

К ЮБИЛЕЮ ЖУРНАЛА «НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

ЦИКЛ АРХИВНЫХ СТАТЕЙ Д.А. ФАРБЕР И Н.Е. ПЕТРЕНКО, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ» В 2010 – 2015 ГГ.

Продолжение

Продолжаем знакомство с оригинальными текстами, опубликованными ранее в журналах «Новые исследования». Чтение текстов экспериментальных исследований в первоисточнике позволяет читателю проследить логику каждого эксперимента в отдельности и серии исследований в целом, познакомиться с основными методами электроэнцефалографических исследований мозговой организации когнитивных процессов, способами анализа и представления данных, которые позволили их авторам получить результаты, представляющие большой интерес для современных исследователей. Начало публикации см. в журнале Новые исследования №1-2026

3. <https://elibrary.eu/item.asp?=21075443> Фарбер Д.А., Петренко Н.Е. Произвольное направленное внимание и эффективность опознания фрагментарных изображений у детей 10-11 лет // Новые исследования. 2013. № 3 (36). С. 5-26. E-mail: <develop.physiol@inbox.ru>

Исследовались мозговые механизмы, определяющие эффективность зрительного опознания в препубертатном возрасте. Анализировались топографические и временные характеристики связанных с событием потенциалов (ССП) при предъявлении неполных изображений разного уровня фрагментации от трудно опознаваемых до полного изображения. Изображения предъявлялись в условиях направленного внимания, задаваемого предупреждающим стимулом. Анализ внутрикоркового взаимодействия по показателю функции КОГ во временном интервале между предупреждающим и целевым стимулом выявил значительную степень зрелости механизмов избирательного произвольного внимания, осуществляемого при участии префронтальной коры. Вовлечение этих корковых зон в опознание неполных изображений обеспечивает характерную для 10-11-летних эффективность опознания, близкую к дефинитивному уровню. При анализе индивидуальных особенностей эффективности опознания в зависимости от его точности были выделены две группы испытуемых – опознающие эффективно, с малым числом ошибок и опознающие со значимо большим числом ошибок. Для группы с высокими показателями эффективности характерно значимо большее вовлечение вентролатеральных префронтальных корковых зон и нижневисочной коры левого полушария, что, по-видимому, определяет эффективность опознания.

Ключевые слова: зрительное восприятие, эффективность опознания, направленное внимание, альфа-ритм, префронтальная кора, дети 10-11 лет, индивидуальные особенности.

Voluntary attention and efficiency of fragmented images identification in 10–11-year-old children. We investigated the brain mechanisms underlying the effectiveness of visual identification at prepubertal

stage. Topographic and temporal characteristics of event-related potentials (ERPs) were studied during the presentation of incomplete images of various levels of fragmentation (from those which are difficult to recognize to the integral images). Direct attention during this work was stimulated by the prior warning signal. Analysis of intracortical interaction in terms of the COG function between the warning and the target signals showed a significant degree of maturity of voluntary attention, which is fulfilled with the involvement of the prefrontal cortex. It is these cortical areas which provide identification (almost definition) of fragmented images, so characteristic of 10–11-year-old children. The analysis of the individual differences in the efficiency of image identification, depending on its accuracy, made it possible to identify two groups of subjects: those who can identify the image effectively with a few errors, and those who tend to identify it with much more errors. The group with high efficiency demonstrates significantly higher activity in ventrolateral prefrontal cortical areas and inferior temporal cortex of the left hemisphere, which apparently determines the efficiency of identification.

Keywords: *visual perception, efficiency of image identification, directed attention, alpha rhythm, prefrontal cortex, 10–11-year-old children, individual differences.*

В наших предыдущих исследованиях было показано, что мозговые системы, определяющие эффективность когнитивных процессов, созревают постепенно и гетерохронно и к 9 годам близки к дефинитивному типу [1]. Вместе с тем с 11-12 лет начинается новый важный этап развития организма – половое созревание, которое опосредуется усилением активности центрального звена гормональной функции – гипоталамуса, стимулирующего выделение гонадотропного гормона гипофиза [1]. Функциональная активность гипоталамо-гипофизарной системы особенно велика на начальных стадиях (II-III) полового созревания в силу несформированности обратных тормозных влияний гормонов незрелых половых желез. Высокая активность гипоталамуса, играющего важную роль в регуляции активационных процессов, изменяет функциональную организацию мозговых структур, как в состоянии покоя, так и в процессе деятельности. В подростковом возрасте наблюдаются отрицательные сдвиги нейрофизиологических показателей внимания и рабочей памяти, а также проявляющиеся на поведенческом уровне признаки неуравновешенности, эмоциональной неустойчивости и неуправляемости [7, 10].

С целью выявления особенностей когнитивных процессов, связанных с пубертатом, важно было провести детальный анализ мозговых механизмов когнитивной деятельности в период, непосредственно предшествующий этому этапу развития (возраст 10-11 лет). Именно в этом возрасте, с переходом в среднюю школу значительно возрастает объем информации, которую ребенок должен усвоить и научиться ее использовать.

Эффективность информационных процессов определяется, прежде всего, функциональными возможностями и степенью зрелости механизмов анализа и обработки поступающей информации. Учитывая особую функциональную значимость зрительной информации в познавательном развитии ребенка, в настоящей работе анализировалась мозговая организация эффективного зрительного опознания – функции характеризующейся сложностью организации лежащих в ее основе мозговых систем [13, 14, 25, 35, 36, 44]. В настоящем исследовании используется модель опознания неполных (фрагментированных) изображений, дающая возможность оценить степень участия в этом процессе как модально-специфических корковых зон, так и высших ассоциативных отделов коры, участие которых определяет эффективность опознания поступающей информации, увеличивающуюся с возрастом [6, 8, 9]. С прогрессивным созреванием высших отделов коры (префронтальных корковых зон) связано

и формирование механизмов внимания [3, 5, 31, 47], определяющего в период подготовки к решению когнитивной задачи преднастройку к восприятию значимой информации. Изучению этого подготовительного периода посвящено значительное количество исследований. Показано, что функциональное состояние мозга в предстимульный период является значимым предиктором результатов деятельности [26, 45, 48]. Так время реакции может быть предсказано характером и степенью частотно-специфической синхронизации электрической активности сенсорно-специфических и ассоциативных зонах коры больших полушарий в период преднастройки [48]. У человека предстимульное состояние определяет также степень осознанности восприятия [12]. Значительная часть исследований предстимульного периода базируется на анализе ритмической электрической активности мозга [15, 16, 28, 29, 42]. При этом основное внимание обращено на показатель мощности альфа-ритма, уменьшение которого характеризует мобилизационную готовность, направленную на детекцию объекта и его анализ [22, 32, 33, 39, 42, 47]. Между тем для понимания специфики функциональной организации мозга в период преднастройки важна не столько оценка амплитудных значений ритмов ЭЭГ, сколько выявление степени и топографических особенностей их синхронизации. Синхронизация ритмов электрической активности отдельных мозговых структур рассматривается как системообразующий механизм [16], обеспечивающий их взаимодействие в локальных и распределенных нейронных сетях – их объединение в единую нейрокогнитивную систему [19, 29, 37, 40, 43]. В качестве меры синхронности ритмов ЭЭГ как показателя взаимодействия двух отделов мозга традиционно используется функция когерентности (КОГ). Исследование КОГ предстимульного периода выявило специфичность взаимодействия корковых зон в процессе произвольного направленного внимания: инструкция, информирующая испытуемого о характере значимой информации, приводит к избирательному, топографически-специфичному усилению коркового взаимодействия по альфа-ритму, зависящему от модальности ожидаемого стимула [3, 5]. Анализ многочисленных количественных линейных и нелинейных методов исследования биоэлектрической активности мозга, появившихся в последнее десятилетие [30, 34, 41] показывает, что одним из перспективных направлений является использование векторных авторегрессионных (ВАР) моделей [23]. Использование ВАР-моделирования позволяет не только оценить классическую функцию КОГ и ее модификации [46], уменьшающие влияние объемного проведения [46], но и выявить причинно-следственные связи между наблюдаемыми явлениями [17, 21, 24]. Апробация предлагаемых методов использования ВАР- модели в исследованиях Р.И. Мачинской и А.В. Курганского [4] позволили выделить наиболее информативный критерий функционального объединения структур мозга в нейрокогнитивные системы (мнимую функцию КОГ), участвующие в преднастройке к восприятию информации.

С целью выяснения механизмов, определяющих эффективность зрительного восприятия у детей 10-11 лет, мы в настоящей работе использовали разные методические приемы:

– меру оценки синхронности альфа-ритма ЭЭГ, позволяющую выявить функциональную организацию мозга в период преднастройки к зрительному восприятию;

– оценку регионарных связанных с событием потенциалов (ССП) – характеризующих организацию периода анализа и обработки значимой информации.

Для выяснения того, в какой мере созревание мозговых механизмов определяет эффективность опознания, его скорость и точность осуществлены были так же исследования на поведенческом уровне.

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании участвовали 31 ребенок в возрасте 10-11 лет (средний возраст 10.61 ± 0.08). Дети имели нормальное зрение.

Испытуемым предъявлялось 16 знакомых изображений предметов (стул, утюг, очки и др.) и животных (слон, верблюд, лошадь) из стандартного набора [38]. Изображения без их предварительного показа предъявлялись в 5 фрагментарных уровнях (2, 4, 5, 7 и 8) от трудно опознаваемого фрагментарного уровня (2) до полного изображения (8 уровень). Для каждого изображения показывались все 5 уровней фрагментации. Время предъявления стимулов – 750 мс. Предъявлению целевого стимула предшествовал предупреждающий стимул (восклицательный знак, настраивающий испытуемого на выполнение задания. Модель эксперимента изложена ранее [6, 8, 9]. У всех испытуемых анализировались поведенческие показатели опознания и функциональная организация мозга в предстимульные и постстимульные периоды.

В поведенческом эксперименте анализировались точность опознания по числу ошибок и порог опознания – по уровню фрагментации, на котором опознается изображение.

В ходе нейрофизиологического эксперимента проводилась непрерывная регистрация ЭЭГ по системе 10-20 % от затылочных (O1, O2), теменных (P3, P4), передневисочных (T3, T4), задневисочных (T5, T6), центральных (C3, C4, Cz) и лобных (F3, F4, F7, F8, Fz) областей коры.

Для анализа периода преднастройки ЭЭГ после исключения артефактов разбивалась на одинаковые временные отрезки (T_0 200 мс). Множество этих отрезков (общая длительность для каждой ситуации 8 сек) использовалось для оценки коэффициентов ВАР 20 порядка. Оптимальный порядок был выбран, исходя из двух требований: (1) остатки авторегрессии не отличаются от белого шума (отсутствие серийных корреляций) и (2) выбранный порядок обеспечивает достаточное частотное разрешение ("частотную специфичность"), сравнимое с тем, что традиционно используется в электрофизиологии при анализе ЭЭГ классическими методами частотного анализа.

В работе использовался алгоритм Виеры-Морфа, модифицированный для вычисления одного набора коэффициентов ВАР-модели для целого множества сегментов ЭЭГ, не составляющих непрерывной записи [18]. Здесь следует отметить, что при оценивании силы функциональных связей (как с помощью классического спектрального оценивания, так и на основе построения ВАР-модели многоканальных данных) возникает проблема "ложных взаимодействий-(spurious interactions)" [2]. Чем короче суммарная длительность многоканального сигнала, тем выше уровень флуктуаций оценки коэффициентов ВАР-модели (эффект конечности выборки) и, соответственно, тем больше (в среднем) величина любой положительной меры взаимодействия (например, функции когерентности). Ясно, что сравнение силы функциональных связей,

оцененных по эпохам различной длины, приведет к возникновению ложного впечатления, что эта сила выше для более короткой эпохи.

Для того чтобы нивелировать влияние конечности выборки на величину мер функциональных связей коэффициенты VAR-модели 20-го порядка во всех экспериментальных условиях вычислялись следующим образом: (1) все множество отрезков длительностью T_0 в каждой экспериментальной ситуации разбивалось на подмножества в 40 последовательных отрезков; (2) для каждого такого подмножества вычислялись коэффициенты VAR-модели 20-го порядка; (3) различные меры функционального взаимодействия вычислялись как среднее по подмножествам из 40 отрезков. В качестве меры функционального взаимодействия вычислялась мнимая часть $J(f) = \text{Im}\{C(f)\}$ комплексной функции когерентности. $J(f)$ вычислялась для дискретной сетки частот и затем усреднялись в альфа-диапазоне, определяемом индивидуально для каждого испытуемого.

Использовалась следующая процедура определения индивидуального альфа-диапазона. Для каждого испытуемого в стандартном альфа-диапазоне 7.5-12.5 Гц для каждой пары отведений автоматически определялось положение максимума функции когерентности в ЭЭГ, записанной до предъявления предупреждающего сигнала. По этим данным строилась гистограмма частотного положения пиков для всего множества пар электродов и сглаживалась 11-точечным окном Бохмана. Сглаживание исключало обнаружение множественных максимумов в пределах стандартного диапазона. Локальные максимумы этой гистограммы рассматривались в качестве частоты доминирующего ритма. Если такой максимум оказывался в пределах стандартного диапазона, то в качестве индивидуального диапазона выбиралась полоса частот шириной 1 Гц, в центре которой находился этот максимум. Если в пределах стандартного диапазона не было локальных максимумов, то в качестве индивидуального использовался весь стандартный диапазон. Все перечисленные выше меры усреднялись для трех экспериментальных условий (ЭУ): ЭУ1 соответствовало отрезку ЭЭГ, регистрируемому до появления предупреждающего стимула – неспецифическое внимание; ЭУ2 – ЭЭГ от предупреждающего стимула до появления целевого (неполного фрагментарного изображения, еще неопознанного) – характеризовал ожидание когнитивной задачи; ЭУ3 – ЭЭГ от предупреждающего стимула до появления первых эффективно опознаваемых фрагментарных изображений – характеризовал преднастройку к когнитивной задаче, предшествующую эффективному опознанию.

