

## НЕЙРОННЫЙ КОД

А.Н. ЛЕБЕДЕВ



Лебедев Артур Николаевич — доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой психофизиологии факультета психологии ГУ ВШЭ, главный научный сотрудник Института психологии РАН.

Контакты: Artleb@mail.ru

---

### Резюме

*В разнообразных опытах проверена гипотеза о том, что нейронный код представлен пакетами незатухающих волн нейронной активности, причем элементарный образ соответствует единичному волновому пакету — взаимосвязанной, циклически повторяющейся деятельности клеток одного нейронного ансамбля. Приводятся формулы с включенными в них параметрами нейронного кода, выражающие зависимость объема и быстродействия памяти человека, субъективных оценок интенсивности стимулов и вероятности выбора действий от нейрофизиологических параметров и характеристик информации, подлежащей обработке. Предложен способ вычисления по параметрам фоновой электроэнцефалограммы психологического портрета человека с такими показателями, как способность к обучению, общительность, исполнительность, склонность к лидерству и т. д., в соответствии с основными шкалами миннесотского опросника (ММПИ).*

---

Невозможно разобраться в сложных психологических проблемах, если не раскрыта структура нейронного

кода, количественно определяющего особенности психических процессов, состояний и свойств личности.

Расшифровка нейронного кода обеспечивает решение ряда трудных задач, стоящих перед психологами. Одна из них, старинная, классическая, относится к проблеме выбора. Как зависит время выбора от количества альтернатив? Иными словами, какова скорость обработки информации человеком? Другая нерешенная проблема касается объема памяти и скорости мнемических операций. Как зависит объем кратковременной памяти от размера алфавита запоминаемых сигналов? Третья — это проблема точности субъективных оценок в функции интенсивности стимулов. Перечень можно было бы продолжить. Попытки решения подобных задач совершались на протяжении десятилетий, но до сих пор формулы, описывающие закон У. Хика, правило Дж. Миллера, основной психофизический закон в трактовках Г. Фехнера и С. Стивенса, были приблизительными и слабо связанными, точнее, совсем не связанными друг с другом. Надежда на решение появилась в последние годы, и она связана с достижениями в области нейрофизиологии, прежде всего с работами академика М.Н. Ливанова и его учеников, а также с работами Е.Н. Соколова (идея векторного кодирования) и Н.П. Бехтеревой (выявление нейронных кодов в характеристиках импульсации центральных нейронов).

#### **Уравнение нейронной волны**

В наших исследованиях середины 60-х гг., выполненных в лаборатории М.Н. Ливанова, было установлено, что колебания медленных электрических потенциалов, регистрируемых с поверхности черепа, закономерно

связаны с изменениями интервалов между импульсами отдельных нейронов в коре мозга животных. Колебания частоты импульсации зеркально отражают волны вызванных потенциалов (Лебедев, Луцкий, 1972; Забродин, Лебедев, 1976). Был сделан вывод, что вызванные потенциалы и электроэнцефалограмму (ЭЭГ) можно использовать для расшифровки нейронных кодов. Н.П. Бехтерева (1980) обнаружила связь узоров нейронной импульсации с образами памяти непосредственно в опытах с участием человека (при нейрохирургических вмешательствах с целью диагностики). Найденную связь между волнами импульсации и волнами ЭЭГ мы связали с метаболизмом нейронов и выразили ее дифференциальным уравнением первого порядка с запаздывающим аргументом (Лебедев, Луцкий, 1972). Решение уравнения при значениях его параметров, выведенных из опытных данных, показало, что узоры из волн ЭЭГ, во-первых, многообразны и исчисляются сотнями миллионов, и, во-вторых, каждый из узоров, поддержанный согласованной активностью минимум 100–300 нейронов, способен, не угасая, сохраняться в течение всей жизни индивида, подобно тому как сохраняется известная ритмическая деятельность нейронов — водителей сердечного и дыхательного циклов. По расчету, сотни миллионов нейронных ансамблей хранят информацию о внутреннем мире человека. Волны нейронной активности, вызванные стимулами, уменьшаются по амплитуде, но не затухают до конца. Они-то и хранят информацию об окружающем мире. Волны нейронной активности выражаются

упомянутым выше дифференциальным уравнением первого порядка:

$$dU(t)/dt = -aU(t) + b \times \exp[-U^2(t-c)]. \quad (1)$$

Уравнение позволяет рассчитать амплитуду  $U$  колебаний мембранного потенциала нейрона в пункте зарождения нервных импульсов в каждый текущий момент времени  $t$ . Потенциал  $U(t)$  нормирован. Параметры колебаний  $a$ ,  $b$  и  $c$  в своих комбинациях объясняют главные особенности нейронных волн и импульсов, хранящих запечатленную в памяти информацию. Параметр  $a$  отражает скорость деполяризации мембраны нервной клетки. Параметр  $b$  отражает скорость ее запаздывающей реполяризации. Параметр  $c$  служит мерой длительности такого запаздывания. Деполяризация вызвана катаболическими процессами, протекающими непрерывно. Реполяризация обусловлена анаболическими процессами. Содержимое нейрона постоянно обновляется, но в момент генерации нервного импульса обновление ускоряется. Одни ионы, продукты катаболизма, выталкиваются наружу, другие загоняются внутрь клетки. С некоторой задержкой поступающие молекулы находят свои адресаты и включаются в метаболические процессы. Колебания изменяются под влиянием синаптических и электротонических воздействий со стороны других нейронов, в том числе рецепторных, под влиянием метаболизма глиальных клеток и в силу разных других причин. Они могут даже приостанавливаться, замедляться или ускоряться, усиливаться по амплитуде или уменьшаться

ся, но не затухают до конца до тех пор, пока нейроны, составляющие ансамбль, живы. Единицами памяти служат пакеты волн, генерируемые нейронными ансамблями.

