].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФНФ, гранты: N-00-06-0028а, N-02-06-

Приведенные выше данные указывают, что существуют не только коды образов памяти, но и состояний, и свойств личности. По гипотезе А.Н. Лебедева такими кодами могут являться колебания нейронной активности в разных диапазонах частот электроэнцефалограммы. Задачей настоящей работы стал поиск электрофизиологических показателей-предикторов когнитивно-личностных особенностей человека.

МЕТОДИКА

Исследования проводились с участием молодых людей обоего пола (в возрасте от 19 до 28 лет), в основном студентов московских вузов. В качестве психологических методик использовали опросник структуры темперамента (ОСТ) В.М. Русалова [11], а также тесты личностной и ситуативной тревожности Спилбергера-Ханина. Кроме того, у всех испытуемых был измерен объем кратковременной памяти на десятичные цифры, проведен тест Равена, и у 69 человек записана фоновая электроэнцефалограмма. Общая численность группы составила 77 человек.

Измерения объема кратковременной памяти проводили в соответствии с оптимальными для запоминания условиями, выявленными в процессе многолетних исследований. Использовалась компьютерная методика А.Н. Лебедева с запоминанием и последующим воспроизведением десятизначных цифр с учетом их положения в строке. В методике был реализован алгоритм обратной связи: при безошибочном воспроизведении тестовой строки следующая строка увеличивалась на одну цифру, если испытуемый ошибался — то сокращалась на одну цифру. Таким образом, компьютер постепенно подводил испытуемого к его пределу запоминания. В этом варианте использовались 20 тестовых строк. Среднее значение правильно воспроизведенных цифр рассматривалось в качестве индивидуального объема кратковременной памяти.

Запись электроэнцефалограммы производили на электроэнцефалографе фирмы «Медикор» (ВНР) и аналого-цифровом преобразователе СЭТ-2 фирмы «Медтехника» в состоянии спокойного бодрствования при закрытых глазах, монополярно. Активные электроды располагались в симметричных точках лобных, центральных и затылочных областей мозга (F3, F4, P3, P4, O1, O2) по международной системе 10–20. Индифферентный электрод помещали на мочку правого уха. Полоса частот была ограничена сверху 30 Гц, постоянная времени составляла 0,3 с. Частота регистрации потенциалов — 100 в секунду. При обработке данных каждый из пятисекундных отрезков записи в каждом из шести отведений подвергался быстрому преобразованию Фурье. Программы отбора и математической обработки электроэнцефалографических параметров были составлены А.Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Связь между различными аспектами активности, эмоциональной чувствительности, тревожности и когнитивной успешности

Используемый в работе опросник структуры темперамента (ОСТ) позволяет традиционно выделяемые два темпераментальных компонента — активность и эмоциональность — расчленять на составляющие.

Активность представляется в виде трех измерений: эргичности (выносливости), пластичности и темпа (скорости). Кроме того, учитываются также два разных аспекта деятельности человека — предметно-деятельностный и коммуникативный (социальный). Таким образом, выделяются по два показателя эргичности, пластичности и скорости, всего шесть аспектов компонента активности. Эмоциональный компонент (как чувствительность к неудачам) также расчленен на два аспекта — предметный и социальный.

Анализ показал, что характеристики активности, свидетельствующие об интенсивности взаимодействия с предметной и социальной средой, положительно связаны между собой и отрицательно — с уровнем функциональной и конституциональной тревожности и чувствительностью к неудачам в предметной и социальной сферах (табл. 1-а). Следует отметить, что из всех показателей эмоционального комплекса наиболее высокую достоверную отрицательную связь с параметрами активности показал уровень конституциональной тревожности. Сопоставление значений конституциональной и функциональной тревожности с показателями предметной и социальной эмоциональности выявило их высокую сопряженность, значения коэффициентов корреляций были положительными и составляли от 0,45 до 0,60.

Таблица 1. Корреляционные соотношения между показателями активности, эмоциональной чувствительности, тревожности и когнитивной успешности 1-а. Связь конституциональной тревожности с показателями активности и эмоциональности

	Ктр	Сэм	Эмо	Фтр	Сэр	Пла	Тем	Эрг
Mean__*10	426	68	57	385	73	74	77	70
St_dev*10	89	28	39	107	27	28	3	35
22%Сс*100°	100	61	60	48	-46	-28	-26	-24
N	77	77	77	77	77	77	77	77

(при $r = 22\%$ $p = 0,05$)

Примечание: в этой и последующих таблицах:

Mean__*10 — среднее значение, умноженное на 10;

St_dev*10 — стандартное отклонение, умноженное на 10; 22%Сс*100° — коэффициент корреляции Пирсона в процентах; Эрг — предметная эргичность; Тем — предметный темп; Пла — предметная пластичность; Сэр — социальная эргичность; Сэм — социальный темп; Ктр — конституциональная тревожность; Фтр — функциональная тревожность.

1-б. Связь объема кратковременной памяти с показателями активности и эмоциональности

	Окп	Сте	Сэр	Пла	Тем	Эрг	Ктр	Сэм	Фтр
Mean_*10	70	73	78	74	77	70	426	68	385
St_dev*10	8,1	27	30	28	33	35	89	38	107
22%Сс*100°	100	29	28	25	22	21	-26	-21	-21
N	77	77	77	77	77	77	77	77	77

Примечание: Окп — объем кратковременной памяти на цифры

Таблица 1-б иллюстрирует противоположные соотношения двух составляющих структуры темперамента с объемом кратковременной памяти.

Если темпераментальный комплекс активности (эргичность, пластичность, темп в предметном и социальном вариантах) был положительно связан с объемом кратковременной памяти, то эмоциональный комплекс (предметная и социальная эмоциональность), наоборот, отрицательно. Таким же образом, как и эмоциональность, связаны с когнитивными и показатели конституциональной и функциональной тревожности.

2. Связь темпераментальных и когнитивных показателей с ритмами электроэнцефалограммы

Результаты работы указывают на сопряженность когнитивных, темпераментальных (активностных и эмоциональных) и электрофизиологических показателей. Таблица 2 отражает связь показателей эмоциональной сферы (предметной и социальной эмоциональности, функциональной и личностной тревожности) с параметрами фоновой электроэнцефалограммы.