Статистический анализ используемых мер оценки ЭЭГ осуществлялся с использованием общей линейной модели в варианте $rmANOVA$.

Для исследования постстимульного периода анализировались ССП, регистрируемые с различных корковых зон. Усреднялись следующие классы ССП: ССП при отсутствии опознания – те уровни фрагментации изображения, на которые испытуемый каждый раз отвечал "Не знаю", ССП, непосредственно предшествующие опознанию (испытуемый отвечал "Не знаю") и ССП при опознании – тот уровень фрагментации изображения, на котором объект был впервые правильно опознан. Усредненные по классам "опознаваемости" стимула ССП отдельных испытуемых использовались для группового усреднения и анализа с помощью метода Главных Компонентов. Суммарная ампли-

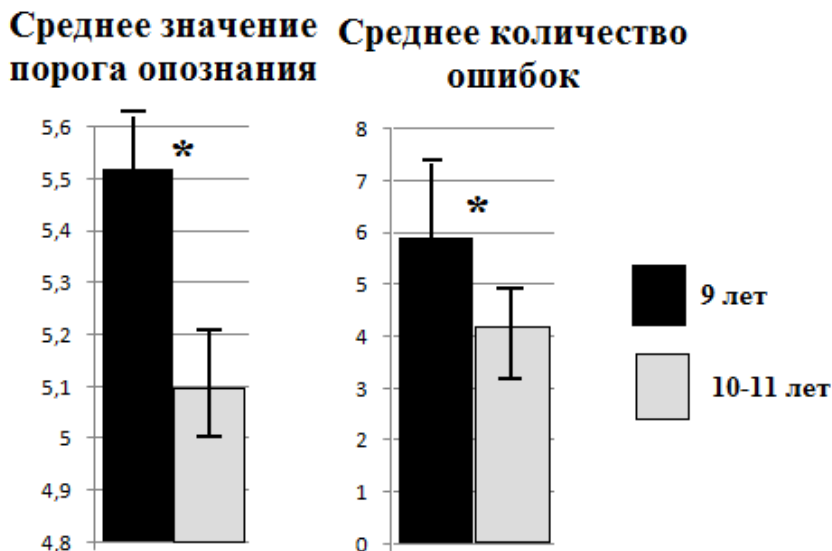
туда ССП на временных отрезках, соответствующих выделенным главным компонентам, обрабатывалась с помощью дисперсионного анализа (ANOVA Repeated measure). Использовались следующие факторы: «опознание» (неопознанные, предшествующие опознанию, опознанные); «полушарие» (левое, правое); «отведения» (7 пар отведений). Достоверность различий суммарных амплитуд ССП компонентов ССП, соответствующих тем временным интервалам, в которых было выявлено значимое влияние фактора «опознание» и его взаимодействие с факторами «полушарие» и «отведение», оценивалась с использованием непараметрического критерия Вилкоксона. Для выяснения того, в какой мере созревание мозговых механизмов определяет эффективность опознания, его скорость и точность осуществлены были так же исследования на поведенческом уровне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поведенческие показатели опознания фрагментарных изображений

Анализ поведенческих показателей опознания фрагментарных изображений позволил выявить увеличение эффективности выполнения задания у детей 10-11 лет в сравнении с 9-летними детьми (рис 1, а). По числу ошибок опознания группа детей 10-11 лет ($n=31$: 16 мальчиков, 15 девочек; средний возраст 10.61 ± 0.08), характеризовалась меньшим числом ошибок ($M=4.19 \pm 0.76$), чем в группе 9 лет – ($n=25$: 14 мальчиков, 11 девочек; средний возраст 9.17 ± 0.15), количество ошибок составляло 5.92 ± 1.46 . Различия между группами по числу ошибок значимы ($F(1,54)=8.3$; $p=0.006$). Среднее значение порога (уровня фрагментации) опознания в группе 10-11 летних составляет 5.10 ± 0.12 и значимо ($F(1,54)=4.1$; $p=0.048$) ниже порога опознания в группе 9 летних детей – 5.52 ± 0.08 . Значимых различий между мальчиками и девочками по количеству ошибок и порогу опознания ни в одной из исследуемых групп выявлено не было.

А



Б

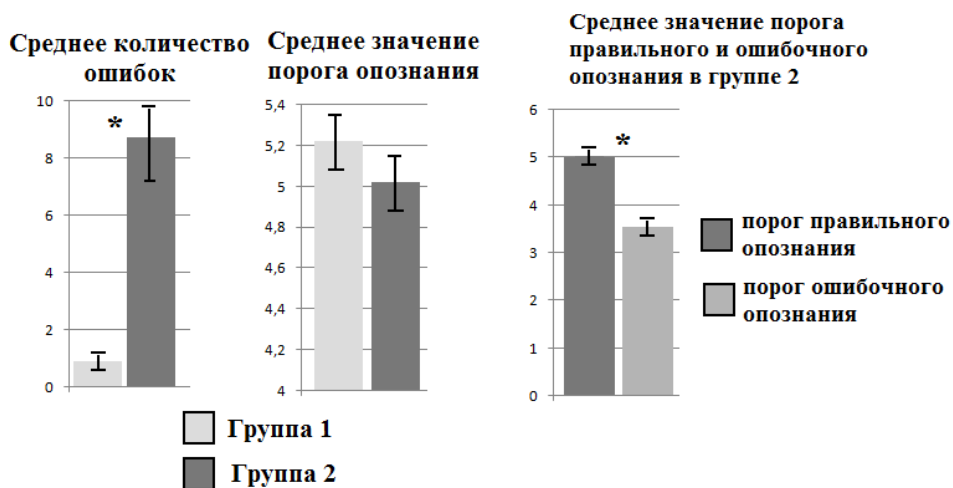


Рис. 1. Возрастные (А) и индивидуальные (Б) поведенческие показатели опознания фрагментарных изображений у детей 10-11 лет. "Звездочками" отмечены значимые различия показателей. Показана ошибка среднего.

В зависимости от количества ошибок у детей 10-11 лет были выделены две крайние группы с разной эффективностью опознания (рис. 1, б). Первая группа (14 человек) характеризовалась малым числом ошибок – 0.93 ± 0.24 , во второй группе (13 человек) отмечено значимо ($F(1,23) = 34.1$; $p = 0.0001$) большее количество ошибок 8.73 ± 1.21 . У детей 10-11 лет вторая группа (с существенно бóльшим числом ошибок) опознает изображения раньше первой группы, но при этом значимые различия порога опознания отсутствуют ($M = 5.22 \pm 0.16$ и $M = 5.02 \pm 0.16$ – для первой и второй групп соответственно). При этом порог опознания ошибочных изображений ($M = 3.55 \pm 0.15$) у испытуемых второй группы значимо ниже порога их правильного опознания.

Исследование предстимульного периода

Для выявления специфики преднастройки проводилось сравнение ситуации ожидания целевого стимула с ситуацией неспецифического внимания (ЭУ1). Сравнение осуществлялось в двух ситуациях, когда целевой стимул не опознавался (ЭУ2) и при эффективном опознании целевого стимула (ЭУ3).

Исследование периода, предшествующего предъявлению целевого, но неопознанного стимула (неэффективное опознание), проводилось при сопоставлении с ситуацией ожидания предупреждающего стимула (неспецифическое внимание). Анализ *т*-ANOVA по множеству пар отведений лобных областей (F3, F4, F7, F8) с остальными внутрислоушарных и межполушарных отведениями проводился по схеме с факторами ПОЛУШАРИЕ1 (левое, правое) – полушарие первого отведения в паре, ПОЛУШАРИЕ2 (левое, правое) – полушарие второго отведения в паре, ЛОКАЛИЗАЦИЯ (по числу разных пар отведений) и УСЛОВИЕ (ЭУ1, ЭУ2).

Основной эффект фактора УСЛОВИЕ оказался высоко значимым для пар отведений, куда в качестве одного отведения входили F7, F8 ($F(1,24) = 4.6$, $p =$

0.042). Для этих отведений так же получено значимое взаимодействие факторов УСЛОВИЕ x ЛОКАЛИЗАЦИЯ ($F(3,66) = 4.2, p = 0.01$). Для областей F3, F4 на значимый уровень выходит взаимодействие факторов УСЛОВИЕ x ПОЛУШАРИЕ1 ($F(1,24) = 10.1, p = 0.004$) и УСЛОВИЕ x ЛОКАЛИЗАЦИЯ x ПОЛУШАРИЕ 1 ($F(3,62) = 3.1, p = 0.04$).

Значимое взаимодействие факторов УСЛОВИЕ x ЛОКАЛИЗАЦИЯ ($F(1,24) = 4.6, p = 0.041$) показал также анализ $J(f)$ в парах отведений, образованных нижевисочными областями (T5, T6) с остальными отведениями, за исключением фронтальных и Cz. Парные сравнения $J(f)$ ситуации неспецифического внимания (ЭУ1) с ситуацией преднастройки на неэффективное опознавание фрагментарных изображений (ЭУ2) выявили значимые различия между следующими парами отведений с фокусом в вентролатеральной префронтальной коре преимущественно правого полушария.

Полученные данные показывают, что период ожидания целевых изображений даже в случае неэффективного опознавания (ЭУ2) характеризуется иной по сравнению с периодом, предшествующим предъявлению предупреждающего стимула (ЭУ1), картиной функциональных связей (рис. 2). Как видно на рисунке отчетливые фокусы изменения $J(f)$ наблюдаются билатерально в вентролатеральных префронтальных зонах коры (F7, F8) и в правой дорсолатеральной префронтальной зоне (F4). Отмечается преимущественная выраженность этих изменений в правом полушарии, где латеральная префронтальная кора образует четкие связи со стриарной и экстрастриарной корковыми зонами.

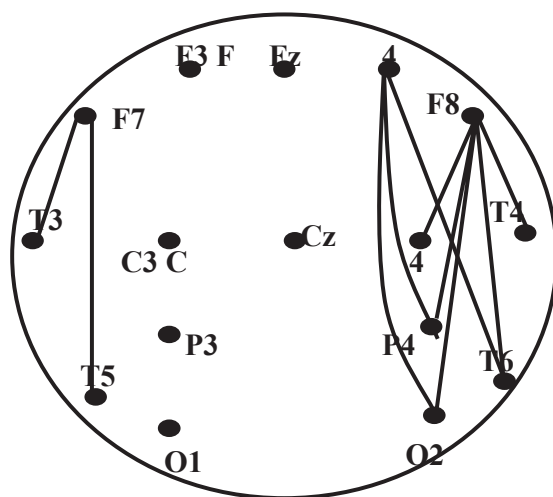


Рис. 2. Значимые изменения мнимой части функции когерентности $J(f)$ при переходе от ситуации неспецифического внимания к ситуации преднастройки к неэффективному опознанию. Показано относительное расположение отведений ЭЭГ с их обозначениями.

Сравнение периода, предшествующего эффективному опознанию целевого стимула, с ситуацией ожидания предупреждающего стимула по $J(f)$ показало высоко значимое влияние фактора УСЛОВИЕ и его взаимодействие с факторами ПОЛУШАРИЕ и ЛОКАЛИЗАЦИЯ. Анализ $rmANOVA$ по множеству пар

отведений, образованных F3, F4 и F7, F8 с остальными отведениями проводился по схеме с факторами полушарие первого отведения в паре ПОЛУШАРИЕ1 (левое, правое), полушарие второго отведения в паре ПОЛУШАРИЕ2 (левое, правое), ЛОКАЛИЗАЦИЯ (по числу разных пар отведений) и УСЛОВИЕ (ЭУ1, ЭУ3).

Влияние фактора УСЛОВИЕ оказалось значимым для пар отведений, куда в качестве одного отведения входили F7, F8 ($F(1,24) = 5.0, p = 0.035$). Для этих отведений получено значимое взаимодействие факторов УСЛОВИЕ x ЛОКАЛИЗАЦИЯ x ПОЛУШАРИЕ 1 ($F(2,58) = 3.2, p = 0.038$) и УСЛОВИЕ x ПОЛУШАРИЕ 2 x ЛОКАЛИЗАЦИЯ x ПОЛУШАРИЕ 1 ($F(3,83) = 3.3, p = 0.019$). Для областей F3, F4 на уровне тенденции выявлено влияние фактора УСЛОВИЕ ($F(1,24) = 4.0, p = 0.058$) на значимый уровень выходит взаимодействие факторов УСЛОВИЕ x ПОЛУШАРИЕ2 x ЛОКАЛИЗАЦИЯ x ПОЛУШАРИЕ 1 ($F(4,21) = 3.4, p = 0.028$). При исключении из анализа перекрестных связей (фактор ПОЛУШАРИЕ 2) влияние фактора УСЛОВИЕ значимо ($F(1,24) = 4.4, p = 0.047$). Эффект фактора УСЛОВИЕ на уровне тенденции ($F(1,24) = 4.0, p = 0.058$) выявлен в парах отведений, образованных Fz с остальными отведениями, за исключением фронтальных. Значимым влияние фактора УСЛОВИЕ ($F(1,24) = 4.3, p = 0.048$) становится при анализе в парах отведений, образованных Fz с каудальными зонами. Этот анализ проводился по схеме с факторами ПОЛУШАРИЕ (левое, правое), ЛОКАЛИЗАЦИЯ и УСЛОВИЕ (ЭУ1, ЭУ3).

