

ЛОКАЛИЗАЦИЯ МЕТОДАМИ НЕЙРОИКОНИКИ МЕХАНИЗМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОБ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ТЕКСТУР

© 2011 г. Ю. Е. Шелепин*, доктор мед. наук; В. А. Фокин**, доктор мед. наук; А. К. Хараузов*, канд. биол. наук; Н. Фореман***, профессор, доктор психологии; С. В. Пронин*; О. А. Вахрамеева*, аспирантка; В. Н. Чихман*, канд. техн. наук

* Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

** Военно-медицинская академия, Санкт-Петербург

*** Миддлсекский Университет, Лондон, Великобритания

E-mail: yshelepin@yandex.ru

Развитие методов цифрового синтеза и обработки изображений позволило методами иконоки целенаправленно создавать тестовые изображения, избирательно активирующие различные структуры зрительной системы. Методы обработки нейрофизиологических данных, как изображений активности целостного мозга, так называемые методы нейроиконики (neuroimaging) позволили выделять структуры головного мозга, активированные в результате этого избирательного воздействия. Цель данного исследования – пространственно-временная локализация (картирование) областей мозга, участвующих в принятии решения о форме текстур. Установлено, что время реакции испытуемого коррелирует со степенью упорядоченности текстур и с латентностью поздних компонентов вызванных потенциалов во фронтальной коре. Тем самым определено время принятия решений человеком в задаче распознавания заданного класса текстур. Картирование мозга методом функциональной магнитно-резонансной томографии показало, что активность мозга в процессе принятия решений при распознавании происходит во фронтальной коре головного мозга человека.

Ключевые слова: иконика, зрение, распознавание образов, принятие решений, нейроиконика (neuroimaging), картирование мозга.

Коды OCIS: 110.6955, 330.5000, 100.2960.

Поступила в редакцию 2011.

1. Введение

Ключевой проблемой понимания работы мозга и применения полученных данных для решения разнообразных практических задач в технике, медицине, эргономике и экономике является изучение механизмов, осуществляющих процессы принятия решений. Особый интерес представляет локализация механизмов принятия решений с помощью методов пространственного и временного функционального картирования мозга. Методы картирования мозга, или методы нейроиконики (neuroimaging), позволяют выделять структуры головного мозга, активированные в результате избирательного воздействия с помощью тестовых изображений, синтезированных методами иконоки [1]. Электрофизиологические методы картирования мозга позволяют локализовать во времени процессы принятия

решений. Методы функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) позволяют картировать пространственное распределение областей фронтальной коры в момент принятия решений [2, 3].

Моделирование процесса обработки данных в выбранной ситуации в зрительной системе является ключевым подходом в исследовании. Модель распознавания в настоящее время представляет собой формализованную действующую модель с определенными нейрофизиологическими коррелятами [4–6]. В соответствии с теорией статистических решений и процедурами оптимальной (байесовской) обработки изображений разработана функциональная модель распознавания образов в зрительной системе в пороговых условиях. Основные этапы работы модели: первичная фильтрация в соответствии с параметрами оптики глаза и параметрами рецептивных полей, согласован-

ная фильтрация (сравнение входного изображения с выученным динамическим шаблоном, хранимым в памяти), принятие решений и инициация моторного ответа. Первичная и согласованная фильтрация обеспечиваются нейронами с рецептивными полями, согласованными со структурами, типичными для натуральных сцен. Для имитации статистических и пространственно-частотных свойств натуральных сцен оптимальными являются стимулы, сконструированные из элементов Габора [7–10]. Поэтому и наши тестовые матрицы построены из элементов Габора. Матрицы содержали упорядоченные элементы Габора среди случайно ориентированных элементов. Эта упорядоченность была статистическая для всей матрицы, а не представляла обязательно квазиколлинеарные геометрические фигуры или змееобразные изображения [7–10]. Мы применяли психофизические, электрофизиологические методы исследования и фМРТ. Томографию использовали для локализации областей мозга, ответственных за принятие решения о доминирующей ориентации элементов в матрице. Анализ вызванных потенциалов (ВП) использовали для измерения временных характеристик этого механизма.

Цель наших исследований заключалась в том, чтобы установить, где в коре головного мозга расположены центры принятия решения о форме изображения, как они взаимодействуют и когда они срабатывают после предъявления теста.

2. Методы исследования

В исследовании участвовали 82 здоровых испытуемых в возрасте 18–25 лет, с нормальным бинокулярным и цветовым зрением, с остротой зрения 1.0 или выше, не имеющие текущих или прошлых неврологических и психических заболеваний. Среди них 66 испытуемых участвовали в электрофизиологических исследованиях, 41 – в условиях пассивного наблюдения, а 25 – в условиях активного выбора. 16 испытуемых приняли участие в фМРТ-исследовании, 8 – в условиях пассивного наблюдения, 8 – в условиях активного выбора.

Тестовые стимулы представляли собой матрицы размером 10×10 решеток – элементов Габора (синусоидальная решетка, модулированная гауссианом). Изображения матриц занимали зрительный угол в 10° . На дистанции 2,6 м размер каждой решетки составлял 1° .

Габоровский элемент состоял из 4-х белых и черных полос, их пространственная частота составляла 4 цикла на угл. град, максимальный контраст Михельсона – 0,9. Ориентация каждого из 100 габоровских элементов в матрице варьировалась от 0 до 160° с шагом 15° . Использовали восемь типов матриц по степени упорядоченности ориентаций элементов. В условиях минимально упорядоченных стимулов ориентация решеток была случайной. Вероятность того, что вертикально или горизонтально ориентированные решетки окажутся в матрице, увеличивалась линейно: при увеличении вертикальной ориентации горизонтальная ориентация пропорционально уменьшалась и наоборот. Так, восемь рядов матриц содержали 8% (случайная матрица), 16, 24, 32, 40, 48, 56 и 64% вертикальных (или горизонтальных) элементов. Таким образом, матрицы варьировали по степени упорядоченности в соответствии с числом элементов, имеющих одинаковую ориентацию. Максимальное число элементов с одинаковой ориентацией составляли наиболее упорядоченную матрицу. В процессе стимуляции доминантная ориентация матрицы изменялась случайно от предъявления к предъявлению (см. рис. 1).

В психофизических, электрофизиологических и фМРТ-исследованиях использовали две экспериментальные процедуры – пассивное наблюдение и активное выделение доминантной ориентации элементов Габора в матрице.

В психофизических и электрофизиологических исследованиях каждый стимул предъявляли в течение 1000 мс на фоне случайной матрицы. Тестовый стимул заменяли случайной матрицей (которая воспринималась как фоновый маскирующий стимул, отображаемый в течение 1000 мс), после чего появлялась новая тестовая матрица. Таким образом, тестовый стимул предъявляли каждые 2 с.