Таблица 2. Связь показателей эмоциональной сферы с параметрами фоновой электроэнцефалограммы

	Ктр	Сэм	Эмо	Фтр	Сте	ОсF	OCF	TEP	Пла
Mean_*10	424	67	54	386	74	282	1268	138	74
St_dev*10	90	28	38	109	28	234	613	69	29
24%Сс*100°	100	64	61	47	-47	-38	37	35	-34

N	69	69	69	69	69	69	69	69	69
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

	Фтр	Ктр	Эмо	ТЕР	ТЕS	Сэм	Сте	tes	ALP
Mean__*10	386	424	54	138	112	67	74	48	291
St_dev*10	109	90	38	69	7	28	28	31	186
24%Сс*100°	100	47	44	39	-37	36	-35	33	-31
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

	Эмо	Сэм	Ктр	ТЕР	Фтр	Сте	ТЕS	dbl	ALS
Mean__*10	54	67	424	138	386	74	112	998	103
St_dev*10	38	28	90	69	109	28	7	53	26
24%Сс*100°	100	71	61	50	44	-39	-35	-29	28
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

	Сэм	Эмо	Ктр	Фтр	ТЕР	Сте	ТЕS	Окп	осF
Mean__*10	67	54	424	386	138	74	112	70,2	648
St_dev*10	28	38	90	109	69	28	7	7,7	394
24%Сс*100°	100	71	64	36	35	-35	-31	-25	-25
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

Примечание: (при $r = 24\%$ $p = 0,05$). В этой и последующих таблицах: Строчные буквы (тер, tes, dbl...) относятся к параметрам, полученным из нефильрованной энцефалограммы; заглавные буквы (ТЕР, ТЕS, ALP, ALS...) относятся к характеристикам усредненных фоновых колебаний (в окрестностях каждой волны в пределах указанной выше эпохи).

ТЕР — мощность тета-ритма; ТЕS, tes — показатели стандартного отклонения средней частоты тета-ритма; ALP — мощность альфа-ритма; dbl-средняя частота альфа-ритма; ALS — стандартное отклонение средней частоты альфа-ритма; Окп — показатель межполушарной пространственной согласованности между лобными, центральными и затылочными отделами; осF — показатель межполушарной пространственной согласованности между лобными и затылочными отделами при их рассогласованности в центральных отделах; осF — показатель межполушарной пространственной согласованности между лобными отделами при их рассогласованности в центральных и затылочных областях.

Интересно, что все четыре показателя эмоциональной сферы, свидетельствующие о повышенной эмоциональной чувствительности, имеют и общий набор электрофизиологических признаков. Это прежде

всего мощность тета-ритма (TEP) и его стандартное отклонение (TES), показатель высокой межполушарной синхронизации в лобных, центральных и теменных отделах (OCF) и показатели парциальной синхронизации в этих же отделах (OcF, ocF).

На первый план выступают параметры тета-ритма, высокая мощность которого и меньшее стандартное отклонение, свидетельствующие о его регулярности, отражают высокую ранимость эмоциональной сферы. Полученные данные согласуются с систематическими наблюдениями Э.А. Голубевой с соавторами, в которых показано, что высокая мощность тета-ритма является признаком слабой нервной системы [2; 3]. Индикаторами эмоциональной чувствительности служат также показатели согласования активности одновременно в лобных, центральных и затылочных отделах мозга (соответственно, при их меньшей дифференцированности). К дополнительным признакам можно отнести меньшие мощность и частоту альфа-ритма и его большее стандартное отклонение.

В таблице 3 отражены корреляционные соотношения показателей активности с электрофизиологическими параметрами.

Таблица 3. Связь показателей активности с параметрами фоновой электроэнцефалограммы

	Тем	Пла	Эрг	bem	теp	alp	OCF	dep	Dlt
Mean__*10	79	74	68	1327	76	907	1268	14	90
St_dev*10	33	29	36	38	82	103	613	23	28
24%Cc*100°	100	55	50	-40	-39	39	-35	-34	-34
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

	Пла	Эрг	Тем	Сэр	Сте	bem	Ктр	OCF	Окп
Mean__*10	74	68	79	79	74	1327	424	1268	70,2
St_dev*10	29	36	33	30	28	38	90	613	7,7
24%Cc*100°	100	59	55	51	43	-37	-34	-32	29
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

	Сте	Ктр	ОсF	Сэр	Пла	Эмо	Фтр	Сэм	Окп
Mean__*10	74	424	282	79	74	54	386	67	70,2
St_dev*10	28	90	234	30	29	38	109	28	7,7
24%Cc*100°	100	-47	44	43	43	-39	-35	-35	33
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

	Сэр	Пла	Сте	Тем	Окп	ВЕМ	BES	Ocf	Bem
Mean__*10	79	74	74	79	70,2	1662	211	1284	1327
St_dev*10	30	29	28	33	7,7	83	36	694	38
24%Сс*100°	100	51	43	30	29	-26	-20	20	-18
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

Примечание: alp, ter, der — показатели мощности соответственно альфа-, тета- и дельта-диапазонов; ВЕМ, bem — средняя частота бета-ритма; BES — стандартное отклонение средней частоты бета-ритма; dlt — показатель разности частотных составляющих в диапазоне альфа-ритма.

Обращает на себя внимание тот факт, что электрофизиологические показатели, уже упомянутые в связи с эмоциональной сферой, оказались связанными и с показателями активности, но уже с обратным знаком. Так, чем меньше мощность тета-ритма и выше мощность альфа-ритма, чем меньше суммарный уровень межполушарной синхронизации во всех исследованных отделах мозга (и, соответственно, больше выражена парциальность), тем выше показатели темпераментальной активности. Прогностическим признаком является также частота бета-ритма, не выявленная в соотношениях эмоционального комплекса. Разные характеристики активности с разной степенью плотности связаны с электрофизиологическими показателями. Наиболее многочисленные связи были получены с таким аспектом общей активности как предметный темп, который характеризует темперамент как потребность и способность в работе в быстром темпе и быстрых движениях, как одной из энергетических составляющих поведения.

Результаты работы, указывающие на сопряженность когнитивных, темпераментальных (активностных и эмоциональных) и электрофизиологических показателей отражает таблица 4.

Таблица 4. Корреляционные соотношения объема кратковременной памяти с психодинамическими и электрофизиологическими показателями

	Окп	Сте	Сэр	Пла	ALM	Сэм	alm	Рав	Эрг
Mean__*10	70,2	74	79	74	1037	67	1020	1239	68
St_dev*10	7,7	28	30	29	48	28	53	171	36
24%Сс*100°	100	33	29	29	-27	-25	-25	24	24
N	69	69	69	69	69	69	69	69	69

Примечание: Рав — количество «сырых» баллов, набранных при решении теста Равена; ALM, alm — показатели средней частоты альфа-ритма.

Наиболее тесные связи объема кратковременной памяти проявились с

показателями активности, причем плотнее с социальной ее стороной.