Изолированное влияние фактора УСЛОВИЕ значимо при анализе J(f) по множеству пар отведений, образованных затылочной (O1, O2 – $F(1,24) = 4.2, p = 0.05$) и теменной (P3, P4 – $F(1,24) = 14.5, p = 0.001$) корой с остальными отведениями. Для пар отведений O1, O2 значимо так же взаимодействие факторов УСЛОВИЕ x ПОЛУШАРИЕ2 x ЛОКАЛИЗАЦИЯ x ПОЛУШАРИЕ 1 ($F(3,22) = 3.6, p = 0.03$) и УСЛОВИЕ x ПОЛУШАРИЕ2 x ЛОКАЛИЗАЦИЯ ($F(3,72) = 3.0, p = 0.038$).

Совместное влияние факторов УСЛОВИЕ x ПОЛУШАРИЕ1 x ПОЛУШАРИЕ 2 показал анализ J(f) в парах отведений, образованных теменными (P3,P4: $F(1,24) = 9.8, p = 0.005$), нижневисочными (T5,T6: $F(1,24) = 4.9, p = 0.036$) и передневисочными (T3,T4: $F(1,24) = 7.1, p = 0.013$) зонами коры с остальными отведениями.

Парные сравнения J(f) ситуации неспецифического внимания (ЭУ1) с ситуацией преднастройки к эффективному опознанию фрагментарных изображений (ЭУ3) выявили значимые различия между следующими парами отведений с фокусом в правой дорсо- и вентролатеральной префронтальной коре (отведения F4, F8) с каудальными и височно-центрными областями этого же полушария (рис. 3). Картина изменений при эффективном опознании близка к таковой при неэффективном опознании большей представленностью изменений внутрикортикальных взаимодействий в правом полушарии. При этом наблюдается усиление фокуса взаимосвязанности в правой дорсолатеральной префронтальной зоне за счет усиления связей с височной корой.

Анализ ССП при опознании фрагментарных изображений в 10-11 летнем возрасте.

Дисперсионный анализ амплитуды ССП у детей 10-11 летнего возраста, проведенный для неопознанных, предшествующих опознанию и опознанных

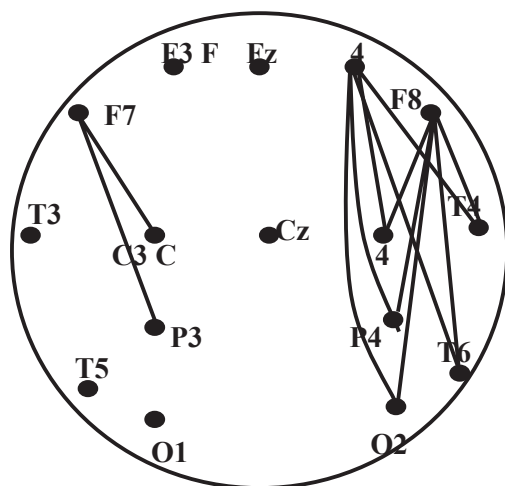


Рис. 3. Значимые изменения мнимой части функции когерентности $J(f)$ при переходе от ситуации неспецифического внимания к ситуации преднастройки к эффективному опознанию.

фрагментарных изображений, выявил следующие различия параметров ССП. Как видно из табл. 1 изолированное влияние фактора ОПОЗНАНИЕ выявлено во временном интервале, соответствующем наиболее характерному для процесса опознания компоненту N250-300, и во временном интервале, соответствующем негативному компоненту N500. Взаимодействие фактора ОПОЗНАНИЕ с фактором ОТВЕДЕНИЕ проявляется практически на всех временных интервалах, затрагивая как ранние компоненты, соответствующие обработке модально-специфической информации, так и более поздние связанные с когнитивными операциями и принятием решения.

Для выявления специфики изменения параметров ССП при опознании фрагментарных изображений в тех временных интервалах, в которых методом дисперсионного анализа было выявлено значимое влияние фактора ОПОЗНАНИЕ и его взаимодействие с фактором ОТВЕДЕНИЕ проводилось сопоставление амплитудных значений компонентов ССП методом парного сравнения.

На рис. 4 приведены ССП на опознанные и неопознанные фрагментарные изображения у детей 10-11 лет независимо от эффективности опознания, отражающие различия, характерные для этого возраста в целом. Наиболее ранние статистически значимые различия отмечены в интервале 80-160 мс как в лобных, так и в каудальных отделах коры. В префронтальной коре левого полушария на опознанные изображения отмечается увеличение ранней негативности с пиковой латентностью приблизительно 100 мс ($F3 - Z = -2.3$; $P = 0.024$; $F7 - Z = -2.2$; $P = 0.031$; $Fz - Z = -2.9$; $P = 0.004$).

В лобных областях при опознании значимо увеличивается амплитуда компонента P350 (305-390 мс: $F3 - Z = -2.4$; $P = 0.016$; $F4 - Z = -2.0$; $P = 0.048$; $F8 - Z = -2.9$;

$P = 0.004$; $Fz - Z = -1.9$; $P = 0.054$). Негативный компонент N350-400 в дорсолатеральной префронтальной коре, имеет большую амплитуду в ответ на неопознанные изображения; на опознанные стимулы в это время начинает развиваться

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа суммарных амплитуд ССП на неопознанные, предшествующие опознанию и опознанные фрагментарные изображения у детей 10-11 лет

времен- ные ин- тервалы, мс	20-80	80-160	161-220	220-304	305-390	390-470	470-570	570-660	660-750
Опознан.				F(4,56) = 4.2; P=0.005			F(1,28) = 4.8; P=0.037		
Опознан. х Отвед.	12,336) = 2.0; P=0.028	F(5,137) = 3.2; P=0.012		(12,17) = 2.6; P=0.04	(12,17) = 2.8; P=0.028	(5,151) = 3.5; P=0.004	(8,209) = 2.1; P=0.045	(12,17) = 2.9; P=0.024	(5,138) = 4.1; P=0.002

ся поздний позитивный комплекс (390-470 мс: F3 – Z=-2.8; P=0.005; F4 – Z=-2.3; P=0.024). Начиная с 550-600 мс в лобных зонах коры поздний позитивный комплекс (ППК) на опознанные стимулы сменяется медленной негативацией (570-660 мс: F3 – Z=-3.4; P=0.0006; F4 – Z=-2.4; P=0.015; F7 – Z=-1.9; P=0.052; F8 – Z=-2.8; P=0.004; Fz – Z=-3.9; P=0.0001).

Негативный компонент N250-300, имеющий большую амплитуду при опознании изображений в этом возрасте, значительно изменяется не в префронтальной коре, а в височных областях (220-305 мс: T3 – Z=-2.0; P=0.044; T4 – Z=-1.9; P=0.052). На более поздних этапах анализа информации с 400 мс в этих зонах коры в ответ на опознанные изображения отмечается значимое усиление ППК (390-470 мс: C3 – Z=-2.3; P=0.021; Cz – Z=-2.8; P=0.0051; T3 – Z=-2.3; P=0.021; T4 – Z=-2.6; P=0.009).

В каудальных областях в ответ на опознанные изображения увеличивается амплитуда компонентов P100 в правом полушарии (80-160 мс: T6 – Z=-2.2; P=0.028; O2 – Z=-1.92; P=0.054) и N250-300 – в левом (220-305 мс: P3 – Z=-2.1; P=0.033; T5 – Z=-1.92; P=0.054). Компонент P300 и следующая за ним негативность N450-500, напротив имеют большие амплитудные значения в ответ на неопознанные стимулы, на опознанные изображения после 400 мс начинает развиваться поздний позитивный комплекс (305-390 мс: P3 – Z=-2.0; P=0.048; O1 – Z=-2.2; P=0.025; 470-570 мс: P3 – Z=-2.3; P=0.024; T5 – Z=-2.8; P=0.006; O1 – Z=-2.7; P=0.007).

Индивидуальные особенности опознания фрагментарных изображений у детей 10-11 лет с разной эффективностью деятельности

В связи с тем, что в поведенческих исследованиях выявлены существенные индивидуальные различия в эффективности опознания, по этому показателю были выделены две крайние группы испытуемых – опознающих изображения с высокой (группа 1) и низкой (группа 2) точностью. Далее проводился индивидуальный анализ постстимульной активности у этих двух групп. Результаты дисперсионного анализа, представленные в таблице 2, выявили значимое влияние фактора ГРУППА и его взаимодействия с факторами ОПОЗНАНИЕ, ПОЛУШАРИЕ и ОТВЕДЕНИЕ на суммарную амплитуду ССП как для начальных этапов анализа информации, так и во временных интервалах, соответствующих компоненту N250- 300 (Ncl) и более поздним когнитивным операциям.

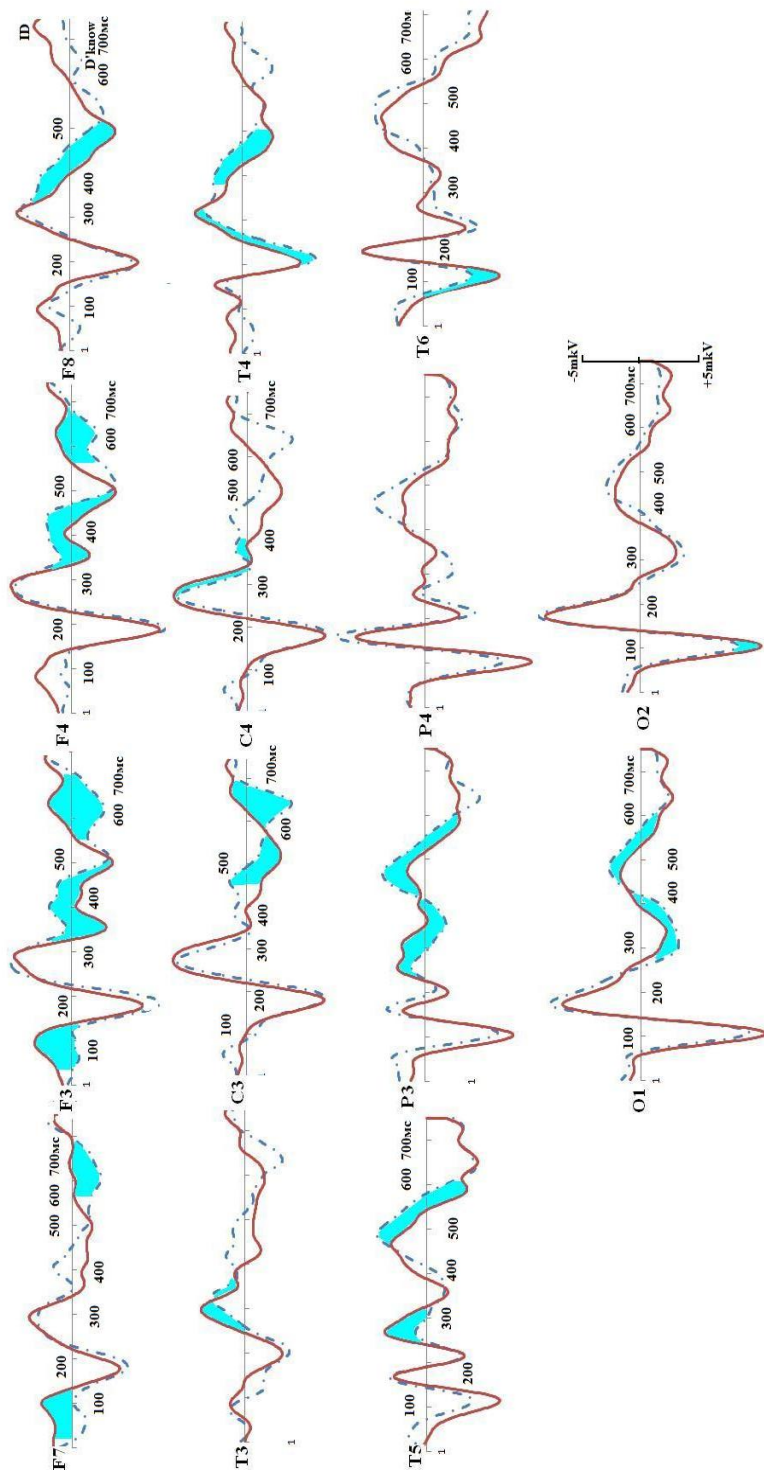


Рис 4. Регионарные ССП на олознанные (толстая линия) и неолознанные (пунктир) фрагментарные изображения у детей 10- 11 лет. По горизонтали – время, мс; по вертикали – усредненные ССП, мкВ. Значимые различия заштрихованы.

