

УДК 612.821, 612.821.8, 612.84, 57.081.23, 004.932

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-08-29-38

Цифровая визуализация активности нейронных сетей головного мозга человека до, во время и после инсайта при распознавании изображений

© 2018 г. **К. Ю. Шелепин***, **; **Г. Е. Труфанов*****, доктор мед. наук;
В. А. Фокин***, доктор мед. наук; **П. П. Васильев***; **А. В. Соколов*****

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

**ООО «Нейроиконика Ассистив», Санкт-Петербург

***ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова», Санкт-Петербург

E-mail: shelepink@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.04.2018

Технологические возможности позволили начать экспериментальное изучение деятельности нейронных сетей как при осознаваемом, последовательном, аналитическом методе решения задач, так и при внезапном скачкообразном «озарении» или «инсайте». Цель данной работы — изучить перестройку нейронных сетей при переходе от неосознаваемых процессов обработки информации в осознаваемые процессы во время инсайта. Методами цифрового синтеза тестов (динамических изображений) и методами цифрового анализа изображений откликов мозга установлена закономерность перестройки активности крупномасштабных нейронных сетей головного мозга человека в момент «инсайта». Активность крупномасштабных нейронных сетей максимальна в момент «инсайта», соответствующего порогу распознавания, решения задачи, и меньше при подпороговых и даже надпороговых условиях наблюдения динамических изображений. Установлено максимальное значение BOLD (Blood-Oxygen-Level Dependent) сигнала при достижении порога в одних зонах и максимальное снижение активности нейронных сетей в других зонах мозга.

Ключевые слова: зрение, неполные изображения, семантика изображений, пороги распознавания, цифровая обработка изображений, функциональная магнитно-резонансная томография, крупномасштабные нейронные сети, цитоархитектонические зоны мозга человека по Бродману.

Коды OCIS: 330.5000, 330.7310, 330.4270, 330.5510.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нейротехнологий в последние годы, создание искусственных автономных систем, обеспечивающих целенаправленную деятельность и принятие решений, потребовало развитие нейрофизиологических исследований инсайта. Особый интерес представляет моделирование инсайта и деятельности нейронных сетей в задачах, решаемых не аналитическим способом для создания систем искусственного интеллекта. Оказалось, что некоторые инженерные решения созвучны традиционным представлениям гештальт-психологии. Именно в рамках гештальт-психологии Дэви Филд и Роберт Гесс смогли предложить новые методы исследования инсайта, легко моделируемые нейронной сетью, имитирующей работу зоны BA17

(Brodmann area 17) первичной зрительной коры [1, 2]. На основании этих работ мы отождествили момент возникновения инсайта с порогом распознавания изображений в условиях неопределенности. Следует заметить, что не всякий психофизический порог является аналогом инсайта. Эффект неопределенности, этап предварительного накопления и эмоциональное сопровождение порога распознавания являются важными атрибутами инсайта. Эти факторы отсутствуют при определении многих психофизических порогов, например, при определении порогов контрастной чувствительности или порогов разрешающей способности.

В качестве инструмента изучения инсайта нами был выбран метод определения порога распознавания неполных фрагментированных изобра-

жений, компьютеризированный метод Голлин-теста [3] в версии, разработанной в лаборатории физиологии зрения ИФ РАН [4]. Существующие методы визуализации активности головного мозга человека и разработанные нами цифровые методы синтеза тестовых сигналов (неполных изображений, соответствующих Голлин-тесту) позволили определить пути решения поставленной задачи [4–6]. Данный стимул для распознавания требует вовлечения последующих, менее изученных отделов мозга [7].

Таким образом, достижение цели на данном этапе сведено к решению задачи определения порога, соответствующего моменту перехода результатов на осознаваемый уровень принятия решений. Этот переход может быть отождествлен с моментом возникновения инсайта, общеизвестного явления внезапного понимания решаемого процесса, в данном случае сведения разрозненных фрагментов в единое целое, в гештальт путём «внезапного озарения».

Проведённая нами работа позволяет утверждать, что Голлин-тест, как один из наиболее эффективных и изученных методов тестирования мозга, является удобным и надёжным методом для изучения механизмов возникновения инсайта. Ранее нами было показано, что порог распознавания в среднем при первом предъявлении равен 20%, но меняется и зависит от сложности рисунка, знакомства испытуемого с данным рисунком и с методом исследования, от состояния испытуемого и его возраста. Для применения Голлин-теста, как метода, имитирующего инсайт, важно то, что момент распознавания сопровождается выраженной осознаваемой эмоциональной реакцией, регистрируемой нами отдельно [3–6]. Процесс достижения инсайта протекает неосознанно. Наблюдатель видит фрагменты, ожидает увидеть объект, но не знает какой, поэтому работает в условиях неопределённости. Поэтому он не может и не строит аналитических, логических схем решения задачи. Достижение порога происходит неожиданно и вызывает естественную эмоциональную реакцию разной степени выраженности. Следовательно, можно утверждать, что разработанный нами инструмент позволяет исследовать нейрофизиологические механизмы инсайта.

Цель данной работы — изучить изменения BOLD-сигнала по данным функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) суммарной активности головного мозга человека и зон, входящих в крупномасштабные нейронные сети, обеспечивающие порог распознавания и перераспределение активности этих сетей до, при и после инсайта, отождествляемого с достижением порога распознавания неполных фрагментированных изображений тестовых объектов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве динамических изображений выбран компьютеризированный Голлин-тест, работа которого приводит к постепенно нарастающему контуру из случайно возникающих фрагментов [3–6].

Для измерения состояния мозга в момент возникновения инсайта мы использовали фМРТ, которая позволяет определять активацию разных областей мозга на основании изменения локального кровотока. В качестве стимулов был использован динамический сигнал — постепенное, во времени заполнение контура различных контурных изображений живых и неживых объектов. Выбор данного теста, как модели вызова инсайта, был обусловлен возможностью контролировать подпороговые, пороговые и надпороговые состояния мозга в процессе восприятия нарастания процента заполнения контура. Регистрация состояния в период до возникновения порога, в момент порога и после осуществлялось при помощи самотестирования испытуемого, электроэнцефалографии (ЭЭГ) и электромиографии (ЭМГ) лицевых мышц. Также регистрировались изменения диаметра зрачка и микротремор глаз.

