

УДК 612.821

ФРОНТАЛЬНЫЕ БИЛАТЕРАЛЬНО-СИНХРОННЫЕ θ -ВОЛНЫ И КОГЕРЕНТНОСТЬ ФОНОВОЙ ЭЭГ У ДЕТЕЙ 7–8 И 9–10 ЛЕТ С ТРУДНОСТЯМИ ОБУЧЕНИЯ

© 2013 г. Р. И. Мачинская, А. В. Курганский

ФГНУ Институт возрастной физиологии РАО, Москва

Поступила в редакцию 16.08.2012 г.

Функциональное взаимодействие корковых зон в состоянии спокойного бодрствования исследовали у детей 7–8 ($N = 29$) и 9–10 ($N = 23$) лет с трудностями обучения, на ЭЭГ которых были зарегистрированы фронтальные билатерально-синхронные θ -волны (ФТВ), и у детей 7–8 ($N = 32$) и 9–10 ($N = 16$) лет контрольной группы без отклонений ЭЭГ и трудностей обучения. Функциональные взаимодействия корковых зон оценивались по когерентности ритмических составляющих θ -, α_1 , α_2 и β_1 -частотных диапазонов фоновой ЭЭГ, свободной от девиантных паттернов. У детей с ФТВ по сравнению с детьми контрольной группы выявлено снижение степени функционального взаимодействия лобных и передневисочных зон коры, преимущественно в левом полушарии. Относительная слабость функционального взаимодействия лобных отделов коры с другими корковыми зонами была больше выражена у детей 7–8 лет, чем у детей 9–10 лет. При этом межгрупповые различия в величине когерентности не зависели от пола детей и частотного диапазона ЭЭГ.

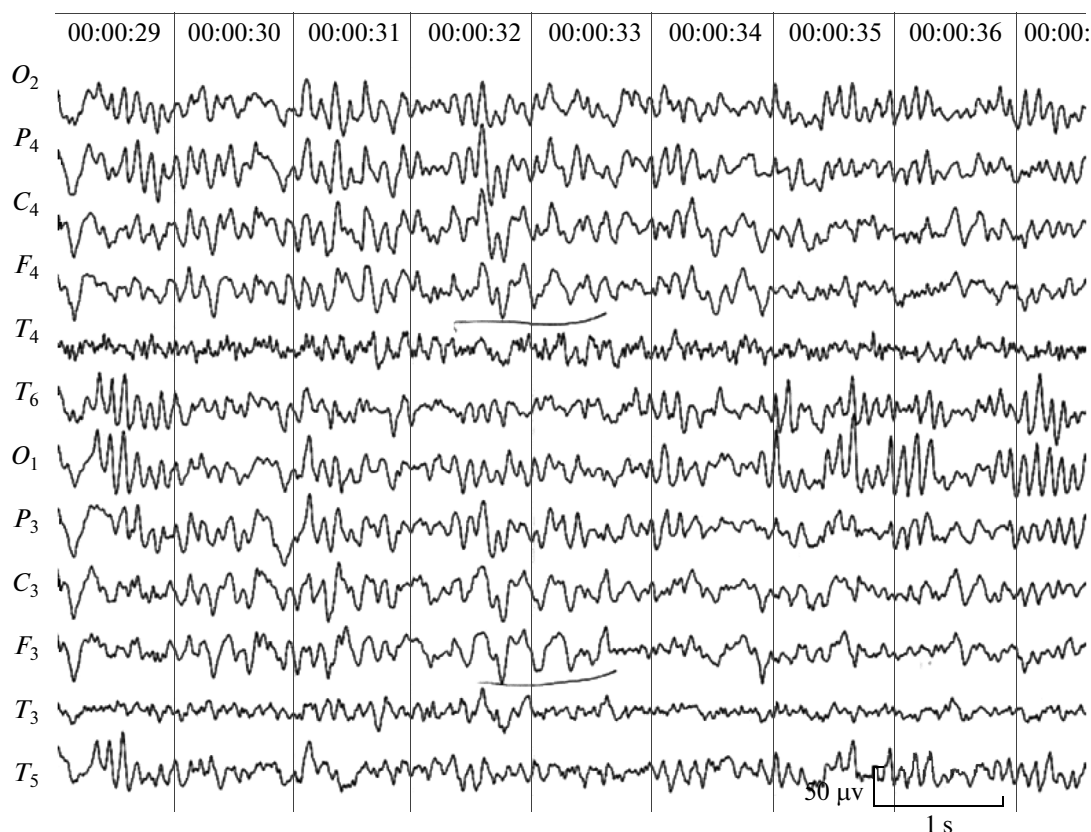
Ключевые слова: фронтальные θ -волны, когерентность фоновой ЭЭГ, дети с трудностями обучения.