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа на неопознанные, предшествующие опознанию и опознанные фрагментарные изображения у детей с разной эффективностью деятельности

времен- ные ин- тервалы, мс	20-80	80-160	160-220	220-305	305-390	390-470	470-570	570-660	660-750
Группа				F(2,28) = 3.4; P=0.049					
Опознан . X Группа			F(2,28) = 4.7; P=0.017	F(2,27) = 7.9; P=0.002	F(1,28) = 4.1; P=0.028				
Опознан. X Отвед. X Группа								(12,187) = 2.4; P=0.044	F(12,18) = 3.3; P=0.011
Опознан. X Полуш. X Отвед. X Группа		F(12,18) = 2.7; P=0.03	F(12,18) = 3.0; P=0.017		F(12,18) = 3.2; P=0.014				

Изолированное влияние фактора ГРУППА значимо в интервале 220-305 мс, взаимодействие факторов ГРУППА x ОПОЗНАНИЕ выявлено в интервале от 160 до 390 мс, а ГРУППА x ОПОЗНАНИЕ x ОТВЕДЕНИЕ на значимый уровень выходит в интервале 560-660 и 660-750 мс. Совместное влияние факторов ГРУППА x ОПОЗНАНИЕ x ПОЛУШАРИЕ x ОТВЕДЕНИЕ отмечено в интервале 80-160 мс 160-220 мс и 305-390 мс. Полученные различия свидетельствуют об определенных отличиях в мозговой организации процесса опознания в группах с высокой и низкой эффективностью опознания.

Для уточнения межгрупповых различий, поскольку совместный анализ выявил влияние фактора ГРУППА на ряд компонентов ССП, был проведен дисперсионный анализ отдельно для 1 и 2 групп. Для группы 1 (таблица 3) изолированное влияние фактора ОПОЗНАНИЕ выявлено в интервале 220-305 мс. Взаимодействие факторов ОПОЗНАНИЕ x ОТВЕДЕНИЕ значимо в интервалах 160-220, 305- 390, 390-470, 470-570 и 570-660 мс. Совместное влияние факторов ОПОЗНАНИЕ x ПОЛУШАРИЕ x ОТВЕДЕНИЕ на значимый уровень выходит в интервалах 80- 160 мс, 160-220 мс, 220-304 мс и 660-750 мс.

Наиболее ранние различия между опознанными и неопознанными фрагментарными изображениями у детей, выполняющих деятельность с малым числом ошибок (рис. 5, а), отмечены в лобных областях левого полушария и связаны с возникновением ранней негативности в ответ на опознанные изображения ($F_3 - Z = -2.5; P = 0.013; F_7 - Z = -1.9; P = 0.055$).

В левой нижневисочной области в ответ на опознанные изображения значимо увеличивается амплитуда компонентов основного комплекса P100 (80-160 мс: $T_5 - Z = -2.1; P = 0.033$) и N250 (220-305 мс: $T_5 - Z = -2.0; P = 0.048$). На уровне тенденции отмечено увеличение амплитуды компонента N400 в ответ на опознанные изображения в нижневисочных зонах коры (390-470 мс: $T_5 - Z = -1.7; P = 0.087; T_6 - Z = -1.9; P = 0.064$). Поздний позитивный комплекс

в каудальных областях так же имеет большую амплитуду при опознании ($T5 - Z = -2.3$; $P = 0.019$; $T6 - Z = -2.4$; $P = 0.016$; $O1 - Z = -2.0$; $P = 0.046$). На неопознанные фрагментарные изображения амплитуда негативности N200 в затылочной и теменной областях левого полушария значимо увеличивается (160-220 мс: $O1 - Z = -2.2$; $P = 0.028$; $P3 - Z = -2.4$; $P = 0.016$). В лобной и лобно-височной зонах правого полушария негативностью 450-500 (390-470 мс: $F4 - Z = -1.9$; $P = 0.054$; $F8 - Z = -2.1$; $P = 0.033$) и поздний позитивный комплекс (570-660 мс: $F4 - Z = -2.5$; $P = 0.013$) также имеют большую амплитуду в ответ на неопознанные изображения.

Иная картина влияния опознания на параметры ССП наблюдается в группе с низкой эффективностью (табл. 4). По данным дисперсионного анализа в этой группе изолированное влияние фактора ОПОЗНАНИЕ отмечено лишь в интервале 570-660 мс, значимое взаимодействие факторов ОПОЗНАНИЕ x ОТВЕДЕНИЕ отмечается во временном окне 80-160 мс. В интервалах 220-304 и 660-750 мс значимо взаимодействие факторов ОПОЗНАНИЕ x ПОЛУШАРИЕ x ОТВЕДЕНИЕ.

Таблица. 4

Результаты дисперсионного анализа суммарных амплитуд ССП на опознанные и неопознанные фрагментарные изображения у детей 10-11 лет с низкой эффективностью деятельности

временные интервалы, мс	20-80	80-160	161-220	220-305	305-390	390-470	470-570	570-660	660-750
Опознан								$F(1,10) = 5.1$; $P = 0.048$	
Опознан x Отвед		$F(3,30) = 4.5$; $P = 0.01$							
Опознан x Полуш x Отвед				$F(1,10) = 7.3$; $P = 0.022$					$F(1,10) = 5.3$; $P = 0.043$

У детей, опознающих фрагментарные изображения с большим количеством ошибок, существуют различия в мозговых механизмах опознания по сравнению с группой детей, которые ошибаются мало (рис. 5 Б).

Наиболее ранние различия ССП опознанных и неопознанных фрагментарных изображений отмечены в лобных областях и связаны с увеличением амплитуды раннего негативного компонента в ответ на опознанные стимулы ($F3 - Z = -2.7$; $P = 0.008$; $F4 - Z = -1.9$; $P = 0.055$). Значимые различия выявлены и для комплекса компонентов P250-N300, в котором P250 имеет большую амплитуду на неопознанные изображения за счет существенного увеличения амплитуды негативности N300 в ответ на опознанные изображения в правой нижнетеменной области (220- 305 мс: $T6 - Z = -2.3$; $P = 0.022$). Поздний позитивный комплекс в переднее- центральных областях коры начинается раньше (с 390 мс) и имеет большую амплитуду в ответ на опознанные фрагментарные изображения. Различия носят значимый характер в правой переднее-височной

зоне (390-470 мс: $T4 - Z = -2.1$; $P = 0.041$). На более поздних временных интервалах медленный позитивный комплекс становится более выражен на неопознанные фрагментарные изображения как в лобных, так и каудальных областях, в то время как при опознании развивается поздняя негативность (570-660 мс: $F3 - Z = -2.4$; $P = 0.016$; $F4 - Z = -2.5$; $P = 0.013$; $P4 - Z = -2.3$; $P = 0.021$).

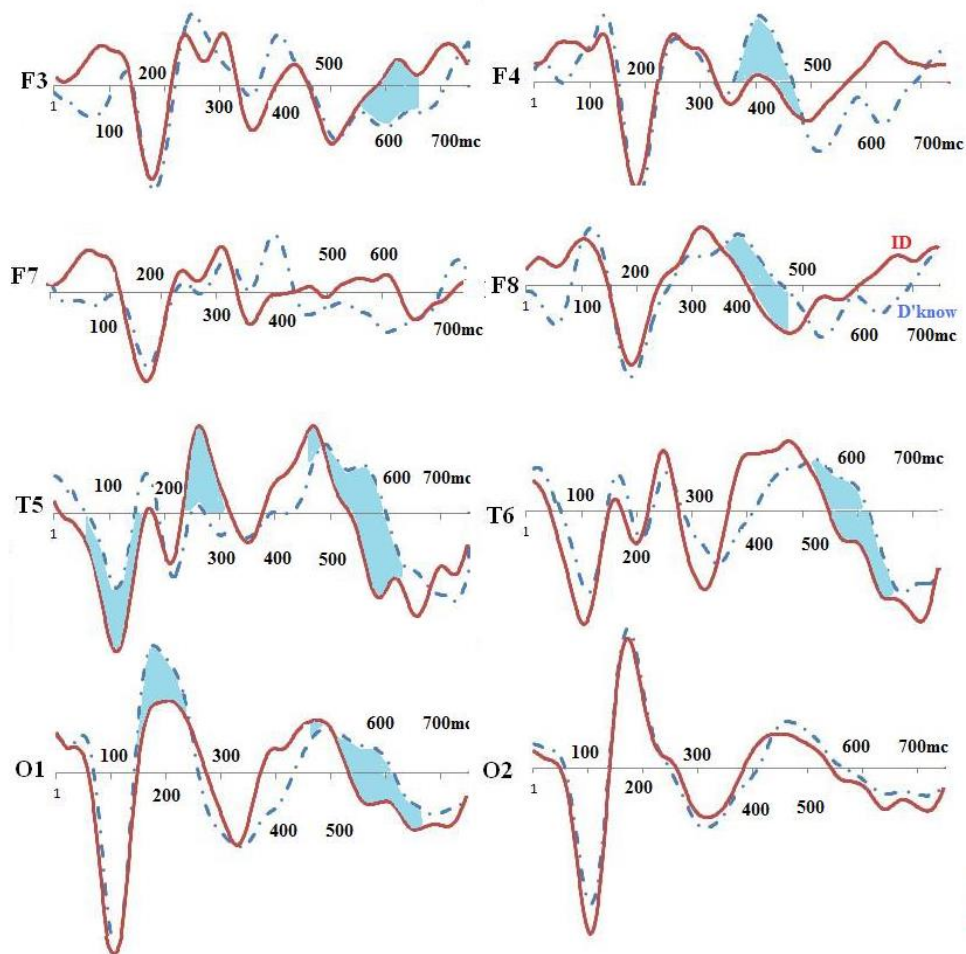


Рис 5А. Регионарные ССП на опознанные и неопознанные фрагментарные изображения у детей с эффективным (А) и неэффективным (Б) опознанием. Обозначения как на рис. 4.

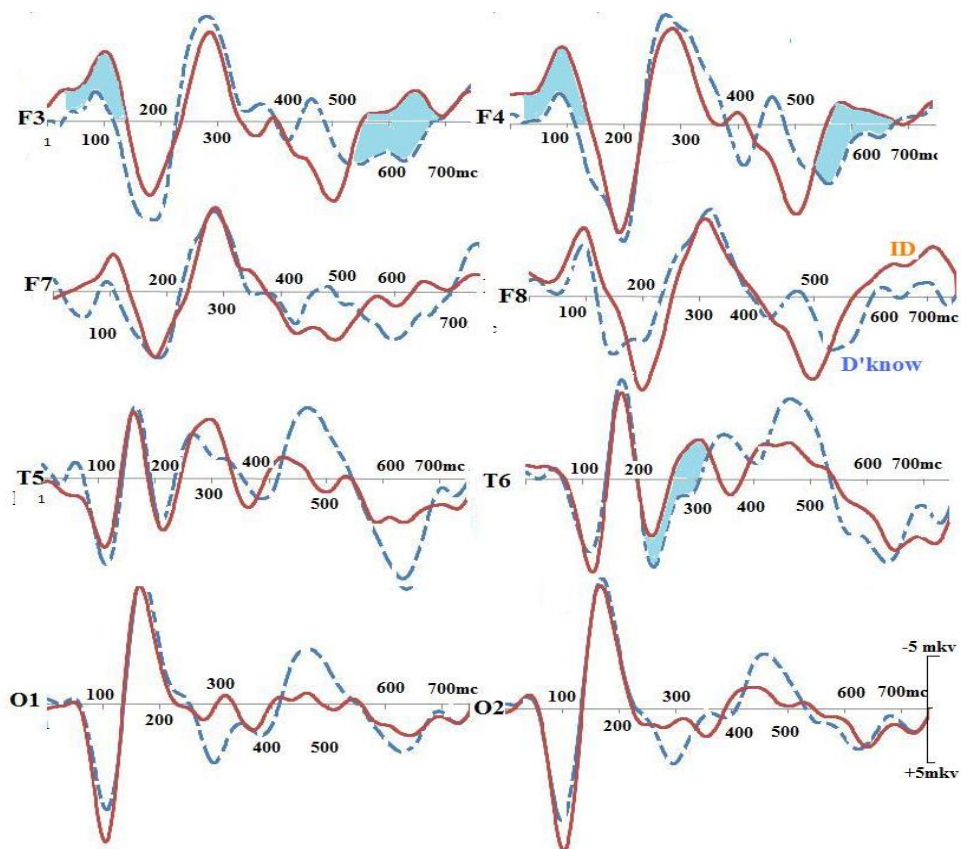


Рис 5Б. Регионарные ССП на опознанные и неопознанные фрагментарные изображения у детей с эффективным (А) и неэффективным (Б) опознанием. Обозначения как на рис. 4.

Таким образом, анализ поведенческих показателей опознания неполных фрагментарных изображений у детей 10-11 лет выявил прогрессивные изменения эффективности этой деятельности на данном этапе развития по сравнению с детьми 9 лет. Отрицательные отклонения функционального состояния мозговых структур, связанных с восприятием информации, характерные для пубертатного периода [7, 10] в 10-11 лет еще не обнаруживаются. Основываясь на данных о роли произвольного внимания в избирательной преднастройке структур мозга к реализации деятельности [3, 5, 31, 47], мы поставили перед собой цель выявить мозговые механизмы, лежащие в основе эффективного опознания. Наше исследование было направлено на выявление специфики функциональной организации произвольного внимания у детей 10-11 лет. Для этого сопоставлялись показатели функционального взаимодействия корковых зон по мнимой функции КОГ ($J(f) = \text{Im}\{C(f)\}$) в период, предшествующий предъявлению целевого стимула и отражающий направленность на выполнение когнитивной задачи с неспецифическим вниманием, с периодом спокойного наблюдения, предшествующим появлению предупреждающего стимула.

