

ДИСКУССИИ

УДК 159.9.07:51–7

**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВНИМАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОСПРИЯТИЯ**

© 2008 г. А. В. Гласко

*Кафедра “Высшая математика” Московского государственного технического университета  
им. Н.Э. Баумана,  
e-mail: petronyi@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.04.2007 г.

Принята в печать 09.06.2008 г.

Предлагается новая модель процесса восприятия элементарного внешнего стимула, основанная на динамике внимания субъекта восприятия. Вводится локальная количественная мера внимания на основе связи внимания с возбудимостью анализатора. Проводится сравнение решения предлагаемой модели с результатами эксперимента по исследованию изменения распределения возбудимости зрительного анализатора в процессе восприятия. Предлагается также формула связи внимания с амплитудой вызванного потенциала как функцией времени. Теоретическая динамика амплитуды сравнивается с экспериментальной. Приводится пример восстановления вызванного потенциала на основе предлагаемой теории. В рамках модели выводится закон Пьерона – Забродина–Лебедева. Вытекающая из модели зависимость реакции от интенсивности стимула соответствует закону Стивенса.

*Ключевые слова: внимание, селективность, ресурсы внимания, теория интеграции признаков, градиент внимания, возбудимость пунктов анализатора, амплитуда вызванного потенциала, закон Стивенса, закон Пьерона–Лебедева–Забродина.*

**The Model of Attention Dynamics in Perception Process**

A. V. Glasko

*Department of the Higher Mathematics, Bauman State Technical University, Moscow,  
e-mail: petronyi@mail.ru*

A new model of perception of an elementary external stimulus is proposed on the basis of attention dynamics of a subject of perception. A local quantitative measure of attention is introduced with regard to connection of attention with analyzer excitability. The solution of the model is compared to the dynamics of distribution of the visual analyzer excitability in the process of perception measured experimentally. A formula of time dependence of attention on the evoked potential amplitude is presented. The theoretical amplitude dynamics is compared to the experimental results. The example of reconstruction of evoked potential on the basis of the model is given. Pieron's law is deduced in the framework of the model. The theoretical relationship between the reaction and stimulus intensity corresponds to the Stevens's law.

*Key words: attention, selective attention, attentional resources, feature-integration theory, gradients of attention, excitability, evoked potential amplitude, Stevens's law, Pieron–Lebedev–Zabrodin's law.*

Одной из наиболее современных теорий внимания является теория ресурсов [15]. В отличие от структурных теорий эта теория способна объяснить поведение человека в условиях двойных заданий, т.е. распределения внимания. Теория недифференцированных ресурсов не в состоянии объяснить важность “структурной удаленности” между двумя заданиями для результативности их выполнения. Для решения этой проблемы К. Уикенс [36] предложил концепцию множественных ресурсов, предпо-

лагающую наличие специфических изолированных ресурсов, относящихся к разным структурным составляющим системы обработки информации, жестко разделенным по определенным качественным признакам (модальности, стадии обработки, коды). Однако последние экспериментальные данные показывают, что степень изолированности ресурсов является менее выраженной, чем это предполагалось. Например, Э. Трейсман [35] обнаружила существование кроссмодальное взаимодействие

между заданиями, выполняемыми в слуховой и зрительной модальностях, хотя и меньшее, чем внутримодальное взаимодействие.

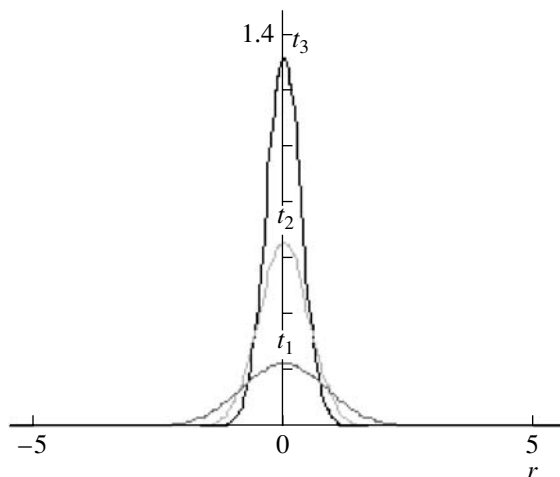
Предлагаемая в настоящей работе теория внимания основана на представлениях, подобных теории ресурсов: селективность внимания объясняется нехваткой ресурсов, т.е. (гипотетическим) законом сохранения. В любой фиксированный момент времени внимание считается распределенным по всему множеству стимулов, доступных восприятию, точнее по абстрактному психическому пространству (ПП), в которое эти стимулы проецируются. С течением времени распределение внимания непрерывно меняется. Этот процесс изменения (динамика внимания) описывается на основе дифференциального уравнения в частных производных. Таким образом, внимание участвует и играет фундаментальную роль как при сознательном, так и при бессознательном восприятии (автоматической обработке), при восприятии как элементарных физических, так и сложных семантических стимулов. Сознательно воспринимается тот стимул, которому уделяется *наибольшее* внимание. В рамках таких представлений очевидным образом объясняется, к примеру, эффект с собственным именем: хотя до момента звучания имени максимум внимания приходился на другой стимул, но в точке ПП, которую в последствии проецируется собственное имя, уделялось небольшое (но не нулевое) количество внимания. В момент звучания имени начинается перераспределение внимания, в результате которого максимум внимания приходится уже на точку ПП, соответствующую восприятию имени, и сознание переключается на восприятие имени. В рамках предлагаемой теории возможно описание взаимодействия между различными психическими процессами в зависимости от расстояния между ними в ПП и характеристик стимулов, их порождающих. Таким образом, концепция жесткой изоляции ресурсов заменяется концепцией зависимости степени взаимодействия от расстояния, допускающей, к примеру, кроссмодальное взаимодействие, хотя, возможно, и более слабое, чем внутримодальное. Недостатком ресурсной теории является также то, что “не было сделано попыток перебросить мост через пропасть, отделяющую концепцию распределения ресурсов от ее структурной реализации в нейронных сетях” [15]\*. Хотя автор настоящей ра-

боты не претендует на решение этой проблемы, здесь предлагается на уровне идей две различных интерпретации излагаемой теории в масштабе нейронных сетей. Первая из них основана на том, что все физиологические процессы, происходящие в нейронной сети, нуждаются в веществах, переносимых жидкостями внутри мозга, например кровью (см. также [10]). Эти жидкости или содержащиеся в них вещества и играют роль ограниченных ресурсов. Вторая интерпретация основана на аналогии между вниманием и теплотой, т.е. между распространением возбуждений в нейронной сети, сопровождаемом латеральным и возвратным торможением и распространением тепла (возбуждений атомов) в кристаллической решетке.

В настоящей работе излагаются *основы* предлагаемой теории: речь идет о восприятии отдельного *элементарного* стимула, например мгновенной точечной вспышки света на экране, тоновой посылки или точечного прикосновения к поверхности кожи. Параметром, характеризующим “значимость” или “силу” такого стимула, является его интенсивность. Обобщение теории на восприятие сложных стимулов, по крайней мере зрительных, возможно на основе синтеза с теорией интеграции признаков Э. Трейсман [15, 21], при отказе от прожекторных представлений о внимании. Вместо луча прожектора, имеющего строгую границу и способного лишь расширяться или сужаться, но не меняться по интенсивности, предлагается непрерывное распределение внимания по всему ПП, которое, однако, может быстро убывать при удалении от “центра внимания” и быть существенно отличным от нуля только в некоторой окрестности этого центра, соответствующей лучу Э. Трейсман (рис. 1). Подобную идею (идею “градиента внимания”) ранее высказывали Дж. Мангун и С. Хиллиард [28, 29]. При этом предлагаемое в настоящей работе уравнение может описывать динамику внимания в пределах отдельных карт Э. Трейсман. Некоторые идеи обобщения предлагаемой здесь теории на восприятие сложных стимулов и систем элементарных стимулов изложены также в работах [7, 8].

Предлагаемая теория не объясняет таких явлений, как затухание ориентировочного рефлекса при многократных повторениях стимула и его восстановление при изменении стимула. Учет этих явлений возможен на основе объединения предлагаемой теории с теорией

\* Из предисловия проф. Е.Н. Соколова



**Рис. 1.** При  $t_1 > t_2 > t_3$  рисунок иллюстрирует решение уравнения теплопроводности (2) для случая, когда в начальный момент времени субстанция сконцентрирована в точке  $x = 0$ . С течением времени она постепенно рассеивается по пространству. При  $t_1 < t_2 < t_3$  рисунок иллюстрирует решение (9) уравнения (8) с дополнительным условием (6) на первом этапе процесса восприятия: распределение внимания в окрестности проекции  $O$  стимула в психическом пространстве в три последовательных момента времени. Графики демонстрируют постепенную концентрацию внимания на стимуле. Через  $r$  обозначена величина отклонения от точки  $x = 0$ .

**Fig. 1.** For  $t_1 > t_2 > t_3$  the figure illustrate the solution of the diffusion equation (2) for the case, when by  $t = 0$  a substance is concentrated in the point  $x = 0$ . Next it is dissipating in the space. For  $t_1 < t_2 < t_3$  the figure illustrate the solution (9) of the equation (8) by the condition (6) on the first phase of the perception process: the distribution of the attention in the neighborhood of the projection  $O$  of the stimulus in the psychical space in moments  $t_1, t_2, t_3$ . The graphs demonstrate that the attention is concentrating on the stimulus.  $r$  is the magnitude of the deviation from the point  $x = 0$ .

нейронной модели стимула Е.Н. Соколова [19].