Электроэнцефалограммы (ЭЭГ) затылочной, теменной, височной, центральной и фронтальной областей регистрировали с использованием 29 Ag/AgCl-электродов, устанавливаемых на поверхности головы в соответствии с международной системой “10-10”. “Земляной” электрод устанавливали на лбу испытуемого, два референтных электрода – на левом и правом соцевидных отростках. Импеданс электродов – около 5 кОм. Зрительные ВП записывали от 29 электродов, расположенных на скальпе соответственно проекциям затылочной, теменной, височной, центральной и лобной (фронталь-

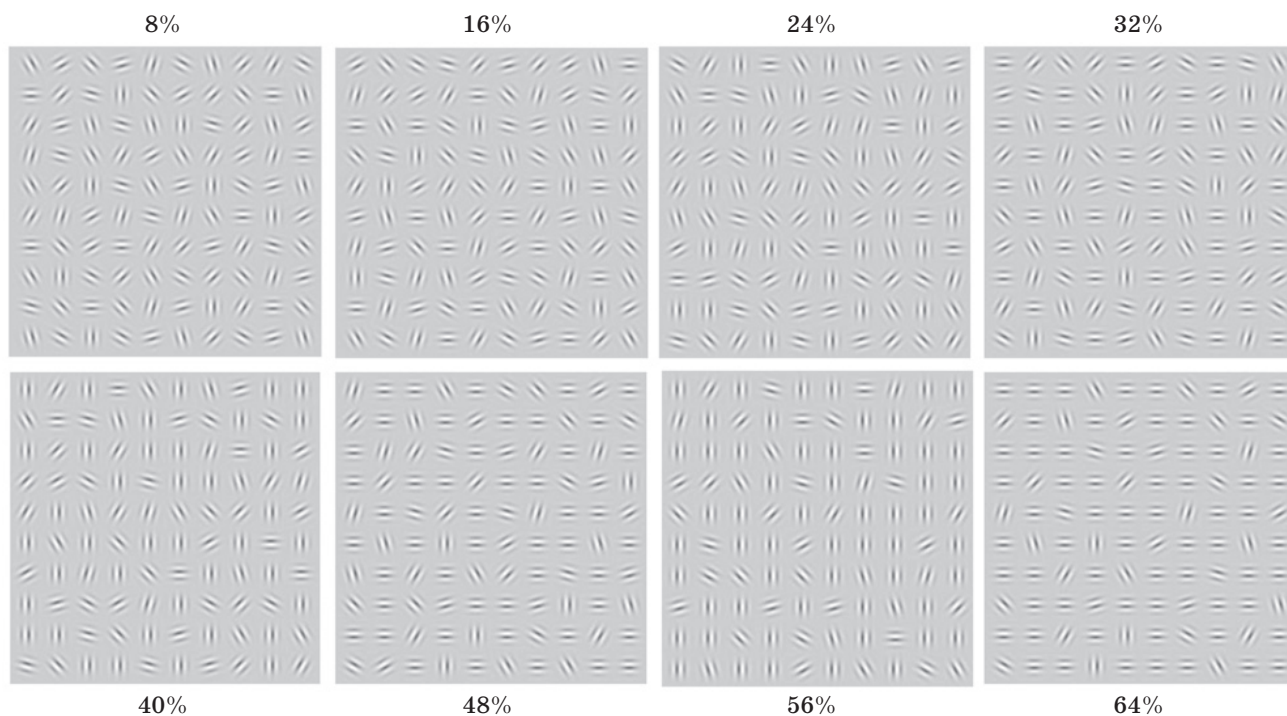


Рис. 1. Примеры тестовых матриц с различным содержанием одинаково ориентированных элементов Габора, представляющих различную степень упорядоченности.

ной) областям коры. Электроды под номерами 30 и 31 на ЭЭГ использовали для электроокулограммы. Отсчеты ЭЭГ (вызванных потенциалов) снимали с частотой 1000 Гц и пропускали через аналоговый фильтр с полосой от 0,1 Гц до 300 Гц. Дополнительный цифровой фильтр с полосой от 1 до 30 Гц применяли для визуализации зрительных ВП.

Распределение мозговой активности (пространственное картирование) выполняли с помощью фМРТ. В фМРТ-исследованиях для предъявления стимулов использовали проектор BENQ PB 8250 XGA, размещенный вне камеры (частота кадровой развертки 85 Гц). Для регистрации использовали 1.5 Т MR-сканер (Symphony, Siemens). Сканировали мозг в 36 срезах (пиксельная матрица 64×64).

В фМРТ-исследованиях в процессе процедуры пассивного наблюдения испытуемый фиксировал взор в центре экрана. Испытуемого не просили принимать какие либо решения относительно изображений и нажимать кнопку ответа. Эксперименты в условиях пассивного наблюдения состояли из двух частей: предъявления случайных и упорядоченных матриц. Активацию осуществляли через одновременное изменение ориентаций всех элементов

матрицы. Условие “активации” сравнивали с условием “покоя”, когда матрица была “заморожена”. Длительность каждой фазы была около 37 с.

В условиях процедуры активного наблюдения испытуемый фиксировал взор в центре экрана и был проинструктирован нажимать левую клавишу пульта в случае его решения о доминировании вертикальной ориентации в матрице и правую клавишу, если ориентация, по его мнению, была горизонтальной. Использовали матрицы с различной степенью упорядоченности: слабо упорядоченные, в которых 24% элементов имели одинаковую ориентацию, и более упорядоченные, в которых одинаковую ориентацию имели 56% элементов. Локализацию активных зон идентифицировали в соответствии с разницей между стимуляцией более упорядоченными (“активация 1”) и менее упорядоченными стимулами (“активация 2”) и наоборот. Доминантная ориентация могла быть горизонтальной или вертикальной от предъявления к предъявлению. Таким образом, задача испытуемого заключалась в правильном выборе и нажатии соответствующей клавиши. Число вертикальных и горизонтальных матриц было одинаковым как в режиме

покоя, так и в активном режиме. Ответы на вертикальные и горизонтальные ориентации усредняли, тем самым усредняли нажатия левой и правой кнопки.

Цифровая обработка изображений результатов фМРТ-исследований включала выделение артефактов, связанных с движением головы в процессе сканирования, и статистический анализ с конструированием статистических карт изображений активности мозга. Статистические карты были совмещены с анатомическими изображениями. Для этого был использован стандартный пакет программ AIR. Для идентификации анатомических структур полученные изображения трансформировали согласно атласу Talairach с помощью программного обеспечения MEDx v.3.46. Статистический анализ включал построение статистических карт разницы содержания оксигемоглобина и дезоксигемоглобина (по критерию Стьюдента $t \geq 4$). Нулевая гипотеза (H_0) заключалась в том, что для одного испытуемого интенсивности сигналов, измеренных в течение покоя и в период активации, не отличались

$$H_0 \Rightarrow I_{\text{покой}} = I_{\text{активация}};$$

не отличались интенсивности и в периоды активации 1 и 2

$$H_0 \Rightarrow I_{\text{активация1}} = I_{\text{активация2}}.$$

Затем проводили статистическую обработку изображений фМРТ-исследований для выделения локального изменения активности,

характерной для всей группы испытуемых. В завершение изображения карт активности соотносили с изображениями анатомических структур мозга с помощью стандартного пакета программ.