Полученные данные выявили существенные преднастройки функциональной организации мозга в ситуации произвольного внимания, направленного на опознание предъявляемых изображений. Готовность к реализации этой деятельности приводила к значительному увеличению степени вовлечения дорсолатеральных и вентролатеральных префронтальных зон в формирование новых когнитивных систем. Эти изменения преимущественно выражены в правом полушарии, что соответствовало избирательному вовлечению корковых зон в анализ и интеграцию фрагментов изображения, то есть на выполнение зрительно-пространственного задания – функции, реализуемой с преимущественным участием правого полушария. Принципиальные различия в организации предстимульного внимания в тех случаях, когда стимул не опознавался, и при его опознании не наблюдались. Вместе с тем выявлено усиление степени вовлечения дорсолатеральной префронтальной коры, играющей важнейшую роль в мониторинге информации и удержании ее в рабочей памяти. Можно полагать, что более эффективное опознание обеспечивается другим важным фактором, реализуемым в процессе преднастройки, а именно извлечением из памяти хранящегося там следа предъявляемого изображения. Это полностью согласуется с гипотезой М. Бара [13, 14, 25] о роли префронтальной коры в опознании изображений. Согласно гипотезе М. Бара префронтальная кора, получающая информацию по быстропроводящей дорзальной зрительной системе, играет важнейшую роль в извлечении следов и поиске возможного аналога объекта в памяти. Информация об этом объекте, поступая по нисходящим связям в корковые зоны вентральной зрительной системы, облегчает процесс опознания. О роли функциональной активности префронтальной коры в эффективном опознании свидетельствуют и данные, полученные в настоящей работе в процессе реализации сенсорных и когнитивных операций, определяющих опознание предъявляемого изображения. При анализе ССП установлено, что у детей этого возраста, как и у взрослых испытуемых [8], при эффективном опознании обнаруживается раннее вовлечение в этот процесс дорсо- и вентролатеральных зон префронтальной коры, что проявилось в наличии у детей 10-11 лет ранней негативности в ответах на опознанные изображения при отсутствии ее на неопознанные стимулы. При этом усиливается и участие в опознании нижневисочных корковых зон, где интегрируются восходящие и нисходящие влияния, и осуществляется заключительный этап процесса опознания [8, 20, 36]. Данные о роли активности префронтальной и височной коры в эффективности опознания подтверждены в серии исследований, проведенных в рамках данной работы и направленных на выявление механизмов, определяющих индивидуальные особенности успешности опознания фрагментарных изображений у детей 10-11 лет. В поведенческом эксперименте в зависимости от точности опознания были выделены две группы детей: опознающих точно, с малым числом ошибок и опознающих со значительно бóльшим числом ошибок. Для группы опознающих с высокой эффективностью было характерно большее вовлечение вентролатеральных префронтальных корковых зон и нижневисочной коры левого полушария. Преимущественное участие левого полушария в процессе опознания определяет его роль в категоризации стимулов и назывании опознаваемого изображения, которые осуществлялись испытуемым в ответах на опознаваемый стимул.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные выявили значительную степень зрелости механизмов избирательного произвольного внимания, осуществляемого при участии префронтальной коры. Вовлечение этих корковых зон в опознание неполных изображений обеспечивает характерную для 10-11-летних детей эффективность опознания, близкую к дефинитивному уровню. Нейрофизиологический анализ функциональной организации мозга в процессе опознания выявил увеличивающееся с возрастом участие префронтальной коры и ее нисходящих влияний на зрительные зоны, обеспечивающих эффективность опознания. При анализе индивидуальных особенностей эффективности деятельности в зависимости от точности опознания были выделены две группы детей: опознающих точно, с малым числом ошибок, и опознающих с существенно бóльшим числом ошибок. Для группы с высокими показателями эффективности характерно значимо большее вовлечение вентролатеральных префронтальных корковых зон и нижневисочной коры левого полушария, что, по-видимому, определяет эффективность опознания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов Д.В., Сельверова Н.Б. Физиолого-педагогические аспекты полового созревания. – М. 1978. – 221 с.
2. Курганский А.В. Некоторые вопросы исследования кортико-кортикальных функциональных связей с помощью векторной авторегрессионной модели многоканальной ЭЭГ // ЖВНД. – 2010. – Т. 60, № 6. – С. 740.
3. Мачинская Р.И. Функциональное созревание мозга и формирование нейрофизиологических механизмов избирательного произвольного внимания у детей младшего школьного возраста // Физиология человека. – 2006. – Т. 32, № 1. – С. 26.
4. Мачинская Р.И., Курганский А.В. Сравнительное электрофизиологическое исследование регуляторных компонентов рабочей памяти у взрослых и детей 7-8 лет. Анализ когерентности ритмов ЭЭГ // Физиология человека. – 2012. – Т. 38, № 1. – С. 5-19.
5. Мачинская Р.И., Мачинский Н.О., Дерюгина Е.И. Функциональная организация правого и левого полушарий мозга человека при направленном внимании // Физиология человека. – 1992. – Т. 18, № 6. – С. 77.
6. Петренко Н.Е., Фарбер Д.А. Возрастная динамика мозговой организации опознания фрагментарных изображений от 5-6 к 7-8 годам // Альманах «Новые исследования». – 2011. – № 4. – С. 5.
7. Фарбер Д.А., Игнатъева И.С. Влияние нейроэндокринных сдвигов пубертатного периода на реализацию рабочей памяти у подростков // Физиология человека. – 2006. – Т. 32. – № 1. – С. 5.
8. Фарбер Д.А., Петренко Н.Е. Опознание фрагментарных изображений и механизмы памяти // Физиология человека. – 2008. – Т. 34, № 1. – С. 5-18.
9. Фарбер Д.А., Петренко Н.Е. Формирование механизмов опознания неполных изображений в дошкольном и младшем школьном возрасте // Физиология человека. – 2012. – Т. 38, № 5. – С. 5.
10. Физиология подростка / Под ред. Фарбер Д.А. – М.: Педагогика, 1988. – 67 с.
11. Физиология развития ребенка: Руководство по возрастной физиологии / Под ред. М.М. Безруких, Д.А. Фарбер. – М.: МПСИ, МОДЭК, 2010. – 768 с.
12. Babiloni C., Vecchio F., Cappa S. et al. pre-and poststimulus alpha rhythms are related to conscious visual perception: a high-resolution EEG study // Cereb. Cortex. – 2006. – I. 16. – P. 1690.

13. Bar M. A cortical mechanism for triggering top-down facilitation in visual object recognition // *J. Cogn. Neurosci.* – 2003. – V. 15. – P. 600.
14. Bar M., Kassam K.S., Ghuman A.S., Boshyan J. et al. Top-down facilitation of visual recognition // *Proc Natl Acad Sci U S A.* – 2006. – V. 103, N 2. – P. 449.
15. Bollinger, J., Rubens, M.T., Zanto, T.P. & Gazzaley, A. Expectation-driven changes in cortical functional connectivity influence working-memory and long-term memory performance // *J. Neurosci.* – 2010. – V. 30. – P. 14399.
16. Bressler S. L., Tognoli E. Operational principles of neurocognitive networks. // *Int J. Psychophysiol.* – 2006. – V. 60, N 2. – P. 139-148.
17. Cadotte A.J., DeMarse T.B., He P., Ding M. Causal measures of structure and plasticity in simulated and living neural networks // *PLoS ONE.* – 2008. – V. 3, N 10. – P. e3355.
18. Cui J., Xu L., Bressler S.L., Ding M., Liang H. BSMART: A Matlab/C toolbox for analysis of multichannel neural time series // *Neural Networks.* – 2008. – 21: 1094.
19. Darvas F., Miller K.J., Rao R.P.N., Ojemann J.G. Nonlinear Phase-Phase Cross-Frequency Coupling Mediates Communication between Distant Sites in Human Neocortex // *J. Neurosci.* – 2009. – V. 29, N 2. – P. 426.
20. Doniger G. M., Foxe J. J., Schroeder Ch. E., Murray M. M., Higgins B. A., and Javitt D. C. Visual Perceptual Learning in Human Object Recognition Areas: A Repetition Priming Study Using High-Density Electrical Mapping // *NeuroImage.* – 2001. – V. 13. – P. 305.
21. Guo S., Seth A.K., Kendrick K.M et al. Partial Granger causality eliminating exogenous inputs and latent variables // *J. Neurosci. Methods.* – 2008. – 172(1): 79.
22. Hanslmayr S, Aslan A, Staudigl T, Klimesch W, Herrmann CS, et al. Prestimulus oscillations predict visual perception performance between and within subjects. *NeuroImage.* – 2007. – V. 37. – P. 1465.
23. Kaminski M. Determination of transmission patterns in multichannel data // *Phil. Trans. R. Soc. B.* – 2005. – I. 360. – P. 947.
24. Kaminski M., Ding M., Truccolo W.A., Bressler S.L. Evaluating causal relations in neural systems: Granger causality, direct transfer function and statistical assessment of significance // *Biol. Cybern.* – 2001. – V. 85. – P. 145.
25. Kverega K., Boshyan J., Bar M. Magnocellular Projections as the Trigger of Top-Down Facilitation in Recognition // *The Journal of Neuroscience.* – 2007. – V. 27, N. 48. – P. 13232.
26. Liang H., Bressler S. L., Ding M. et al. Temporal dynamics of attention- modulated neuronal synchronization in macaque V4 // *Neurocomputing.* – 2003. – V. 52-54. – P. 481
27. Nolte G., Bai O., Wheaton L. et al. Identifying true brain interaction from EEG data using the imaginary part of coherency // *Clin. Neurophysiol.* – 2004. – V. 115. – P. 2292.
28. alva S, Palva JM New vistas for alpha-frequency band oscillations // *Trends Neurosci.* – 2007. – V. 30. – P. 150.
29. Patten TM, Rennie CJ, Robinson PA, Gong P. Human cortical traveling waves: dynamical properties and correlations with responses // *PLoS One.* – 2012. – V. 7, N 6. P. e38392.
30. Pereda E, Quiroga RQ, Bhattacharya J. Nonlinear multivariate analysis of neurophysiological signals // *Prog Neurobiol.* – 2005. – V. 77, N 1-2. – P. 1.
31. Posner, M.I. Attention: The mechanisms of consciousness // *Proceedures of the National Academy of Science.* – 1994. – V. 91. – P. 7398.
32. Rohenkohl G., Nobre A.C. Alpha Oscillations Related to Anticipatory Attention Follow Temporal Expectations // *J Neurosci.* – 2011. – V. 31, N 40. – P. 14076.
33. Romei V., Gross J., Thut G. On the Role of Prestimulus Alpha Rhythms over Occipito-Parietal Areas in Visual Input Regulation: Correlation or Causation? // *The Journal of Neuroscience.* – 2010. – V. 30, N 25. – P. 8692.

34. Schreiber T. Measuring information transfer // Phys Rev Lett. – 2000. – V. 85, N 2. – P. 461.
35. Sehatpour P., Molholm S., Schwartz T., Mahoney J., Mehta A., Javitt D., Stanton P., Foxe J. A human intracranial study of long-range oscillatory coherence across a frontal-occipital-hippocampal brain network during visual object processing // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. – 2008. – V. 105, N. 11. – P. 4399.
36. Sehatpour P., Molholm S., Javitt D.C., Foxe J.J. Spatiotemporal dynamics of human object recognition processing: An integrated high-density electrical mapping and functional imaging study of "closure" processes // NeuroImage. – 2006. – V. 29. – P. 605.
37. Senkowski D., Schneider T.R., Foxe J.J., Engel A.K. Crossmodal binding through neural coherence: implications for multisensory processing // Trends in Neurosciences. – 2008. – V. 31, N. 8. – P. 401.
38. Snodgrass J.G., Corwin J. Perceptual identification thresholds for 150 fragmented pictures from the Snodgrass and Vanderwart picture set. // Percept. Motor Skills. – 1988. – V. 67. – P. 3.
39. Snyder A.C., Foxe J.J. Anticipatory attentional suppression of visual features indexed by oscillatory alpha-band power increases: a high-density electrical mapping study // J Neurosci. – 2010. – V. 30. – P. 4024.
40. Tabareau N, Slotine J-J, Pham Q-C. How Synchronization Protects from Noise // PLoS Comput Biol. – 2010. – V. 6, N1. – P. e1000637.
41. Thakor N.V., Tong S. Advances in quantitative electroencephalogram analysis methods // Annu Rev Biomed Eng. – 2004. – V. 6. – P. 453.
42. van Dijk H, Schoffelen JM, Oostenveld R, Jensen O. Prestimulus oscillatory activity in the alpha band predicts visual discrimination ability // J Neurosci. – 2008. – V. 28. – P. 1816.
43. Varela F., Lachaux J-P., Rodriguez E., Martinerie J. The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration // Nat. Rev. Neurosci. – 2001. – V. 2. – P. 229.
44. Viggiano M.R., Kutas M. Overt and covert identification of fragmented objects inferred from performance and electrophysiological measures // J. Experim. Psychology: General. – 2000. – V. 129, N 1. – P. 107
45. on Stein A., Chiang C., Konig P. Top-down processing mediated by interareal synchronization // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. – 2000. – V. 97. – P. 14748.
46. Wolters C., de Munck J.C. Volume Conduction // Scholarpedia. – 2007. – V. 2, N 3. – P. 1738.
47. Yamagishi N, Callan D.E, Anderson S.J, Kawato M. Attentional changes in pre-stimulus oscillatory activity within early visual cortex are predictive of human visual performance // Brain Res. – 2008. – V. 1197, N 4. – P. 115.
48. Zhuang J., Peltier S., He S., LaGonte S., Hu X. Mapping the connectivity with structural equation modeling in an fMRI study of shape-from-motion task // Neuroimage. – 2008. – V. 42. – P. 799.