DOI: 10.7868/S0131164613010104

Билатерально-синхронные вспышки фронтальных θ -волн (ФТВ) (рисунок) являются характерной особенностью ЭЭГ-детей с трудностями обучения при отсутствии у них выраженной неврологической или психической патологии. Эти ЭЭГ-паттерны, выявленные при визуальном анализе, присутствовали на ЭЭГ детей 6–7 и 7–8 лет с низкими показателями академической успеваемости в большинстве случаев (от 60 до 80% в разных выборках) при отсутствии их в контрольных группах [1–3]. Результаты визуальной оценки ЭЭГ согласуются с данными спектрального анализа: в работах [4, 5] отмечается увеличение спектральной мощности θ -колебаний в лобно-центральных отделах коры у детей с трудностями обучения. Комплексные электроэнцефалографические и нейропсихологические исследования [3, 6] показали, что основной причиной трудностей усвоения школьной программы у детей 6–7 и 7–8 лет с ФТВ является недостаточная сформированность функций регуляции, программирования и контроля деятельности. В поисках нейрофизиологической причины обнаруженных нами когнитивных дефицитов мы обратились к клинико-энцефалографическим данным о происхождении фронтальных билатерально-синхронных медленных волн. Оказалось, что эти ЭЭГ-паттерны характерны для повреждений таламуса, преимущественно его медиальных отделов [7, 8]. В свою очередь, поврежде-

ния медиальных структур таламуса сопровождаются нарушениями регуляции поведения и когнитивных процессов, сходными с проявлениями лобного синдрома [9–11]. Причина лобных дефицитов при повреждении медиодорзального ядра таламуса (МД) кроется в тесном взаимодействии этой структуры с лобной префронтальной корой (ПФК), с которой МД связано мощными двусторонними связями и составляет единую морфофункциональную фронто-таламическую систему [12–14]. Непосредственные свидетельства связи ФТВ и активности таламических нейронов были получены в острых экспериментах на животных (мышях) при моделировании лобного синдрома аппликацией кобальта на лобную кору [15]. В этой работе было обнаружено, что медленные синхронные θ -колебания на ЭЭГ лобной коры сопровождаются появлением соответствующих ритмических осцилляций активности нейронов МД таламуса, причем θ -осцилляции в коре и таламусе когерентны. Сопоставление перечисленных выше данных и результатов собственных электроэнцефалографических и нейропсихологических исследований послужило основанием для того, чтобы рассматривать ФТВ как признак неоптимального состояния (незрелости или дисфункции) фронто-таламической системы мозга.

В нашей предыдущей публикации [16] с помощью векторной авторегрессионной модели [17]



ЭЭГ спокойного бодрствования ребенка 7 лет. Подчеркнуты билатерально-синхронные фронтальные θ -волны (ФТВ).

сравнивались направленные внутрикорковые взаимодействия¹ во время регистрации ФТВ и в периоды, свободные от этих паттернов. Анализ взаимного влияния ЭЭГ-сигналов показал, что наиболее вероятной причиной появления синхронных медленных волн во фронтальных отделах коры является наличие общей нейронной активности в θ -диапазоне частот, синхронизируемой за счет связи с глубинными структурами мозга. Было также показано, что функциональное взаимодействие корковых зон в период регистрации ФТВ характеризуется диффузным увеличением степени вовлечения фронтальных и центральных областей во взаимодействия как друг с другом, так и с остальными корковыми отделами.