3. Результаты

Результаты работы изложены в трех разделах. В первом разделе представлены результаты психофизических, во втором – электрофизиологических исследований. Они позволили отразить развитие во времени различных стадий обработки тестовых изображений в зрительной системе. В третьем разделе представлены результаты картирования мозга с использованием фМРТ.

3.1. Психофизические исследования были выполнены только в условиях активного наблюдения. Испытуемый получал инструкцию нажимать левую клавишу консоли, если предъявляемая матрица, по его мнению, была с доминирующей вертикальной ориентацией, или правую, если – с горизонтальной. Психофизические исследования позволили получить отношения между степенью упорядоченности стимулов, числом правильных ответов и временем реакции наблюдателя. Рисунок 2 показывает результаты психофизических измерений, усредненные по 25 испытуемым.

Видно, что процент правильных ответов был низким для менее ориентированных матриц и резко увеличивался с увеличением сте-

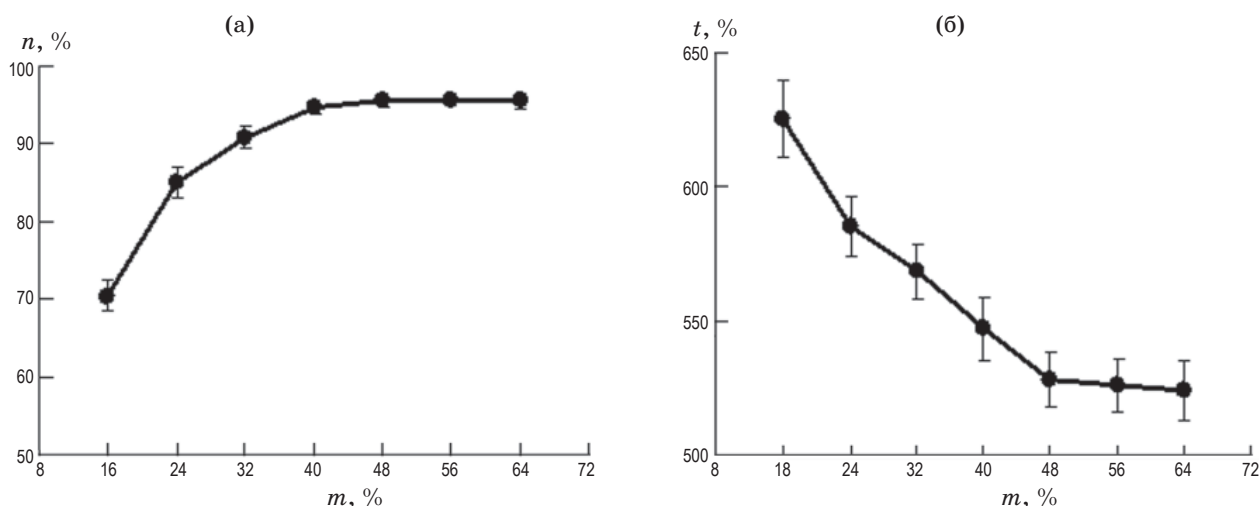


Рис. 2. Зависимость числа (n) правильных ответов (а) и времени реакции (б) от степени упорядоченности матриц (числа элементов Габора (m) с одной ориентацией в матрице 10×10 элементов Габора). Задача испытуемого – определить доминирующую ориентацию в изображении. Данные усреднены по 25 испытуемым. Вертикальные линии показывают стандартные ошибки.

пени упорядоченности ориентации, достигая плато, когда матрицы содержали 40 или более одинаково ориентированных элементов. Что касается времени реакции, то оно постепенно уменьшалось от 625 до 524 мс с увеличением числа одинаково ориентированных решеток, демонстрируя уменьшение времени обработки стимулов для более упорядоченных матриц.

3.2. В электрофизиологическом исследовании мы регистрировали ВП от электродов, расположенных на скальпе в проекциях затылочной, теменной, височной и лобной коры. Использовали две экспериментальных процедуры: пассивное наблюдение и активный

выбор. При пассивном наблюдении примеры зрительных ВП, усредненных для 41 испытуемого, показаны на рис. 3 и зарегистрированы от электродов соответственно затылочной (а) и лобной (б) коры.

Как видно на рис. 3, при пассивном наблюдении затылочные ВП характеризуются несколькими ранними компонентами (P100, N150 и P220), тогда как ВП фронтальных областей характеризуются только одной поздней доминантной волной с максимальным значением около 230 мс после предъявления стимула.

На рис. 4 представлены результаты, полученные при условии активного ответа испытуе-

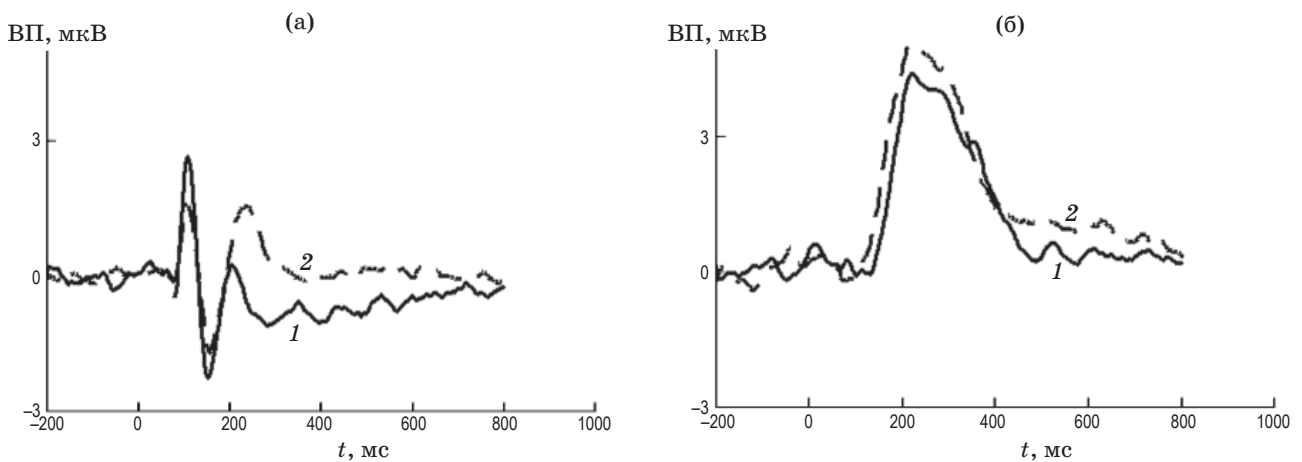


Рис. 3. Вызванные потенциалы, записанные в проекциях затылочной (а) и лобной (б) областей в ответ на предъявление случайных и упорядоченных матриц. Пассивное наблюдение. 1 – степень упорядоченности 100% (все элементы Габора в матрице 10×10 элементов имеют одну упорядоченность); 2 – неупорядоченные, случайные матрицы, степень упорядоченности 8% (8 элементов в матрице 10×10 имели одну ориентацию, разные ориентации оказываются равновероятны).