Из электрофизиологических показателей информативной оказалась частота альфа-ритма, как это уже и было показано в прежних работах [6; 8]. Результаты указывают, что высокая эмоциональная чувствительность, как уже было отмечено в таблице 1-б, является, по-видимому, негативным фактором по отношению к когнитивной продуктивности (объему памяти и успешности решения интеллектуальных задач).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Психотерапевты и практические психологи подтверждают единство соотношения «психологическое-физиологическое» многочисленными наблюдениями о «расшатывании» физиологии внутренним психологическим хаосом или "вытягиванием физиологии в струнку" при возникновении актуальных для личности доминант [1].

Взаимосвязь широкого круга психологических явлений (таких как объем, скорость и точность обработки информации) выведена из нейрофизиологических предпосылок и подтверждена экспериментально [5; 6; 13; 14].

В настоящем исследовании были получены соотношения между психодинамическими показателями темперамента, характерологическими особенностями эмоциональной сферы личности, когнитивной продуктивностью и параметрами электроэнцефалограммы.

Выявлены два симптомокомплекса электрофизиологических параметров, противоположным образом связанных с эмоциональной чувствительностью и когнитивной успешностью. Высокие показатели мощности тета-ритма и суммарной межполушарной синхронизации в лобных, центральных и затылочных областях свидетельствуют о повышенной ранимости эмоциональной сферы и невысокой когнитивной продуктивности. И, наоборот, низкая мощность тета-ритма и высокая мощность альфа-ритма, а также дифференциация синхронизационных процессов в исследованных областях, свидетельствуют об эмоциональной устойчивости и когнитивной успешности.

Полученные нами результаты согласуются с данными других исследователей, связывающих устойчивые паттерны фоновой электроэнцефалограммы с устойчивыми индивидуальными характеристиками человека. В систематических исследованиях Э.А. Голубевой с сотрудниками выявлены синдромы разноуровневых психологических и психофизиологических показателей [2; 3].

Н.Н. Данилова приводит результаты исследований, в которых выделен специальный фактор с длительной тета- и дельта-активностью,

замедленным альфа-ритмом, высокой чувствительностью и низкой эффективностью решения когнитивных задач [4]. Интересно также предположение Н.Н. Даниловой о том, что функционирование и соотношение разных волновых генераторов электроэнцефалограммы связано с преобладанием устойчивого типа реагирования — симпатического или парасимпатического.

Т.А. Ратановой обсуждаются данные работы со школьниками, где показано, что успешность различения перцептивных и смысловых сигналов связана с более сложной и дифференцированной системой межцентральных мозговых связей. При этом у детей с низкой скоростью различения выявлены одиночные связи только на частоте тета-ритма [10].

Наша работа и литературные данные указывает, что разные устойчивые когнитивно-личностные структуры обеспечиваются разными нейрофизиологическими механизмами. Однако задачей является поиск целостных психофизиологических структур, поскольку, по словам А.А. Ухтомского, «в восприятии истины человек движется весь целиком — и умом, и чувством, и волей» [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гармаев О.А.* Психопатический круг в семье. М., 2000.
2. *Голубева Э.А.* Индивидуальные особенности памяти человека. М., 1980.
3. *Гусева Е.П.* Биоэлектрические характеристики основных свойств нервной системы у подростков // Проблемы дифференциальной психофизиологии. М., Изд. «Педагогика», 1981. Т 10.
4. *Данилова Н.Н.* Психофизиологическая диагностика функциональных состояний. М.: Изд-во МГУ, 1992.
5. *Лебедев А.Н.* Константа М.Н. Ливанова в количественном описании психологических явлений // Психологический журнал, 1997. Вып. 6. С. 96–105.
6. *Лебедев А.Н., Артеменко О.И., Белехов Ю.Н.* Диагностика интеллектуальной одаренности // Труды Института психологии РАН, М., 1997. Вып. 2.
7. *Лебедев А.Н., Князева Т.С.* Электрофизиологические предикторы субъективных оценок музыки разных композиторов // Психологический журнал. 1999. Т. 20. Вып. 6. С. 72–79.
8. *Маркина А.В., Мальцева И.В., Лебедев А.Н.* Связь параметров альфа-ритма с объемом кратковременной памяти. Психологический журнал. 1995. Т. 16. № 2. С. 128–132.
9. *Маркина А.В., Пашина А.Х., Руманова Н.Б.* Связь ритмов электроэнцефалограммы с когнитивно-личностными особенностями человека // Психологический журнал. 2000. Т. 21. № 5. С. 48–55.
10. *Ратанова Т.А.* Психофизиологические основы индивидуальности. М.,

Московский психолого-социальный институт; Воронеж: Изд-во НПО «МОДЭК», 1999.

11. *Русалов В.М.* Опросник структуры темперамента. Методическое пособие. М., 1990.

12. *Ухтомский А.А.* Интуиция совести. СПб, 1996.

13. *Lebedev A.N.* The way from Weber's constant to laws of cognitive psychology//Synergie, Syntropie, Nichtlineare Systeme. Heft 6. Verlag im Wissenschaftszentrum Leipzig, 2000. P. 323–344.

14. *Lebedev A.N.* The oscillatory mechanisms of memory // Cognitive Processing, International Quarterly of Cognitive Sciences, 2001. V. 2. P. 57–66.

Нейросетевой подход к моделированию сенсорных суждений¹

В.М. Шендяпин

Институт Психологии РАН

Введение

Исследование процесса вынесения сенсорных суждений об идентичности или различии двух объектов, воспринимаемых наблюдателем последовательно, является важной и актуальной междисциплинарной задачей. Кроме большого значения для теоретического изучения естественного и создания искусственного интеллекта, эта задача имеет чрезвычайно перспективные практические приложения в экономике для разработки промышленных роботов. Важной для теории и практики характеристикой вынесенного сенсорного суждения является оценка уверенности субъекта в выбранном им решении.

При изучении сенсорных суждений, в соответствии с традицией теории обнаружения сигнала, выделяются два основных психических процесса. 1. В ответ на внешнее предъявление стимулов определённой физической модальности с целью их сравнения в психике человека формируются внутренние сенсорные представления этих стимулов. 2. На основе этих сенсорных представлений наблюдатель принимает решение о тождестве или различии предъявленных физических стимулов и оценивает свою уверенность в нём.

Нашей целью является моделирование процессов, обеспечивающих *формирование информации о различии* стимулов и *принятие решений*. При этом предполагается, что математическое описание внутренних сенсорных представлений внешних физических стимулов уже в основном известно.