В следующем разделе перечисляются основные (на наш взгляд) качественные особенности динамики внимания в процессе восприятия. На основе этих свойств внимания в дальнейшем строится математическая модель динамики внимания в процессе восприятия элементарного физического внешнего стимула [10], базирующаяся на уравнении для плотности внимания  $I(x, t)$ . Способы измерения плотности внимания определяются в разделах 3, 4. При этом используется прежде всего из-

вестная связь внимания и времени реакции (ВР) на тестирующие стимулы [15]. Более конкретно, плотность внимания  $I(x, t)$  определяется как величина, пропорциональная изменению возбудимости (величины, обратно пропорциональной ВР [23]). Такое определение возможно благодаря методу, разработанному в школе Е.И. Бойко [3, 16, 24] и эффективно используемому для *локального* измерения возбудимости [23]. Кроме того, внимание, как известно [15], влияет также на амплитуды колебаний вызванного потенциала (ВП). Это также позволяет измерять плотность внимания. В разделах 3, 4, 5 проводится сравнение предсказаний модели с экспериментальными результатами: динамикой возбудимости различных пунктов зрительного анализатора в процессе целенаправленного восприятия [22], динамикой амплитуды вызванного потенциала (ВП), законом Стивенса [20]. В рамках модели выводится также известный экспериментальный закон Пьерона–Забродина–Лебедева [11, 12].

## 1. КАЧЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВНИМАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОСПРИЯТИЯ

Характерной качественной особенностью динамики внимания является свойство селективности внимания. Усиление внимания к одному из воспринимаемых (воображаемых, мыслимых и пр.) стимулов с необходимостью приводит к ослаблению внимания к другим стимулам [1, 2, 15]. Подобная дополнительность восприятия имеет место как внутри одной модальности, так и между различными модальностями. В рамках теории ресурсов [15] селективность внимания объясняется нехваткой количественно ограниченных ресурсов, т.е. на основе закона сохранения. Развивая эту идею, отметим следующее [10]. *Селективное свойство внимания дает качественную основу для гипотезы о сохранении внимания.* Более того, оно указывает на очевидную аналогию между вниманием и физическими субстанциями типа газа, раствора или тепла. Действительно, благодаря этому свойству внимание естественно трактовать как некоторую сохраняющуюся целостность: внимание “не возникает ниоткуда и не исчезает в никуда”, а лишь *пересосредоточивается* или *перераспределяется* с одного стимула (внешнего или внутреннего) на другой, из одного “места” в другое.

Вторая качественная особенность динамики внимания обычно не выделяется в качестве отдельного свойства в силу своей очевидности. В процессе восприятия внешнего стимула последний сначала привлекает к себе внимание, а затем внимание отвлекается от него. В силу селективности (сохранения) рост внимания к стимулу означает концентрацию внимания, а понижение внимания к стимулу – рассеяние внимания (по отношению к нему). Итак, *в процессе восприятия внимание сначала концентрируется на стимуле, а затем рассеивается по отношению к нему.*

Третья качественная особенность динамики внимания состоит в том, что чем “сильнее” стимул, тем быстрее он привлечет к себе внимание и тем большее внимание он к себе привлечет. При этом в случае элементарного стимула под “силой” понимается его интенсивность. Так, внезапный взрыв петарды за окном мгновенно привлекает к себе повышенное внимание (отвлекая от других дел), в то время как шорох листьев обычно остается незамеченным.

На основе перечисленных свойств внимания в дальнейшем строится модель динамики внимания в процессе восприятия элементарного физического стимула.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОСПРИЯТИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ВНЕШНЕГО СТИМУЛА

Построим математическую модель динамики внимания испытуемого в процессе восприятия внешнего стимула. С этой целью рассмотрим сначала абстрактное метрическое ПП  $S$  с определенной на нем мерой  $\mu$  и введем формально в этом пространстве плотность внимания  $I(x, t)$ ,  $x \in S$ ,  $t$  – (безразмерное, относительное) время. Тогда гипотеза о сохранении внимания (свойство селективности) запишется в виде

$$\int_S I(x, t) d\mu = \text{const},$$

(полное количество внимания в ПП есть величина постоянная). Глобальная структура ПП,

\* Метрическое пространство – это множество, для которого введено понятие расстояния между элементами (метрики). Мера – это обобщение понятия площади или объема на произвольные множества. Мера позволяет строить интеграл.

а также детали его структуры не являются предметом обсуждения настоящей работы, они определяются спецификой картирования [26]. Для настоящей работы существенно только, чтобы ПП было локально отождествимо с областями двухмерного евклидова линейного пространства  $R^2$ , т.е. окрестности отдельных точек ПП можно было рассматривать как плоские области. Такие области можно трактовать, с одной стороны, как карты Э. Трейсмана, а с другой – как локальные области слоев коры головного мозга (КГМ). В настоящей работе речь пойдет о восприятии элементарного внешнего раздражителя – точечный источник света, короткая тоновая посылка и прочее, – характеризуемого интенсивностью  $\varphi$  в относительных единицах. В общем случае под  $\varphi$  можно понимать некоторую обобщенную характеристику стимула, учитывающую его семантическое содержание [8]. Если интенсивность стимула  $\varphi$  достаточно мала, то вызванное (непосредственно) действием стимула перераспределение внимания происходит в основном в пределах малой окрестности  $S_0$  точки  $O$  ПП, в которую он проецируется. Эту окрестность мы и будем считать плоской областью, а проекцию стимула в ПП примем за начало координат  $O(0; 0)$  в этой области. Ввиду сказанного закон сохранения приближенно выполняется в пределах области  $S_0$

$$\int_{S_0} I(x, t) dx = \text{const} \quad (1)$$

(поток внимания через границы области пренебрежимо мал). Если же интенсивность стимула относительно велика, он вызывает глобальное (межмодальное) перераспределение внимания по всему ПП. В настоящей работе рассматривается случай “малой” интенсивности и строится уравнение, описывающее динамику внимания в пределах области  $S_0$  за достаточно малый промежуток времени (порядка ВР). Это уравнение описывает процесс, вызванный непосредственно действием стимула. Однако этот процесс может инициировать новые процессы в различных (ассоциативных) областях ПП. Вероятно, эти процессы описываются тем же уравнением, только роль  $\varphi$  для них, возможно, играет уже не интенсивность исходного стимула, а некоторая характеристи-

\*\* Подчеркнем, что термин “малый” следует понимать в указанном выше смысле, а не в том смысле, что он близок к абсолютному порогу восприятия.

ка первичного процесса (интенсивность “внутреннего” стимула).

Построим уравнение для функции  $I(x, t)$  в области  $S_0$ . Будем основываться на описанных выше качественных особенностях динамики внимания. Ввиду равенства (1) и указанной выше аналогии между динамикой внимания и динамикой тепла, газа или раствора, естественно искать его в форме уравнения теплопроводности (уравнения диффузии)

$$I_t = a_0^2 \Delta I, \quad (2)$$

где  $a_0^2$  – положительный постоянный коэффициент,  $I_t$  – производная плотности внимания  $I(x, t)$  по времени, а  $\Delta$  – оператор Лапласа. Это уравнение описывает эволюцию распределения непрерывной субстанции (газа, тепла и т.д.), характеризуемой плотностью  $I(x, t)$ , по пространству при заданном ее распределении в начальный момент времени. Важнейшей для нас особенностью уравнения (2) является то, что его решение удовлетворяет закону сохранения (1). Однако его решение удовлетворяет также и закону возрастания энтропии ( $a_0^2 > 0$ ): как бы ни была распределена субстанция  $I(x, t)$  в начальный момент времени, с течением времени она постепенно равномерно распределяется по пространству (“рассеивается”). Так, если в начальный момент времени субстанция была сконцентрирована в точке  $x = 0$ , то с течением времени она будет эволюционировать так, как показано на рис. 1, где  $t_1 > t_2 > t_3$ ,  $r = \pm R = \pm|x|$ . В то же время внимание в процессе восприятия сначала концентрируется на стимуле, а затем уже рассеивается по отношению к нему (отвлекается от него). Описание процесса концентрации внимания уравнением (2) кажется проблематичным. Известно, что обращение времени путем замены  $t \rightarrow -t$  в этом уравнении приводит к некорректной задаче. Тем не менее в работах [5, 6] показано, что преобразование времени  $t \rightarrow t^{-1}$  в уравнении (2) приводит к уравнению

$$I_t = -\frac{a_0^2}{t^2} \Delta I, \quad (3)$$

которое при выборе дополнительного условия в виде

$$I(x, +\infty) = \delta(x) \quad (4)$$

( $\delta(x)$  – функция Дирака) описывает процесс концентрации субстанции (в данном случае – внимания) в точке  $x = 0$ . При этом задача (3),

(4), корректна. Для того чтобы концентрация внимания через некоторое время сменялась рассеянием, добавим в правую часть уравнения (3) “классическое” слагаемое с положительным, возрастающим с течением времени коэффициентом

$$I_t = -\frac{a_0^2}{t^2} \Delta I + k(\varphi) t \Delta I, \quad (5)$$

а дополнительное условие (4) запишем в виде

$$I_{k=0}(x, +\infty) = \delta(x). \quad (6)$$

Исходя из требования качественно-правильной зависимости процесса  $I(x, t)$  от величины интенсивности  $\varphi$ , коэффициент  $a_0$  должен убывать с ростом интенсивности (в этом можно убедиться из анализа решения задачи (5), (6)). Из соображений простоты выберем его в виде  $a_0 = \varphi^{-1}$

$$I_t = -\frac{\Delta I}{\varphi^2 t^2} + k(\varphi) t \Delta I. \quad (7)$$

Отметим, что выбор второго слагаемого в правой части пропорциональным  $t$  производился в процессе анализа соответствия модели экспериментальному закону Стивенса (это первый эксперимент, с которым сравнивалась модель и на объяснение которого она была изначально направлена, см. [10]), поэтому такой выбор нельзя считать чисто теоретическим (из условия возрастания коэффициента и принципа простоты). Анализ соответствия предлагаемой модели закону Стивенса приведен (из соображений логики изложения) в конце настоящей работы. Выбор же  $a_0 = \varphi^{-1}$ , по видимому, не влияет существенно на основные результаты, полученные в рамках настоящей работы. Уравнение (7) записано в безразмерном времени. Чтобы перейти к реальному физическому времени, выполним замену переменной  $t \rightarrow \alpha \cdot t$ , где  $\alpha$  – постоянный положительный коэффициент размерности времени (мс). В результате получим уравнение динамики внимания в процессе восприятия внешнего стимула [10]

$$I_t = -\frac{\alpha \Delta I}{\varphi^2 t^2} + k(\varphi) \alpha^{-2} t \Delta I. \quad (8)$$

Здесь  $t$  – уже реальное время, измеряемое в миллисекундах. Параметр модели  $\alpha$  может зависеть от испытываемого и условий эксперимента. Как определяется коэффициент  $k(\varphi)$ , описано в разделе 5.