Предъявление нарастающего числа элементов контура

При выполнении распознавания Голлин-теста исследовали карты распределения мозговой активности по BOLD-сигналу в момент предъявления стимула — динамического изображения относительно распределённой активности нейронной сети базового режима мозга (относительного покоя — REST). Сравнение осуществляли на основании стандартных методов статистической обработки изображений в среде MatLab и Spm12 «виртуальных срезов мозга» по данным фМРТ.

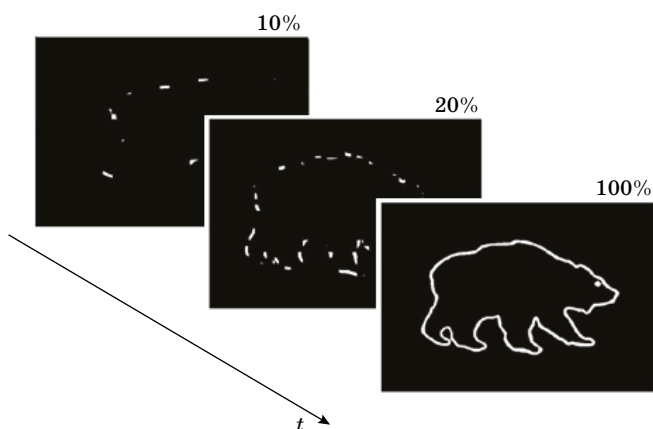


Рис. 1. Отдельные кадры из последовательного ряда тестовых изображений, заполняющих со скоростью одной минуты контур изображения Голлин-теста. На рисунке даны примеры фрагментированного 10, 20 и 100% заполнения контура тестового изображения [3–6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы сравнивали изображения, отражающие активность разных зон мозга, не только относительно «покоя», но и как разницу активности в момент достижения порога распознавания относительно допорогового состояния и в момент достижения порога распознавания относительно послепорогового состояния мозга. Особенность фМРТ-измерений состоит в том, что интерес представляет не абсолютное значение BOLD-сигнала, а разница между его значением в разных состояниях испытуемого. Таким образом, в этих условиях мы всегда имеем дело с относительной величиной, хотя и можем оценивать активность той или иной структуры в числе активированных вокселей. Получены статистически достоверные различия максимальной активности мозга в момент достижения порога, в момент, когда наблюдатель внезапно видит в случайном паттерне точек или фрагментов контура целостный объект, что и является сутью инсайта. Сравнивая карты разниц активности отличия порога от допорогового и послепорогового состояния, представленные на рис. 2А, 2Б, 2В, различия

видимы даже визуально, «на глаз». На графиках это видимое на картах различие активности мозга в разные моменты представлены количественно. На гистограммах в центре виден достоверный пик. Этот пик на графиках соответствует моменту порогового значения распознавания формы неполного, фрагментированного изображения. Последующее увеличение проявляемых на экране фрагментов контура тестового изображения уже не увеличивает различие с «покоем», а напротив, уменьшает это различие.

На рис. 2А и 2В в условиях до, при и после достижения порога распознавания видна активность слева в лобной доле практически на всех срезах. Но на рис. 2Б видно, что увеличивается число вокселей в правом полушарии в лобной доле срезов 20–30 и в затылочной доле срезов от 16 до 0 и срезов от 16 до 24. Это важный результат, он согласуется с общими предположениями о роли правого полушария в развитии инсайта.

Важно отметить, что в момент достижения порога распознавания, который мы отождествляем со своеобразным инсайтом, наблюдается максимум