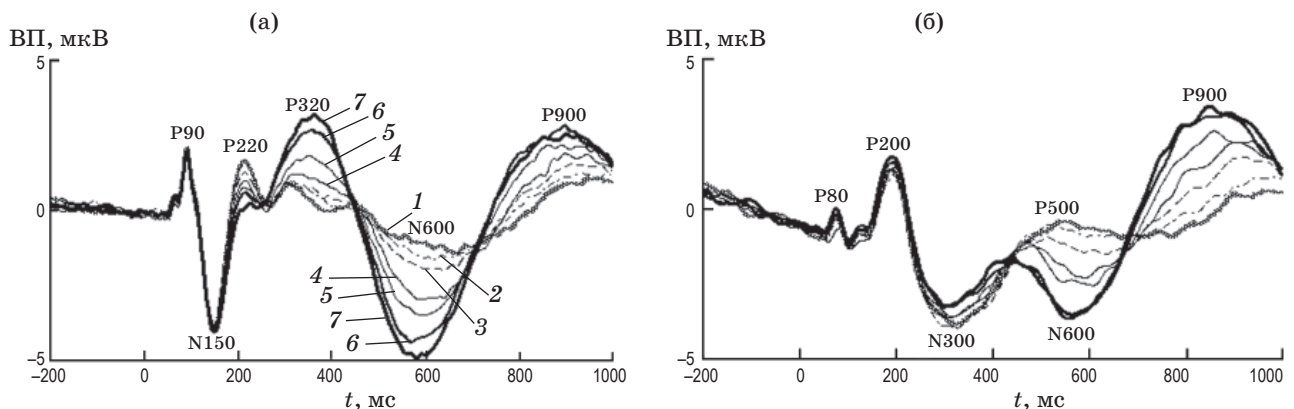


Рис. 4. Вызванные потенциалы, записанные в затылочной (а) и лобной (б) областях в ответ на предъявление матриц с различной степенью упорядоченности. 1 – 16%, 2 – 24, 3 – 32, 4 – 40, 5 – 48, 6 – 56, 7 – 64%. Активное наблюдение. Задача испытуемого заключалась в определении доминантной ориентации. Данные усреднены по 25 наблюдателям.

мого, осуществляющего выбор доминирующей ориентации в матрице.

Вызванные потенциалы при активном выборе и пассивном наблюдении отличаются. Действительно, если сравнивать электрические отклики, полученные при пассивном и при активном наблюдении (рис. 3 и 4), можно увидеть принципиальную разницу между этими двумя типами ВП. Для пассивной задачи мы видим затухание ВП на протяжении 300 мс после стимуляции в затылочных и до 400 мс – во фронтальных областях. Временной предел в 300–400 мс для вызванных осцилляций является типичным при условии пассивного наблюдения. Более поздние колебания электрической активности мозга отсутствуют, вероятно, из-за их низкой синхронизации в этом режиме наблюдения.

При активном выборе на этих временах мы наблюдаем низкочастотные колебания, длящиеся до 1000 мс после стимуляции. В задаче активного выбора ранние компоненты ВП (во временном отрезке 100–200 мс после стимуляции) не отличаются существенно для различных типов стимула. Только относительно поздние компоненты показали значимую зависимость от степени упорядоченности матрицы. Эти различия в амплитуде и латентности начинаются от 200 мс после стимуляции.

Во временном диапазоне 0–250 мс после стимуляции ранние волны ВП, записанных от затылочной и фронтальной областей, отличаются по амплитуде и латентности, но без видимых изменений полярности. Однако во временном отрезке примерно 250–500 мс после стимуляции ВП имеют разную полярность компонентов. В интервале от 500 до 1000 мс после стимуляции очень поздние потенциалы фронтальной и затылочной коры одинаковым образом зависят от степени упорядоченности стимула.

На основе измерений латентности пиков электрофизиологических реакций и психофизических измерений времени реакции мы попытались в наших экспериментальных условиях найти их корреляцию с моментом принятия решения. Латентные периоды ранних компонентов ВП, записанных в затылочной и фронтальной областях, не показали никакой зависимости от степени упорядоченности матриц. Первую зависимость латентного периода от сложности стимула мы наблюдали во фронтальной области через 300–330 мс после стимуляции (N300). Несколько более поздняя волна

(310–360 мс) продемонстрировала обратную корреляцию в затылочной коре.

Выраженная зависимость значений латентности пиков ВП мы наблюдали во фронтальной области на 450–550 мс после стимуляции (P500). После этой точки ВП характеризуются низкочастотными отрицательными и положительными волнами (N600 и P900) с высокой амплитудой и широким распределением по скальпу. Зависимость их латентности и латентности N300 и P500 во фронтальной области наблюдалась параллельно с кривой времени реакции. В соответствии с изменением времени реакции испытуемого меняются и латентности поздних компонентов ВП. Вероятно, изображения более упорядоченных по ориентации элементов матрицы требуют меньше времени для обработки в зрительной системе. Зависимости латентных периодов компонентов ВП в затылочной и в лобной коре от сложности матриц – процента упорядоченных (с одной ориентацией) элементов Габора – представлены на рис. 5.

Из рисунка видно, что ранние компоненты не изменяются при изменении сложности (уменьшении степени упорядоченности) стимула, а поздние – зависят, как зависит и время реакции наблюдателя.

Далее мы вычислили коэффициенты корреляции между различными компонентами ВП затылочной и лобной областей коры и временем реакции наблюдателя (временем нажатия кнопки). Результаты вычислений представлены в табл. 1 и 2.

Из таблиц видна значимая корреляция латентности некоторых компонентов ВП, запи-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции (k) между временем реакции и латентностями компонентов ВП, записанных в лобной области, и их статистическая значимость (p)

ВП	P80	P200	N300	P500	N600	P900
k	-0,10	-0,12	0,80	0,97	0,99	0,97
p	нет	нет	0,95	0,99	0,99	0,99

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (k) между временем реакции и латентностями компонентов ВП, записанных в затылочной области, и их статистическая значимость (p)

ВП	P90	N150	P220	P320	N600	P900
k	-0,35	-0,38	-0,62	-0,89	0,96	0,94
p	нет	нет	нет	0,99	0,99	0,99