4. <https://elibrary.eu/item.asp?=23373058> Фарбер Д.А., Петренко Н.Е. Особенности мозговой организации произвольного внимания и их влияние на эффективность целостного опознания у подростков 12-13 ЛЕТ// Новые исследования. 2015. № 4 (36). С. 5

У детей 12-13 лет изучались показатели функциональной организации мозга в период подготовки к когнитивной деятельности и её выполнения. Анализ показателей формирования внутрикоркового взаимодействия в процессе преднастройки к целостному опознанию неполных изображений у детей трёх возрастных групп: 10-11, 11-12 и 12-13 лет выявил динамику мозговой организации произвольного внимания и её специфику в 12-13 лет.

Установлено, что в течение предподросткового возраста происходят неоднозначные изменения степени и характера участия регуляторных систем в мозговой организации произвольного внимания. К 12-13 годам вследствие прогрессивного созревания дорзолатеральной префронтальной коры возрастает влияние системы избирательной регуляции. Возрастает дифференцированность и полушарная специализация формирующихся при произвольном внимании функциональных объединений корковых областей. На поведенческом уровне снижается импульсивность принятия решения. Положительная направленность организации произвольного внимания и его влияние на эффективность выполнения заданий нивелируется негативными изменениями активности структур мотивационной регуляторной системы. В 12-13 лет существенно снижается степень вовлечения вентролатеральной префронтальной коры в организацию произвольного внимания. Дефицитарность мотивационного компонента внимания отрицательно влияет на успешность выполнения когнитивного задания: у детей 12-13 лет, несмотря на снижение импульсивности принятия решений, число ошибочных ответов по сравнению с детьми 11-12 лет значимо не изменяется.

Ключевые слова: регуляторные системы мозга, произвольное внимание, мотивационный компонент внимания, префронтальная кора, электроэнцефалограмма, функциональная организация мозга, связанные с событием потенциалы, зрительное опознание.

Brain organization of voluntary attention in adolescences aged 12-13 affects in-complete image recognition. We studied functional brain organization during the preparation to the cognitive task and along its performance in children aged 12-13. A comparative analysis of cortico-cortical interactions during the preparation to incomplete image recognition in children aged 10-11, 11-12 and 12-13 showed the dynamics of brain organization of voluntary attention and its specificity in 12-13-year-old children.

It was found that the involvement of executive systems into the brain organization of voluntary attention is changing ambiguously along the pre-teen years. The fact that the dorsolateral prefrontal cortex (PFC) becomes more mature to the age of 12-13 leads to a greater involvement of the executive system. Functional cortico-cortical connectivity formed during voluntary attention performance becomes more differentiated and hemispherical specialized. Behavioral data shows a decrease in impulsive decision-making. However, positive changings in the development of voluntary attention and its influence on the task performance are overshadowed by the decreased activity of the motivational modulatory system. The ventrolateral PFC becomes significantly less involved into the processes of voluntary attention to the age of 12-13. Lower level of the motivational component of attention negatively affects cognitive performance: children aged 12-13 did not show any significant differences in task performance, as compared with children aged 11-12, despite of the fact that they show a decrease in impulsive decision-making.

Key words: brain executive systems, voluntary attention, motivational component of attention, PFC, EEG, functional brain organization, ERPs, incomplete image recognition.

Возрастные и индивидуальные особенности произвольного внимания определяют возможности школьника в процессе преднастройке к выполнению когнитивных заданий и организации учебной деятельности. Ранее было показано, что постепенное и гетерохронное созревание регуляторных структур мозга в дошкольном и младшем школьном возрасте определяют прогрессивное развитие механизмов произвольного внимания на этом этапе развития [2; 3; 8].

Однако с наступлением пубертатного периода эта прогрессивная тенденция сменяется неоднозначными изменениями в развитии регуляторных систем разного уровня. На раннем этапе полового созревания в организме происходят изменения, связанные с активизацией нейрогормональной функций гипоталамуса [6], выделением гормонов, неоднозначно влияющих на созревание структур мозга, в том числе и высших регуляторных центров произвольного внимания и произвольной регуляции деятельности [17].

Современные методы изучения морфологической и функциональной организации мозговых процессов позволили получить новые и важные данные о структуре нейронов и их связей, обеспечивающих системную организацию когнитивной деятельности в этом возрасте. Показано, что существенные из-

менения происходят в префронтальной коре [9; 19-22]. Особенностью ее созревания на рассматриваемом этапе развития является разная динамика формирования нейронов и их связей в разных ее зонах [10]. Неравномерность развития связей префронтальной коры с другими структурами мозга обуславливает специфику их объединения в функциональные системы, складывающиеся в процессе когнитивной деятельности [13]. Показана также неодновременность созревания префронтальной коры и глубоких структур мозга, связанная с неоднозначным влиянием половых гормонов на их развитие [17]. Под влиянием половых гормонов, выделяющихся на начальной стадии полового созревания, наиболее интенсивные изменения происходят в лимбической и вентро-стриарной системах, что приводит к существенным изменениям механизмов мотивационно-эмоциональной регуляции [21; 22].

Прогрессивное созревание корковых регуляторных структур – процесс более длительный. Согласно имеющимся данным созревание префронтальной коры и ее связей с другими структурами прослеживается в течение всего восходящего онтогенеза. При этом установлена неодновременность и неоднозначность воздействия половых гормонов в особенности тестостерона на дорзолатеральные и вентролатеральные зоны префронтальной коры и их контролируемых влияний.

Учитывая данные о различной роли дорзо- и вентролатеральных зон префронтальной коры в формировании разных управляющих функций [1], есть все основания считать, что особенности их функционирования в предпубертальном и подростковом возрасте могут определять специфику мозговой организации произвольного внимания и его роль в эффективности когнитивной деятельности. К настоящему времени нет четких данных о возрасте появления описанных выше морфофункциональных изменений регуляторных систем, связанных с половым созреванием. Это обусловлено как индивидуальной вариативностью его темпа, так и, прежде всего, широким возрастным диапазоном анализируемых групп (например, 11-16, 12-17, 10-15 лет), включающих согласно существующей классификации [14] предпубертальный (до 13 лет) и подростковый (после 13) возраст. В связи с этим нами было начато поперечное изучение особенностей функционирования дорзо- и вентролатеральных систем префронтальной коры, их вклада в мозговую организацию произвольного внимания в период подготовки к выполнению когнитивного задания – опознанию неполных изображений разного уровня фрагментации. Результаты исследования детей 10-11 и 11-12 лет выявили определенную специфику мозговой организации произвольного внимания в каждой из групп, связанную с изменяющимся в течение предпубертального возраста вкладом разных регуляторных систем префронтальной коры в формирование межкортикальных объединений на разных этапах подготовки к выполнению когнитивного задания [5]. В настоящей статье рассматриваются данные, полученные при исследовании детей 12-13 летнего возраста, приходящегося на II и III стадии полового созревания [6].

С целью выявления динамики механизмов произвольного внимания, связанных с изменением в функционировании префронтальных регуляторных систем в статье представлены результаты совместного анализа показателей межкортикального взаимодействия дорзолатеральной и вентролатеральной преф-

ронтальных корковых зон с другими областями коры детей трех возрастных групп: 10-11, 11- 12, 12-13 лет.

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании участвовали 25 школьников 12-13 лет (12 мальчиков и 13 девочек), средний возраст $12,3 \pm 0,14$. наряду с показателями мозговой организации внимания на разных этапах подготовки к деятельности и при ее осуществлении у детей 12-13 лет анализировались данные, полученные в тех же экспериментальных условиях при исследовании 21 школьника 11-12 лет (10 мальчиков, 11 девочек, средний возраст $11,2 \pm 0,2$) и 31 школьник 10-11 лет (16 мальчиков, 15 девочек). Все дети – учащиеся общеобразовательных школ г. Москвы, имеющие нормальное зрение и без трудностей обучения и отклонений в поведении.

Испытуемым предъявлялось 16 знакомых изображений предметов и животных из стандартного набора [18] без предварительной демонстрации полных изображений. Для каждого из 16 целевых объектов последовательно предъявлялись изображения пяти уровней фрагментации от трудно опознаваемых до полных изображений. Подробно модель и временная последовательность эксперимента изложены ранее [4]. У всех испытуемых анализировались поведенческие показатели опознания и функциональная организация мозга в предстимульные и постстимульные периоды.

В качестве поведенческих показателей использовались успешность опознания, о которой судили по числу ошибок, и порогу опознания – уровень фрагментации, на котором правильно опознавалось изображение.

В период подготовки к решению испытуемым когнитивной задачи и в процессе ее выполнения проводилась непрерывная регистрация ЭЭГ по системе 10- 20% от затылочных (O1, O2), теменных (P3, P4), передневисочных (T3, T4), задневисочных (T5, T6), центральных (C3, C4) и лобных (F3, F4, F7, F8) отведений.

В качестве меры функционального взаимодействия в период преднастройки использовалась мнимая часть комплексной функции когерентности $J(f) = \text{Im}\{C(f)\}$. Более подробно этот метод оценки межкоркового взаимодействия описан нами ранее [4].

Для каждой пары отведений вычислялась величина J_α , равная среднему значению функции $J(f)$ в диапазоне альфа-ритма (7,5-12,5 Гц). Такое вычисление проводилось индивидуально для каждого испытуемого отдельно в трех экспериментальных условиях (ЭУ1, ЭУ2, ЭУ3). ЭУ1 характеризовало неспецифическое внимание и соответствовало отрезку ЭЭГ, регистрируемому от момента фиксации взора до появления предупреждающего стимула; ЭУ2 относилось к ожиданию целевого стимула, и ему соответствовал отрезок ЭЭГ от предупреждающего стимула до появления еще не опознанного целевого фрагментарного изображения; ЭУ3 характеризовало ожидание целевого, уже опознанного, стимула, и ему соответствовал отрезок ЭЭГ от предупреждающего стимула до появления эффективно опознаваемых фрагментарных изображений.

Статистический анализ величин J_α осуществлялся с помощью дисперсионного анализа для повторных измерений (rmANOVA) для двух подмножеств пар отведений, включавших отведения от дорзолатеральных (F3, F4) и вентралате-

ральных (F7, F8) зон префронтальной коры с отведениями от других корковых зон.

Для исследования степени и характера участия различных областей коры в эффективном зрительном опознании в предпубертковом возрасте анализировалась амплитуда компонентов регионарных ССП. Усреднялись ССП при отсутствии опознания – испытуемый отвечал "Не знаю" и ССП, регистрируемые при правильном опознании. Усредненные по типам "опознаваемости" стимула ССП отдельных испытуемых анализировались с помощью метода главных компонент. Суммарная амплитуда ССП на временных отрезках, соответствующих выделенным главным компонентам, обрабатывалась с помощью дисперсионного анализа для повторных измерений (rmANOVA). Значимость попарных различий параметров ССП оценивалась при помощи непараметрического критерия Вилкоксона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поведенческие показатели опознания фрагментарных изображений.

Анализ поведенческих показателей опознания фрагментарных изображений позволил выявить их изменение от 10-11 к 11-12 и 12-13 годам (рис. 1). Данные дисперсионного анализа выявили значимое влияние фактора ВОЗРАСТ как на количество ошибок ($F(2,65) = 5,633; p = 0,006$), так и на порог опознания ($F(2,65) = 23,36; p = 0,000$).

По числу ошибок опознания группа детей 12-13 лет значимо не отличалась от детей 11-12 лет ($1,9 \pm 0,33$), но по сравнению с 10-11 годами ($4,19 \pm 0,76$) обе группы совершали значимо меньше ошибок ($Z = -2,354; P = 0,019$ и $Z = -2,229; P = 0,026$ соответственно).

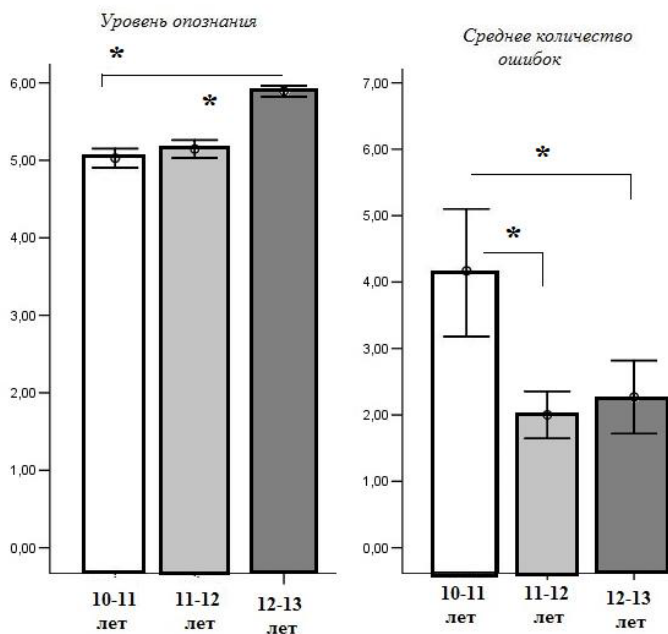


Рис. 1. Среднее значение порога опознания и количества ошибок у детей 10-11, 11-12 и 12-13 лет

Вместе с тем в 12-13 лет значительно увеличивается среднее значение порога (уровня фрагментации) опознания и составляет 5.89 ± 0.07 , по сравнению с группой 11-12 летних, у которых порог опознания составляет $5,177 \pm 0.11$ ($Z = -4.357$; $p = 0.001$) и с группой 10-11-летних детей – 5.10 ± 0.12 ($Z = -4,741$; $P = 0,0001$). Значимые половые различия как по количеству ошибок, так и по порогу опознаны не выявлены.