Здесь мы всесторонне опираемся на векторную психофизиологию: обобщённую модель информационных процессов в биологических нейронных сетях и теорию векторного представления физических стимулов в сенсорном пространстве человека, разработанные Е.Н. Соколовым и его сотрудниками [1]. Изложим и обсудим основные моменты парадигмы Соколова, наиболее важные для достижения поставленной нами цели, то есть для моделирования работы механизмов принятия человеком сенсорных решений.

Согласно этой парадигме, «психофизиологическое исследование начинается с анализа поведенческих, вегетативных и электроэнцефалографических реакций на макроуровне ... в условиях строгого контроля параметров стимуляции» [1, с. 4]. На вопрос о том, как объединить выявленные закономерности в виде соотношений «вход-выход», полученные на макроуровне, с результатами регистрации реакций отдельных нервных клеток на микроуровне, парадигма даёт ответ: «Интеграция этих данных в рамках психофизиологии достигается построением модели в виде системы связанных между собой нейроноподобных элементов. К модели предъявляются два жёстких требования: вся модель в целом должна воспроизводить закономерности макроуровня,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Гуманитарных Исследований. Код проекта 00-06-00211а.

а реакции каждого нейроноподобного её элемента должны соответствовать реакциям соответствующих им реальных нейронов» [1, с. 4].

Отсюда следует, что для моделирования сенсорных суждений необходимо использовать нейросетевой подход. Ответ на вопрос о том, как в нейросетевой модели принятия сенсорных решений описывается физический стимул, нам даёт векторная психофизиология Соколова.

«Стимул, воздействующий на ансамбль нейронов, порождает в каждом из них определённый уровень возбуждения. Комбинация этих возбуждений образует *вектор возбуждения* (ВВ), кодирующий входное воздействие. Этот вектор подвергается в нейронных сетях операции нормировки, в результате чего самые разные стимулы, воздействующие на данный ансамбль нейронов, порождают ВВ, равные по длине. При постоянной длине ВВ сигналы кодируются разными их направлениями. Всё множество стимулов, представленных этими ВВ, располагается на сфере в пространстве, размерность которого определяется числом независимых нейронов в ансамбле» [1, с. 3]. Вот эти векторы возбуждения и образуют сенсорное пространство человека, репрезентирующее физические стимулы, предъявляемые человеку.

О свойствах сенсорного пространства человека мы делаем только одно предположение — что оно является валидным, то есть человек воспринимает предъявляемый ему физический стимул без серьёзных патологий. Тогда, несмотря на то, что разные люди различают одну и ту же пару физических стимулов с разной эффективностью, можно, подавая на разные модели принятия решения одну и ту же пару стимульных векторов, сравнивать эти модели по эффективности, так как они поставлены в равные условия в сенсорном пространстве стимулов.

Обсуждение основных моделей принятия сенсорных решений с оценкой уверенности

На сегодня можно выделить три класса математических моделей принятия решений при вынесении сенсорных суждений.

Первый класс включает в себя все модели, основанные на предположении, что человек выводит своё сенсорное суждение на основе только одной выборки случайного сенсорного эффекта от разницы предъявленных стимулов [6]. Согласно этим моделям в каждом наблюдении степень уверенности вычисляется на оси сенсорных впечатлений о различии стимулов просто как расстояние от величины полученной единственной выборки случайного сенсорного эффекта о различии стимулов до величины заданного порога, превышение которого соответствует принятию решения о том, что есть различие. Главным недостатком этого класса моделей является их неспособность оценивать время принятия решения. Кроме того, исследователи поняли, что человек при вынесении сенсорного суждения может использовать больше, чем одну выборку случайного сенсорного эффекта о различии стимулов.

Все остальные теории и соответствующие им классы моделей являются многовыборочными и поэтому лишены этого недостатка.

Второй весьма многочисленный класс включает в себя стохастические модели с последовательными выборками случайной величины сенсорного различия и накоплении их на одном счётчике («модель случайных блужданий» [7; 9]), либо на двух счётчиках, которые по отдельности накапливают положительные и отрицательные выборки случайной величины сенсорного различия («аккумуляторная модель» [11; 13;

14]). При этом уверенность в выбираемом решении возникает в результате стохастического процесса накопления свидетельств в пользу конкурирующих гипотез [5]. Под свидетельствами при этом понимаются именно превышения случайной величины сенсорного впечатления от одного стимула над случайной величиной сенсорного впечатления до другого стимула. То есть положительные выборки разницы этих случайных величин свидетельствуют о том, что больше первый стимул, а отрицательные выборки — о том, что больше второй.

Недостатком этого класса моделей является тот факт, что теория, на которой они базируются, концептуально не различает первый и второй стимулы. Они для неё совершенно симметричны и существуют одновременно и на равных правах. Между тем бывают ситуации, когда эта симметрия нарушается. Например, второй стимул может быть предъявлен намного позже первого. Тогда о сенсорном впечатлении первого стимула можно говорить только в контексте какого-либо механизма памяти, что, естественно, требует модифицировать саму теорию моделирования сенсорных решений и ввести в неё модель памяти.

Третий класс моделей строится на основе нейросетевой парадигмы, эвристичность которой подтверждается вышеописанной парадигмой векторной психофизиологии. Этот класс пока что самый малочисленный. К нему можно отнести модель адаптивного фильтра для узнавания [8], а также модель принятия решения с оценкой уверенности в ситуациях выборов из множества многопараметрических альтернатив [12]. Хотя последняя модель описывает не сенсорные, а более сложные жизненные решения, её всё же можно отнести к этому классу, так как она также описывает механизм принятия решения и оценки уверенности в нём с помощью функционирования математической нейронной сети.

Однако развиваемый Хисом подход к моделированию процессов принятия субъектом решения и оценки рейтинга уверенности в нём с помощью только одного накопителя, на наш взгляд, является менее адекватным, чем подход к этой же задаче, развиваемый Викером [11; 13; 14]. Последний наиболее глубоко и успешно проработал концепцию моделирования уверенности в сенсорных суждениях. Его гипотеза «баланса доказательств» использует отдельные сумматоры для накопления доказательств в пользу каждого из конкурирующих решений. Его рейтинг уверенности лучше или в более общей форме отражает наши интуитивные представления о психологической природе переживания уверенности, чем число колебаний при латентном выборе альтернатив [5], или время эксклюзивного латентного выбора единственной альтернативы [12].

В нашей статье предложен ещё один вариант нейросетевой модели, позволяющий описывать уверенность в сенсорных суждениях [10]. Он возник как развитие адаптивной модели памяти Хиса и Фулмана [8], позволяющей адекватно отражать в рамках стохастической модели способность человека запоминать новые стимулы и обеспечивать привыкание к повторному предъявлению одного и того же стимула. В своей модели авторы использовали широко применяющуюся в радиотехнике теорию адаптивной подстройки параметров обучаемого фильтра Уидроу [3].