Решение системы уравнений (1) циклической активности нейронов раскрывает механизм запечатления, хранения и извлечения информации в нейронных сетях, поскольку объясняет главное — устойчивость волн когерентной нейронной активности. Нейроны порознь время от времени изменяют порядок следования своих импульсов. Чередование импульсов одиночных центральных нейронов часто выглядит хаотичным, но активность групп нейронов, объединенных в ансамбли, всегда высоко упорядочена, подобно пейсмекерной активности нейронов сердца или дыхательного центра. Миллионы таких пульсирующих «сердец» служат основой внутреннего мира человека, проявляясь внешне в колебаниях потенциалов электроэнцефалограммы. Уравнение (1) было исследовано в дальнейшем в работах Я.Б. Песина (Песин, 1974) и Н.В. Зубова (Зубов, 1980). Оно послужило основой для свежих идей в области разработки нейрокомпьютеров нового поколения (Лебедев, 1993; Майоров, Мышкин, 1993). Вывод о стабильности волновых узоров, вытекающий из решения уравнения (1), позволяет проверить в эксперименте следующую гипотезу.

#### **Гипотеза о волновой структуре нейронного кода**

Предположение о волнах активности как материальном субстрате внутреннего мира человека впервые еще в XVIII веке высказал первый

психофизиолог, английский врач Д. Гартли (Гартли, 1967). Развивая его идею, мы выдвинули следующую гипотезу: объективно существующими единицами внутреннего мира человека служат пакеты волн, генерируемые нейронными ансамблями и образованные последовательностью из нескольких волн, различающихся фазами. Каждая отдельная волна является результатом согласованной активности группы нейронов, называемой звеном. Такая группа разряжается импульсами одновременно, подобно оружейному залпу, т. е. когерентно, согласованно. Последовательные залпы одного нейронного звена образуют последовательную группу импульсов. Промежутки между соседними залпами составляют 10% от периода повторения групп импульсов (константа М.Н. Ливанова,  $R=0.1$ ). Группы импульсов повторяются через одинаковые промежутки времени, равные периоду волн в диапазоне частот основных ритмов электроэнцефалограммы. Для человека типична частота альфа-ритма (константа Г. Бергера,  $F=10$  Гц). Одно нейронное звено активируется вслед за другим звеном с минимальным промежутком времени, равным произведению константы М.Н. Ливанова на период ( $1/F$ ) колебаний. Ограниченное число разных нейронных звеньев, активируемых в одном цикле активности, т. е. в течение одного периода, образует своей активностью один волновой пакет. Группы нейронных импульсов функционально связаны с колебаниями мембранных потенциалов нейронов. В узорах электроэнцефалограммы (ЭЭГ) закодированы «буквы» и «слова», отражающие внутренний мир человека, его неповторимую

индивидуальность. Наша гипотеза доступна проверке разными способами. Сначала рассчитаем объем памяти человека, долговременной и кратковременной, пользуясь параметрами электроэнцефалограммы, затем вычленим скоростные характеристики памяти.

### Уравнение объема памяти

Уравнение (1) объясняет циклическую повторяемость волновых узлов, 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:  $S=N^N$ . Объем кратковременной памяти  $H$  зависит от размера алфавита запоминаемых элементов  $A$  (цифр, букв, слогов и т. п.), известного испытуемому, подчиняясь формуле:

$$H=N \ln N / \ln(kA), \quad (2)$$

в которой  $k$  — коэффициент концентрации внимания,  $N$  — размер алфавита нейронных «букв». Выражение под знаком натурального логарифма в знаменателе формулы — объем внимания, равный произведению размера алфавита стимулов  $A$  на коэффициент концентрации внимания  $k$ . Второй множитель в числителе — логарифм объема долговременной памяти, равного примерно полумиллиарду образов ( $9^9$ ). Если внимание испытуемого рассеяно, то  $k=N$ , т. е. объему кратковременной памяти. При максимальной концентрации значение

коэффициента минимально: равно единице,  $k=1$ . В среднем, приближенно  $k=(N+1)/2$ .

Точность прогноза объема памяти по уравнению (2) мы проверили в опытах с измерениями объема кратковременной памяти на стимулы, различающиеся по размеру алфавита. Результаты опытов, выполненных по классической методике, отражены в цитируемых ниже статьях и диссертациях ряда наших сотрудников. Здесь же приводится обобщенная таблица, вскрывающая связь объема кратковременной памяти с размером алфавита стимулов. В табл. 1 представлены результаты сравнения объема

кратковременной памяти, вычисленного по уравнению (2) и полученного в наших опытах с различными алфавитами стимулов (Lebedev, 2001).

Различия между предсказанными и опытными значениями составили около 11%. Для психологических измерений это высокая точность. Опытные данные подтвердили нашу гипотезу. Итак, объем кратковременной памяти функционально зависит от размера алфавита запоминаемых элементов: чем больше размер  $A$  алфавита при постоянной концентрации внимания  $k$ , тем меньше объем  $N$  кратковременной памяти.

Таблица 1

Зависимость объема кратковременной памяти от размера алфавита запоминаемых стимулов

Наименование элементов	Размер алфавита	Объем памяти		Стандартное отклонение	Число испытуемых
		расчетный	полученный в эксперименте		
Цифры	2	8.7	9.7	1.1	32
Цифры	10	5.6	6.3	1.2	96
Буквы рус.	33	4.4	5.2	1.4	29
Буквы лат.	26	4.6	4.3	0.9	27
Слоги рус.	3700	2.3	2.6	0.5	7

### Правило гармоничного выбора

В формуле (2) коэффициент  $k=1$ , т. е. внимание максимально сконцентрировано. В частном случае при размере алфавита, равном единице ( $A=1$ ), но максимально рассредоточенном внимании ( $k=N$ ) находим по уравне-

нию (2), что объем кратковременной памяти  $N=9$ , т. е. в данном случае информация об одном и том же объекте ( $A=1$ ), элементе алфавита, девятикратно дублируется, поскольку существует не более  $N=9$  независимых параллельных нейронных каналов обработки. Эта особенность объясняет

один интересный феномен, связанный с принятием решения в ситуации равновероятного выбора.