**Таблица 1.** Динамика возбудимости ( $B$ , 1/с) испытуемого П.В. в окрестности проекции стимула в психическом пространстве

**Table 1.** The dynamics of the excitability ( $B$ , 1/s) of probationer P.V. in the neighbourhood of the projection of the stimulus in the psychical space

		$t$ , мс											
$R_3$	140	170	200	250	300	350	400	500	600	700	900	1200	
0	2.36	2.76	2.85	2.99	3.06	3.19	3.24	3.28	3.28	3.28	3.00	2.92	
1	2.25	2.42	2.55	2.61	2.67	2.68	2.63	2.78	–	2.65	2.79	2.78	
2	2.19	2.32	2.34	2.45	2.51	–	–	–	–	–	–	–	
3	2.20	2.22	2.29	2.41	2.42	2.45	2.47	2.45	–	2.35	2.56	2.50	

Решение уравнения имеет вид [5, 6, 10]

$$I(r, t) = \frac{1}{2\pi D(t)} e^{-\frac{r^2}{2D(t)}}, \quad (9)$$

$$D(t) = \frac{2\alpha}{\phi^2 t} + k(\phi)\alpha^{-2}t^2. \quad (10)$$

Здесь через  $r$  обозначена величина отклонения текущей точки  $x$  области  $S_0$  ПП от проекции  $O(0; 0)$  стимула в ПП:  $r = \pm R$ , где  $R = |x|$  – соответствующее расстояние. Функция  $D(t)$  сначала убывает с течением времени, что соответствует концентрации внимания на стимуле (назовем это первым этапом процесса восприятия), затем возрастает, что соответствует рассеянию внимания (назовем это вторым этапом). На рис. 1 представлены графики функции (9) в три последовательных момента времени первого этапа процесса восприятия:  $t_1 < t_2 < t_3$ , иллюстрирующие концентрацию внимания на стимуле. Распределение внимания в любой момент времени центрально-симметрично (т.е. зависит только от расстояния  $R$ , но не от направления смещения из точки  $O$ ). Отметим, что полученные распределения внимания качественно соответствуют экспериментальным результатам Дж. Мангуна и С. Хиллиарда [28–30], исследовавших методом ВП зависимость внимания к зрительным стимулам (вспышкам) от расстояния до фокуса внимания, а также результатам Н.И. Чуприковой [22], исследовавшей динамику такой зависимости методом измерения ВР. В следующем разделе проверяется количественное соответствие предлагаемой модели результатам работы [22].

### 3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ МЕРА ВНИМАНИЯ: ВНИМАНИЕ И ВОЗБУДИМОСТЬ

В работе [22] изложены результаты экспериментального исследования изменения воз-

будимости различных пунктов зрительного анализатора в процессе целенаправленного восприятия испытуемым зрительного стимула. Показано, что в начале процесса восприятия имеет место повышение возбудимости не только в положительном пункте анализатора (т.е. в точке  $O$  проекции стимула в ПП), но в сравнительно широкой области анализатора (ПП) вокруг положительного пункта. С течением времени повышение возбудимости постепенно концентрируется в точке  $O$ . Процесс концентрации занимает 250–600 мс. Нетрудно видеть (см. рис. 1), что такая ситуация соответствует свойствам функции (9) на первом этапе процесса восприятия.

В табл. 1 приведены экспериментальные значения возбудимости конкретного испытуемого (П.В.) на различных расстояниях  $R_3$  от проекции стимула  $O$  в последовательные моменты времени, отсчитываемые от момента действия стимула. Возбудимость вычислялась по формуле [23]

$$B = \frac{1}{\tau}, \quad (11)$$

где  $\tau$  – ВР на тестирующий зрительный стимул. В качестве  $\tau$  использовались средние по нескольким измерениям значения ВР, частично взятые\*\* из табл. 3 работы [22, с. 168], частично измеренные по рис. 3, а [22, с. 171]. Расстояние  $R_3$  измеряется в относительных единицах, причем за единицу принимается расстояние

\* Индекс “э” означает – “экспериментальное”.

\*\* Отметим, что в работе [22] допущена опечатка (первый элемент последней строки табл. 3): среднее ВР в положительном пункте анализатора в момент времени  $t = 300$  мс равен  $\tau = 327$  мс, а не 335 мс, как указано в работе [22]. В этом можно убедиться, вычислив среднее арифметическое ВР, полученных в отдельных опытах и приведенных в той же табл. 3 работы [22].

от положительного пункта анализатора до близлежащих индифферентных пунктов (в терминологии работы [22]). Для среднеудаленных пунктов  $R_3 = 2$ , для далекоотставленных  $R_3 = 3$ , для самого положительного пункта (проекции стимула  $O$ )  $R_3 = 0$ . Расстояния от индифферентных пунктов анализатора одной группы до положительного пункта считаются примерно одинаковыми. Обозначим через  $r_3$  величину отклонения индифферентного пункта анализатора (соответствующей точки ПП) от положительного ( $O$ ):  $r_3 = \pm R_3$ . Чтобы связать относительное расстояние  $r$ , фигурирующее в уравнении восприятия (8), с расстоянием  $r_3$  введем масштабный множитель  $M_r$ ,

$$r_3 = M_r r.$$

Измерение ВР на тестирующие стимулы является широко распространенным методом изучения внимания. Сокращение ВР указывает на усиление (присутствие) внимания [15]. Так, в многочисленных экспериментах работы [23] показано, что привлечение внимания к стимулу, например с помощью словесных инструкций, ведет к сокращению ВР. Д. Ла Берг [27] в экспериментах по обоснованию прожекторной теории внимания Э. Трейсмана также опирался на сокращение ВР на тестирующие зрительные стимулы. Правда, вследствие принципов прожекторной теории, Д. Ла Берг не измерял величину внимания таким образом, а считал, что там, где есть внимание, ВР меньше, а там, где его нет, – больше. Дж. Мангун и С. Хиллиард [31] использовали ВР в качестве индикатора степени распределения зрительного внимания между левым и правым полем зрения. В настоящей работе предлагается связать количественную меру внимания – плотность внимания  $I(r, t)$  – как функцию пространства (ПП) и времени с ВР на соответствующий тестирующий стимул (вспышку в соответствующей точке экрана). Внимание находится в обратной зависимости от ВР и, следовательно, в прямой зависимости от возбудимости соответствующего пункта анализатора. Однако непосредственно отождествить плотность внимания  $I(r, t)$  с возбудимостью  $B(r_3, t)$  или пропорциональной ей величиной нельзя. Действительно, возбудимость не равна нулю ни в начальный момент времени  $t = 0$ , ни на больших расстояниях от положительного пункта анализатора (где влияние стимула фактически отсутствует). Существует некоторый “нормальный” (“индифферентный”) уровень возбудимости  $B_0$ . В результате действия сти-

мула (вызванных этим действием психофизиологических процессов) возбудимость отклоняется от этого уровня (в различных точках анализатора на разную величину). В отсутствие же стимула или на больших расстояниях от положительного пункта возбудимость равна  $B_0$ . В то же время плотность внимания, определенная равенством (9), в начальный момент времени ( $t = 0$ ) равна нулю во всем ПП (с математической точки зрения более точно сказать, что эта функция стремится к нулю при  $t$ , стремящемся к нулю). Точно так же функция  $I(r, t)$  будет (примерно) равна нулю на больших расстояниях от точки  $O$ .

Определим плотность внимания в точке  $x$  ПП в момент времени  $t$  как величину, пропорциональную абсолютной мере отклонения возбудимости  $B(r_3)$  соответствующего пункта анализатора в этот момент времени от индифферентного уровня  $B_0$  [4]

$$I(r, t) = M_B \cdot (B(r_3, t) - B_0), \quad (12)$$

где  $M_B$  – размерный постоянный коэффициент (масштабный множитель возбудимости). В качестве приближенного значения  $B_0$  примем возбудимость далекоотставленных индифферентных пунктов анализатора\*. Саму разность