Далее будет продемонстрировано как, используя теорию адаптивного линейного сумматора Уидроу и целенаправленно меняя вычислительную точность математических методов, используемых для построения модели памяти, на более точное соответствие этих методов нашим представлениям о работе реального мозга, можно получить новую более адекватную реальности модель адаптивного нейрона.

Кроме того, будет показано, как на основе полученных адаптивных нейронов можно построить нейросетевую модель детектора новизны сенсорных стимулов, способную использовать подход Викакса к моделированию уверенности в сенсорных суждениях.

Математическая модель адаптивного нейрона

Пусть реальный физический стимул, согласно векторной парадигме Соколова, представляется в сенсорном пространстве человека m -мерным вектором $(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$. Модель памяти является сетью из m формальных нейронов. Каждый i -ый нейрон модели через свой аксон посылает сигнал x_i каждому из остальных нейронов сети и в свою очередь на своих синапсах получает сигналы от каждого из остальных нейронов сети $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_m$ (все кроме x_i) [10].

Модель i -ого адаптивного нейрона, изображённого отдельно от остальных нейронов сети, приведена на рисунке 1. На входе i -ого адаптивного нейрона компоненты стимульного вектора $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_m$, (все кроме x_i) для k -ого момента времени образуют вектор с размерностью $n = (m-1)$: $\mathbf{X}_k = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_m)^T$ – входной вектор заданных выходных сигналов от других нейронов. Состояние входных синапсов нейрона для k -ого момента времени задаётся вектором $\mathbf{W}_k = (w_{i1}, \dots, w_{i,i-1}, w_{i,i+1}, \dots, w_{im})^T$ – текущим вектором весовых коэффициентов синапсов. Состояние нейрона описывается его выходным сигналом x_i , желаемым результатом d_i и полученным результатом y_i :

$$y_k = \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k \quad (1)$$

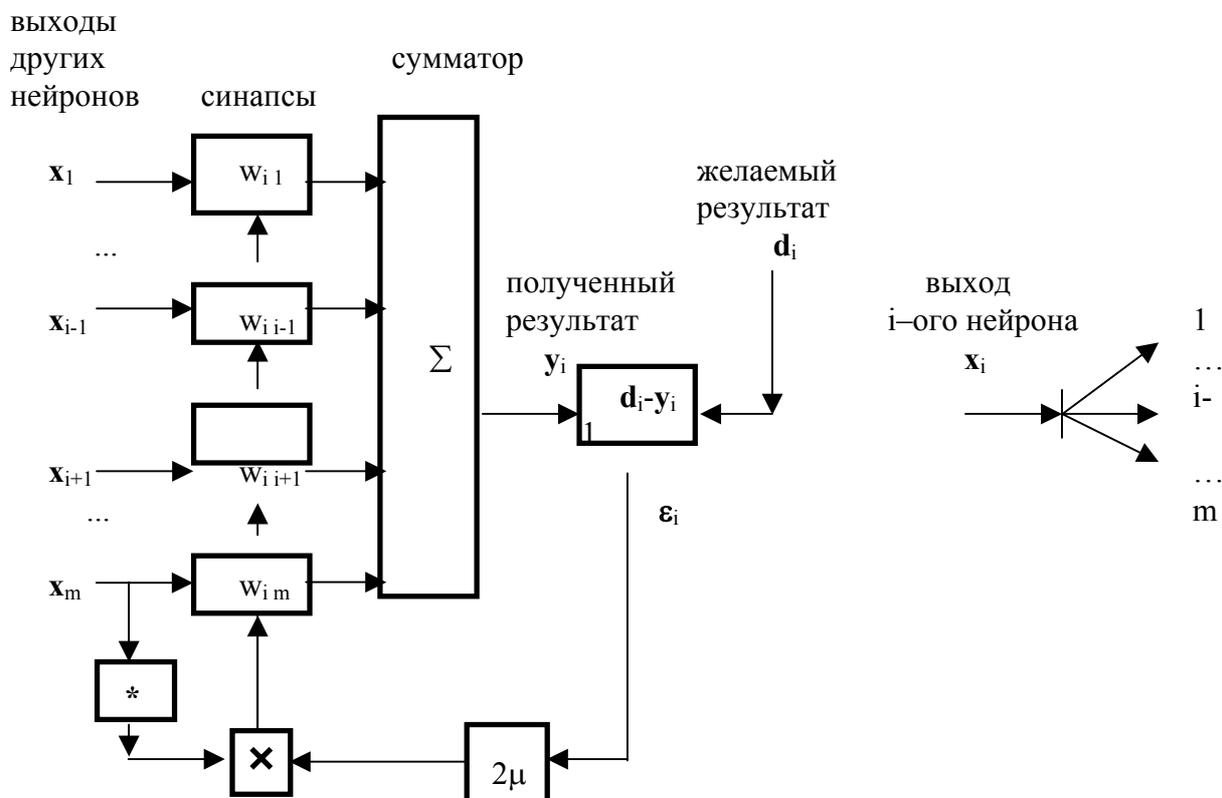


Рис.1. Модель i -ого адаптивного нейрона

Процесс записи стимула в память нейросети состоит в том, что для каждого нейрона подбирается такой вектор \mathbf{W}_k , чтобы отклонение желаемого результата от полученного результата $\varepsilon_k = d_k - y_k$ было минимальным. Используя выражение (1), это отклонение можно записать в виде:

$$\varepsilon_k = d_k - y_k = d_k - \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k = d_k - \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k. \quad (2)$$

Поскольку теория адаптивного сумматора позволяет работать со случайными комплексными процессами, не ограничивая заранее общности разрабатываемой модели, будем полагать, что параметры отражения стимула x_1, x_2, \dots, x_m и весовые коэффициенты нейронов $w_{ij}, j \neq i$ являются комплексными стационарными эргодическими случайными величинами, зависящими от времени.

Квадрат модуля отклонения (КМО) при этом равен:

$$|\varepsilon_k|^2 = (d_k^* - \mathbf{W}_k^H \mathbf{X}_k^*)(d_k - \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k) = |d_k|^2 - \mathbf{W}_k^H \mathbf{X}_k^* d_k - d_k^* \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{X}_k^* \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k, \quad (3)$$

где знак «**H**» означает результат последовательно выполняемых операций комплексного сопряжения и транспонирования, знак «*» означает операцию комплексного сопряжения.