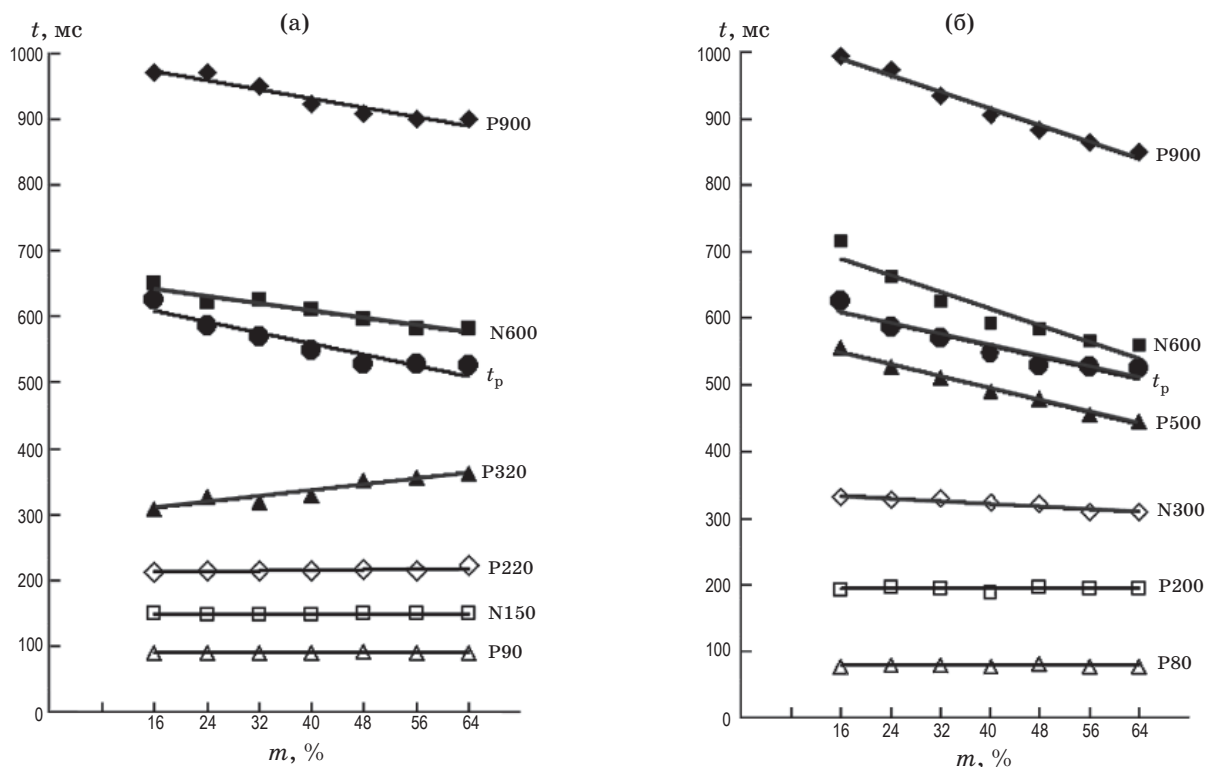


Рис. 5. Зависимость латентности компонентов ВП (P80-P900, N150-N600), полученных в затылочной и лобной областях от степени упорядоченности стимулов в задаче выделения доминантной ориентации на изображении. Электрические реакции мозга зарегистрированы от электродов, расположенных в затылочной (а) и лобной (б) областях. t_p – время реакции испытуемого.

санных в лобной и в затылочной областях, с временем реакции испытуемых. Во фронтальной области компоненты ВП N300, P500 изменяются пропорционально времени реакции. Они предшествуют реакции. Также мы можем заметить хорошую корреляцию с временем реакции поздних компонентов N600, P900 и их статистическую значимость. Эти компоненты ВП в затылочной и фронтальной областях развиваются уже после реакции испытуемого, после нажатия им кнопки пульта ответов.

3.3. Измеренные нами зрительные ВП являются зависимым событием, демонстрирующим только временные свойства процесса восприятия и принятия решения. Для локализации этого процесса в мозге мы провели фМРТ-измерения, причем, как и в электрофизиологических исследованиях, в активном и пассивном режимах.

В условиях пассивной экспериментальной процедуры при фМРТ-контроле активности мозга мы предъявляли или упорядоченную матрицу с элементами Габора, имеющими одинаковую ориентацию, или неупорядоченную

матрицу со случайной ориентацией элементов Габора. В обоих случаях мы измеряли активность локальных участков мозга косвенно стандартным методом по количеству кислорода в крови (BOLD – Blood Oxygen Level Dependence). Мы измеряли BOLD-активность в ответ на периодическое предъявление матриц и сравнивали с BOLD-активностью на неподвижное изображение одной из матриц. Различие между активностью на неподвижные и движущиеся матрицы показано для упорядоченных матриц и для случайных матриц. Статистические карты соответствуют 36 срезам мозга, где зона “мозговой активности” (увеличение содержания кислорода или I (активность) $>$ I (покой) при $t \geq 4$) показана цветом. Локализация активных зон была стабильной у 8 испытуемых, которые приняли участие в этих исследованиях.

Мы провели фМРТ-исследования и для оценки реакции структур мозга при активном выборе мы измеряли разницу в BOLD-активности между двумя условиями: разделение доминирующей ориентации в близких к случайным матрицах (24% одинаково ориентированных

элементов), которые тяжело разделить, и близких к ориентированным (56% одинаково ориентированных элементов), которые легко разделить. Как отмечено выше, нулевая гипотеза (H_0) заключалась в том, что интенсивности фМРТ-сигнала, измеряемого в течение этих двух условий, были одинаковыми ($H_0 \Rightarrow I_{\text{активность1}} = I_{\text{активность2}}$).

Полученные данные показывают, что в задаче активного выбора локальное изменение оксигенации крови отражает активность определенных участков фронтальной коры. Активность во фронтальной области в условиях пассивного наблюдения практически отсутствует.

Данные, полученные от одного испытуемого, соответствуют результатам измерений активности мозга для группы испытуемых.

Рисунок 6 иллюстрирует пример результата усреднения от 8 испытуемых и демонстрирует с большой значимостью ($p = 0,001$) достоверность выявленных зон активации.

По данным усреднения активность мозга в условиях пассивного наблюдения представлена преимущественно в дорсальных в затылочных областях коры. В условиях активного выбора на рис. 6 можно видеть заметные области активации во фронтальной области. Выравнивание статистических карт с анатомическими изображениями и трансформация результатов в соответствии с атласом Талейраха (Talairach atlas) показывают, что эти области активации соответствуют областям по Бродману ВА6, ВА9, ВА10 и ВА24. Заметим, что имеется некоторое различие между вычитанием распре-