Функциональная организация мозга на разных этапах подготовки к выполнению когнитивного задания. Для выявления специфики мозговой организации произвольного внимания при эффективном и неэффективном выполнении когнитивной задачи показатели $J\alpha$ на этапе ожидания целевого изображения в тех случаях, когда оно не опознавалось (ЭУ2) и при его правильном опознании раздельно (ЭУ3) сопоставлялись с таковыми при неспецифическом внимании (ситуации ожидания предупреждающего стимула (ЭУ1)).

Анализ *gm ANOVA* по множеству пар отведений, включающих дорзолатеральную префронтальную кору (F3, F4) при сравнении ЭУ2 и ЭУ1 выявил значимость совместного влияния факторов УСЛОВИЕ и ПОЛУШАРИЕ ($F(1,24) = 5,028$, $p = 0,034$), что отражает различный характер изменения межкортикального взаимодействия в правом и левом полушарии при переходе от неспецифического внимания к произвольному направленному вниманию. Для пар отведений, в которые в качестве одного входили зоны вендролатеральной префронтальной коры (F7, F8) значимость влияния фактора УСЛОВИЕ и его взаимодействия с другими факторами не выявлено.

Сравнение периода, предшествующего эффективному опознанию целевого стимула, с ситуацией ожидания предупреждающего стимула (ЕУ3, ЕУ1), проведенное по той же схеме для подмножества отведений, включающих дорзолатеральную префронтальную кору (F3, F4), выявило значимое влияние фактора УСЛОВИЕ. Его взаимодействие с другими факторами не выявлено.

С целью выявления возрастной динамики нейрофизиологических механизмах преднастройки к опознанию неполных предметных изображений разного уровня фрагментации у детей 10-11, 11-12 и 12-13 лет был проведен дополнительный дисперсионный анализ, использующий помимо описанных факторов, фактор ВОЗРАСТ.

Для пар отведений, в которые в качестве одного входили области F3, F4 на значимый уровень выходит взаимодействие факторов ВОЗРАСТ \times УСЛОВИЕ \times ПОЛУШАРИЕ ($F(4,138) = 3.095$, $p = 0.018$).

Для пар отведений F7, F8 значимых взаимодействий с фактором ВОЗРАСТ выявлено не было.

Выявленное дисперсионным анализом совместное влияние факторов ВОЗРАСТ \times УСЛОВИЕ \times ПОЛУШАРИЕ1 свидетельствует о наличии в подмножестве отведений, включающих дорзолатеральную префронтальную кору, существенных возрастных различий в специализации полушарий на разных этапах подготовки к деятельности у детей 10-11, 11-12 и 12-13 лет.

Как видно на рисунке 2, в подмножестве пар отведений, включающем F3 и F4 (дорзолатеральная префронтальная кора), в левом полушарии величина $J\alpha$ у всех трех групп детей имеет минимальное значение в ЭУ1, а максимальное значение в ЭУ3. В правом полушарии также максимальное значение величины $J\alpha$ отмечено в ЭУ3, однако динамика от ЭУ1 к ЭУ3 у разных возрастных

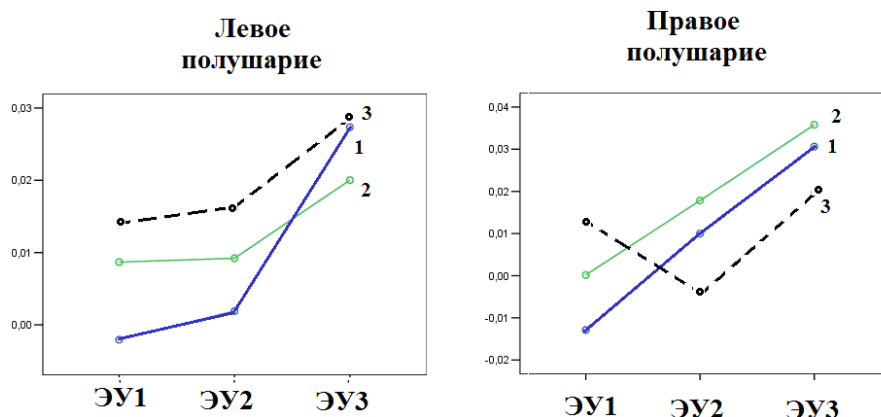


Рис. 2. Полушарные различия J_a в подмножестве отведений, включающих дорзолатеральную префронтальную кору, в разных экспериментальных условиях у детей 3 возрастных групп. Обозначения: По вертикали - усредненные значения J_a в подмножестве отведений дорзолатеральной префронтальной коры. По горизонтали - экспериментальные условия ЭУ: неспецифическое внимание (ЭУ1); ожидание целевого не опознаваемого стимула (ЭУ2); ожидание эффективно опознаваемого стимула (ЭУ3). Сплошная линия — дети 10-11 лет (1); тонкая линия – дети 11-12 лет (2); пунктир – дети 12-13 (3).

групп носит разный характер. Если у детей 10-11 и 11-12 лет происходит почти линейное возрастание J_a от ЭУ1 до ЭУ3, то у детей 12-13 лет отмечается снижение значений J_a в ситуации ожидания целевого не опознаваемого стимула (ЭУ2).

Анализ степени и характера вовлечения различных зон коры в процесс опознавания фрагментарных изображений. С помощью метода главных компонентов были выделены временные интервалы, включающие статистически значимые амплитудные показатели ССП, регистрируемые в разных корковых зонах.

Амплитуда ССП в выделенных временных интервалах анализировалась с использованием $gmANOVA$. Оценивалось влияние следующих факторов: ОПОЗНАНИЕ (опознанные, неопознанные); ПОЛУШАРИЕ (левое, правое); ЛОКАЛИЗАЦИЯ (9 пар отведений).

Анализ, проведенный отдельно для ССП, регистрируемых в разных корковых зонах выявил (табл. 1) значимое влияние фактора ОПОЗНАНИЕ для дорзолатеральной префронтальной коры во временном интервале 390-470 мс, для вентролатеральной префронтальной коры взаимодействие факторов ОПОЗНАНИЕ и ПОЛУШАРИЕ значимо для компонента N200 (160-220 мс), а изолированное влияние фактора ОПОЗНАНИЕ значимо во временном интервале от 305 до 570 мс. Для каудальных зон влияние фактора ОПОЗНАНИЕ выражено меньше и обнаружено в теменных областях в интервалах 390-470 и 660-750 мс. В затылочных корковых зонах влияние фактора ОПОЗНАНИЕ выявлено только как тенденция и наблюдается во временном интервале 220-304 мс, соответствующем компоненту N250, наиболее тесно связанному с процессом опознавания.

Для уточнения характера изменений ССП, связанных с опознанием методом парного сравнения, сопоставлялись амплитудные значения компонентов

Таблица 1

Регионарные различия ССП, связанные с опознанием у детей 12-13 лет

Временные интервалы, мс	20-80 8	80-160 9	161-220 7	220-304 6	305-390 4	390-470 5	470-570 2	570-660 1	660-750 3
F3-F4						F(1,23) = 7.40; P=0.012			
F7-F8			F(1,23) = 6.78; P=0.016		F(1,23) = 6.84; P=0.015	F(1,23) = 7.75; P=0.011	F(1,23) = 4.87; P=0.037		
P3-P4						F(1,23) = 8.19; P=0.009			F(1,23) = 6.46; P=0.018
T5-T6									
I-O2				F(1,23) = 4.17; P=0.055					

ССП на опознанные и неопознанные стимулы. Как видно, на рис. 3 в вендролатеральной префронтальной коре на опознанные изображения отмечается увеличение негативности с пиковой латентностью соответствующего компонента N150 мс (160-220мс: F7 – Z=-1,98; P=0,047; F8 – Z=-2,28; P=0,022). Компоненты N350 и N450 как в дорзо-, так и вендролатеральных областях префронтальной коры увеличиваются при опознании.

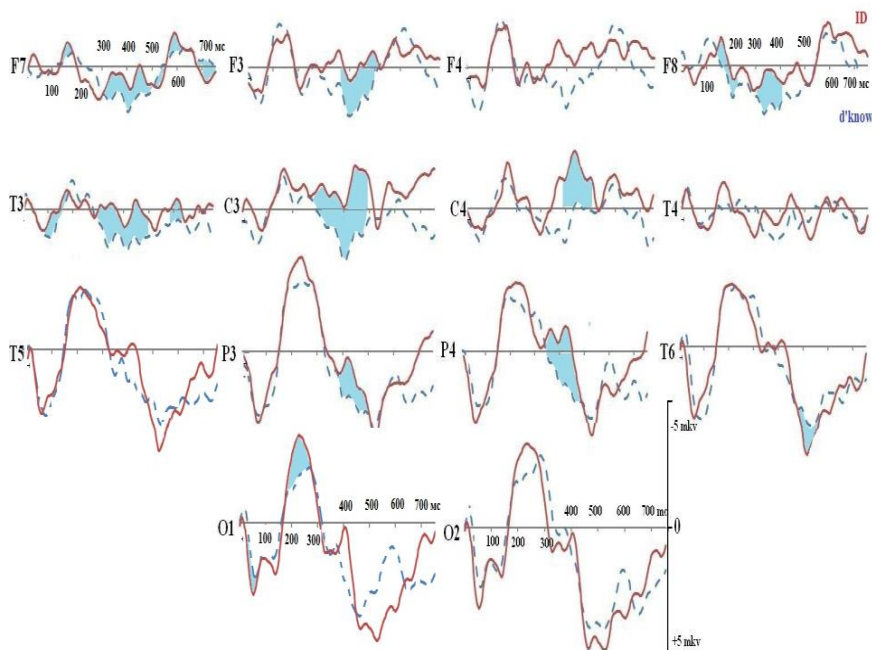


Рис. 3. ССП различных областей коры на опознанные и неопознанные фрагментарные изображения у детей 12-13 лет. Значимые различия компонентов ССП заштрихованы.

В ССП на неопознанные фрагментарные изображения в это время развивается высокоамплитудный позитивный компонент с пиковой латентностью 400 мс (305-390мс: F7 – Z=-2,114; P=0,034; F8 – Z=-1,94; P=0,052; 390-470мс: F3 – Z=-2,457; P=0,014; F7 – Z=-2,371; P=0,017). Эти же различия отмечаются и в центральный и передневисочных зонах коры (305-390мс: C3 – Z=-1,977; P=0,048; T3 – Z=-2,74; P=0,006; 390-470мс: C3 – Z=-3,257; P=0,001; C4 – Z=-3,00; P=0,003; T3 – Z=-2,67; P=0,007). На поздних стадиях опознания в передних областях коры значимые различия между опознанными и неопознанными фрагментарными изображениями отмечены в интервале 470-570мс (F7 – Z=-3,14; P=0,001; T3 – Z=-2,17; P=0,03) и 670-750мс (F7 – Z=-2,06; P=0,039; C3 – Z=-2,37; P=0,017) и связаны с увеличением негативности при опознании. Наиболее ранние статистически значимые различия на опознанные и неопознанные фрагментарные изображения отмечены в интервале 80-160 мс в передневисочной области левого полушария и связаны с увеличением ранней негативности N150 мс в ответ на опознанные изображения (T3 – Z=-1,93; P=0,053).

В каудальных областях, где значимое влияние фактора опознание было выявлено только для теменной коры, метод парного сравнения амплитудных значений ССП выявил наличие значимых различий амплитуды компонентов ССП и в задневисочной, и в затылочной областях. Различия выражены для компонентов основного комплекса P100 (20-80 мс: O1 – Z=-1,877; P=0,057) и N 250 (160-220 мс: O1 – Z=-1,88; P=0,052), для компонента N 400 (390-450 мс: P3 – Z=-2,08; P=0,037; P4 – Z=-2,74; P=0,006) и следующей за ним поздней позитивности (470-570мс: T6 – Z=-1,88; P=0,052), имеющих большую амплитуды в ответ на опознанные фрагментарные изображения.