Предполагая, что d_k и \mathbf{X}_k - случайные величины, а \mathbf{W}_k не коррелирует с d_k и \mathbf{X}_k , среднее значение квадрата модуля отклонения ξ_k запишем в виде:

$$\xi_k = E[|\varepsilon_k|^2] = E[|d_k|^2] - \mathbf{W}_k^H \mathbf{P}_k - \mathbf{P}_k^H \mathbf{W}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{R}_k \mathbf{W}_k, \quad (4)$$

где $\mathbf{P}_k = E[\mathbf{X}_k^* d_k]$ - вектор взаимной корреляции между вектором входа и желаемым результатом i -ого нейрона, $\mathbf{R}_k = E[\mathbf{X}_k^* \mathbf{X}_k^T]$ - эрмитова, положительно определенная корреляционная матрица входов нейрона.

Далее будем считать, что \mathbf{X}_k и d_k представляют собой стационарные случайные величины. При этом \mathbf{P}_k и \mathbf{R}_k не зависят от времени и индекс k можно опустить. $E[|d_k|^2]$ также не зависит от времени. Выражение (4) тогда можно переписать:

$$\xi_k = E[|\varepsilon_k|^2] = E[|d_k|^2] - \mathbf{W}_k^H \mathbf{P} - \mathbf{P}^H \mathbf{W}_k + \mathbf{W}_k^H \mathbf{R} \mathbf{W}_k \quad (5)$$

Из (5) следует, что средний квадрат модуля отклонения (СКМО) ξ_k является квадратичной функцией вектора \mathbf{W}_k и может быть представлен в n -мерном пространстве в виде поверхности со впадиной. Процесс минимизации СКМО заключается в поиске низшей точки впадины путем изменения вектора весовых коэффициентов. Эта задача может быть решена с помощью метода наискорейшего спуска.

Данный метод предполагает вычисление градиентов ξ_k по действительной и мнимой частям вектора весовых коэффициентов, $\mathbf{W}_k = \mathbf{A}_k + i\mathbf{B}_k$. Из (3) получаем:

$$\nabla_{\mathbf{A}k} |\varepsilon_k|^2 = -2 \operatorname{Re} \{ \mathbf{X}_k^* d_k - \mathbf{X}_k^* \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k \}, \quad (6)$$

$$\nabla_{\mathbf{B}k} |\varepsilon_k|^2 = -2 \operatorname{Im} \{ \mathbf{X}_k^* d_k - \mathbf{X}_k^* \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k \}. \quad (7)$$

Вводя комплексный оператор градиента $\nabla_{\mathbf{W}_k} = \nabla_{A_k} + i\nabla_{B_k}$, выражения (6) и (7) можно заменить одной формулой:

$$\nabla_{\mathbf{W}_k} |\varepsilon_k|^2 = -2 (\mathbf{X}_k^* \mathbf{d}_k - \mathbf{X}_k^* \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k). \quad (8)$$

Отсюда, беря математическое ожидание от обеих частей (8), получаем:

$$\nabla_{\mathbf{W}_k} \xi_k = -2 (\mathbf{P} - \mathbf{R}\mathbf{W}_k). \quad (9)$$

Оптимальное значение вектора весовых коэффициентов \mathbf{W}_{opt} , при котором СКМО имеет минимум, достигается в точке, где градиент (9) обращается в ноль. Из условия обращения градиента в ноль получаем уравнение Винера-Хопфа в матричной форме:

$$\mathbf{R}\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{P}. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) даёт искомый оптимальный вектор весовых коэффициентов:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}. \quad (11)$$

Для практической реализации адаптивным нейроном процесса получения вектора \mathbf{W}_{opt} могут быть использованы различные вычислительные методы. Проанализируем эти методы с точки зрения объёма информации, необходимой для их практической реализации, а также их сложности.

1) Прямой метод вычислений использует формулу (11). Этот метод даёт точное винеровское решение уравнения (10), но требует в качестве необходимой информации знания матрицы \mathbf{R} и вектора \mathbf{P} , которые при моделировании обычно неизвестны. Кроме того, даже при наличии этой информации адаптивному нейрону необходимо уметь выполнять операции обращения эрмитовой положительно определённой матрицы и умножения матрицы на вектор. Совершенно невероятно, чтобы такая сложная обработка соответствовала реальным возможностям биологического нейрона.

Чтобы избавиться от сложной операции обращения матрицы, в математике для приближённого решения уравнения (10) используется гораздо более простой итерационный метод наискорейшего спуска. Полученное при этом за малое время, приближённое решение затем может уточняться в ходе последующих итераций для достижения желаемой точности.

Такой итерационный подход очень привлекателен для практических применений, когда задачу требуется решить пусть и не точно, но в реальном времени (то есть очень быстро) и на очень скромной аппаратуре. Далее нас будут интересовать именно такие итерационные методы, так как мы полагаем, что наш адаптивный нейрон является как раз такой «очень скромной аппаратурой», вынужденной работать в условиях «реального времени».

2) При использовании метода наискорейшего спуска вектор весовых коэффициентов изменяется пропорционально градиенту СКМО, взятому со знаком минус. В соответствии с выражением для градиента СКМО (9) получаем выражение для весового вектора в $(k+1)$ -ый момент времени:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu (-\nabla_{\mathbf{W}_k} \xi_k) = \mathbf{W}_k + 2\mu (\mathbf{P} - \mathbf{R}\mathbf{W}_k), \quad (12)$$

где скалярный параметр μ определяет шаг адаптации весовых коэффициентов нейрона к оптимальным значениям.

Согласно оценкам, полученным в [3], метод наискорейшего спуска, использующий алгоритм минимума СКМО (12), при выполнении условия:

$$1/\lambda_{\max} > \mu > 0, \quad (13)$$

где λ_{\max} - наибольшее собственное значение матрицы \mathbf{R} , гарантирует нахождение с любой заданной степенью точности решение уравнения Винера-Хопфа (10) за время необходимое для достижения требуемой точности. Сходимость алгоритма к точному решению имеет экспоненциальный характер. Чем точнее требуется решение, тем большим является необходимое время.

Однако и этот алгоритм имеет скорее теоретическую, чем практическую ценность, так как он требует априорного знания матрицы \mathbf{R} и вектора \mathbf{P} , которые при моделировании не известны. Поэтому этот метод также не подходит для нашей модели.

3) Практическая реализация метода наискорейшего спуска в теории адаптивного линейного сумматора [3] строится с помощью стохастического алгоритма минимума КМО, который вместо истинного градиента СКМО (9) использует его оценку в виде градиента КМО (8):

$$\nabla_{\mathbf{W}_k} |\varepsilon_k|^2 = -2(\mathbf{X}_k^* d_k - \mathbf{X}_k^* \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k) = -2\mathbf{X}_k^* (d_k - y_k) = -2\mathbf{X}_k^* \varepsilon_k, \quad (14)$$

являющуюся случайной величиной.