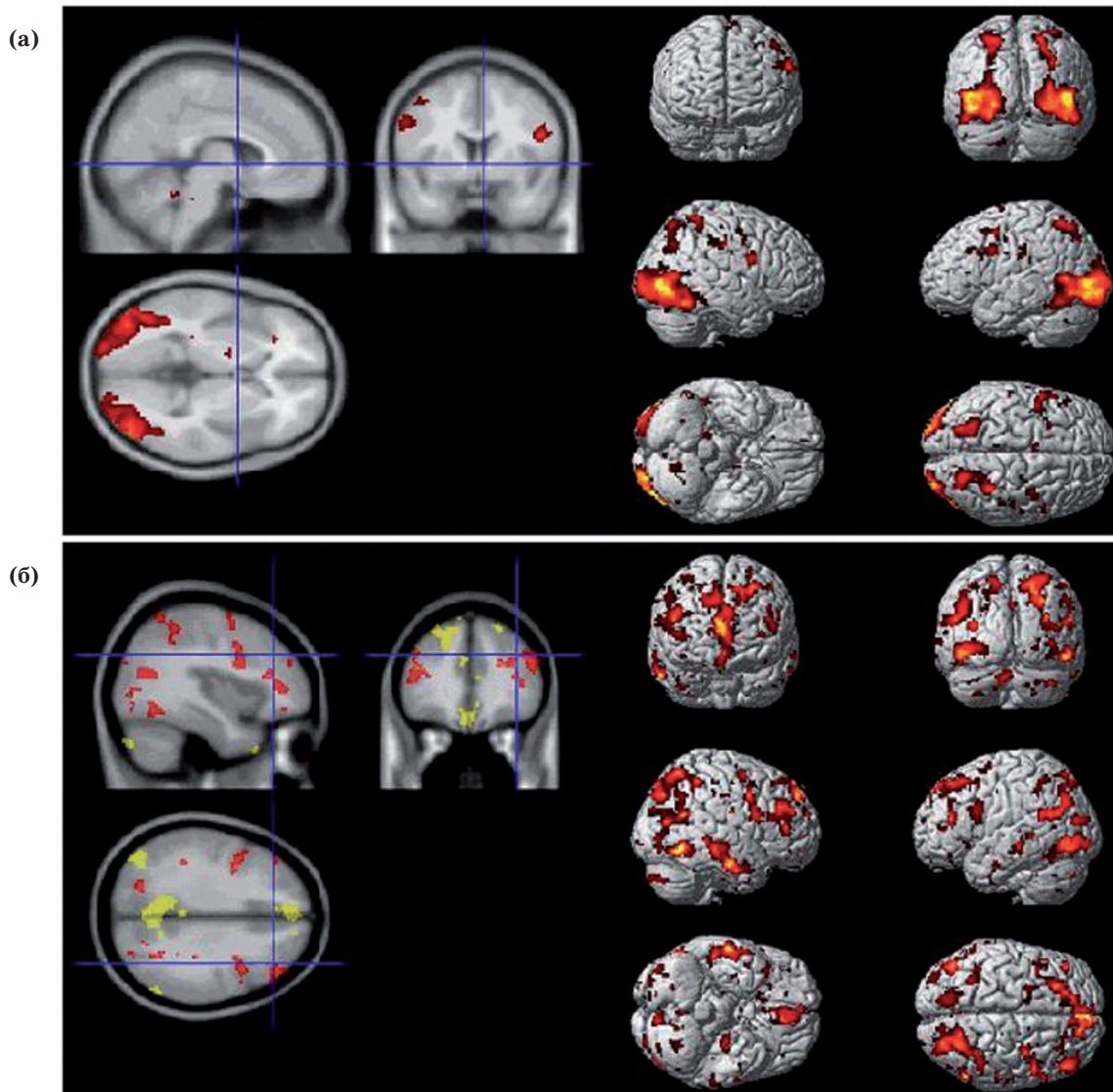


Рис. 6. Усредненная, для группы из 8 испытуемых, фМРТ статистическая карта достоверного изменения активации при пассивном наблюдении (а) и при активном выборе (б). Результат вычитания распределения активации 1 из распределения активации 2 и наоборот окрашен красным и желтым цветом.

деления интенсивности сигнала в период активации 1 из распределения интенсивности сигнала в период активации 2, и наоборот. В этой ситуации мы видим, что активные области локализованы рядом, но еще включают область поясной извилины – ВА24.

Сравнение BOLD-ответов в пассивном и активном режимах фМРТ-картирования показывает, что активация во фронтальных областях появляется только тогда, когда испытуемые активно воспринимают стимулы и принимают решение о них. Мы предполагаем что фронтальные области ВА6, ВА9, ВА10 и ВА24 принадлежат к нейронным ансамблям, ответственным за принятие решений, по крайней мере в наших экспериментальных условиях.

Между активированными зонами мозга (а именно между затылочными зрительными областями и областями фронтальной коры, принимающей решения), выявленными в наших исследованиях методом фМРТ, мы реконструировали межкорковые связи, которые обеспечивают их взаимодействие. Реконструкцию осуществляли с помощью метода диффузно-тензорной томографии (DTI: diffusion-tensor imaging) и последующей обработки изображений проводящих путей с привязкой к активированным участкам коры головного мозга испытуемых во время их исследования в активном протоколе. С помощью этой техники и программного обеспечения были реконструированы волокна (аксоны), начинающиеся от зрительных областей в затылочной области и проецирующиеся в области принятия решения во фронтальной доле, локализованные с помощью фМРТ. Этим же методом установлены и обратные аксонные связи между фронтальными центрами принятия решений и областями зрительной коры в затылочной области.

В результате выделены пути, идущие из затылочной во фронтальную область и из фронтальной в затылочную кору. Это так называемые восходящие и нисходящие связи.

4. Обсуждение

В исследованиях Д. Филда, а также в независимых от них работах И. Ковач и Б. Юлеша [7–10] ориентации всех элементов были случайными, кроме нескольких элементов, которые формировали контур из квазилинейных элементов. Осуществленный Д. Филдом анализ процессов объединения элементов Габора в контур позволяет исследовать алго-

ритмы локального взаимодействия между активированными нейронами и реконструировать из элементов Габора фигуру. Горизонтальные связи, существующие между нейронами в первичной зрительной коре (V1), настроены на ориентацию, которая обеспечивает восприятие коллинеарных элементов [7–10]. Так, например, при наблюдении натуральных сцен человек легко конструирует конфигурацию веток, хотя они и перекрыты частично листвой.

Мы разработали тип стимулов, в которых тестовым объектом в изображении матриц являются не квазилинейные линии в матрице, а вся матрица, образующая тестовые изображения – текстуры. Текстуры формируются из матрицы элементов Габора с различной ориентацией (текстуры ранжируем от текстуры со случайной ориентацией до упорядоченной с доминирующей горизонтальной или вертикальной ориентацией). В наших экспериментах испытуемого просили дать оценку доминантной ориентации элементов в матрице. Это означает, что испытуемый должен был оценить ориентацию большинства элементов, т. е. выполнить глобальный анализ представленного изображения. Сложность матриц в этой задаче, таким образом, была определена в соответствии с числом (процентом) элементов Габора в матрице, имеющих одинаковую ориентацию. Доминирующая ориентация элементов Габора в матрице менялась случайно, так что моторный ответ наблюдателя не зависел от выбора.

Благодаря этому набору стимулов в условиях активного и пассивного наблюдения, настоящее исследование позволило определить центры принятия решений в мозге с помощью фМРТ, а также исследовать временные характеристики стадии принятия решения при обработке зрительной информации с помощью электрофизиологических методов. Важно подчеркнуть, что мы изучали процесс принятия решений о пространственных свойствах изображений, которые имели минимальное эмоциональное значение [11–15].

Ранее было показано, что принятие решений о стимулах, имеющих эмоциональную окраску, вовлекает области вентральной части фронтальной коры [16], в то время как изображения без эмоциональной окраски в наших исследованиях вовлекает другие, более дорсальные области фронтальной коры. В процессе выполнения задачи испытуемым в его лобной

доле мозга формируются мозаичные центры принятия решений [15].