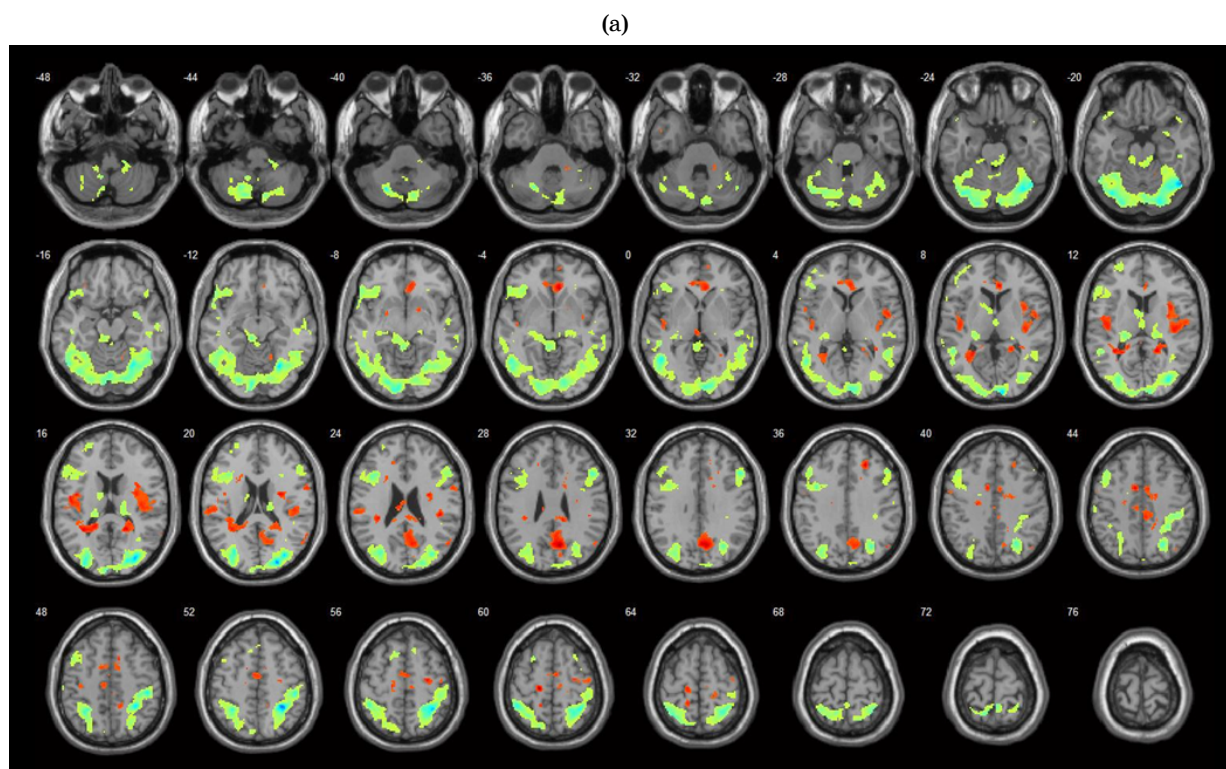


Рис. 2 (начало). Результат статистической обработки разницы состояния активности мозга до, во время и после возникновения инсайта относительно состояния «покоя» по данным фМРТ. Усреднённый уровень активации для группы из 22 человек (FDR-corrected (уровень ложноположительных результатов), $p = 0,01$) в задачах на распознавание неполно представленного изображения объекта. Зоны мозга, окрашенные в красный цвет, — результат статистической оценки активности мозга в состоянии «покоя» относительно состояния «до инсайта» при предъявлении 10% контура (А), в состоянии «покоя» относительно состояния «инсайта» при предъявлении 20% контура (Б), в состоянии «покоя» относительно состояния «после инсайта» при предъявлении 60% контура (В). Зоны мозга, окрашенные в зелёный цвет, — состояние мозга «до инсайта» при предъявлении 10% контура относительно состояния «покоя» (А), состояние мозга «инсайта» при предъявлении 20% контура относительно состояния «покоя» (Б), состояние мозга «после инсайта» при предъявлении 60% контура относительно состояния «покоя» (В).

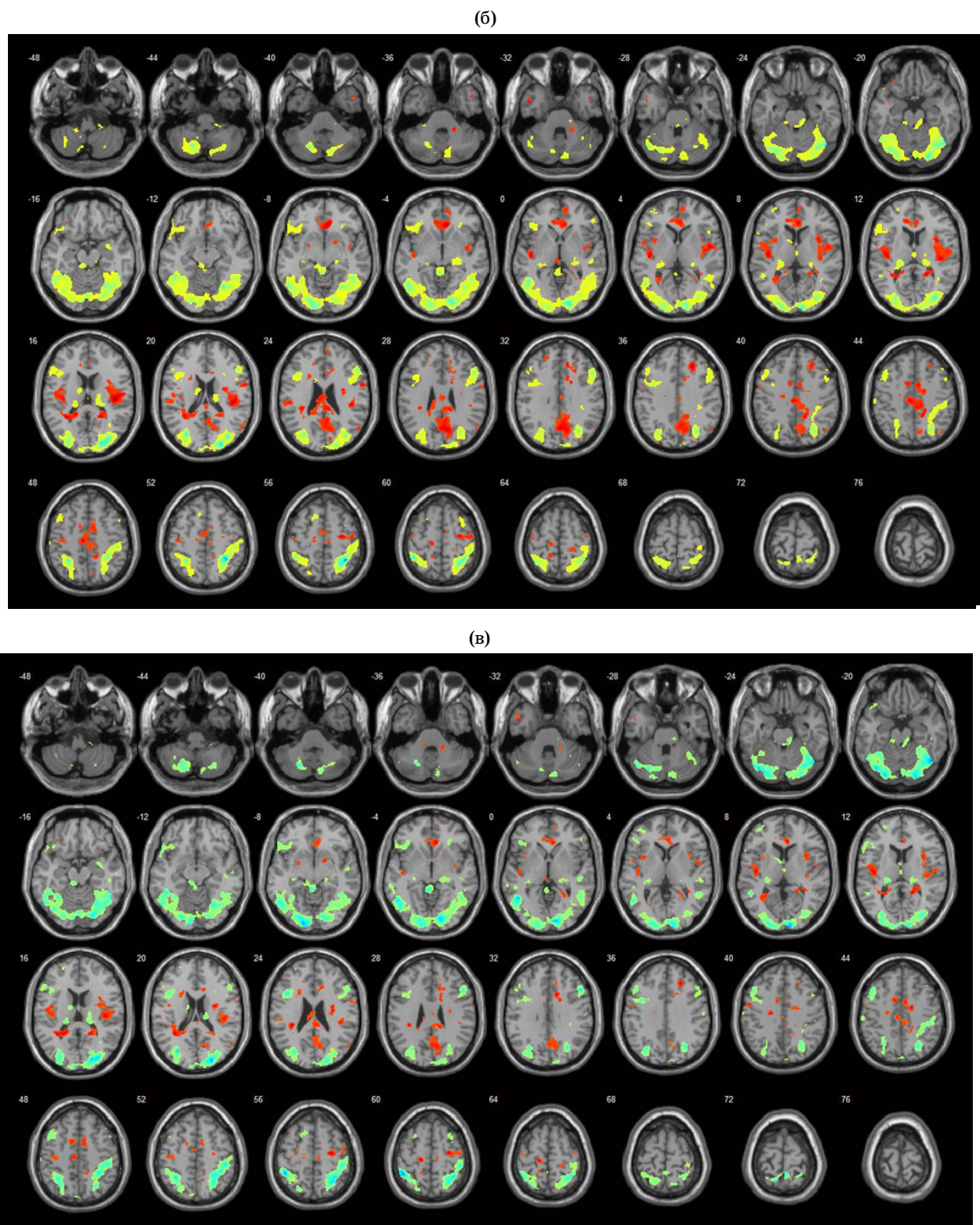


Рис. 2 (окончание). Результат статистической обработки разницы состояния активности мозга до, во время и после возникновения инсайта относительно состояния «покоя» по данным фМРТ. Усреднённый уровень активации для группы из 22 человек (FDR-corrected (уровень ложноположительных результатов), $p = 0,01$) в задачах на распознавание неполно представленного изображения объекта. Зоны мозга, окрашенные в красный цвет, — результат статистической оценки активности мозга в состоянии «покоя» относительно состояния «до инсайта» при предъявлении 10% контура (А), в состоянии «покоя» относительно состояния «инсайта» при предъявлении 20% контура (Б), в состоянии «покоя» относительно состояния «после инсайта» при предъявлении 60% контура (В). Зоны мозга, окрашенные в зелёный цвет, — состояние мозга «до инсайта» при предъявлении 10% контура относительно состояния «покоя» (А), состояние мозга «инсайта» при предъявлении 20% контура относительно состояния «покоя» (Б), состояние мозга «после инсайта» при предъявлении 60% контура относительно состояния «покоя» (В).