Известно, что любой выбор определяется в целом совокупностью сообщений различного рода, мотивов. При двух альтернативных действиях вероятность ( $p$ ) любого из них равна 0.5, если суммарные влияния всевозможных мотивов в пользу того или иного действия равны между собой. Действие, вероятность выбора которого больше 0.5, назовем мажоритарным. Если вероятности реализации каждого мотива в отдельности равны между собой, подчиняясь равномерному закону распределения, то в итоге выбор мажоритарного действия осуществляется с вероятностью 0.75, совпадая с серединой диапазона от 0.5 до 1.0 всех его мыслимых значений. Согласно нашей гипотезе, принятие решения по разным мотивам, разным основаниям осуществляется в каждом из нейронных каналов параллельно, причем число таких каналов не превышает константы  $N=9$ . Максимальное число аргументов, т. е. оснований, учитываемых одновременно при выработке решения, согласно нашей гипотезе, не превышает указанного числа.

В условиях полной неопределенности выбора одного из двух решений ( $p=0.5$ ) при одном аргументе ( $N=1$ ) находим стандартное отклонение вероятности выбора:

$$S=\sqrt{p(1-p)}=p=0.5. \quad (3)$$

Однако если одновременно существует  $N$  равновозможных аргументов, то искомое стандартное отклонение рассчитывается по известной формуле  $S=p/\sqrt{N}$ . В частности, при  $N=9$  стандартное отклонение равно

$S=0.17$ . При числе каналов  $N$  больше, чем единица, приближенно искомую вероятность  $p(>0.5)$  решения можно вычислить по формуле:

$$p(>0.5)=0.5+0.677S=0.5+0.338/\sqrt{N}, \quad (4)$$

поскольку распределение числа исходов в случае множественности аргументов подчиняется биномиальному закону, приближенно описываемому распределением Гаусса. Приближенность объясняется тем, что ось абсцисс не простирается до бесконечности в обе стороны от среднего значения аргумента. Она ограничена конечными значениями вероятности  $p$  — нулем в левой ветви и единицей в правой. Значение интегральной функции гауссового распределения  $F(p)$  равно 0.75 при  $p=0.677S$  (Митропольский, 1971, с. 525). Таково среднее значение интеграла для  $p>0.5$ .

Напомним, что число  $N$  параллельных каналов обработки зависит от значения константы  $R$  М.Н. Ливанова. При  $R=0.1$  искомая вероятность равна  $p(>0.5)=0.61$  согласно формуле (4). В. Лефевр (1991) и К.М. McGrow (1985) экспериментально выявили искомую вероятность  $p$ , приблизительно равную 0.61, увидев в найденной величине «золотое сечение»  $p=(\sqrt{5}-1)/2=0.618$ .

В сфере сознания одновременно актуализированы не все вычисленные выше сотни миллионов образов, составляющие объем долговременной памяти, но лишь немногие из них, поддерживаемые активностью наиболее многочисленных нейронных ансамблей в каждый данный момент времени. Образы, вовлекающие в свои ритмы наибольшее число нейронов, осознаются.

Каждый нейрон связан с десятками тысяч других нейронов. Нейронные ансамбли конкурируют, стремясь захватить в свои ритмы наибольшее число нейронов. В каждый текущий момент времени лишь небольшое число ансамблей оказывается образовано наибольшим числом нейронов. Именно они составляют сферу сознания. Ансамбли, теряя нейроны, но тем не менее сохраняя узоры активности (коды), не разрушаются. Информация, хранимая ими, уходит на время в подсознание. Численность нейронов в ансамбле колеблется, причем с разной частотой. Максимально высокая частота обратно пропорциональна длительности  $T$  одиночных веретен альфа-ритма  $T=1/FR$ , где  $F=10$  Гц — частота доминирующего альфа-ритма, константа Г. Бергера. Образы, актуализируемые с равной или с близкими частотами (относительная разность меньше константы  $R=0.1$ ), имеют наибольшие шансы к изменению, кооперации, объединению. Не взаимодействуют в этом смысле, не поддаются захвату, не разрушаются только те ансамбли, доминирующие частоты актуализации которых соотносятся как члены гармонического ряда в соотношении  $1, 1/2, 1/3, 1/4$  и т. д. Заметим, что феномен медленных плавных биений таким частотам не свойствен.

Если актуализированы только два разных образа, то соотношение между периодами их активности равно соотношению между двумя первыми членами ряда. Если в сознании актуализированы три образа, то соотношение между периодами их максимальной активности выражается рядом  $1, 1/2, 1/3$ . Доля  $p$ , отражающая вероятность актуализации в сознании в каждый

текущий момент доминирующего, т. е. повторяющегося чаще остальных образа из нескольких  $M$  возможных, вычисляется по уравнению:

$$p+p/2+p/3+p/4+\dots+p/M=1. \quad (5)$$

Из формулы (5) вытекает зависимость объема словаря  $G$  от объема текста  $V$ , практически важная для решения задач в области квантитативной лингвистики:

$$G=RV+(V-RV\ln(RV)+0.5772)/2, \quad (6)$$

где  $R$  — константа М.Н. Ливанова,  $R=0.1$ . Высокая точность расчетов по уравнению (6) была выявлена в нашей ранней работе (Лебедев, 1985).

Таким образом, наше предположение о циклических нейронных кодах выдержало проверку при оценке объема памяти человека и вероятностей альтернативных исходов в процедурах выбора человеком тех или иных решений. Более того, можно проверить гипотезу еще одним, четвертым способом — путем измерения временных параметров мнемических операций.

### Скорость мнемических операций

В общем случае пакеты волн нейронной активности, кодирующие число  $M$  образов памяти, сравниваются с пакетами волн, порождаемыми числом  $K$  одновременно предъявленных стимулов. Время сравнения,  $t(K)$ , мс/стимул, зависит от указанного выше периода  $T=1/(FR)$  биений частот альфа-ритма:

$$t(K)=T(1-P^K)(1-P)^K/(K+1), \quad (7)$$

где  $P$  — вероятность сравнения без задержки, вызванной несовпадением фаз реактивных и фоновых колебаний нейронной активности в момент воздействия стимула,  $P=(1-R)/M$  и  $T=1/FR=1000$  мс — максимальная длительность задержки,  $F=10$  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  $N$  предварительно запомненных стимулов, т. е. среди элементов кратковременной памяти, то время  $T_c$ , необходимое для позитивного решения в среднем, вычисляется по формуле:

$$T_c = T(H+1)(1-P/H)^2/4N, \quad (8)$$

с обозначениями, принятыми для равенства (7), а время, необходимое в среднем для сравнения одного элемента, хранящегося в памяти, с предъявленным стимулом, подчиняется производной формуле:

$$t = T_c / (H-1). \quad (9)$$

Вывод формул (7)–(9) был опубликован ранее (Lebedev, 1990; 2001). Время, вычисленное по формуле (8) при  $T=1/FR$ ,  $R=0.1$ ,  $F=10$  Гц, как указано выше, и  $M=N>>1$ , — это константа Каваноха (Cavanagh, 1972), равная примерно одной четверти секунды — времени, необходимому для сканирования всего содержимого кратковременной памяти. При  $M=N=1$  значение формулы (8), равное 5 мс, приближается к константе Гайсслера (Geissler, 1990) — 4.5 мс, т. е. равно минимально возможному интервалу, кванту времени, имеюще-

му психологический смысл, по Гайсслеру (Geissler, 1990).