Наряду с результатами, показывающими локализацию процесса принятия решений об изображениях, временные характеристики работы лобных центров принятия решений мы исследовали электрофизиологическими методами. Представленные результаты показали, что латентность ранних компонентов ВП не зависит от степени упорядоченности в предъявляемых тестовых матрицах. Известно, что ВП в первые 100 мс после стимуляции в затылочной области отражают нейронную активность, кодирующую такие характеристики стимулов, как контраст, яркость и пространственная частота, но в этих экспериментах они были постоянными. Для наших тестовых изображений компоненты ВП около 200 мс отражают нейронную активность, связанную со следующим уровнем обработки, таким как восприятие целостного образа или восприятие ориентации элементов. Этот вывод согласуется с результатами других исследований.

Интересно, что при пассивном наблюдении ранние компоненты во фронтальной коре не выражены. Вероятно, что без задачи выбора и принятия решений взаимодействие затылочной и лобной коры незначительно и выделение отклика на поверхности головы затруднено.

В наших экспериментах при задаче активного выбора в лобных зонах выражены ранние компоненты, а латентность компонентов после 250 мс во фронтальной области начинает зависеть от степени упорядоченности изображений. Это также коррелирует с временем реакции в психофизических экспериментах. Так, мы полагаем, что во временном интервале 250 и 500 мс после предъявления стимулов решение “принимается” во фронтальной коре. Поздние волны, которые появляются примерно через 600–900 мс после включения стимула, либо отражают уровень уверенности испытуемого в точности решения, либо сравнение принятого решения с характеристиками стимула. Процесс сравнения может косвенно отражать работу механизма обнаружения ошибок [17].

Локализацию центров принятия решений в коре головного мозга осуществляли с помощью использования фМРТ в тех же экспериментальных условиях [11–15]. В экспериментальном протоколе с пассивным наблюдением матриц с низкой степенью упорядоченности активность вызывалась не только в затылоч-

ных областях, но и в теменной области. Эта активация была типичной для пассивного наблюдения. Однако не было активации во фронтальной области. Активация области V5 (область, где нейроны отвечают на синхронное движение) в нашем случае была обусловлена когерентным вращением, т. е. когерентным изменением ориентации решеток Габора, которые испытуемый воспринимал как вращение.

Следует заметить, что результаты, полученные у всех испытуемых, аналогичны, следовательно, в будущем настоящий протокол может быть использован и в клинических исследованиях.

В процессе нашей работы мы обнаружили разные ответы при использовании различных экспериментальных протоколов. При активном протоколе, требующем принятия решения, испытуемый выполняет активный выбор, базирующийся на доминирующих ориентациях элементов матрицы. В активном экспериментальном протоколе активация проявляется во фронтальной области. Если сравнить стимуляцию матрицами, имеющими высокую и низкую упорядоченности, записи показывают поразительную разницу в распределении активности в лобных областях ВА6, ВА9, ВА10 и ВА24. Это различие демонстрирует большое число локусов активности в различных частях коры. Активное наблюдение приводит к активированию локусов во фронтальной коре, отражающих работу центров принятия решений.

Эти данные частично согласуются с хорошо известными исследованиями Дамасио и его коллег [16]. Но в их исследованиях принятие решений, сделанное испытуемым, обычно ассоциируется с эмоциональным выбором. Вероятно, это второй механизм принятия решений, на базе функционирования структур, взаимосвязанных с эмоциональной сферой [3, 16]. В нашем исследовании испытуемые должны были принимать решения исключительно о доминирующей ориентации в матрице, т. е. о конфигурации сложных фрагментированных изображений – о ее форме. Решения в наших экспериментах, таким образом, имеют отношение к оценке глобальной ориентации элементов текстуры и зависят от степени упорядоченности внутри стимула. Это означает, что решение задачи должно вовлечь дорсальные зрительные пути, ответственные за описание пространственных отношений. Центры принятия решений при эмоциональном значении стимула являются выходом вентрального пути.

Центры принятия решений о конфигурации объекта и о значении объекта для наблюдателя – это соседние, но разные части фронтальной, а точнее префронтальной коры. Это заключение подтверждают результаты вычитания распределения интенсивности сигнала в изображениях карт мозга в режимах активности 1 из 2 и вычитания в режимах активности 2 из 1. Механизм принятия решения в нашей экспериментальной парадигме имеет другую локализацию в лобной коре.

На этом основании мы можем сделать важное заключение, что фронтальная кора организована как ряд различных зон, каждая из которых выполняет решение в различных задачах и каждая имеет различную локализацию. Выделенные нами области соединены между собой аксональными связями фронтальной области. Области фронтальной коры соединены прямыми и обратными связями с затылочной корой.

Наши результаты демонстрируют, что в мозге, вероятно, имеются области, осуществляющие решения по множественным критериям и конфликтующим оценкам [18, 19]. Предполагаем, что центры принятия решений, работающие с применением множественных критериев, работают как нейронные оппонентные системы, локализованные во фронтальных областях коры головного мозга человека. Решения в эмоциональной сфере могут конфликтовать с решениями в распознавании образов как конфликты с оппонентными конфигурациями, как оппонентность пространственных отношений.

Интересно, что, как показывает анализ наших исследований, активацию областей, захватывающих поясную извилину, в активном протоколе исследования мы можем видеть, не только непосредственно по данным фМРТ, но и косвенно по электрофизиологическим данным. Амплитуда и латентные периоды поздней волны, развивающейся в интервале 500–1000 мс, т. е. после моторного ответа, коррелируют с принятием решения. Эта волна отражает процесс оценки собственных решений после реакции испытуемых, в основе которого лежит физиологический механизм обнаружения ошибок [17]. В психологической литературе эти процессы получили название оценки уровня риска уже принятого решения [20–22].

Другой важный фактор – уверенность или неуверенность в принятии решения с учетом вероятности происходящих событий [23]. Ре-

ципрокное взаимодействие в префронтальной коре было продемонстрировано ранее с помощью методов функционального картирования мозга в рамках исследования эмоционально-когнитивного взаимодействия [24, 25].

Наша задача заключалась в исследовании принятия решения в условиях неопределенности, причем вполне конкретной неопределенности, связанной со структурой тестового изображения.

Как можно сделать правильное решение в условиях неопределенности? Впервые, еще в XVIII веке, пути решения этой проблемы сформулировал профессор Санкт-Петербургской академии наук Д. Бернулли [26]. Уже тогда он понял необходимость введения механизма, осуществляющего баланс критериев оценки. Теперь можно предположить, что баланс может быть осуществлен с помощью оппонентного механизма взаимодействия разных нейронных структур, аналогично тем оппонентным механизмам, которые известны в первичных структурах зрительной системы.