$$\delta(r_3, t) = B(r_3, t) - B_0$$

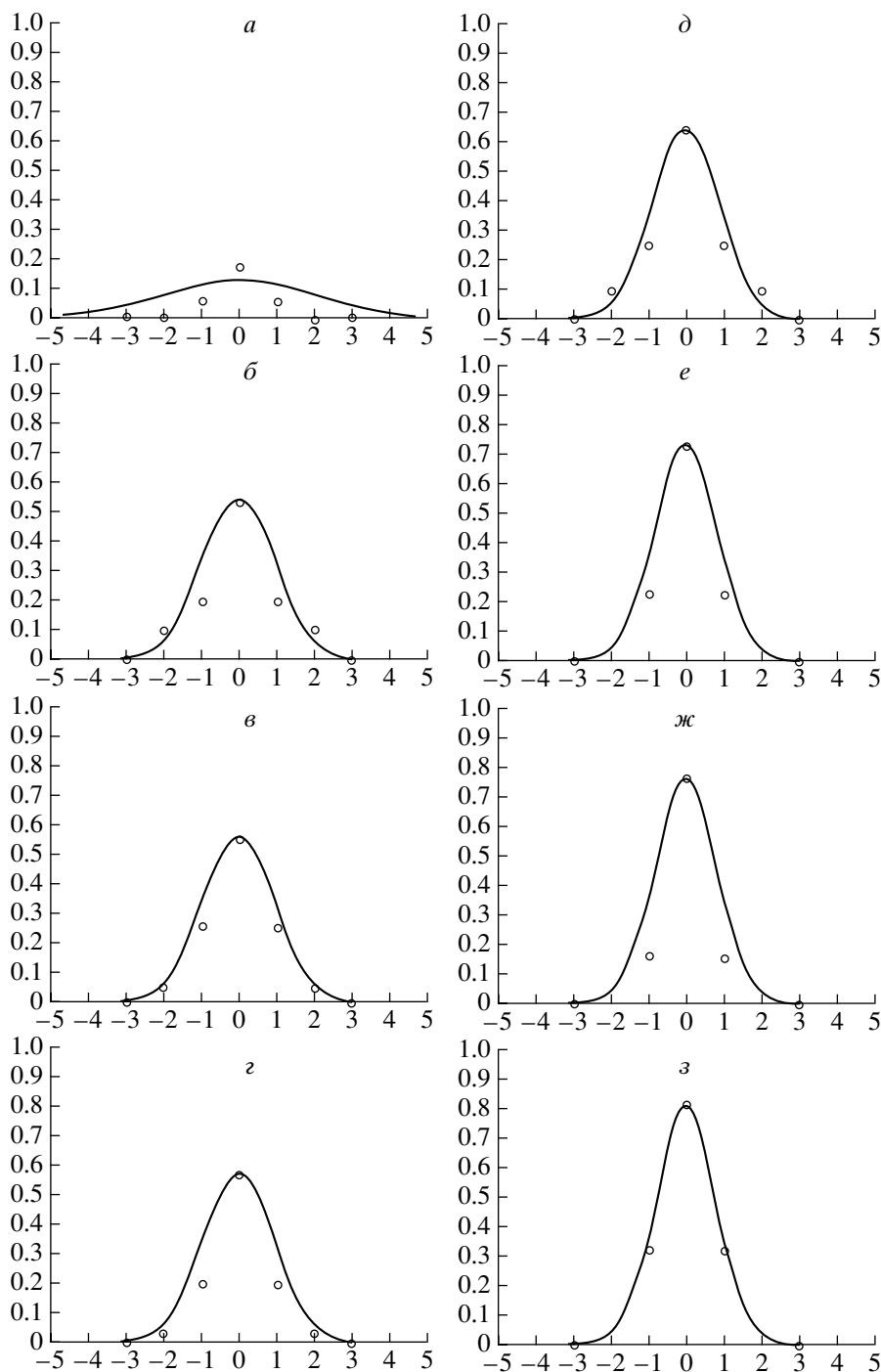
назовем для краткости приращением возбудимости.

На рис. 2 представлены [4] результаты аппроксимации распределений приращения возбудимости (кружки) внутри области зрительного анализатора ( $R_3 \leq 3$ ) в различные моменты времени функциями (сплошные кривые)

$$G(r) = \frac{1}{2\pi\tilde{D}} e^{-\frac{r^2}{2\tilde{D}}}, \quad (13)$$

с различными значениями параметра  $\tilde{D}$ . При этом использовались следующие значения масштабных множителей:  $M_r \approx 15.7$ ,  $M_B \approx 75.2$  с.

\*Исключение было сделано для момента времени  $t = 140$  мс, для которого в качестве  $B_0$  было выбрано значение возбудимости в среднеудаленном индифферентном пункте анализатора. Это обусловлено тем, что (по-видимому, из-за случайной погрешности измерений) в этот момент времени возбудимость в далекоотставленном индифферентном пункте чуть больше возбудимости в среднеудаленном (см. табл. 2), так что именно среднеудаленный индифферентный пункт следует рассматривать в качестве “наиболее индифферентного”.



**Рис. 2.** Аппроксимация распределений приращения возбудимости зрительного анализатора в последовательные моменты времени ( $t$ ) распределениями (13).  $a$  – 140 мс;  $б$  – 170 мс;  $в$  – 200 мс;  $г$  – 250 мс;  $д$  – 300 мс;  $е$  – 350 мс;  $ж$  – 400 мс;  $з$  – 500 мс;  $и$  – 700 мс;  $к$  – 900 мс;  $л$  – 1200 мс. По оси абсцисс откладывается величина отклонения от положительного пункта анализатора  $r_e$  (в относительных единицах), по оси ординат – приращение возбудимости  $\delta$ , 1/с. Рисунок демонстрирует сохранение количества внимания.

**Fig. 2.** The approximation of the distributions of the change in the excitability of the visual analyzer in different moments of the time ( $t$ ) by the distributions (13).  $a$  – 140 мс;  $б$  – 170 мс;  $в$  – 200 мс;  $г$  – 250 мс;  $д$  – 300 мс;  $е$  – 350 мс;  $ж$  – 400 мс;  $з$  – 500 мс;  $и$  – 700 мс;  $к$  – 900 мс;  $л$  – 1200 мс. Axial of the abscissa lay off the magnitude of the deviation from the positive point of the analyzer  $r_e$  (in the relative unit), axial of the ordinate – the increment of the excitability  $\delta$ , 1/s. The figure demonstrate the conservation of the attention.



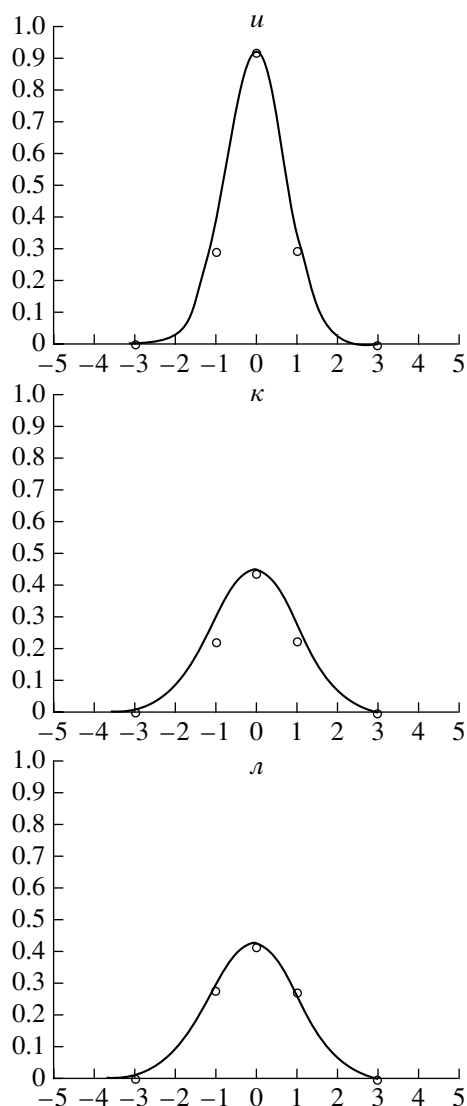


Рис. 2. Окончание.

Множители  $M_r$  и  $M_b$  выбирались так, чтобы получить как можно лучшую аппроксимацию распределения  $\delta(r_3)$  в момент времени  $t = 300$  мс (рис. 2, д). Очевидно, что в целом аппроксимация рис. 2 достаточно убедитель-

на. Однако, как известно, интеграл функции (13) по пространству не зависит от  $\tilde{D}$ . Поэтому сказанное означает, что интеграл приращения возбудимости, т.е. плотности внимания  $I(r, t)$ , по рассматриваемой области (а это не что иное, как количество внимания в данной области) одинаков в разные моменты времени, т.е. *количественно подтверждает гипотезу* о сохранении внимания в локальном смысле (т.е. в пределах достаточно малой области ПП в течение достаточно малого промежутка времени).

В табл. 2 приведена зависимость  $\tilde{D}(t)$ , соответствующая аппроксимации, представленной на рис. 2. Видно, что эта зависимость соответствует описанной ранее качественной закономерности: сначала функция  $\tilde{D}(t)$  убывает (что соответствует концентрации внимания), затем начинает возрастать (внимание рассеивается). На рис. 3 эта зависимость представлена графически (кружки). Сплошная линия на рис. 3 отражает теоретическую зависимость (10), соответствующую значениям параметров  $\varphi = 16$ ,  $\alpha \approx 118$  мс,  $\psi'_0 = 1.25 \times 10^{-3}$  (параметр  $\psi'_0$ , характеризующий модальность восприятия, определен в разделе 5). Очевидно, что эта кривая достаточно неплохо аппроксимирует экспериментальные значения  $\tilde{D}(t)$ . По поводу выбора значения параметра  $\varphi$  отметим следующее. С одной стороны, в работе [22] интенсивность не указана. С другой стороны, поскольку параметр  $\varphi$ , фигурирующий в уравнении (8), представляет интенсивность в относительных единицах, то знать экспериментальную величину интенсивности нет необходимости. Таким образом,  $\varphi$  оказывается свободным параметром модели. Значение же параметра  $\psi'_0$  (кстати, заметно влияющее на форму теоретической кривой  $D(t)$ ) соответствует восприятию яркости света точечного источника в условиях темновой адаптации (см. раздел 5).

**Таблица 2.** Зависимость  $\tilde{D}(t)$ , соответствующая аппроксимации экспериментальных распределений приращения возбудимости на рис. 2

**Table 2.** The dependence  $\tilde{D}(t)$ , corresponds to the approximation of experimental distributions of the change in the excitability on the fig. 2

$t$ , мс	140	170	200	250	300	350	400	500	700	900	1200
$\tilde{D}$	0.0170	0.0039	0.0038	0.0037	0.0033	0.0029	0.0028	0.0026	0.0023	0.0047	0.0050

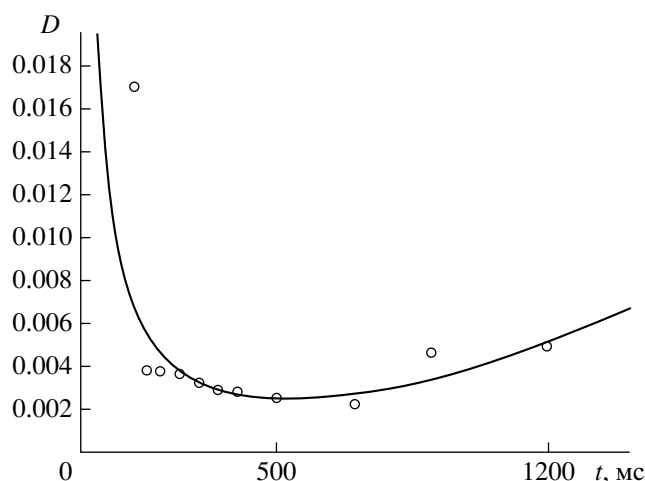
В работе [13] проведено сравнение предсказаний предлагаемой модели с динамикой возбудимости зрительного анализатора для всех других испытуемых работы [22]. В целом результаты сравнения говорят в пользу адекватности модели. Отметим, что параметры модели  $\alpha$ ,  $M_B$  и  $M_r$  различны для разных испытуемых и характеризуют их индивидуальные особенности.