Скорость  $t$  мнемического поиска, вычисленная по формуле (9), совпадает с опытными данными, обобщенными Кавенохом и представленными в табл. 2.

Заметим, что различия в объемах памяти, указанных в табл. 1 и 2, объясняются условиями измерения (например, буквы и слоги в знаках кириллицы или латинского алфавита) и разной концентрацией внимания в найденных выше пределах  $1 \leq k \leq N$  для формулы (2). Обратная связь между размером алфавита элементов и объемом памяти в целом, подчиняясь уравнению (2), не вызывает сомнения.

Таким образом, гипотеза о циклических нейронных кодах выдержала еще одну, пятую экспериментальную проверку.

### Скорость обработки информации человеком

По формуле (2) из опытного значения объема кратковременной памяти  $N$  легко вычислить параметр  $N$ , а из его значения, в свою очередь, константу М.Н. Ливанова  $R$ . Именно так поступили наши сотрудники (аспирантка Ю.М. Стакина и студентка С.С. Абрашина), выполнив опыты по измерению объема кратковременной памяти. Вычисленное значение константы было введено в формулу (7) при значениях параметров  $K=1$  и  $M=2$ . В итоге было рассчитано скрытое время реакции выбора из двух альтернатив при предъявлении на экране компьютера одного из двух равновероятных сигналов (это были цифры 0 или 1) и обнаружено, что вычисленное



Таблица 2

Зависимость скорости мнемического поиска (мс/элемент) от объема кратковременной памяти на разные элементы

Элементы памяти	Объем памяти, число элементов	Скорость, мс/элемент	
		Опыт	Расчет
Слоги	3.4	72	73
Случайные формы	3.8	68	66
Геометрические 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

значение скрытого времени реакции выбора, усредненное для группы испытуемых, с высокой точностью совпадает с опытным значением (см. ниже). Разумеется, измерялось также скрытое время простой сенсомоторной реакции ( $K=1$ ,  $M=1$ ) на зрительные стимулы. В проведении опытов принимали участие сотрудники лаборатории когнитивной психофизиологии. Компьютерные программы предъявления стимулов и анализа опытных данных написаны автором.

В опытах принял участие 21 испытуемый, в основном студенты. Число измерений объема кратковременной памяти в каждом опыте равнялось 20. Размер алфавита цифр для измерения объема памяти составлял 10, размер алфавита в реакциях выбора — 2. Для измерения объема памяти нужно было запомнить строку из

цифр. До или после того, как она погаснет, нужно было начать ввод цифр с клавиатуры в том же самом порядке. Три первые предъявления были тренировочными, остальные девять — экспериментальными. С целью измерения времени простой реакции предлагалось нажать кнопку «1», когда на экране появится цифра «1». Неточные, очень поспешные и слишком медленные нажатия считались ошибочными. Три первые предъявления также были тренировочными, результаты остальных 20 использовались для расчета.

Усредненные результаты испытаний для выборки, состоящей из 21 испытуемого, приводятся в табл. 3.

Найденное по табличным данным и формуле (2) значение параметра  $N$  использовалось для расчета константы М.Н. Ливанова. Значение константы оказалось равным  $R=0.105$

при объеме памяти  $N=7.86$  десятичных цифр; при этом период биений, вычисленный по формуле  $T=1/(FR)$ , равен 948 мс, а скрытое время реакции выбора —

$$t=263+(948/2)(1-(1-0.105)/2)^2=407.8 \text{ мс.} \quad (10)$$

Вычисленное значение скрытого времени реакции выбора для группы испытуемых практически совпало с результатом опытных измерений (411.7 мс). Различие составило около 1%. Это весьма высокая точность, подтверждающая правильность теоретического расчета. Интересно взглянуть, как соотносится наша гипотеза с классическим положением — основным психофизическим законом.

### Субъективные оценки стимулов

Естественно предположить, что чем выше физическая интенсивность стимула, тем больше нейронов вовлекаются в согласованную активность, кодируя стимул, и тем меньше число  $M$  всех, в том числе ассоциированных, посторонних образов в фокусе внимания. Напротив, чем ниже физическая интенсивность стимула, тем больше число  $M$  актуализированных образов памяти, включая посторонние, и медленнее ответные реакции, скрытое время которых подчиняется при известном приближении формуле:

$$T_i=T/(1+h \times I)^2, \quad (11)$$

выведенной ранее из тех же предположений, что и формула (7), где  $I$  — интенсивность стимула в децибелах над порогом и  $h$  — коэффициент пропор-