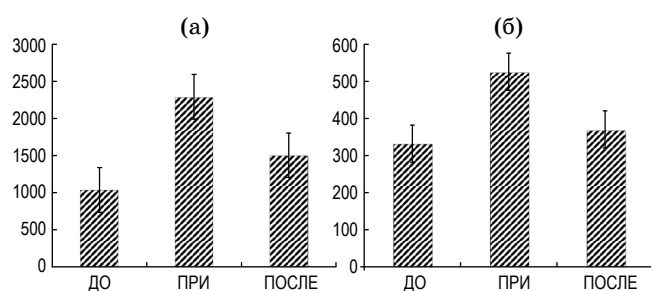


Рис. 3. Среднее значение разницы активированных вокселей всего головного мозга при двух типах статистического сравнения с указанием стандартной ошибки среднего значения (SE) в зависимости от предъявления изображения до появления инсайта, во время инсайта и после достижения инсайта. (а) «активация» относительно «покоя» и (б) «покой» относительно «активации». Предварительные данные представлены ранее [6].

общего числа активированных вокселей фМРТ-срезов. Интересно, что максимум различия достигается как при сравнении «покой» минус «активация», так и «активация» минус «покой». Это связано с тем, что наблюдаются локальные особенности уровня активации, которые значительно ниже в одних зонах и выше в других цитоархитектонических зонах, входящих в разные нейронные сети. Наглядно это увидим при наблюдении динамики изменения BOLD-сигнала во времени.

Изучили активность крупномасштабных нейронных сетей, связывающих структуры префронтальной коры (BA9, BA10, BA11), височно-теменной коры (BA39, BA40, BA22), лимбической коры (BA23, BA24, BA29, BA30, BA31), задневисочной (BA37) и затылочной коры (BA17, BA18, BA19) и подкорковых ядер (инсулы, амигдалы и др.). Показали, что существуют некоторые различия в активации левого и правого полушария. Первые 15 с после начала стимуляции они одинаковы и слева и справа, если рассматривать суммарно от-

вет по BOLD-сигналу всех областей. Хотя и имеются отличия реакции определённых зон на первые, как кажется наблюдателю, случайно появляющиеся точки – фрагменты будущего контура. Затем начинается отклик на формирование из случайных скоплений точек некоего паттерна. Этот отклик происходит не во всех областях. В одних он проявляется увеличением активности BA37, BA19, а в других снижением активности, как например, в медиальной теменной области BA7 или Precunius. Все поле 7, включая Precunius, очень разнородно, его разные зоны включены в разные нейронные сети, и каждая из них выполняет разные функции.

На рис. 4 видно, что область над стрелкой выявляет две значительные области мозга, активируемые практически во всех сферах его деятельности. Форма этой активности разнонаправленная, оппонентная. В литературе они получили названия зоны активации и зоны покоя. Это нейронные сети, проявляющие свою активность в разных состояниях мозга при классификации или при распознавании объектов (нижневисочная кора) и при относительно покое или при более простой форме деятельности, не при решении пороговых задач (поясная извилина и медиальная часть теменной коры). Овал очерчивает первый неспецифический отклик теменных и лобных областей, соответствующих реакции «внимание», когда уже начато предъявления фрагментов, создающих неопределённый рисунок, так как фрагментов недостаточно, чтобы произошёл процесс распознавания. Стрелки указывают среднее значение заполнения контура, при котором происходит распознавание, отождествляемое с инсайтом.

Этот довольно запутанный график откликов мозга отвечает ещё на один вопрос. Где отклик больше: в правом полушарии или в левом? Видно, что в условиях исследования мозговой активности правое

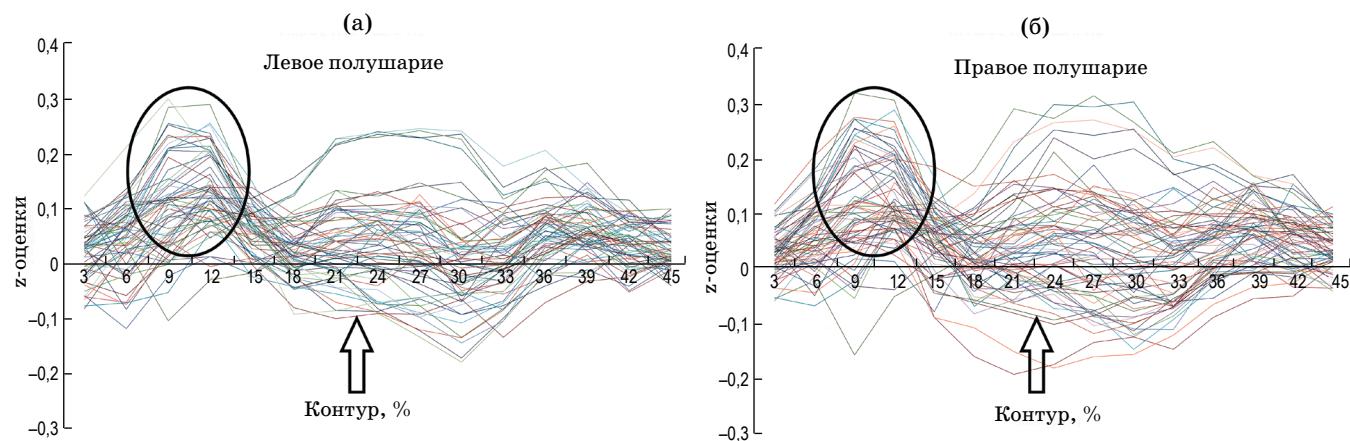


Рис. 4. Изменение во времени BOLD-сигнала всех зон мозга по Бродманну, выбранных нами как области интереса. По оси абсцисс — время и процент заполнения контура, численно равный моменту предъявления. По оси ординат — изменение кровотока в относительных единицах.

полушарие проявляет значительно большую активность (статистически значимое различие).

Рассмотрим отклики мозга отдельных областей. Во времени они соответствуют приходу зрительной информации в мозг в первичные отделы и области синтеза изображений. Инерционность BOLD-сигнала не позволяет точно определять время прихода сигнала в ту или иную область. Но мы предъявляли отдельные фрагменты в одну секунду, что позволило нам увидеть динамику изменения BOLD-сигнала.