#### 4. ВНИМАНИЕ И ВЫЗВАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Хорошо известен метод изучения внимания, основанный на измерении амплитуд различных колебаний ВП [15]  $N1$ ,  $P1$ ,  $N2$  и т.д. При этом внимание связывается с отдельными компонентами ВП, такими как негативность рассогласования (НР) и процессная негативность (ПН). Волна НР соответствует произвольному вниманию, а волна ПН – произвольному. При этом произвольное внимание связывается с реакцией на новизну стимула. В настоящей работе предлагается рассматривать внимание как фундаментальную функцию, характеризующую любой процесс восприятия. Каждый воспринимаемый (сознательно или бессознательно) стимул привлекает к себе внимание (большее или меньшее). Стимул, не привлекающий внимания, не воспринимается (не вызывает никаких психофизиологических процессов вообще). В любой момент времени внимание распределено по всему множеству стимулов, доступных восприятию (а также по множеству “внутренних” стимулов, генерируемых самим мозгом). Внимание как целое (включая произвольное и непроизвольное), описывается одной функцией  $I(x, t)$  и эта функция связывается с амплитудой ВП как функцией времени. Естественно, эта функция содержит вклады различных процессов, в частности НР и ПН. Сравнение решения уравнения (8) с экспериментальными данными демонстрирует продуктивность такого подхода.

В соответствии с формулами (9), (10), в процессе восприятия внешнего стимула внимание испытуемого сначала концентрируется на стимуле, затем рассеивается (по отношению к нему). Как следствие, внимание, уделяемое стимулу, сначала возрастает, затем достигает максимума и начинает убывать

$$I(0, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\varphi^2 \alpha^2 t}{2\alpha^3 + \varphi^2 k(\varphi) t^3} \quad (14)$$



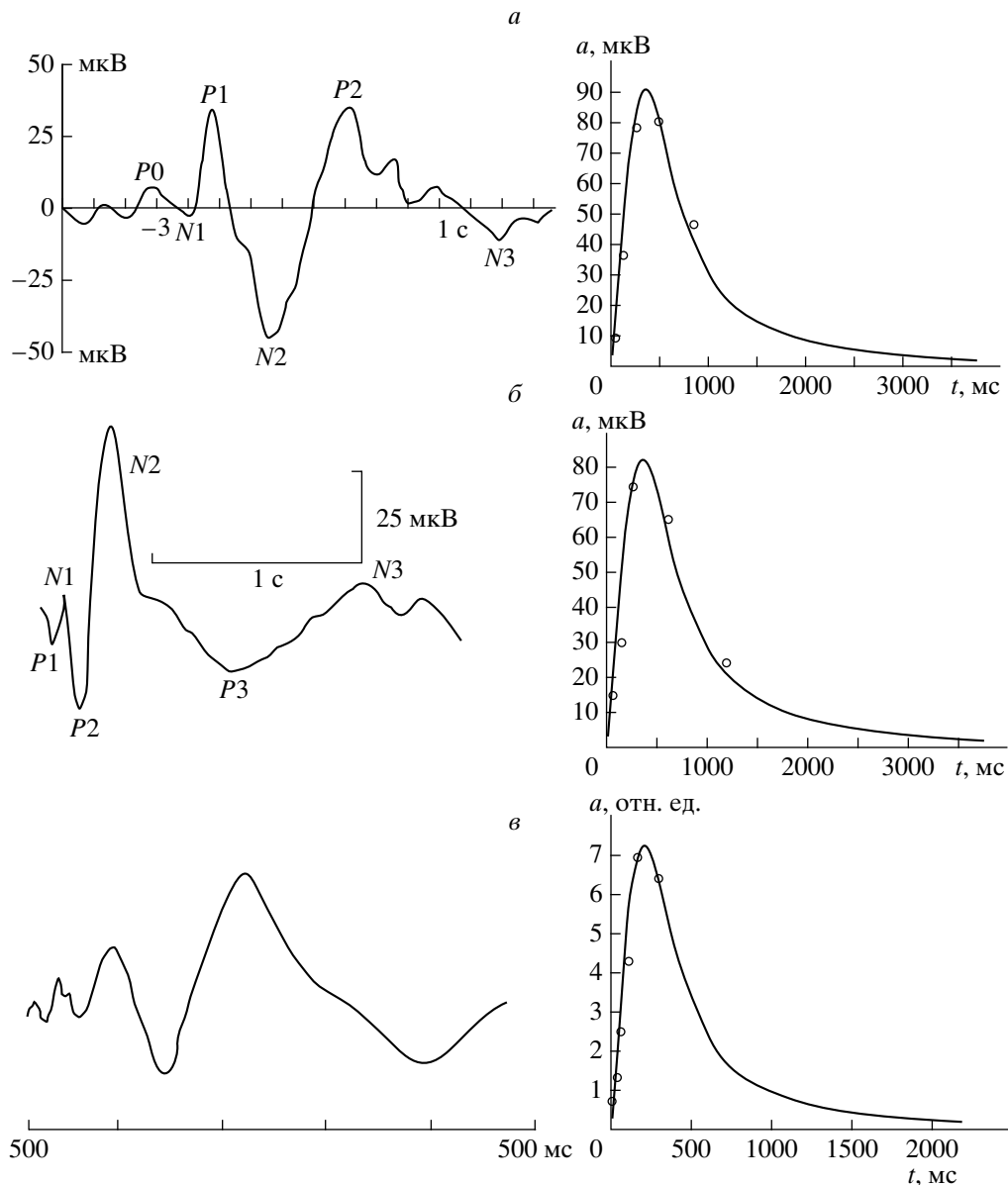
**Рис. 3.** Сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей  $D(t)$ . Кружки представляют значения  $D(t)$ , соответствующие кривым на рис. 2 (это экспериментальные значения), а сплошная линия представляет теоретическую зависимость (10).

**Fig. 3.** The compare of the theoretical dependence  $D(t)$  and the experimental it. The small circles represent values of the function  $D(t)$ , correspondent to curves on the fig. 2 (that is experimental values). The firm line represent the theoretical dependence (10).

Подобная динамика характерна и для амплитуды ВП. Приведем несколько примеров. На рис. 4, *a* и *б* (слева) представлены слуховые ВП, взятые из работ [18] и [25] соответственно. На рис. 4, *в* (слева) представлен ВП в ответ на соматосенсорный стимул, взятый из работы [17]. Отметим, что во всех приведенных примерах более или менее четко выполняется еще одна закономерность: частота колебаний монотонно убывает, т.е. временные интервалы между пиками растут. Естественно предположить, что рост амплитуды ВП в начале процесса восприятия объясняется усилением внимания к стимулу на первом этапе этого процесса, а последующий спад амплитуды – ослаблением внимания к нему на втором этапе. Из соображений простоты предположим, что амплитуда ВП  $a(t)$  пропорциональна плотности внимания в точке проекции стимула в ПП

$$a(t) = \beta \cdot I(0, t) = \frac{\beta}{2\pi} \cdot \frac{\varphi^2 \alpha^2 t}{2\alpha^3 + \varphi^2 k(\varphi) t^3}, \quad (15)$$

где  $\beta$  – постоянный коэффициент (измеряемый в микровольтах). При этом речь может



**Рис. 4.** Динамика амплитуды вызванного потенциала. Слева: усредненный ВП. *a* – слуховой ВП из работы [18] (стимул – тоновая посылка); *б* – слуховой ВП из работы [25] (стимул – щелчок); *в* – соматосенсорный ВП из работы [17]. Справа: изменение амплитуды ВП с течением времени. Сплошная линия – теоретическая кривая, кружки – экспериментальные значения.

**Fig. 4.** The dynamics of the amplitude of the evoked potential. Left: the averaged evoked potential. *a* – auditory evoked potential from [18] (stimulus – the tone burst); *б* – auditory evoked potential from [25] (stimulus – the click); *в* – somatosensory evoked potential from [17]. Right: evolution of the amplitude of the evoked potential. The firm line – the theoretical curve, the small circles – experimental values.

идти как о ВП, непосредственно инициированном действием стимула, так и о ВП в ассоциативных областях коры. В последнем случае  $\phi$  – это, возможно, уже не интенсивность стимула (см. раздел 2), а  $x = 0$  – точка проекции “внутреннего” стимула в ПП. С учетом сказанного ранее гипотеза (15) равносильна предположению о связи между амплитудой ВП и воз-

будимостью (вероятно, возбудимость влияет на ВП). С другой стороны, формулу (15) можно понимать и как определение локальной меры внимания в процессе восприятия, альтернативное ее определению через возбудимость (при этом зависимость внимания от  $x$  можно исследовать на основе методики, используемой Дж. Мангуном и С. Хиллиардом [30]). От-

метим, что формула (15) соответствует результатам экспериментальных исследований зависимости амплитуды ВП от интенсивности стимула  $\phi$ . Так, известно, что уменьшение интенсивности звукового стимула ведет к снижению амплитуды и росту латенции среднелатентных ответов [15, 32, 34]. Эта формула соответствует также результатам исследования влияния произвольного внимания на ВП. Так, хорошо известно [15], что произвольное внимание при зрительном восприятии ведет к росту амплитуд колебаний  $P1$ ,  $N1$  и  $N2$ . В частности, Дж. Мангун и С. Хиллиард [30], регистрировавшие ВП в ответ на зрительные стимулы, подчеркивают, что эффект произвольного внимания проявляется как амплитудная модуляция этих колебаний без изменения их латенций, полярности или формы волны. Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  могут зависеть от индивидуальных особенностей субъекта восприятия. Будем выбирать их из условия оптимальной аппроксимации экспериментально измеренной амплитуды ВП теоретической кривой. В простейшем случае для получения хорошей аппроксимации достаточно потребовать совпадения теоретических и экспериментальных значений  $t_{\max}$  и  $a_{\max}$ , где  $a_{\max}$  – наибольшее значение амплитуды ВП в процессе восприятия, а  $t_{\max}$  – момент времени, в который это значение достигается

$$a_{\max}^{\text{теор}} = a_{\max}^{\text{эксп}}, \quad t_{\max}^{\text{теор}} = t_{\max}^{\text{эксп}}. \quad (16)$$

В общем случае формулы (16) можно использовать для получения начального приближения к масштабным множителям  $\alpha$  и  $\beta$ .