циональности, неодинаковый для стимулов разных модальностей (Lebedev, 1993). При минимальной интенсивности, вблизи абсолютного порога, число  $M$  актуализированных образов памяти и число  $K$  всевозможных воспринимаемых сигналов, связанных со стимулом и как-то напоминающих стимул, но, по существу, посторонних, много больше одного ( $I_{\min}, M \gg 1, K \gg 1$ ), а при восприятии надпороговых стимулов при их интенсивности, приближающейся к максимальной, число воспринимаемых стимулов равно, по условию измерения, единице, так же как и число ожидаемых стимулов ( $I_{\max}, M=1, K=1$ ). Соотношение переменных перцептивных задержек ( $T_{\max}/T_{\min}$ ), равное соотношению силы ощущений ( $S_{\max}/S_{\min}$ ), при этом условии с учетом известной формулы основного психофизического закона в записи Стивенса (Stevens, 1970) задано уравнением, опубликованным ранее (Lebedev, 1993):

$$T_{\max}/T_{\min}=S_{\max}/S_{\min}=(I_{\max}/I_{\min})^n, \quad (12)$$

в котором  $n$  — показатель степени основного психофизического закона. Вычисленное при заданных условиях по формуле (7) отношение  $T_{\max}/T_{\min}$  равно  $2/R^2$ , а показатель степени в основном психофизическом законе Стивенса выражается формулой:

$$n=\ln(2/R^2)/\ln(I_{\max}/I_{\min}), \quad (13)$$

следующей из равенства (12), где  $R=0.1$  — константа Ливанова. Расчет по уравнению (13) приводит к тем же величинам искомого показателя степени, что и найденная опытным путем формула

Таблица 3

## Характеристики скорости обработки информации и объема кратковременной памяти

Статистические характеристики	Показатели							
	M01	S01	P01	M02	S02	P02	MMA	MME
Mean	263.4	16.7	1.0	411.7	39.7	9.2	9.0	7.86
St_dev	25.3	18.8	2.6	108.1	36.0	16.7	1.0	0.80
43%Cc×100±	7	-11	11	37	-1	-26	26	-7
Asym×100	7	30	26	-3	10	18	-1	-3
Excess×100	-5	93	59	2	-3	23	-5	-3
N	21	21	21	21	21	21	21	21
Gauss_dist	YES	NO	NO	YES	YES	YES	YES	YES

*Примечание*

*M01* — простая реакция, средняя величина скрытого времени, мс;

*M02* — реакция выбора из двух альтернатив, средняя величина скрытого времени, мс;

*S01* — простая реакция, стандартное отклонение, мс;

*P01* — простая реакция, ошибки, %;

*S02* — реакция выбора, стандартное отклонение, мс;

*P02* — реакция выбора, ошибки (преждевременные ответы), %;

*MMA* — максимум объема памяти, число цифр;

*MME* — средний объем кратковременной памяти, число цифр;

*Mean* — усредненное по выборке значение показателя;

*St\_dev* — стандартное отклонение;

*43%Cc×100±* — коэффициент корреляции показателя, умноженный на 100, с величиной скрытого периода простой сенсомоторной реакции (*M01*), 0.43 — критическое для данной выборки значение коэффициента;

*Asym×100* — величина асимметрии распределения индивидуальных значений показателя, умноженная на 100;

*Excess×100* — величина эксцесса распределения индивидуальных значений показателя, умноженная на 100;

*N* — число испытуемых в выборке;

*Gauss\_dist* — заключение о соответствии (Yes) или несоответствии (No) наблюдаемого закона распределения закону Гаусса.

Тетсуняна (Tegthsonian, 1971). Расхождения незначительны. Это еще одна опытная проверка нашей гипотезы о волновой структуре нейронного кода с положительным результатом.

Заметим, что идея постоянства диапазона ощущений  $S_{max}/S_{min}$  была высказана В. Саррисом (1967) раньше публикаций Р. Тетсуняна и наших (Lebedev, 1993; 2000). Но еще раньше,

в 1966 г., близкая идея была высказана В.Д. Небылицыным (Небылицын, 2000). Итак, можно видеть, что временные характеристики памяти, скорость запечатления и извлечения информации из памяти, психолингвистические и психофизические закономерности являются строго определенными функциями нейрофизиологических параметров. Выше речь шла об инструментальных показателях.

Более сложные в оценке и интерпретации тестовые показатели, отражающие свойства личности, также являются функцией параметров электроэнцефалограммы.

#### **Свойства личности, зашифрованные волнами ЭЭГ**

Давно известно, что динамика электрических потенциалов головного мозга имеет яркие индивидуальные особенности. Одна из самых важных личностных особенностей человека — его способность к обучению — также индивидуальна. Каждому со школьной скамьи известно, что одним легче дается обучение, другим — труднее. Результаты предыдущих положительных проверок гипотезы о волновой структуре нейронного кода позволяют высказать в развитие гипотезы еще одно предположение. А именно: мы предполагаем, что электроэнцефалограмму можно читать, как правдивую книгу о самом себе, о психологических особенностях каждого из нас. Мы смотримся в обычное зеркало, чтобы проверить свои представления о внешнем облике. Электроэнцефалограмма — такое же зеркало для отражения нашей внутренней сути, для объективной оценки особенностей нашей личности, наших возмож-

ностей. С целью проверки данной гипотезы были выполнены следующие опыты.

#### *Методика*

Достаточно расслабиться на 20 минут с закрытыми глазами и электродами, размещенными на голове, чтобы оценку не только медицинских показателей, но и психологических особенностей человека выполнил с приемлемой точностью «железный» эксперт, неподкупный компьютер (конечно, тоже иногда ошибающийся, но беспристрастный и ошибающийся реже, чем человек). У множества школьников, главным образом старшеклассников, мы записали электроэнцефалограмму в лобных, центральных и затылочных областях головного мозга в состоянии покоя, при закрытых глазах. Результирующий вектор из 300 электрофизиологических показателей для каждого школьника мы сопоставили с его усредненными оценками за предыдущий год по основным предметам. Выбирались ЭЭГ-показатели, отличающиеся наибольшей степенью связи (линейные коэффициенты корреляции по Пирсону) и наибольшей толерантностью (взаимной независимостью, оцениваемой по множественным коэффициентам корреляции). Затем по программам множественного линейного регрессионного анализа (Митропольский, 1971) мы находили уравнения, с наибольшей точностью обеспечивающие прогноз школьных оценок. С учетом различного уровня требований, предъявляемых в разных школах, при объединении данных использовалась нормализация школьных оценок.

### Результаты

В *табл. 4* показаны результаты прогноза, взятые из начальной, средней и конечной части всего списка испытуемых, включавшего в себя 255 школьников (преимущественно старшеклассников) из разных регионов России. Уравнение для расчета показателей успешности обучения оказалось следующим:

$$IQP = 114.733 - 1.046(P56) + 0.019(A5or) + 0.018(A4or) + 0.631(P23), \quad (14)$$

где

*IQP* — вычисленный по ЭЭГ показатель успешности обучения;

*P56* — показатель синхронизации, %, затылок слева — затылок справа (O1–O2);

*A5or* — мощность колебаний, затылок слева (O1) в полосе 12 Гц;

*A4or* — мощность колебаний, затылок справа (O2) в полосе 11 Гц;

*P23* — показатель синхронизации, %, лоб справа — центр слева (F4–C3).