На рис. 5–8 мы видим синхронность изменения BOLD-сигнала после начала предъявления. Сразу после начала предъявлений характерно торможение только участков первичной зрительной коры BA17 и BA18 и «безучастность» в этот момент зон BA19, BA37. Но на последующих этапах происходит нарастание BOLD-сигнала в первичных областях зрительной коры BA17, BA18 и значительный рост на последующих этапах обработки BA19 и BA37.

Максимум ответа — в зоне BA37, и этот максимум совпадает с моментом распознавания, т.е. при

возникновении инсайта. Мы видим, что справа оппонентные отклики зоны BA37 и прекунеус более выражены, чем слева. Пик расхождения совпадает с моментом возникновения инсайта или с порогом распознавания и максимумом эмоциональной реакции испытуемого.

Рассмотрим изменения BOLD-сигнала в лобных долях. Видно, что в левом и в правом полушариях в зонах BA9 и BA10 одинаково развивается реакция на появление сигнала. Но потом, в момент, когда развивается инсайт в затылочных отделах крупномасштабной нейронной сети, обеспечивающей распознавание в BA37, и справа и слева есть выраженная активация, а нейронные сети в лобных долях работают своеобразно. Зона BA9 и BA10 в левом и правом полушарии демонстрируют значимые отличия. Слева активность зоны BA9 не изменяется, а зона BA10 тормозится. Справа наоборот возрастает активность зоны BA9, а активность зона BA10 лобной коры не изменяется.

Верхний ряд графиков (а) и (б) на рис. 8 показывает активацию зон, выбранных нами, как зо-

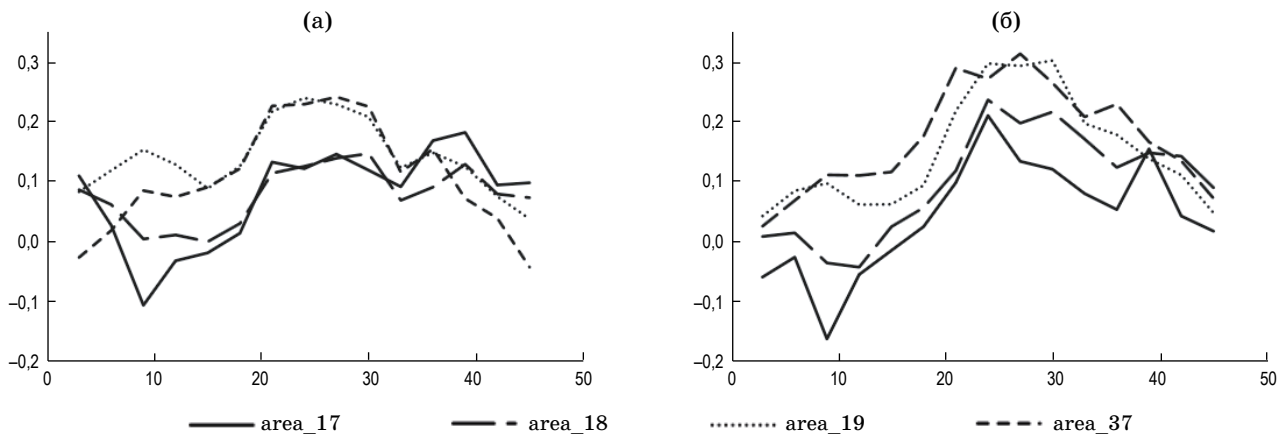


Рис. 5. Изменения BOLD-сигнала в затылочных зонах по Бродману. А — левое полушарие, Б — правое полушарие. По оси абсцис — время и соответствующей ему процент предъявления контура. По оси ординат — значение BOLD-сигнала в относительных единицах.

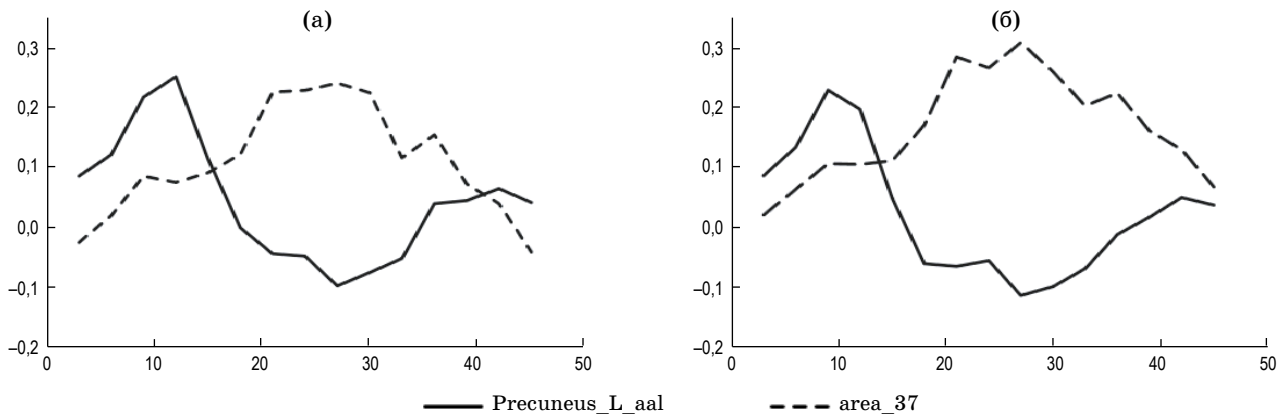


Рис. 6. Отклики оппонентных зон: затылочно-височной коры BA37 и предклинье (precuneus) медиальной области теменной коры (BA7). А — левое полушарие, Б — правое полушарие. По оси абсцисс — время и соответствующей ему процент предъявления контура. По оси ординат — значение BOLD-сигнала в относительных единицах. Различия между откликами в интервале 20–30 с статистически значимы.