Результаты сравнения теоретических предсказаний с экспериментальными данными показали [9, 13, 14], что формула (15) адекватно описывает динамику амплитуды ВП, по крайней мере в случаях, когда ВП соответствует элементарному стимулу и монополярно измерен в области коры мозга, рекомендуемой для данной модальности (в частности, в проекционной зоне). Всего было обработано около 45 ВП слуховой, зрительной и соматосенсорной модальностей. При этом примерно в 70% случаев было обнаружено отчетливое соответствие теории и эксперимента, в 20% случаев соответствие оказалось менее отчетливым, но приемлемым, в 10% случаев получилась плохая аппроксимация. Плохая или средняя аппроксимация относится, как правило, к случаям, когда ВП регистрировали биполярно или усредняли по группе испытуемых. Последнее естественно в том случае, если разные испытуемые внутри группы имеют различные пара-

метры  $\alpha$  и  $\beta$ . В случаях же, когда ВП на элементарный физический стимул регистрировали монополярно, у одного испытуемого, в области, рекомендованной для соответствующей модальности (в частности, в проекционной зоне и области вертекса для слуховых стимулов), как правило, наблюдалось отчетливое соответствие между теорией и экспериментом. Отчетливое соответствие очень часто наблюдалось и для группы испытуемых (по-видимому, в случаях, когда различные испытуемые характеризуются близкими значениями параметров  $\alpha$  и  $\beta$ ). Поскольку в большинстве случаев на экспериментальной кривой ВП отсутствует линия нулевого потенциала, амплитуда, как правило, измерялась между пиками соседних колебаний\* [17] и ставилась в соответствие моменту времени, среднему между латентными периодами этих колебаний. Величина  $\phi$  фиксировалась произвольным образом: зависимость амплитуды ВП от интенсивности стимула не проверялась (во многих экспериментальных работах интенсивность не указывается, а в модели  $\phi$  – это интенсивность в относительных единицах). При фиксированном  $\phi$  параметры  $\alpha$  и  $\beta$  выбирались из условия оптимальной аппроксимации.

Приведем несколько примеров [9].

1. Кривая на рис. 4, *a* (слева), взятом из работы [18] (с. 16, рис. 1, средний, тонкая линия), представляет экспериментально измеренный посредством электрода, вживленного в мозг, слуховой ВП в ответ на бинаурально воспринимаемому (предъявляемому с помощью громкоговорителя, расположенного перед испытуемым) тоновую посылку длительностью 50 мс. Обозначения колебаний частично внесены автором настоящей работы. Через  $P0$  обозначено положительное колебание непосредственно перед моментом действия стимула (оно используется в дальнейшем). Метод измерения (имплантированный в мозг электрод), очевидно, должен обеспечивать существенно большую точность, чем при регистрации с поверхности головы. Хотя исследования проводились с большими паркинсонизмом, автором работы [18] подчеркивается, что у испытуемых не было специфических нарушений восприятия.

В табл. 3, *a* приведены значения амплитуды ВП и соответствующие латентные периоды, измеренные по рис. 4, *a* (слева). Амплитуда ко-

\* В терминологии, принятой при анализе колебаний, эта величина называется размахом колебаний.

**Таблица 3.** Зависимость амплитуды вызванного потенциала от времени, измеренная по рис. 4, *а*, *б*, *в* (слева) соответственно

**Table 3.** The time dependence of the evoked potential amplitude, measured on fig. 4, *a*, *b*, *v* (left) correspondent

<i>а</i>							
Колебание	<i>P0-N1</i>	<i>N1-P1</i>	<i>P1-N2</i>	<i>N2-P2</i>	<i>P2-N3</i>		
<i>t</i> , мс	37	137	269	489	857		
<i>a</i> , мкВ	9.7	36.1	78.4	79.8	46.5		
<i>б</i>							
Колебание	<i>P1-N1</i>	<i>N1-P2</i>	<i>P2-N2</i>	<i>N2-P3</i>	<i>P3-N3</i>		
<i>t</i> , мс	70.8	142	258	608	1200		
<i>a</i> , мкВ	14.39	30.30	75.00	65.15	24.24		
<i>в</i>							
<i>t</i> , мс	12	24	42	68	110	175	301
<i>a</i> , отн. ед.	0.7	1.5	1.3	2.5	4.3	6.9	6.4

лебания *N1* измерялась от пика этого колебания до предшествующего ему положительно-го пика *P0*. На рис. 4, *а* (справа) представлена теоретическая зависимость амплитуды ВП от времени (сплошная линия) и экспериментальные значения амплитуды (кружки). Очевидно, что этот рисунок демонстрирует блестящее соответствие между теорией и экспериментом.

2. Кривая на рис. 4, *б* (слева), взятая из работы [25] (с. 139, рис. 65), представляет слуховой ВП в ответ на щелчок во второй фазе сна. Обозначение *N3* внесено в рисунок автором настоящей работы. Сравнение предсказаний предлагаемой модели с ВП во время сна интересно тем, что во сне внимание испытуемого максимально рассеяно. Фактически отсутствуют другие стимулы (прежде всего внутримозгового происхождения), “конкурирующие” с исследуемым. Иначе говоря, условия эксперимента можно считать наиболее “чистыми” в смысле изолированности от неконтролируемых внешних факторов.

В табл. 3, *б* приведена зависимость амплитуды ВП от времени, измеренная по рис. 4, *б* (слева). Очевидно,  $a_{\max} = 75$  мкВ,  $t_{\max} = 258$  мс. Однако соответствующие значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  использовались только в качестве начального приближения. Из условия оптимальной аппроксимации были выбраны следующие значения параметров:  $\alpha = 3.4 \times 10^3$  мс,  $\beta = 228$  мкВ. Сравнение теоретической (сплошная линия) и экспериментальной (кружки) за-

висимостей амплитуды ВП от времени представлено на рис. 4, *б* (справа). Очевидно, этот рисунок демонстрирует превосходное соответствие между теорией и экспериментом.

3. Кривая на рис. 4, *в* (слева), взятая из работы [17], представляет соматосенсорный ВП. Результаты измерения зависимости  $a(t)$  по этому рисунку представлены в табл. 3, *в*. Поскольку на рис. 4, *в* (слева) отсутствует масштаб по оси ординат, значения амплитуды в табл. 3, *в* указаны в относительных единицах. Были выбраны следующие значения параметров:  $\alpha = 2 \times 10^3$  мс,  $\beta = 20$  отн. ед. Формулы (16) использовались для выбора начального приближения. Результаты сравнения представлены на рис. 4, *в* (справа) и, очевидно, достаточно убедительны.

В случае, когда на экспериментальной кривой ВП присутствует линия нулевого потенциала, амплитуду ВП возможно измерять не между пиками соседних колебаний, а от линии нулевого потенциала до пика колебания и ставить в соответствие латентному периоду колебания. В этом случае нетрудно восстановить также сам ВП. ВП  $p(t)$  представляет собой гармонические колебания с переменной амплитудой  $a(t)$  и частотой  $\omega(t)$

$$p(t) = a(t) \sin(\omega(t)t + \gamma).$$

Частота ВП монотонно убывает с течением времени и стремится к нулю при  $t$ , стремящемся к бесконечности. Естественно искать ее в виде

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-st}.$$

Параметры  $\omega_0$ ,  $s$  и  $\gamma$  выберем из условия оптимальной аппроксимации. На рис. 5 представлены результаты аппроксимации ВП, изображенного на рис. 4, *а* (слева). Другой пример подобной аппроксимации приведен в работе [13]. Зависимость  $\omega(t)$ , вероятно, не связана с динамикой внимания: внимание влияет только на амплитуду колебательного процесса.

## 5. ЗАКОН ПЬЕРОНА И ЗАКОН СТИВЕНСА

Определим ВР  $\tau$  как длительность процесса  $I(0, t)$ . Хотя этот процесс в рамках абстракции (приближения) уравнения (8) бесконечен,  $I(0, t)$  стремится к нулю при стремлении  $t$  к бесконечности, можно считать его завершенным,

когда внимание к стимулу становится достаточно малым

$$I(0, \tau) = I_0, \quad (17)$$

где  $I_0 \ll I_{\max}$  ( $I_{\max}$  – наибольшее значение функции  $I(0, t)$ ).

Различные авторы связывают интенсивность ощущения (реакцию) с амплитудой различных отдельных колебаний ВП [17]. Здесь предлагается своеобразная альтернатива такому подходу. Определим интенсивность ощущения  $\psi$  как среднее значение амплитуды ВП (т.е. плотности внимания в точке  $x = 0$ ) за ВР

$$\psi = \frac{\psi_0}{\tau} \int_0^{\tau} I(0, t) dt. \quad (18)$$

Параметр  $\psi_0$  назовем масштабом модальности: он может быть различным для разных модальностей. Отметим, что ввиду сходимости интеграла (18), выбор  $I_0$  существенной роли для дальнейшего не играет. Главное, чтобы этот параметр был достаточно мал.