С целью выявления специфики мозговой организации опознания в 12-13 лет был проведен совместный анализ амплитудных значений регионарные ССП у детей 11-12 и 12-13 лет и включением в дисперсионный анализ наряду с факторами ОПОЗНАНИЕ и ЛОКАЛИЗАЦИЯ фактора ВОЗРАСТ. Выявлено изолированное влияние фактора ВОЗРАСТ как для ранних и среднелатентных компонентов (20-80 мс $F(1,43) = 5.36$; $P=0.025$; 160-220 мс $F(1,43) = 6.46$; $P=0.015$), так и для поздних колебаний ССП (470-570 мс: $F(1,43) = 4.95$; $P=0.031$; 570-660 мс: $F(1,43) = 6.54$; $P=0.014$ и 660-750мс: $F(1,42) = 5.62$; $P=0.022$) периодов обработки информации. Совместное влияние факторов ВОЗРАСТ и ОПОЗНАНИЕ значимо в интервале 570-660мс ($F(1,43) = 4.54$; $P=0.039$). Влияние фактора ВОЗРАСТ и его взаимодействие с факторами ОПОЗНАНИЕ и ЛОКАЛИЗАЦИЯ значимо в широком временном окне (20-80мс $F(6,258) = 2.32$; $P=0.033$; 80-160мс: $F(2,101) = 4.44$; $P=0.01$; 160-220мс: $F(2,107) = 2.88$; $P=0.049$; 220-305мс: $F(6,38) = 3.95$; $P=0.004$; 305-390мс: $F(6,38) = 2.93$; $P=0.019$; 390-470мс: $F(6,38) = 2.93$; $P=0.019$; 470-570мс: $F(3,136) = 6.03$; $P=0.001$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ поведенческих показателей опознания фрагментарных изображений у детей 12-13 лет выявил значимое возрастание порога опознания в сравнении с 11-12 годами. Увеличение порога опознания свидетельствует о снижении к 12-13 годам импульсивности детей, которые начинают принимать решения более обдуманно, не торопясь, основываясь на большем количестве информации об объекте. При этом значимые изменения числа ошибок не об-

наруживаются. Возможно, это объясняется индивидуальными различиями, выраженными в 12-13 лет. Среди обследованных детей 5 из 25 допускали значительное число ошибок.

Нейрофизиологические исследования позволяют считать, что столь выраженная индивидуальная вариативность точности опознания связана с изменением функциональной активности регуляторных систем в начале полового созревания и индивидуальным темпом его развития. Результаты настоящей работы свидетельствуют о существенно различных изменениях в системах дорзолатеральной и вентролатеральной префронтальной коры. Прогрессивные изменения дорзолатеральной префронтальной коры и ее связей с другими областями коры к 12-13 годам проявляются в увеличении степени ее участия в анализе и обработке сенсорной информации. Сопоставление связанных с событием потенциалов (ССП) на опознанные и неопознанные стимулы выявило активацию при опознании этой области коры как на начальных этапах обработки информации, так и при осуществлении более поздних когнитивных операций. Проявлением прогрессивного развития дорзолатеральной префронтальной коры является и значительное снижение к 12-13 годам в сравнении с 10-11 годами импульсивности принятия решения вследствие формирования механизмов тормозного контроля.

Положительные изменения дорзолатеральной префронтальной коры проявляются при анализе ее участия в межкортикальном взаимодействии в процессе преднастройки к деятельности. В системе связей дорзолатеральной префронтальной коры с другими структурами мозга в 12-13 лет наблюдаются дифференцированные изменения показателя межкортикального взаимодействия в левом и правом полушариях в разных ситуациях внимания.

Полушарная специализация формирующихся при произвольном внимании межкортикальных объединений в системе дорзолатеральной префронтальной коры была выявлена нами у взрослых [4] и отсутствовала в 10-11 и 11-12 лет [5]. В 12-13 лет отмечены существенные отличия организации произвольного внимания, предшествующего эффективному и неэффективному опознанию целевого стимула. В левом полушарии в системе связей дорзолатеральной префронтальной коры значения показателя межцентрального взаимодействия постепенно повышаясь от ситуации неспецифического внимания к произвольному неэффективному, достигали максимальной величины при произвольном внимании, предшествующем эффективному опознанию. Иная картина наблюдалась в правом полушарии. При переходе от неспецифического внимания к ожиданию целевого, но еще трудно опознаваемого стимула, в 12-13 лет значение показателей межкортикального взаимодействия ($J\alpha$) снижается, увеличиваясь в период, предшествующий эффективному опознанию. Этот факт коррелирует с наблюдаемым нами в этом возрасте увеличением порога опознания фрагментарных изображений и свидетельствует о совершенствовании механизмов принятия решения за счет тормозного контроля. Очевидно, что, когда уровень фрагментации изображения недостаточен для правильного его опознания, неадекватным является активизация системы зрительного опознания, что и отражается в снижении межкортикального взаимодействия в подмножестве отведений, включающих дорзолатеральную кору.

Несмотря на эти прогрессивные изменения, которые должны были бы привести к возрастающей точности опознания, число ошибочных ответов к 12-13 годам не только не уменьшается, но даже незначительно возрастает. Причиной этого являются изменения, происходящие с началом полового созревания в системе вендролатеральной префронтальной коры. Несмотря на то, что вендролатеральная префронтальная кора, как показал анализ ССП, активируется в процессе опознания зрительных стимулов, ее вклад в организацию функциональных межкортикальных взаимодействий в процессе преднастройки снижается, тенденция к этому снижению наблюдалась нами уже у детей 11-12 лет, а в 12-13 лет, как показали результаты данной работы, значимые изменения межкортикального взаимодействия в системе вендролатеральной префронтальной коры при внимании, направленном на опознание неполных изображений, не выявляются.

Неоднозначность морфофункциональных изменений мозговых структур на начальном этапе полового созревания отмечены всеми исследователями этого периода индивидуального развития. Особенно много внимания уделено различиям функционирования дорзолатеральных и вендролатеральных зон префронтальной коры и их связи с другими корковыми областями [8, 10, 20]. Эти различия рассматриваются как важнейший фактор наблюдаемой в подростковом возрасте разнонаправленной динамики когнитивных процессов [11, 12] и их соотношение с эмоционально-мотивационными процессами [8, 20]. При изучении поведенческих показателей выполнения когнитивных заданий и использовании нейровизуализационных методов исследования мозга установлена зависимость эффективности выполнения задания от его эмоциональной привлекательности или последующего вознаграждения [8, 19, 20]. ФМРТ исследования показали, что преимущество в выполнении эмоционально привлекательного задания связано с повышенной активностью глубинных вендростриарных и лимбических структур. При этом активность вендролатеральной коры выражена значительно меньше, ее повышение наблюдается только при эмоциональной привлекательности и положительном подкреплении деятельности. Полученные в данной работе результаты свидетельствуют о том, что изменения в мотивационной регуляторной системе проявляются уже в предподростковом возрасте. Отсутствие эмоциональной привлекательности и положительного подкрепления при опознании изображения привело к снижению мотивационного компонента внимания, что проявилось в 12-13 лет в снижении вклада вендролатеральной префронтальной коры в мозговую организацию произвольного внимания. Дефицитарность мотивационного компонента внимания, связанная с изменениями эмоционально-мотивационной сферы на начальном этапе полового созревания нивелирует прогрессивные изменения когнитивных процессов к 12-13 годам. Следствием этого является отсутствие положительного влияния совершенствующихся к этому возрасту дорзолатеральных механизмов произвольного внимания, на эффективность деятельности – точность опознания не только не улучшается, но даже несколько ухудшается. Очевидно, что отсутствие мотивационного компонента внимания к выполнению нейтрального, не представляющего сиюминутного интереса задания у школьников 12-13 лет может отрицательно сказываться на успешности их учебной деятельности и являться важным фактором дезадаптации к школе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ поведенческих показателей опознания у детей 12-13 лет показал, что в этом возрасте значимо увеличивается уровень опознаваемости неполного фрагментированного изображения и в сравнении с 11-12 годами наблюдается тенденция к увеличению числа ошибок опознания. Сравнительный анализ (rmAnova) показателей функционального взаимодействия различных областей коры в процессе подготовки к опознанию изображений разного уровня фрагментации, проведенный у детей трех возрастных групп: 10-11, 11-12, 12-13 лет выявил динамику мозговой организации произвольного внимания в предпубертальном возрасте и механизмы, определяющие его специфику в 12-13 лет. Установлено, что гетерохронные, неоднозначные морфофункциональные преобразования различных зон префронтальной коры, связанные с началом полового созревания приводят к существенным изменениям их вклада в мозговую организацию произвольного внимания и обеспечения эффективной деятельности.

Прогрессивное созревание дорзолатеральной префронтальной коры к 12-13 годам определяет возрастающую дифференцированность формирующихся в левом и правом полушарии функциональных объединений корковых зон, адекватных процессам, осуществляемым на разных этапах подготовки к деятельности. Прогрессивные изменения в дорзолатеральной системе, связанные с формированием механизмов избирательной активации и тормозного контроля на поведенческом уровне, проявляются в снижении импульсивности принятия решения, что должно способствовать возрастающей точности опознания в 12-13 лет. Проведенные исследования не выявили уменьшения числа ошибок с возрастом. Причиной являются изменения, происходящие в вентролатеральной префронтальной коре. Вследствие значительного повышения активности глубоких эмоциогенных структур снижается ее активность и соответственно вклад мотивационной регуляторной системы в организацию произвольного внимания. Установленное у 12-13-летних детей отсутствие мотивационного компонента внимания к положительно немотивируемой деятельности является существенным препятствием для эффективного выполнения задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачинская Р.И. Управляющие функции // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2015. – Т. 65, № 1. – С. 33-60.
2. Мозговые механизмы формирования познавательной деятельности в дошкольном и младшем школьном возрасте / под ред. Р.И. Мачинской, Д.А. Фарбер. – М.: НОУ ВПО «МПСУ»; Воронеж: МОДЭК, 2014.
3. Развитие мозга и формирование познавательной деятельности ребенка / под ред. Д.А. Фарбер, М.М. Безруких. – М.: МПСИ; Воронеж: МОДЭК, 2009.
4. Фарбер Д.А., Мачинская Р.И., Курганский А.В., Петренко Н.Е. Функциональная организация мозга в период подготовки к опознанию фрагментарных изображений. // Журнал высшей нервной деятельности им И.П. Павлова. – 2014. – Т. 64, № 2. – С. 190-200.
5. Фарбер Д.А., Курганский А.В., Петренко Н.Е. Мозговая организация преднастройки к зрительному опознанию у детей предпубертального возраста // Физиология человека. – 2015. – Т. 41, № 5. – С. 5-15.
6. Физиология подростка / под ред. Д.А. Фарбер. – М.: Педагогика, 1978. – 167 с.

7. Физиология развития ребенка: Руководство по возрастной физиологии / под ред. М. М. Безруких, Д. А. Фарбер. – М.: Издательство Московского психолого-социального института; Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2010. – 768 с.
8. Banagee S., Frey H.P., Molhalm S., Fax I. Interests shape how adolescents pay attention the interaction of motivation and top-down attention processes in beasing sensory activation to anticipated events // *European Journal of Neurosciena.* – 2014. – P. 1- 17.
9. Barnea-Goraly N, Menon V, Eckert M, Tamm L, Bammmer R, Karchemskiy A, Dant CC, Reiss AL. White matter development during childhood and adolescence: a cross-sectional diffusion tensorimaging study. *Cereb Cortex.* – 2005. – 15:1848-1854.
10. Blakemore S.J., Imaging Brain development; The adolescent Brain // *Neuroimage.* – 2012. – P. 397-406.
11. Dumontheil I., Burgess P., Blakemore S-J. Development of rostral prefrontal cortex and cognitive behavioral disorders // *Dev. Med. Ch. Neurol.* – 2008. – V. 50, № 3. – P. 168.
12. Huizinga M., Dolan C.V., Molen M.W. Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis // *Neuropsychologia.* – 2006. – Vol. 44. – P. 2017-2036.
13. Hwang K., Velanova R., Luna B. Strengthening of Top-Down Frontal Cognitive Control Networks Underlying the Development of Inhibitory Control: An fMRI Effective Connectivity Study // *J. Neurosci.* – 2010. – V. 30, № 46. – P. 15535.
14. *New Oxford American Dictionary / 2nd Edition, 2005.* – N.Y.: Oxford University Press, 2005.
15. Luna B., Padmanabhan A., O’Hearn K. What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? // *Brain Cogn.* – 2010. – V. 72, № 1. – P. 101.
16. Sebastian C.L., Tan G.C.Y., Roiser J.P., Viding E., Dumontheil I., Blakemore S.J. Developmental influences on the neural bases of responses to social rejection: implications of social neuroscience for education. *NeuroImage*, in press.
17. Sisk C., Zehr J. Pubertal Hormones organize the adolescent brain and behavior // *Front Neuroendocrinol.* – 2005. – V. 26, № 3-4. – P. 163.
18. Snodgrass J.G., Corwin J. Perceptual identification thresholds for 150 fragmented pictures from the Snodgrass and Vanderwart picture set // *Percept. Motor Skills.* – 1988. – V. 67. – P. 3.
19. Somerville L., Hare T., Casey B. Fronto-striatal maturation predicts cognitive control failure to appetitive cues in adolescents // *J. Cogn. Neurosci.*, 2011. – Vol. 23. – N9. – P. 2123-2134.
20. Somerville L., Jones R., Casey B. A time of change: a behavioral and neural correlates of adolescents’ sensitivity to appetitive and aversive environmental cues // *Brain Cogn.*, 2010. – Vol. 72, № 1. – P. 124-133.
21. Sowell E.R. et al. Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children // *J. Neurosci.* – 2004. – Vol. 24, № 38. – P. 8223-8231.
22. Sowell E.R., Thompson P.M., Holmes C.J., Jernigan T.L., Toga A.W. In vivo evidence for post-adolescent brain maturation in frontal and striatal regions // *Nat Neurosci.* – 1999. – 2:859-861.