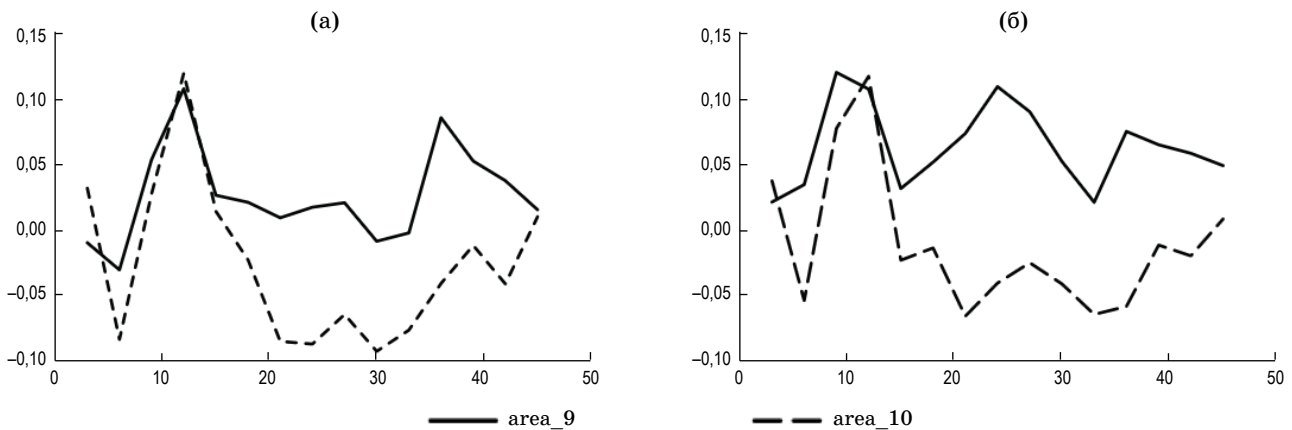


Рис. 7. Отклики зон правой и левой верхних лобных долей мозга ВА9 и ВА10. А — левое полушарие, Б — правое полушарие. По оси абсцисс — время и соответствующей ему процент предъявления контура. По оси ординат — значение BOLD-сигнала в относительных единицах.

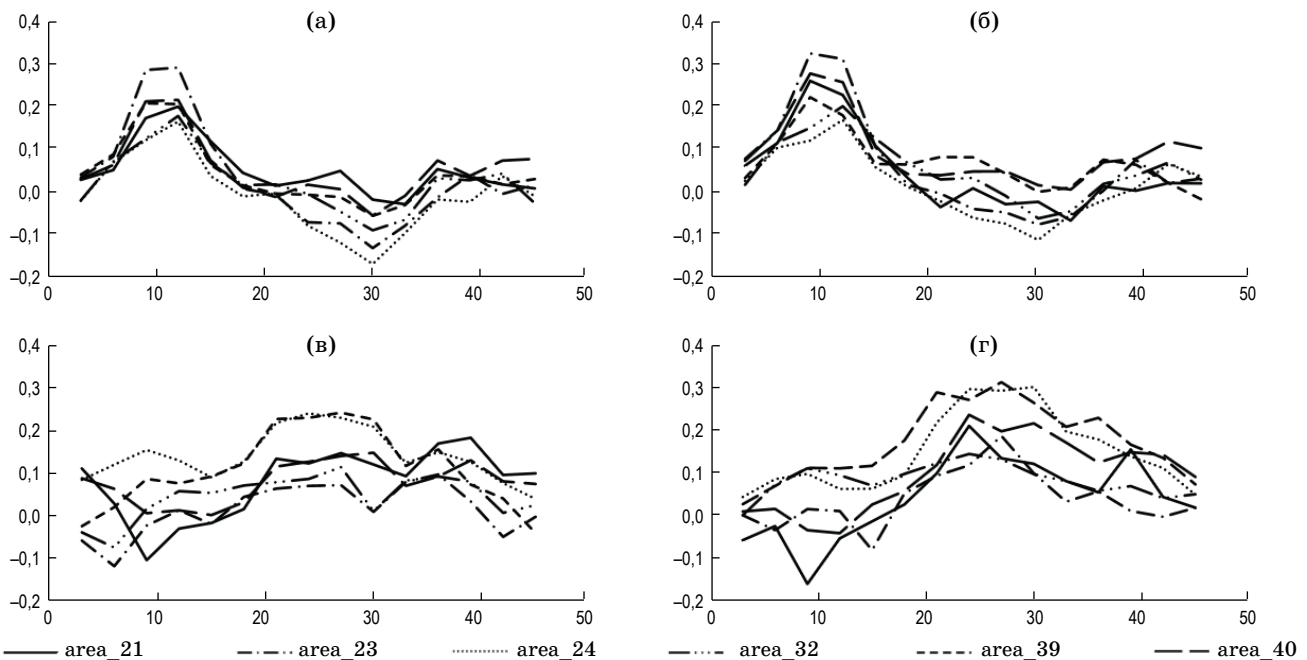


Рис. 8. Отклики зон, активированных самым появлением стимула — два верхних рисунка и зоны активированные распознаванием — два нижних графика. А — левое полушарие, Б — правое полушарие. По оси абсцисс — время и соответствующей ему процент предъявления контура. По оси ординат — значение BOLD-сигнала в относительных единицах.

ны интереса, отражающих общее внимание при предъявлении стимула. Нижний ряд графиков (в) и (г) показывает активацию зон интереса в момент инсайта, участвующих в момент распознавания изображения и принятия решения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Озарение или инсайт предполагает кажущееся внезапным, скачкообразное решение задачи. Противоположный ему механизм — это детальный последовательный аналитический способ решения задачи.

Образное конкретное мышление человека является одной из важнейших функций мозга [7]. Инсайт — это высшее и наиболее наглядное проявление подобной деятельности мозга. Непосредственный анализ результатов требует обратить внимание на некоторые «побочные» изменения активности BOLD-сигнала, связанные с процедурой любого исследования фМРТ. На период подпорогового предъявления приходится первый известный подъём увеличения BOLD-сигнала на 4–10 с от начала предъявления. Этот подъём активности не связан с порогом и развивается всегда в одно и то же время при любой стимуляции.

Для большинства зон в этот момент характерно отсутствие изменений или активация для зон, связанных с вниманием. Это преимущественно теменные и лобные зоны (ВА7 и ВА6, 9, 10). В затылочных зонах (ВА17, 18) наблюдается торможение. В затылочно-височных областях изменений в этот момент не наблюдается (ВА37). Для того, чтобы дифференцировать интересующий нас процесс и наступающий сразу после начала предъявления любого стимула известный подъем активности, мы проводили отдельные серии исследований, в которых варьировалось время предъявления фрагментов и тем самым изменялось наступление времени порога распознавания.