Еще раз подчеркнем, что, кроме оппонентных взаимодействий внутри фронтальной коры, выделенные нами области фронтальной коры взаимодействуют с областями затылочной коры. В соответствии с нашими данными фронтальные области коры, обеспечивающие выбор и принятие решения, соединены с областями затылочной коры, которая выполняет обработку зрительного сигнала. Следует учесть, что эти прямые и обратные связи, изученные методами прижизненной тензорной трактографии, отражают работу восходящих и нисходящих управляющих сигналов. С помощью метода диффузной трактографии и последующей обработки изображений мы реконструировали пути из затылочной части к тем же центрам принятия решений во фронтальной области, которые были локализованы с помощью фМРТ.

Таким образом, мы идентифицировали, где в мозге “принимается” решение о степени упорядоченности текстур, изображений, нейтральных для наблюдателя. Эта область – не та часть лобной коры которая выделяет эмоционально значимые стимулы и которая была выделена ранее [24, 25]. Так, при различении стимулов, нейтральных и имеющих значение для наблюдателя, активируются различные участки во фронтальной коре. Эта “находка” позволила предположить существование нескольких центров принятия решений во фронтальной обла-

сти. Между этими областями, вероятно, имеются оппонентные внутрикорковые связи. Такая конструкция фронтальной области обеспечивает адекватное поведение и в повседневных, и в экстремальных ситуациях.

5. Заключение

В психофизических, электрофизиологических и фМРТ-исследованиях временного и пространственного картирования мозговой активности мы получили результаты, свидетельствующие о том, что фронтальные зоны коры мозга человека вовлечены в процесс принятия решений. Из настоящего исследования и предшествующих работ можно заключить, что эта область состоит из отдельных зон, рас-

пределение в которых активации различно при принятии решений в зависимости от задачи. Временные характеристики этой финальной стадии обработки зрительного сигнала таковы, что процессы принятия происходят после стимуляции в интервале 200–500 мс, а в интервале 500–900 мс происходит собственная оценка принятого решения. Одни процессы развиваются до, а другие после моторной реакции. Обработка зрительной информации включает, в зависимости от задачи распознавания изображений, различные области мозга вплоть до фронтальной коры, связанные восходящими и нисходящими связями и оппонентными взаимодействиями.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-07-00336.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мирошников М.М., Нестерук В.Ф.* Дальнейшее развитие методологических основ иконоки // Труды ГОИ. 1987. Т. 64. В. 198. С. 5–11.
2. *Philiastides M.G., Ratcliff R., Sajda P.* Neural representation of task difficulty and decision making during perceptual categorization: a timing diagram // J Neurosci. 2006. № 26. V. 35. P. 8965–8975.
3. *Heerkeren H.R., Marrett S., Bandettini P.A., Ungerleider L.G.* A general mechanism for perceptual decision-making in the human brain // Nature. 2004. V. 431. № 7010. P. 859–862.
4. *Красильников Н.Н.* Теория передачи и восприятия изображений // М.: Радио и связь, 1986. 247 с.
5. *Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е.* Функциональная модель зрения // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 72–82.
6. *Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е., Красильникова О.И.* Применение принципов оптимального наблюдателя при моделировании зрительной системы человека // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. С. 17–24.
7. *Kovacs I., Jules B.* A closed curve is much more than an incomplete one: Effect of closure in figure-ground segmentation // Proc. of the National Academy of Sciences of the USA. 1993. V. 90. P. 7495–7497.
8. *Field D.J., Hayes A., Hess R.F.* Contour integration by the human visual system: evidence for a local 'association field' // Vision Research. 1993. V. 33. P. 173–193.
9. *Филд Д.* Согласованные фильтры, вейвлеты и статистика натуральных сцен // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. P. 25–36.
10. *Field D.J., Hayes A.* Contour integration and the lateral connections of V1 neurons. In: The Visual Neurosciences, L.M. Chalupa and J.S. Werner (Eds.), MIT Press. 2004.
11. *Fokin V., Trufanov G., Sevostyanov A., Shelepin Y., Harauzov A., Pronin S.* Occipital-parietal interaction in incomplete pattern discrimination // Perception. 2006. V. 25. P. 18–19.
12. *Shelepin Y., Krasilnikov N., Trufanov E., Harauzov A., Pronin S., Fokin V.* The Principle of Least Action and Visual Perception // Perception. 2006. V. 35. P. 125.
13. *Фокин В.А., Шелепин Ю.Е., Хараузов А.К., Севостьянов А.В., Труфанов Г.Е., Пронин С.В.* Активация областей коры головного мозга человека, активируемых при восприятии упорядоченных и хаотичных изображений // Российский физиологический журнал. 2007. Т. 93. № 10. С. 1089–1100.
14. *Хараузов А.К., Шелепин Ю.Е., Пронин С.В., Сельченкова Т.В., Носков Я.А.* Электрофизиологическое исследование механизмов распознавания текстур // Российский физиологический журнал. 2007. Т. 93. № 1. С. 3–13.
15. *Шелепин Ю.Е., Фокин В.А., Хараузов А.К., Пронин С.В., Чихман В.Н.* Локализация центра принятия решений при восприятии формы зрительных стимулов // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 6. С. 835–837.
16. *Bechara A., Damasio A.R.* The somatic marker hypothesis: A neural theory of economic decision // Games Economic Behavior. 2005. V. 52. P. 336–372.

17. *Bechtereva N.P., Shemyakina N.V., Starchenko M.G., Danko S.G., Medvedev S.V.* Error detection mechanisms of the brain: background and prospects // *Int. J. Psychophysiol.* 2005. V. 58. № 2–3. P. 227–34.
 18. *Saaty T.L.* *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.* New York: McGraw-Hill. 1980.
 19. *Saaty T.L.* *Theory and Applications of the Analytic Network Process.* Pittsburgh, Pennsylvania. 2005.
 20. *Кочетков В.В., Скотникова И.Г.* Индивидуально-психологические проблемы принятия решений // М.: Наука, 1993. С. 144.
 21. *Шендяпин В.М., Барабанщиков В.А., Скотникова И.Г.* Уверенности в решении: моделирование и экспериментальная проверка // *Экспериментальная психология.* 2010. Т. 3. № 1. С. 30–57.
 22. *Tversky A., Kahneman D.* The Framing of Decisions and the Psychology of Choice // *Science.* 1981. V. 211. № 4481. P. 453–458.
 23. *Clark D.* *Framing effects exposed.* New York: Pearson Education Limited. 2009.
 24. *Damasio A.* Category-related recognition defects as a clue to the neural substrates of knowledge // *Trends Neurosci.* 1990. V. 13. № 3. P. 95–98.
 25. *Northoff G., Heinzl A., Bermpohl F., Niese R., Pfennig A., Pascual-Leone A., Schlaug G.* Reciprocal modulation and attenuation in the prefrontal cortex: an fMRI study on emotional-cognitive interaction // *Hum Brain Mapp.* 2004. V. 21. P. 202–212.
 26. *Bernoulli D.* *Speciment theories novae de mensure sertis* // *Commentarii Aademiae Sientiarum Imperialis Petropolitananae.* 1738. V. 5. P. 175–192.
-