В скобках — коды отведений согласно Международной классификации «10/20».

В *табл. 4* приводятся показатели успешности обучения (норма 100, стандартное отклонение 10 условных единиц) и удвоенная ошибка среднего значения (*Ett*) для нескольких школьников из общей выборки. Из большого списка выбраны школьники с наименьшими, средними и наибольшими показателями успешности обучения. При сопоставлении значений параметров ЭЭГ со значениями успешности обучения можно заметить, в полном соответствии с уравнением (14), что высокая мощность колебаний в полосе альфа-ритма и высокая согласованность коле-

баний в центральной области слева и в лобной области справа сочетается с высокими показателями успешности обучения. Противоположным образом успешность обучения связана с корреляцией колебаний в симметричных точках затылочных областей справа и слева. Чем менее связаны колебания в этих корковых зонах, тем выше успехи в обучении школьников.

Коэффициент корреляции между вычисленными по ЭЭГ и реальными достижениями школьников, равный 0,488, значимо превышает нулевое значение ( $p < 0.01$ ). Способность школьника к обучению, включая интеллектуальную одаренность, с приемлемой точностью может быть рассчитана по биотокам мозга.

Можно ли вычислить подобным образом иные личностные особенности? Как выяснилось, можно. Определенные комбинации из параметров электроэнцефалограммы оказались связанными с теми или иными личностными особенностями, обычно вычисляемыми по психологическим тестам.

В *табл. 5* приведен пример прогноза психологических особенностей одного из испытуемых по параметрам его электроэнцефалограммы. Полная расшифровка показателей, составляющих психологический портрет личности и обозначенных кодами десяти основных и трех контрольных шкал теста ММРІ, приводится в соответствующих руководствах (например, Рукавишников и др., 1993), а в *табл. 5* даны лишь заголовки, выбранные нами из контекста каждого описания. Заметим, что заголовки, выдаваемые нашей экспертной системой, предназначены для психолога, беседующего с пациентом. Сам испытуемый может неверно истолковать столь краткую характеристику какой-то

Таблица 4

Реальные (IQR) и вычисленные (IQP) по параметрам электроэнцефалограммы (P56, A5or, A4or, P23) показатели успешности обучения (всего 255 учеников)

Коды фамилий школьников	Показатели успешности обучения						
	IQR	P56	A5or	A5or	P23	Err	IQP
M13LEGIG	88	45	25	27	27	3	86
9363BERE	90	47	53	54	30	3	86
M09ZDOTA	94	47	23	43	33	2	88
M14RADCH	94	46	61	74	32	2	89
071KOTIN	88	43	98	89	30	2	92
F11TNAGI	88	38	41	43	24	2	92
M10TNAGI	94	42	107	133	30	2	94
F11YAR1	98	38	44	94	32	1	98
F12CONDR	98	41	20	35	42	1	99
9350BERE	102	37	100	105	32	1	100
M11DEDKO	102	38	94	125	33	1	100
F09SABLI	102	36	74	97	32	1	100
M11MASHI	98	36	77	86	33	1	101
M12LASTO	94	33	58	54	32	1	102
NOVIK81F	128	29	38	51	36	2	109
LIVEN86M	128	29	107	117	38	2	113
SIRYE82M	128	30	110	123	43	2	115
STREL87F	128	27	118	110	38	2	115
OVCIN86F	128	26	113	110	38	3	116
CAPLY86F	128	26	98	128	40	3	117
DJAMA84M	128	26	117	123	39	3	117

*Примечание*

P56 — показатель синхронизации, %, затылок слева — затылок справа (O1–O2);

A5or — мощность колебаний, затылок слева (O1) в полосе 12 Гц;

A4or — мощность колебаний, затылок справа (O2) в полосе 11 Гц;

P23 — показатель синхронизации, %, лоб справа — центр слева (F4–C3);

Err — ошибка вычисленного показателя (IQP) успешности обучения.

В скобках — коды отведений согласно Международной классификации «10/20».

собственной личностной черты, не зная соответствующего контекста.

Регрессионные уравнения для расчета значений основных шкал теста

ММРІ по параметрам электроэнцефалограммы рассчитывались для одной части испытуемых, а для другой части по найденным уравнениям вычислялись

искомые значения параметров. Подробнее это рассматривается в работе (Лебедев, 2002). Здесь же следует заметить, что коэффициент корреляции между прогнозируемым и опытным значениями взятого для примера параметра 4PD оказался +0.556 при числе испытуемых, данные которых использовались для вывода уравнений, 69. Краткая характеристика взятой здесь для примера психологической особенности (шкала 4PD): на одном полюсе, при низких значениях показателя, — терпелив, соблюдает нормы поведения; на другом, при высоких значениях, —

нетерпелив, эгоистичен. Заметим еще раз, что интерпретацией полученных результатов должен заниматься психолог.

Таким образом, не задавая ни одного вопроса испытуемому, только записав его электроэнцефалограмму, притом в состоянии релаксации, при закрытых глазах, в отсутствие какой-либо заданной или произвольной деятельности, возможно с приемлемой точностью выявить психологический портрет человека, узнать, например, насколько он умен, энергичен, предприимчив, совестлив, тревожен и т. п. Ранее

Таблица 5

**Психологический портрет одного из испытуемых, вычисленный по параметрам электроэнцефалограммы**

Код	Оценка	Краткое описание	Границы
OSI	(093)	общительный, открытый	+ (88–110)
DDD	(094)	обычно внимателен, активен	+ (90–110)
4PD	(096)	терпелив	+ (94–104)
5MF	(098)	она женственна, он мужествен	+ (86–112)
6PA	(099)	уравновешен	+ (96–104)
8SC	(101)	упрямый, неприступный	+ (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)

*Примечание.* В первом столбце — код шкалы и в круглых скобках рядом — численное значение показателя у данного испытуемого, вычисленное по параметрам ЭЭГ. Во втором столбце — краткое описание личностной черты. В третьем столбце, в скобках, — нижняя и верхняя границы нормы. Знаки +, ++ и +++ здесь обозначают следующее: + — признак в пределах нормы  $0.8M + \text{среднее} - 0.8M$ ; ++ — 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 (в данном примере отсутствует).