Интересующая нас динамика активности отслеживала динамику изменения тестового сигнала во времени. Так 20%-уровень заполнения контура, соответствующий порогу распознавания, мог наступать приблизительно через 20 или через 30 с после начала предъявления. Мы впервые рассмотрели основные нейрофизиологические механизмы порога по данным изменения BOLD-сигнала на основании разницы этого сигнала в покое, при подпороговой стимуляции, при стимуляции в момент достижения порога и при стимуляции после достижения порога.

На основании полученных результатов ещё раз укажем, что в момент достижения порога распознавания, который мы отождествляем с инсайтом, наблюдается максимум общего числа активированных вокселей фМРТ. Интересно, что максимум различия достигается как при сравнении состояний «покой» минус «активация», так и «активация» минус «покой». Это связано с тем, что наблюдаются локальные особенности уровня активации, которые значительно ниже в одних зонах и выше в других цитоархитектонических зонах, входящих в оппонентные нейронные сети, принадлежащие к системе «покой» и к системе «активация», и нейронных сетей быстрого реагирования.

Важно, и это мы впервые определили, что после достижения порога распознавания в данной задаче в момент надпорогового предъявления стимула происходит спад активности по сравнению с моментом порога распознавания. Это, казалось бы, простое наблюдение характерно не для любого достижения порога, а только того, при котором ликвидируется неопределённость и процесс распознавания завершается. Мы зафиксировали, что при распознавании Голлин-теста активность правого полушария превышает активность левого полушария.

Роберт Гесс и Дэвид Филд на основе анализа собственных результатов моделирования горизонтальных взаимодействий в первичной зрительной коре показали возможность восстановления контура за счёт внутрикорковых горизонтальных связей [1, 2]. Однако предложенная ими схема для ВА17 вызывает возражения. Горизонтальные свя-

зи могут развиваться в пределах стриарной коры ВА17 на короткие дистанции.

Стимулы, примененные в виде фигуры «змеи», оптимальны, так как следуют один фрагмент за другим. Если «змея» неколлинеарна, то требуется другой механизм. Нужна была другая методика и мы её применили [4–6]. Для исследования неосознаваемых полностью процессов уже применяли фМРТ-исследования в нашем институте. Но применяемые методики не позволили увидеть процесс до, во время и после достижения порога. Применённый нами известный и разработанный в институте компьютеризированный Голлин-тест позволил изучить другие механизмы взаимодействия осознаваемых и неосознаваемых процессов обработки сенсорной информации. В результате проведённой работы удалось показать, что для объединения фрагментов в единое целое в гештальт и его распознавание и классификации недостаточно работа нейронной сети взаимодействующих модулей первичной зрительной коры. Этим другим механизмом может служить зона, обеспечивающая целостное восприятие в нижневисочной коре ВА37. Что мы и видим в наших исследованиях.

Нами впервые показана динамика изменения BOLD-сигнала от подпорогового до надпорогового уровня. Измерение порогов распознавания методами цифровой обработки откликов головного мозга позволит перейти к целенаправленному моделированию искусственных нейронных сетей. Порог распознавания сопровождается максимумом активности всего мозга, превышающем уровень «покоя» при отсутствии стимулов, а также подпороговый и надпороговый уровень, когда объект был виден ясно и чётко. Перестройка активности нейронной сети обусловлена перераспределением активности оппонентных корковых областей мозга и подкорковых ядер, что было установлено на основании изменения BOLD-сигнала. Изменение BOLD-сигнала во времени коррелирует с изменением спектра ЭЭГ — снижением альфа- и повышением гамма-ритма. Этот результат подтверждает результаты других исследователей [8].

Максимум нейронной активности в момент порогового распознавания формы фигуры сопровождается выраженной эмоциональной реакцией, которую мы регистрировали на основании устных ответов испытуемых и результатов объективных измерений колебаний размеров диаметра зрачков, микротремора глаз и напряжением мимических мышц, сопровождающих любую эмоциональную реакцию [4, 5].

Видно, что активность в одних областях уменьшается и увеличивается в других. Эти изменения происходят в процессе действия стимула. Оппонентные взаимодействия, например, ВА17 и ВА37 или ВА9 и ВА10 в затылочных, височных и, главное, во фронтальных областях головного моз-

га отражают многоуровневый процесс принятия решений по конфликтующим оценкам, предсказанным в теоретических исследованиях [9] и реализованных в оппонентных структурах головного мозга человека. Установлен максимум активности одних зон в момент достижения порогового уровня предъявления контура и его снижение после достижения порогового уровня. В оппонентных зонах пороговый момент совпадает с абсолютным минимумом активности. Обеспечение баланса критериев при принятии решения осуществляется путём перераспределения активности между областями мозга. Структуры мозга, обеспечивающие важнейшие когнитивные и непременно сопровождающие их эмоциональные процессы, взаимодействуют по принципу синхронности и оппонентности, т.е. осуществляют решения по множественным критериям и по конфликтующим оценкам [9]. На полученных нами с помощью фМРТ «срезах мозга» в момент инсайта активация зон мозга на основании статистического сравнения больше по сравнению с покоем и со значением активации при подпороговой и надпороговой стимуляции.

В задней части нижневисочной области и в фузиформной извилине расположена зона ВА37. Она имеет значимые связи с левой нижневисочной областью (ВА20, ВА21), левой префронтальной корой (ВА9, ВА46, ВА45 и ВА47), левой инсулой (ВА13), левом и правым предклиньем (захватывающая зоны ВА7, ВА19) и с затылочной областью (ВА18). Вероятно, левая зона ВА37 — это область узлового пересечения двух нейронных сетей: одной, осуществляющей зрительное распознавание, и другой, обеспечивающей описание семантических свойств речи [10, 11].

Если относить инсайт к образному конкретно-мысленному [12], то установленные нами нейронные сети, включающие ВА19 и особенно ВА37, указывают конкретные нейрофизиологические механизмы, принимающие участие в обеспечении инсайта, важнейшего мыслительного процесса. Для него, в первую очередь, важны дорзальные отделы мозга. Может быть, аналитическое мышление включает нейронные сети фронтальной коры. Нейронные сети, обеспечивающие конкретное образное мышление, уже созданы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Впервые показаны значимые отличия между значения BOLD-сигнала в оппонентных зонах на динамический, изменяющийся во времени, сигнал во время достижения порога распознавания или в данной трактовке достижения «инсайта». Интересно, что активация зон мозга в сравниваемых в одних зонах развивается несколько раньше угнетения активности в других. Этот процесс нами растянут во времени за счёт медленного накопле-

ния фрагментов контурного тестового изображения. Поэтому удалось с помощью достаточно инерционного устройства исследовать динамические процессы в нейроно-глиальных сетях головного мозга человека. Временной ход откликов и характер запаздывания напоминает работу именно нейроно-глиальных сетей, представляющий интерес для дальнейших работ.