Полученные результаты хорошо согласуются с представлением о фронто-таламическом происхождении медленных синхронных колебаний в лобных отделах коры в состоянии спокойного бодрствования. Обнаруженное в исследовании [16] периодическое снижение степени “автоном-

¹ Здесь и далее термины “внутрикорковое взаимодействие”, “функциональное взаимодействие” или “функциональная связь” используются для описания линейной статистической связи между пространственно удаленными нейрофизиологическими событиями [18], в данном случае частотными составляющими ЭЭГ-сигналов, зарегистрированных от пространственно удаленных корковых зон.

ности” фронтальных корковых зон в результате неоптимального функционирования фронто-таламической системы может быть одной из причин когнитивных дефицитов у детей с ФТВ. Значение состояния покоя как исходного фона для когнитивной деятельности было показано в работах Д.А. Фарбер и соавт. [19, 20] на основании сопоставления возрастных изменений фоновой ЭЭГ и познавательных процессов у детей. Можно предположить, что длящиеся от одной до нескольких секунд сбои в функционировании лобных отделов мозга во время ФТВ могут приводить к трудностям перехода из состояния покоя к деятельности. Однако вопрос, в какой мере подобные сбои влияют на работу мозга в процессе когнитивной деятельности, в рамках анализа фоновой ЭЭГ остается открытым.

Вместе с тем, количественный анализ фоновой ЭЭГ допускает возможность исследования другого вопроса, который также необходимо рассмотреть в связи с поиском причин когнитивных дефицитов у детей с ФТВ. Речь идет о возможном негативном влиянии неоптимального состояния фронто-таламической системы на морфофункциональное созревание внутрикорковых связей в процессе индивидуального развития.

Таблица 1. Распределение детей обследованной выборки по наличию фронтальных θ -волн (ФТВ) на ЭЭГ, возрасту и полу

| ЭЭГ | 7–8 лет | | | 9–10 лет | | |
|------------------|----------|---------|---|----------|---------|---|
| | мальчики | девочки | всего | мальчики | девочки | всего |
| Возрастная норма | 18 | 14 | $N = 32$ $mean\ age = 7.68 \pm 0.42$ | 10 | 6 | $N = 16$ $mean\ age = 9.60 \pm 0.57$ |
| ФТВ | 23 | 6 | $N = 29$ $mean\ age = 7.82 \pm 0.56$ | 20 | 3 | $N = 23$ $mean\ age = 9.80 \pm 0.56$ |
| Всего | 41 | 20 | $N = 61$ | 30 | 9 | $N = 39$ |

Фронтально-таламическая система играет важную роль в избирательной модуляции активности корковых зон при внимании [21, 22], подготовке к анализу значимой информации [2] и удержании информации в рабочей памяти [23]. Недостаточность избирательных модулирующих влияний на кору головного мозга со стороны фронтально-таламической системы может сказываться не только на функционировании мозга в момент реализации деятельности, но и на формировании нейронных сетей в коре в процессе онтогенеза. Последнее предположение представляется оправданным, поскольку как локальные нейронные сети в коре [24], так и проводящие пути мозга длительно созревают в онтогенезе человека [25]. Кроме того, существуют данные о зависимости морфофункционального созревания мозга от индивидуального опыта индивида (*experience-dependent brain maturation*), в особенности, от тех видов деятельности, которые требуют участия механизмов избирательного направленного внимания [26, 27].