Перейдем теперь к определению коэффициента  $k(\phi)$  в уравнении (8). Очевидно, что *чем больше интенсивность стимула, тем быстрее он привлечет к себе внимание и тем большее внимание он к себе привлечет* (см. раздел 1). Другими словами, с ростом интенсивности “пик” на рис. 4 (справа), т.е. график функции  $I(0, t)$ , должен вытягиваться вверх и сужаться, сжимаясь к оси ординат (т.е. последовательность функций  $I_\phi(0, t)$  подобна  $\delta$ -образной последовательности). Для этого достаточно потребовать нормировки функции  $I(0, t)$

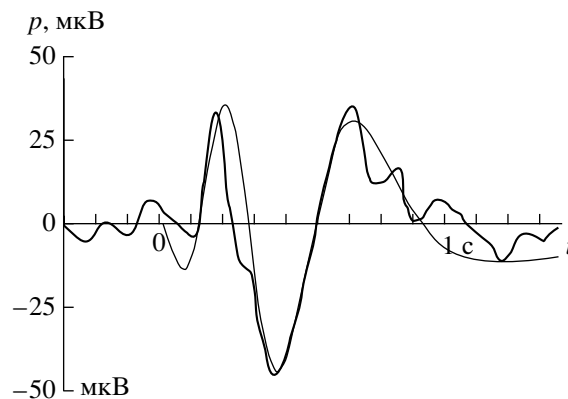
$$\int_0^{\tau} I(0, t) dt = C. \quad (19)$$

Из (18), (19), получим

$$\psi \tau = L = \text{const}, \quad (20)$$

где  $L = \psi_0 C$ . Это хорошо известный [11, 12] экспериментальный закон Пьерона–Лебедева–Забродина: *произведение интенсивности ощущения на ВР есть величина постоянная, не зависящая от величины (в данном случае – интенсивности) действующего стимула.*

После вычисления интеграла уравнение (19) преобразуется в (довольно громоздкое) трансцендентное уравнение для функции  $k(\phi)$ . Решив его (численно), найдем из (14) и (17) зависимость  $\tau(\phi)$ , а затем из (20) – зависимость  $\psi(\phi)$ . В качестве примера на рис. 6 в двойном



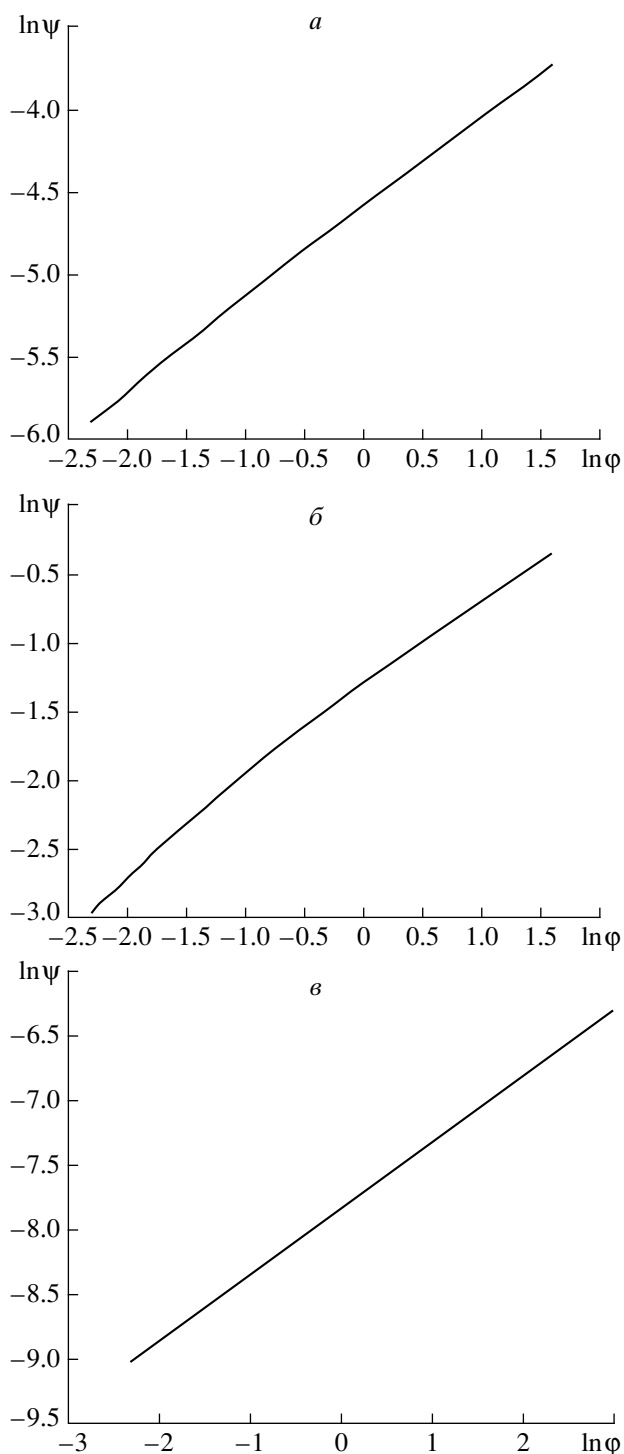
**Рис. 5.** Сравнение экспериментального ВП, представленного на рис. 4, а (слева), с теоретическим.

**Fig. 5.** The compare of the experimental evoked potential, represent on the fig. 4, a (left), with the theoretical it.

логарифмическом масштабе (по оси абсцисс откладывается  $x = \ln \phi$ , а по оси ординат –  $y = \ln \psi$ ) представлены графики этой зависимости для  $I_0 = 0.01$  и трех различных значений параметра  $\psi'_0 = \psi_0/L$ . Очевидно, что во всех трех случаях полученная зависимость в широком диапазоне изменения интенсивности стимула достаточно точно соответствует психофизическому закону Стивенса

$$\psi = c \phi^\lambda,$$

т.е. кривые на рисунке близки к прямым  $y = \lambda x + b$ , где  $b = \ln c$ . Зависимость на рис. 6, а соответствует значению параметра  $\psi'_0 = 0.1$ . Интенсивность  $\phi$  меняется в 50 раз. Показатель закона Стивенса при этом равен  $\lambda \approx 0.53$  (он измеряется как тангенс угла наклона прямой), что соответствует восприятию громкости звука при моноуральном раздражении [20]. Рис. 6, б отвечает значению  $\psi'_0 = 10$ . Интенсивность стимула также меняется в 50 раз. При этом  $\lambda \approx 0.6$ , что соответствует восприятию громкости звука при бинауральном раздражении [20]. Наконец, на рис. 6, в представлена зависимость для случая  $\psi'_0 = 1.25 \times 10^{-3}$ . Интенсивность стимула меняется в 200 раз. Соответствующее значение  $\lambda \approx 0.5$ , что отвечает восприятию яркости света точечного источника в условиях темновой адаптации [20].



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложено количественное определение (плотности) внимания как функции в психическом пространстве (ПП) и времени, основанное на связи внимания и времени реакции (ВР) на тестирующие стимулы. На основе качественных закономерностей динамики внимания построено динамиче-

**Рис. 6.** Теоретическая зависимость величины реакции  $\psi$  от интенсивности стимула  $\phi$  в двойном логарифмическом масштабе для различных значений параметра  $\psi'_0$ . Интенсивность стимула и реакция выражены в относительных единицах. Видно, что все кривые на рисунке близки к прямым. Последнее означает, что теоретическая зависимость  $\psi(\phi)$  соответствует экспериментальному закону Стивенса. *а* – параметр модели  $\psi'_0 = 0.1$ . При этом показатель закона Стивенса (измеряемый как тангенс угла наклона прямой на рисунке)  $\lambda \approx 0.53$ , что соответствует восприятию громкости звука при моноуральном раздражении; *б* – параметр  $\psi'_0 = 10$ . При этом  $\lambda \approx 0.6$ , что соответствует восприятию громкости звука при бинауральном раздражении; *в* – параметр  $\psi'_0 = 1.2 \times 10^{-3}$ . При этом  $\lambda \approx 0.5$ , что соответствует восприятию яркости света точечного источника в условиях темновой адаптации.

**Fig. 6.** The theoretical plot of the reaction  $\psi$  from the stimulus  $\phi$  for several values of  $\psi'_0$ . It is used log-log scale. The stimulus and the reaction are represent in relative unit. One can see, that all curves are related to straight lines. That mean, that the theoretical dependence  $\psi(\phi)$  correspondent to the Stevens'es law. *a* – the parameter of the model  $\psi'_0 = 0.1$ . At that exponent of the Stevens'es law (equal slope ratio of the straight line in the figure)  $\lambda \approx 0.53$ , that correspondent to perception of the sound volume by monaural listening; *б* – the parameter  $\psi'_0 = 10$ . At that  $\lambda \approx 0.6$ , that correspondent to perception of the sound volume by binaural hearing; *в* – the parameter  $\psi'_0 = 1.25 \times 10^{-3}$ . At that  $\lambda \approx 0.5$ , that correspondent to perception of the luminosity of a point source by conditions of dark adaptation.

ское уравнение (8) для плотности внимания в процессе восприятия элементарного внешнего стимула с коэффициентом  $k(\phi)$ , определяемым равенством (19). На базе этого уравнения построена математическая модель процесса восприятия, в рамках которой различные психофизиологические величины (амплитуда ВП, интенсивность ощущения, ВР) выражаются через плотность внимания. Предсказания модели соответствуют большому объему экспериментальных данных. Так, решение уравнения (8) вполне удовлетворительно описывает экспериментальную динамику возбудимости зрительного анализатора в процессе целенаправленного восприятия. В частности, подтверждается гипотеза о сохранении внимания (новая интерпретация селективности). Вытекающая из модели формула (15) для динамики амплитуды ВП подтверждается сравнением с

множеством экспериментальных измерений ВП. Из модели следует закон Пьерона. Теоретическая зависимость реакции (интенсивности ощущения) от интенсивности стимула, вычисленная для нескольких модальностей, соответствует экспериментальному закону Стивенса.