Итерационный процесс для вычисления весового вектора адаптивного нейрона при этом не требует знания матрицы \mathbf{R} и вектора \mathbf{P} и оказывается значительно проще, чем (12), так как не требует выполнения операций умножения матрицы на вектор:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu \varepsilon_k \mathbf{X}_k^*. \quad (15)$$

Соответствующая блок-схема настройки весов адаптивного нейрона приведена на рисунке 1. Простота обработки полученной модели позволяет надеяться, что собственной активности биологического нейрона хватает для её реализации. Вполне вероятно, что нейрон может взвешивать входные сигналы, суммировать их и вычитать, а также выполнять корреляционную обработку.

При этом, как показано в (3), математическое ожидание оценки градиента (8) равно истинному градиенту (9), а среднее значение вектора весовых коэффициентов сходится к винеровскому решению (11). Использование в методе наискорейшего спуска оценки градиента вместо истинного градиента можно интерпретировать как добавление некоторого шума к истинному градиенту. Шум градиента в свою очередь вызывает появление шумовой составляющей вектора весовых коэффициентов, как в процессе адаптации, так и в установившемся режиме. Однако погрешность адаптации, вызванная этими шумами, в установившемся режиме пропорциональна коэффициенту усиления кольца обратной связи μ и поэтому может быть сделана достаточно малой.

Нейросетевая модель детектора новизны стимула

Нейросетевая модель Хиса и Фулмана для вынесения решения о новизне предъявляемого второго стимула по отношению к ранее запомнившемуся нейросетью первому стимулу использует скалярное произведение вектора второго стимула, поступающего на вход нейросети, с вектором выходной реакции нейросети на этот стимул [8]. Такой вариант скалярного представления различий между вторым и ранее запомнившимся первым стимулом является, на наш взгляд, вполне допустимым. Однако для моделирования процесса принятия решения эти авторы взяли модель случайных блужданий, которая не воспроизводит баланс доказательств в пользу каждой рассматриваемой альтернативы и поэтому проигрывает аккумуляторной модели Виккерса.

Нами предложена другая модель возможного механизма принятия решения о различии либо тождестве стимулов с оценкой уверенности. Модель построена из адаптивных нейронов, образующих нейронный ансамбль [4; 10]. В качестве примера на рисунке 2 приведен детектор новизны для трёхмерного стимула. В этом случае нейронный ансамбль содержит, соответственно, 3 адаптивных нейрона. Для примера рассмотрим работу первого из них.

Первая компонента трёхмерного стимульного вектора s_1 является желаемым сигналом для первого адаптивного нейрона. Две другие компоненты стимульного вектора s_2 и s_3 образуют двухмерный входной вектор. Весовые коэффициенты w_{12} и w_{13} образуют соответствующий двухмерный весовой вектор первого нейрона. Для адаптивной настройки этого весового вектора первый нейрон имеет две цепи обратной связи, работающих по алгоритму (15). В процессе адаптации за счёт подстройки весов w_{12} и w_{13} величина разбаланса ε_1 между желаемым s_1 и полученным результатом $y_1 = s_2 w_{12} + s_3 w_{13}$ приближается к нулю.

Второй и третий адаптивные нейроны устроены аналогичным образом, только желаемым сигналом второго нейрона является s_2 — вторая компонента стимульного вектора, а желаемым сигналом третьего нейрона является s_3 — третья компонента стимульного вектора.

Выходным вектором рассматриваемого нейронного ансамбля из трёх нейронов является вектор разбаланса $\mathbf{E} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)^T$. При предъявлении первого стимула замыкаются цепи адаптивной подстройки весов нейронного ансамбля, и происходит запоминание этого стимула. В процессе запоминания все компоненты вектора \mathbf{E} приближаются к нулю. При предъявлении второго стимула цепи подстройки весов автоматически разрываются. Адаптация весов в этих условиях происходить не может. Если второй стимул отличается от первого, то вектор разбаланса \mathbf{E} при воздействии второго стимула мгновенно становится отличным от нуля. Каждая компонента этого вектора поступает затем на вход соответствующего блока принятия решения о тождестве или различии с оценкой уверенности.

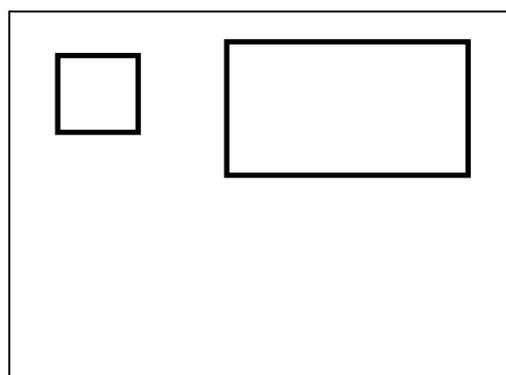
Все три схемы принятия решения совершенно идентичны. Структура первой схемы (для ε_1) изображена подробно на рисунке 2. Каждая схема принятия решения имеет три отдельных канала. Два — для формирования бинарных признаков (1/0) о принятых решениях: «различны» или «идентичны» пары предъявленных стимулов. Третий канал выдаёт непрерывную оценку «рейтинга уверенности» в принятом решении. Данная

трёхканальная схема принятия сенсорного решения была разработана Викаром и Ли [14] и используется нами без изменений.

Модель принятия решения является многомерным вариантом модели, описанной Викаром и Ли [14]. Для каждого параметра стимула наша модель, согласно гипотезе баланса доказательств [11; 14], формирует отдельные каналы новизны, тождества и оценки уверенности. Так как мы полностью разделяем подход Викара к процессу принятия решения, то для задания порогов в каналах новизны и тождества может быть использована его идея об адаптивной подстройке порогов, на основе референтного уровня уверенности, который, как предполагает Викар, контролируется сознанием испытуемого [14].

Выводы

1. Для моделирования процесса различения физических стимулов необходимо использовать парадигму Е.Н.Соколова о *векторном* представлении стимулов в сенсорном пространстве человека.
2. Для сенсорного представления стимулов и получения информации о различии последовательно поступающих стимулов необходимо использовать *нейросетевые* модели.
3. Для построения нейросетевой модели была предложена модель *адаптивного нейрона с желаемым сигналом*.
4. Для моделирования процесса вынесения *сенсорного* суждения о новизне стимула необходимо использовать гипотезу Викарса о *балансе доказательств* в пользу каждой из рассматриваемых альтернатив.
5. Для моделирования процесса вынесения сенсорного суждения о новизне стимула на основе векторной психофизиологии Соколова была разработана *нейросетевая модель детектора новизны*, использующая предложенный нами адаптивный нейрон с желаемым сигналом и предложенную Викаром аккумуляторную модель принятия решения.