было найдено, что по небольшим наборам параметров электроэнцефалограммы также уверенно можно судить об интеллектуальной одаренности, в частности, о способности ребенка успешно усваивать стандартную школьную программу обучения (Лебедев, Артеменко, Белехов, 1997; Lebedev, Artemenko, 1997). Трудное, но перспективное новое направление исследований — поиск ЭЭГ-индикаторов, позволяющих в реальном времени предвидеть переживания (Лебедев, Князева, 1999) и действия (Maltzeva, Geissler, Basar, 2000) человека.

В проведении опытов принимали участие О.И. Артеменко, А.В. Маркина, Т.С. Князева, Н.А. Скопинцева, Л.П. Бычкова, И.В. Мальцева, Н.Б. Пасынкова, И.К. Шеховцев, Ю.А. Шпатенко, Ю.Н. Белехов, Н.Б. Горюнова, Ю.М. Стакина, И.Ю. Мышкин, Б.Г. Бовин, Е.А. Киселева, А.Х. Пашина и другие наши сотрудники.

### Обсуждение

Гипотеза о циклических нейронных кодах внутреннего мира человека позволила количественно объяснить классические феномены — объем памяти человека и скорость мнемических операций, составляющих основу принятия решений человеком.

Ранее было доказано, что по небольшим наборам параметров электроэнцефалограммы можно уверенно судить об интеллектуальной одаренности, в частности о способности ребенка успешно усваивать стандартную школьную программу обучения (Лебедев и др., 1997). В настоящее время ведется поиск объективных электроэнцефалографических показателей музыкальной одаренности и намечен поиск более широкого круга

индикаторов разных способностей — художественных, спортивных, лингвистических.

Еще одна важная задача, вполне созревшая для решения, заключается в поиске некоего общего механизма, раскрывающего связь пространственного кодирования (Соколов, Вайткявичус, 1989; Фомин, Соколов, Вайткявичус, 1979) 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 (Шульгина, 1993). Несомненно, именно циклическая активность нейронных ансамблей влияет на изменение синаптических связей после прекращения стимуляции. Напрашивается 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 активности. Ее восстановление происходит также не хаотически. Фазовые соотношения восстанавливаются в прежнем порядке. Для сравнения: при замедлении движения поезда вплоть до его остановки и последующем затем ускорении фазовые соотношения между позициями какой-нибудь метки (определенной гайки или спицы) на каждом колесе восстанавливаются с высочайшей точностью. Ничто не мешает устойчивости фазовых соотношений, определяющих



временную структуру нейронного кода, до тех пор, пока число согласованно пульсирующих нейронов превышает критическую величину, указанную выше. При этом отдельные нейроны могут замолкать, выключаться, включаться и функционировать попеременно в составе разных ансамблей, т. е. в составе разных единиц памяти.

Известный факт многообразия нейронов по функциям, размерам и числу связей также легко согласуется с гипотезой о циклических нейронных кодах.

Нетрудно представить, например, что первая по порядку волна импульсации, порождаемая какой-либо группой нейронов в составе определенного ансамбля, вызывается активностью нейронов, размещенных преимущественно в ретикулярных структурах, следующая волна определена вовлечением нейронов старой коры, нейронов гиппокампа, третья по порядку волна сильнее всего обусловлена активностью каких-то определенных зон новой коры, четвертая — других областей мозга и т. д., но при этом все без исключения группы нейронов со связанной активностью в составе одного и того же ансамбля образуют некое единство — ту или иную единицу внутреннего мира человека. Изменения циклической активности нейронов первичны, а изменения синаптических проводимостей вторичны.

## Литература

Бергер Г. Электроэнцефалограмма человека // Успехи современной биологии. 1933. Т. 26. Вып. 3. С. 94–95.

Бехтерева Н.П. Здоровый и больной мозг человека. Л.: Наука, 1980.

## Заключение

Согласно нашей теории, развивающей представления М.Н. Ливанова (Ливанов, 1934; 1940; 1965; 1989), внутренний мир человека закодирован когерентными волнами активности центральных нейронов коры и подкорковых структур. В этой теории две нейрофизиологические константы, М.Н. Ливанова и Г. Бергера (Бергер, 1933), были впервые включены в формулы для расчета объема памяти и внимания, скорости поиска сведений в памяти и принятия решений, точности субъективных оценок и ряда других психологических показателей (Лебедев, 1985; 1997; Маркина и др., 1995; Lebedev, 1983; 1990; 1993). Установлено, что психологический портрет личности после обучения нашей экспертной системы также может быть вычислен с приемлемой точностью только по параметрам электроэнцефалограммы, без единого вопроса к испытуемому. Выведенные из нейрофизиологических предпосылок уравнения выражают глубокую взаимосвязь широкого круга психологических явлений. Они наглядно выражают красоту и мощь нового, системного направления в психологии, инициированного Б.Ф. Ломовым (Ломов, 1984).

Гартли Д. Размышления о человеке, его долге и упованиях // Английские материалисты XVIII века. М.: Просвещение, 1967.

Забродин Ю.М., Лебедев А.Н. Психология и психофизика / Под ред.