Результаты обработки изображений карт активности кровотока в мозге по BOLD-сигналу позволило установить, что вне затылочной (зоны ВА17, ВА18, ВА19) и височной коры (зоны ВА37) важное участие в обеспечении решения задач данного типа принимает активность инсулы (ВА13), префронтальной коры (ВА9, ВА46, ВА47, ВА10) и поясной коры (ВА24, ВА30).

Показанный экспериментально в данной работе многоуровневый процесс принятия решения по конфликтующим оценкам, как мы видим, реализован в оппонентных структурах головного мозга человека [11]. Важность принятия решения по конфликтующим (оппонентным в нашей терминологии) оценкам был предсказан в известных теоретических исследованиях Саати [12]. Установлен максимум активности определённых зон в момент достижения порогового уровня предъявления контура, соответствующего моменту возникновения инсайта. Это повышение активности вызывает снижение активности в других, оппонентных зонах. Обеспечение баланса критериев при принятии решения осуществляется путём перераспределения активности между областями мозга. Структуры мозга, обеспечивающие важнейшие когнитивные функции и непременно сопровождающие их эмоциональные процессы, взаимодействуют синхронно, но между ними существуют оппонентные взаимодействия. В результате становится возможным осуществлять принятие решения по множественным критериям и по конфликтующим между собой оценкам события. Именно такой принцип взаимодействия элементов в процессе принятия решений был предсказан Саати [12]. Эти самые общие представления о принятии решений в настоящее время могут быть применены для оптимизации искусственной нейронной сети как локальной, так и крупномасштабной, обеспечивающей целенаправленное мотивированное поведение. Эти представления перекликаются с рядом существующих работ по локальным [13] и глобальным нейронным сетям [11, 14]. Моделирование деятельности нейронных сетей позволяет предполагать, что загадочный механизм инсайта может быть организован на более простой нейронной сети, присущей и высшим позвоночным хищникам и приматам. Загадочность этого механизма в том, что его предварительная часть происходит вне нашего сознания, и в сознание приходит уже результат предварительной

обработки изображений. Аналитический способ решения задач, вероятно, гораздо более сложный, так как требует вовлечение элементов внутренней речи и логического осознанного мышления, тесно связанного с речью человека. Обучение нейронных сетей основано именно на оппонентных взаимодействиях. Эти взаимодействия многоуровневые. Первый уровень — оппонентность внутри рецептивного поля, следующий — оппонентность между рецептивными полями и высший уровень — оппонентность между крупномасштабными нейронными сетями. В данной работе мы рассмотрели некоторые особенности именно крупномасштаб-

ных нейронных сетей. И этот тип оппонентности различается медиаторами, например, серотонином и допамином. Обучение нейронных сетей может происходить за счёт наказания или наград, либо в реальной жизни — при своевременном или при запоздалом распознавании врага от друга.

Исследование одобрено Этическим комитетом Санкт-петербургского государственного университета 12.06.2017 № 02-124.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (ГП-14, раздел 63).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hess R.F., Field D.J. Integration of contours: new Insights // Trends in Cognitive Sciences. 1999. V. 3. № 12. P. 480–486.
2. Field D.J., Hayes A., Hess R.F. Contour integration by the human visual system: evidence for a local 'association field' // Visual Research. 1993. V. 33. P. 173–93.
3. Foreman N., Hemmings R. The Gollin incomplete figures test: a flexible, computerised version // Perception. 1987. V. 4. № 16. P. 543.
4. Шелепин К.Ю., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Распознавание фрагментированных изображений и возникновение "инсайта" // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 70–78.
5. Шелепин К.Ю., Шелепин Ю.Е. Нейрофизиология «инсайта» // Петербургский психологический журнал. 2015. № 11. С. 19–38.
6. Шелепин К.Ю., Соколов А.В., Фокин В.А., Васильев П.П., Пронин С.В. Феномен инсайта и цифровая визуализация активности головного мозга человека // Вестник ЮУрГУ. Серия «Психология». 2017. Т. 10. № 4. С. 47–55.
7. Глезер В.Д. Зрение и мышление. Л.: Наука, 1995. 250 с.
8. Kounios J., Beeman M. The cognitive neuroscience of insight // Annual Rev. Psychology. 2014. V. 65. № 93. P. 74.
9. Ardila A., Bertolucci P.H., Braga L.W., Castro-Caldas A., Judd T., Kosmidis M.H., Matute E., Nitrini R., Ostrosky-Solis F., Rosselli M. Illiteracy: the neuropsychology of cognition without reading // Archives of Clinical Neuropsychology. 2010. V. 25. P. 689–712.
10. Kraft A., Grimsen C., Kehler S., Bahnemann M., Spang K., Prass M., Irlbacher K., Köhnlein M., Lipfert A., Brunner F., Kastrup A., Fahle M., Brandt S.A. Neurological and neuropsychological characteristics of occipital, occipito-temporal and occipito-parietal infarction // Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior. 2006. V. 56. P. 38–50.
11. Шелепин Ю.Е., Фокин В.А., Меньшикова С.В., Борачук О.В., Коскин С.А., Соколов А.В., Пронин С.В., Хараузов А.К., Васильев П.П., Вахрамеева О.А. Методы иконоки и методы картирования мозга в оценке функционального состояния зрительной системы // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 2. С. 63–78.
12. Saaty T.L. The analytic hierarchy and analytic network measurement processes: Applications to decisions under Risk // European Journal of Pure and Applied Mathematics. 2008. V. 1. № 1. P. 122–196.
13. Wechsler H. Neural networks for perception: human and machine perception. NY: Academic Press, 2014. 384 p.
14. Weng J., Paslaski S., Daly J., Van Dam C., Brown J. Modulation for emergent networks: Serotonin and dopamine // Neural Networks. 2013. V. 41. P. 225–239.