Возможны следующие нейрофизиологические интерпретации предлагаемой модели.

1. Первая возможная интерпретация основана на следующих соображениях. Селективность внимания обусловлена борьбой за ресурсы. Все стимулы, доступные в текущий момент времени восприятию, не могут в одинаковой степени отчетливо и полно восприниматься (подвергаться информационной обработке), поскольку восприятие каждого из стимулов требует определенных затрат ресурсов организма, а этих ресурсов имеется ограниченное количество. Роль ресурсов могут играть различные химические вещества, содержащиеся в жидкостях, окружающих нервные клетки, в частности в крови\* (например, в качестве таковых можно рассматривать  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  и известные отрицательные ионы либо питательные вещества). Естественно связать плотность внимания с плотностью этих химических веществ в данной точке коры головного мозга, тогда селективность (сохранение) обретет простой физический смысл: она обусловлена диффузией веществ в жидкой среде (или диффузией самой жидкости) по коре. Такая интерпретация объясняет описание процесса восприятия на основе уравнения параболического типа (уравнения диффузии). В пользу этой интерпретации говорит тот факт [15], что селективное внимание усиливает локальный мозговой кровоток в модально-специфических областях мозга, т.е. кровь перераспределяется между областями коры в процессе селекции. Естественно предположить, что такое перераспределение происходит и в меньших масштабах: в пределах одной модально-специфической области. По предположению П. Роланда [33], перераспределение кровотока связано с вызванным вниманием увеличением возбудимости в соответствующей области коры. Если связать плотность внимания с плотностью крови (или влияющих на возбудимость химических веществ, в ней содержащихся), придем к следующей интерпретации: внимание влияет на возбудимость, а возбудимость влияет на возбуждение, т.е. на ВП.

\* См. также [10].

2. Возможна, однако, и другая интерпретация в масштабах нейронной сети. Подобно тому как тепло в твердом теле распространяется путем передачи возбуждений (фононов) между атомами кристаллической решетки, возбуждение в коре головного мозга распространяется путем передачи потенциалов действия между нейронами сети. Фонон (квант тепловой энергии), передаваясь от атома  $A$  к соседнему атому  $B$ , покидает атом  $A$ . Аналогично, если нейрон  $A$  возбуждает (синаптическим путем) соседний нейрон  $B$ , то нейрон  $B$  может оказывать тормозящее действие на нейрон  $A$  (возвратное торможение). В результате возбуждение, передаваясь нейрону  $B$ , “покидает” нейрон  $A$ , т.е. “перемещается” от нейрона к нейрону. Так же как соответствие между рождением и уничтожением фононов обуславливает сохранение теплоты, соответствие между возбуждением и торможением нейронов обуславливает сохранение внимания (селективность). Подобие процессов на микроскопическом уровне приводит к подобию динамических уравнений на макроскопическом уровне. При такой интерпретации плотность внимания характеризует непосредственно возбуждение нейронов и через него определяет амплитуду ВП.

В заключение отметим, что для дальнейшей проверки гипотезы о сохранении внимания и адекватности предлагаемой модели процесса восприятия было бы хорошо повторить эксперимент по методике работы [22] в более развернутом варианте (т.е. провести измерения в большем числе точек). В частности, желательнее увеличить число изучаемых индифферентных пунктов и исследовать индифферентные пункты, еще более удаленные от положительного. Интересно также более подробно изучить процесс рассеяния внимания (возбудимости).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов-Крылов И.Н. Психофизиологические механизмы произвольного и непроизвольного внимания у человека: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. СПб.: Ин-т физиологии им. И.П. Павлова РАН, 1999. 34 с.
2. Блок В. Уровни бодрствования и внимание. Экспериментальная психология. Под ред. Фресс П., Пиаже Ж. М.: Прогресс, 1970(5): 97–146.
3. Бойко Е.И. Механизмы умственной деятельности. Избранные психологические труды. Под ред. Брушлинского А.В., Ушаковой Т.Н. М.: Московский психолого-социальный ин-т. Воронеж: НПО “МОДЭК”, 2002. 688 с.



4. Гласко А.В. Внимание как динамический инвариант. *Обозр. прикл. и промышл. матем.* 2006. 13(4): 624–625.
5. Гласко А.В. Инверсный подход к проблеме обращения времени в уравнении теплопроводности. Сборник научных трудов Третьей Всероссийской конференции “Необратимые процессы в природе и технике”. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005(1): 46–55.
6. Гласко А.В. К вопросу об обращении времени в уравнении теплопроводности. Необратимые процессы в природе и технике. Тез. докладов Третьей Всероссийской конференции. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005: 130–131.
7. Гласко А.В. О восприятии музыкальной мелодии. *Обозр. прикл. и промышл. матем.* 2008. 15(2): 278–279.
8. Гласко А.В. О восприятии художественной композиции. *Обозр. прикл. и промышл. матем.* 2008. 15(2): 279–280.
9. Гласко А.В. Психофизический закон Стивенса, амплитуда вызванного потенциала и динамика внимания. *Психофизика сегодня*. Под ред. Носуленко В.Н., Скотниковой И.Г. М.: ИП РАН, 2007: 136–143.
10. Гласко А.В. Синтез закона индукции Павлова и психофизического закона Стивенса в динамическом уравнении процесса восприятия. AIS’05, CAD-2005, “Интеллектуальные системы”, “Интеллектуальные САПР”. Труды конференций. М.: Физматлит, 2005. 2: 166–174.
11. Забродин Ю.М. Основы психофизической теории сенсорных процессов (Теоретическая и экспериментальная психофизика): Автореф. дис. ... докт. психол. наук. Л.: Ленингр. ун-т им. А.А. Жданова, 1977. 46 с.
12. Забродин Ю.М., Лебедев А.Н. *Психофизиология и психофизика*. М.: “Наука”, 1977. 286 с.
13. Ковалкин С.С. К экспериментальному обоснованию некоторой модели восприятия. *Дипломная работа*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 104 с.
14. Мизяк В.Г. Динамика амплитуды слуховых и зрительных вызванных потенциалов как следствие динамики внимания в процессе восприятия внешнего стимула. *Дипломная работа*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 102 с.
15. Наатанен Р. *Внимание и функции мозга*. М.: Изд-во МГУ, 1998. 600 с.
16. *Пограничные проблемы психологии и физиологии*. Под ред. Бойко Е.И. М.: Изд-во АПН РСФСР, 1961. 212 с.
17. Рутман Э.М. Возможности применения усредненных вызванных потенциалов в психофизике. *Проблемы психофизики*. М.: “Наука”, 1974. 251 с.
18. Севостьянов А.В. Интрацеребральные вызванные потенциалы и импульсная активность нейронов головного мозга человека в тестах на внимание: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб.: Ин-т мозга человека, 1995. 20 с.
19. Соколов Е.Н. *Теоретическая психофизиология*. М.: Изд-во МГУ, 1986. 107 с.
20. Стивенс С.С. *Психофизика сенсорной функции. Психология ощущений и восприятия*. Под ред. Гиппенрейтер Ю.Б., Любимова В.В., Михалевской М.Б. М.: “ЧеРо”, 1999: 283–290.
21. Трейсман Э. Объекты и их свойства в зрительном восприятии человека. В *мире науки*. 1987(1): 68–78.
22. Чуприкова Н.И. О скорости развития и степени концентрированности локального очага повышенной возбудимости при выделении объекта из фона. *Проблемы дифференциальной психологии*. Т. VII. Под ред. Небылицына В.Д. М.: Просвещение, 1972: 156–175.
23. Чуприкова Н.И. Слово как фактор управления в высшей нервной деятельности человека. М.: Просвещение, 1967. 327 с.
24. Чуприкова Н.И. Метод тестирующего стимула в изучении механизмов аналитико-синтетической деятельности мозга человека. *Психология высших когнитивных процессов*. Под ред. Ушаковой Т.Н., Чуприковой Н.И. М.: Изд-во Ин-та психологии РАН, 2004: 10–32.
25. Шагас Ч. *Вызванные потенциалы мозга в норме и патологии*. М.: Мир, 1975. 314 с.
26. Шиффман Х. *Ощущение и восприятие*. СПб.: “Питер”, 2003. 924 с.
27. LaBerge D. Spatial extent of attention to letters and words. *Human Perception and Performance*. J. Exp. Psychol. 1983. 9: 371–379.
28. Mangun G.R., Hillyard S.A. The spatial allocation of visual attention as indexed by event-related brain potentials. *Human Factors*. 1987. 29: 195–211.
29. Mangun G.R., Hillyard S.A. Spatial gradients of visual attention: behavioral and electrophysiological evidence. *EEG a. Clin. Neurophysiol.* 1988. 70: 417–428.
30. Mangun G.R., Hillyard S.A. Electrophysiological studies of visual selective attention in humans. *The Neurobiological Foundations of Higher Cognitive Function*. Eds Scheibel A., Wechsler A. N.Y.: Guilford, 1990.
31. Mangun G.R., Hillyard S.A. Allocation of visual attention to spatial locations: Tradeoff functions for event-related brain potentials and detection performance. *Percept. Psychophys.* 1990. 47: 532–550.
32. McFarland W.H., Vivion M.C., Goldstein R. Middle components of the AER to tone-pips in normal-hearing and hearing-impaired subjects. *J. Speech Hear. Res.* 1977. 20: 781–798.
33. Roland P.E. Somatotopical tuning of postcentral gyrus during focal attention in man. A regional cerebral blood flow study. *J. Neurophysiol.* 1981. 46: 744–754.
34. Thornton A., Mendel M.I., Anderson C. Effects of stimulus frequency and intensity on the middle components of the averaged auditory EEG response. *J. Speech Hear. Res.* 1977. 20: 81–94.
35. Treisman A.M. Features and objects: The fourteenth barlett memorial lecture. *Quart. J. Exp. Psychol.* 1988. 40A: 201–237.
36. Wickens C.D. The structure of attentional resources. *Attention and Performance VIII*. Ed. Nickerson R. Hillsdale, N.J.: Erlbaum, 1980. 822 p.