- М.Н. Ливанова и Б.Ф. Ломова. М.: Наука, 1977.
- Зубов Н.В.* Исследование феноменологических уравнений нейродинамики: Автореф. дис. ... канд. психол. наук. Л., 1980.
- Лебедев А.Н.* Единицы памяти и связанные с ними особенности речи // Психологические и психофизиологические исследования речи / Под ред. Т.Н. Ушаковой. М.: Наука, 1985. С. 26–44.
- Лебедев А.Н.* Константа М.Н. Ливанова в количественном описании психологических явлений // Психол. журн. 1997. Т. 18. № 6. С. 96–105.
- Лебедев А.Н., Артеменко О.И., Белехов Ю.Н.* Диагностика интеллектуальной одаренности // Труды Института психологии РАН. Вып. 2. М.: ИП РАН, 1997. С. 274–281.
- Лебедев А.Н., Князева Т.С.* Электрофизиологические предикторы субъективных оценок музыки разных композиторов // Психол. журн. 1999. Т. 20. № 6. С. 72–79.
- Лебедев А.Н., Луцкий В.А.* Ритмы электроэнцефалограммы — результат взаимосвязанных колебательных нейронных процессов // Биофизика. 1972. Т. 17. Вып. 3. С. 556–558.
- Лебедев А.Н.* Циклы памяти // Нейрокомпьютер как основа мыслящих ЭВМ / Под ред. А.А. Фролова, Г.И. Шульгиной. М.: Наука, 1993. С. 53–58.
- Лебедев А.Н.* Когнитивная психофизиология на рубеже столетий // Психол. журн. 2002. Т. 23. № 1. С. 85–92.
- Лефевр В.А.* Формула человека. Контуры фундаментальной психологии. М.: Прогресс, 1991.
- Ливанов М.Н.* Анализ биоэлектрических колебаний в коре головного мозга у кролика // Сов. невропатология, психиатрия и психогигиена. 1934. Т. 3. Вып. 11–12. С. 98–115.
- Ливанов М.Н.* О неравномерном развитии некоторых частотных процессов, слагающих электроцефrogramму, и о ритме Бергера // Физиол. журн. СССР им. И.М. Сеченова. 1940. Т. 28. Вып. 2–3. С. 157–171.
- Ливанов М.Н.* Торможение в нейронных системах коры головного мозга // Рефлексы головного мозга: Сборник трудов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня выхода в свет книги И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга». М.: Наука, 1965. С. 64–71.
- Ливанов М.Н.* Избранные труды. М.: Наука, 1989.
- Ломов Б.Ф.* Методологические и теоретические проблемы психологии. М.: Наука, 1984.
- Майоров В.В., Мьшикин И.Ю.* М-машина — модель кратковременной памяти // Нейрокомпьютер как основа мыслящих машин / Под ред. А.А. Фролова, Г.И. Шульгиной. М.: Наука, 1993. С. 137–145.
- Маркина А.В., Мальцева И.В., Лебедев А.Н.* Связь параметров альфа-ритма с объемом кратковременной памяти // Психол. журн. 1995. Т. 16. № 2. С. 128–132.
- Митропольский А.К.* Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971.
- Небылицын В.Д.* Проблемы психологии индивидуальности. Избранные психологические труды / Под ред. А.В. Брушлинского, Т.Н. Ушаковой. М.; Воронеж: НПО «Модэк», 2000.
- Песин Я.Б.* О поведении решений одного сильно нелинейного дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом // Дифференц. уравнения. 1974. Т. 10. № 6. С. 1025–1036.
- Рукавишников А.А., Рукавишникова Н.Г., Соколова М.В.* (составители) Пособие по применению ММРП / Под ред. В.И. Чиркова. Ярославль: Изд-во НППЦ «Психодиагностика», 1993.
- Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г.* Нейроинтеллект. От нейрона к нейрокомпьютеру. М.: Наука, 1989.

Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. Искусственные органы чувств. М.: Наука, 1979.

Шульгина Г.И. Основные принципы системной организации нейронов головного мозга при обработке, фиксации и воспроизведении информации // Нейрокомпьютер как основа мыслящих ЭВМ / Под ред. А.А. Фролова, Г.И. Шульгиной. М.: Наука, 1993. С. 23–38.

Cavanagh J.P. Relation between the immediate memory span and the memory search rate // Psychological Review. 1972. V. 79. P. 525–530.

Geissler H.-G. Foundation of quantized processing // Psychophysical explorations of mental structures // Geissler H.-G. (ed.) Psychophysical explorations of mental structures. Toronto: Hogrefe and Huber Pbl., 1990. P. 193–210.

Lebedev A.N. Cyclical neural codes of human memory and some quantitative regularities in experimental psychology // Geissler H.-G. (ed.) Psychophysical explorations of mental structures. Toronto: Hogrefe and Huber Pbl., 1990. P. 303–310.

Lebedev A.N., Myshkin I.Yu., Mayorov V.V. The wave model of memory // Holden A.V., Kryukov V.I. (eds.) Neurocomputers and attention. Vol. 1. Neurobiology, synchronization and chaos. Manchester: Manchester University Press, 1990. P. 53–59.

Lebedev A.N. Imaginary dimensions of subjective spaces // Psychometric Methodology. Proceedings of the 7th European Meeting of the Psychometric Society in Trier. Stuttgart, N. Y.: Gustav Fischer Verlag, 1993. P. 258–262.

Lebedev A. N. Derivation of Stevens's exponent from neurophysiological data // Behavioral and Brain Sciences. 1993. V. 16. № 1. 1993. P. 152–153.

Lebedev A.N., Artemenko O.I. EEG Indices of intellectual abilities // Quantitative and Topological EEG and MEG analysis. Third International Hans Berger Congress. Jena: Druckhaus Mayer Verlag GMBH Jena-Erlangen, 1997. P. 133–135.

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

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

Lebedev A.N., Pasyukova A.V., Shpatenko Yu.I. Reaction time as a function of alpha-rhythm frequency // Sinz R., Rosenzweig M. (eds.) Psychophysiology, memory, motivation and event-related potentials in mental operations. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1983. P. 525–529.

Maltseva I.V., Geissler H.-G., Basar E. Alpha oscillations as an indicator of dynamic memory operations — anticipation of omitted stimuli // International Journal of Psychophysiology. 2000. V. 36. P. 185–197.

McGraw K.M. Subjective probabilities and moral judgments // Journal of Experimental and Social Psychology. 1985. V. 14. P. 501–518.

Sarris V. Adaptation level theory: Two critical experiments on Helson's weighted average model // American Journal of Psychology. 1967. V. 80. P. 331–335.

Stevens S.S. Neural events and the psychophysical law // Science. 1970. V. 170. P. 1043–1050.

Teghtsoonian R. On the exponent in Stevens's law and the constant in Ekman's law // Psychological Review. 1971. V. 78. P. 71–80.