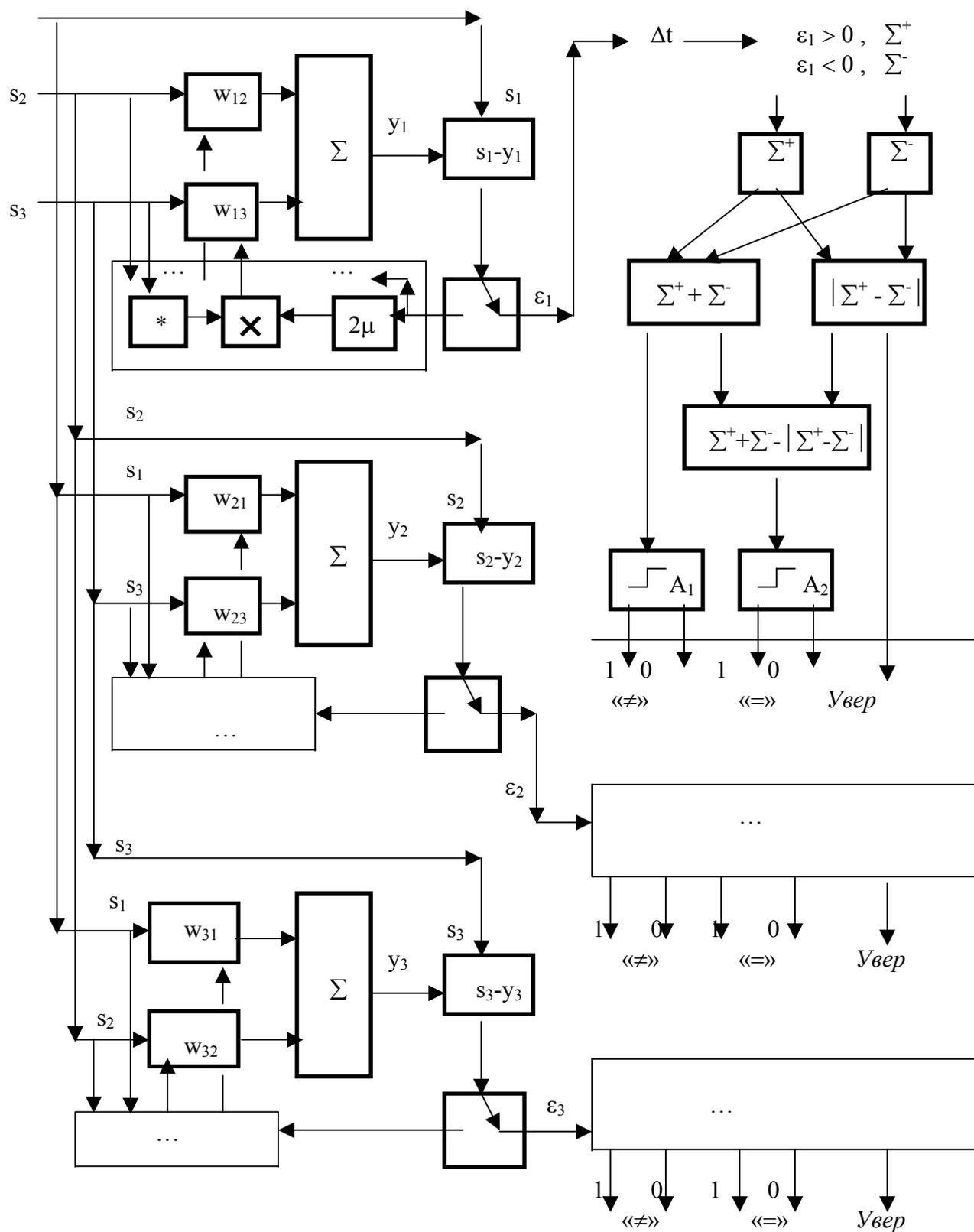


Рис. 2. Нейросетевая модель детектора новизны трёхмерного стимула
Литература

1. *Соколов Е.Н.* Принцип векторного кодирования в психофизиологии // Вестник Московского Университета. Серия 14. Психология. 1995. № 4.
2. *Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г.* Нейроинтеллект: от нейрона к нейροкомпьютеру. М.: Наука, 1989.
3. *Уидроу Б., Стирнс С.* Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989.
4. *Шендяпин В.М.* Применение теории адаптивного сумматора для обучения активного нейрона / Труды VIII Всероссийской конференции «Нейροкомпьютеры и их применение» НКП–2002 с международным участием / Под ред. А.И. Галушкина. М.: Институт проблем управления РАН, 2002. С.1057. Компакт-диск ISBN 5-201-14935-9.
5. *Audley R.J.* A stochastic model for individual choice behavior // *Psychological Review*, 1960. V.67. P. 15.
6. *Baranski J.V. & Petrusic W.M.* Probing the locus of confidence judgments: experiments on the time to determine confidence // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1998. V. 24. P. 929.
7. *Heath R.A.* Random-walk and accumulator models of psychophysical discrimination: a critical evaluation // *Perception*. 1984. V.13. P. 57.
8. *Heath R.A. & Fulham R.* An adaptive filter model for recognition memory // *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*. 1988. V.41. P. 119.
9. *Link, S.W. & Heath R.A.* A sequential theory of psychological discrimination // *Psychometrika*. 1975. V.40. P. 77.
10. *Shendyapin V.M., Skotnikova I.G.* Neural network model as a possible tool for modeling of confidence in sensory judgments // *Fechner Day 2001. Proceedings of the 17th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics* / E. Sommerfeld, R. Kompass, T. Lachmann (Eds.). Leipzig: Pabst Science Publishers, 2001. P. 597.
11. *Smith P.L. & Vickers D.* The accumulator model of two-choice discrimination // *Journal of Mathematical Psychology*. 1988. V.32. P. 135.
12. *Usher M. & Zakay D.* A neural network model for attribute-based decision processes // *Cognitive Science*. 1993. V.17. P. 349.
13. *Vickers D.* *Decision process in visual perception* New York: Academic Press, 1979.
14. *Vickers D. & Lee M.D.* Dynamic models of simple judgments: I. Properties of a self-regulating accumulator model // *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*. 1998. V.2. P. 169.