Показано, что созревание нейронных сетей мозга в онтогенезе отражается в параметрах фоновой ЭЭГ [19, 28]. В том случае, если неоптимальное состояние фронтально-таламической системы действительно влияет на формирование корковых нейронных связей, мы можем ожидать, что это влияние отразится на характере корково-коркового взаимодействия, оцениваемого по степени согласованности ритмической электрической активности (ЭА) мозга в состоянии спокойного бодрствования в периоды, свободные от ФТВ. Ранее на другой выборке детей было проведено исследование фоновой когерентности α -ритма у детей младшего школьного возраста с ЭЭГ-признаками незрелости регуляторных систем мозга, в том числе, с ФТВ, которые рассматривались как показатель функциональной незрелости фронтально-таламической системы. Результаты этого исследования, свидетельствующие об особенностях функционального взаимодействия корковых зон по α -ритму у детей с ФТВ, приведены в работе [29]. В настоящем исследовании, продолжающем анализ функциональной организации коры головного мозга у детей с ФТВ, представленный в нашей предыдущей публикации [16], ставилась задача оценки па-

раметров когерентности ритмов ЭЭГ в четырех частотных диапазонах – θ , α_1 , α_2 и β_1 . Было проведено сопоставление записей ЭА мозга у детей 7–8 и 9–10 лет с трудностями обучения, на ЭЭГ которых присутствовали фронтальные θ -волны, и у детей того же возраста без трудностей обучения и отклонений на ЭЭГ.

МЕТОДИКА

Анализировались записи ЭЭГ 100 детей 7–8 и 9–10 лет, учащихся младших классов общеобразовательной школы, не имевших в анамнезе выраженной неврологической и психической патологии. Все дети участвовали в исследовании добровольно при информированном согласии их родителей. В табл. 1 представлено распределение детей исследованной выборки по возрасту, полу и наличию ФТВ на ЭЭГ. Видно, что приблизительно половина записей ЭЭГ принадлежала детям с низкими показателями академической успеваемости (2–3 балла по основным предметам) и содержала фронтальные билатерально-синхронные θ -волны, остальные записи принадлежали детям того же возраста без трудностей обучения, нарушений поведения и отклонений ЭА мозга.

ЭЭГ записывалась в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами от 12 симметричных монополярных отведений F_3/F_4 , C_3/C_4 , T_3/T_4 , P_3/P_4 , T_5/T_6 , O_1/O_2 , расположенных по международной схеме 10–20. В качестве референта использовалось среднее арифметическое потенциалов от левого и правого мастоидов.

Поскольку задача настоящего исследования состояла в анализе функционального взаимодействия корковых зон в периоды, свободные от ФТВ и других отклонений ЭА, осуществлялся предварительный просмотр записей ЭЭГ, в ходе которого экспертным методом определялись и удалялись участки, содержащие девиантные паттерны или артефакты. В результате, ЭЭГ, свободная от ФТВ и других девиантных паттернов, не являлась непрерывной записью, а представляла собой последовательность отрезков разной продолжительности, разделенных удаленными участками сигнала. В каждой индивидуальной записи ЭЭГ каждый та-

кой отрезок разбивался на неперекрывающиеся короткие сегменты длительностью 500 мс. Суммарная продолжительность “чистой” записи ЭЭГ существенно варьировала от ребенка к ребенку. Для того, чтобы избежать влияния этого обстоятельства на анализируемые параметры когерентности ЭЭГ, при расчетах индивидуальных параметров когерентности использовалась последовательность, составленная из первых сорока 500-миллисекундных сегментов записи (это соответствует суммарной длительности 20 секунд). Выбор количества суммируемых отрезков был обусловлен размером самой короткой “чистой” записи в исследуемой выборке.

Функциональные корково-корковые взаимодействия оценивались с помощью 12-канальной векторной авторегрессионной модели (далее VAR-модели). VAR-модель является простейшей линейной моделью, позволяющей оценивать статистические связи в многоканальных (векторных) временных рядах, и успешно используется в электрофизиологии (см. обзоры в работах [17, 30]). Поскольку выбранные для анализа 40 сегментов не составляли непрерывной записи, для вычисления коэффициентов VAR-модели использовался метод, предложенный в работе [31]. В качестве оптимального порядка VAR-модели был выбран 20-й порядок. Такой выбор гарантировал отсутствие серийных корреляций остатков авторегрессии и, одновременно, обеспечивал достаточно высокое частотное разрешение около 1 Гц [30]. На основании полученных коэффициентов VAR-модели для каждой пары отведений с номерами k и m вычислялся кросс-спектр $S_{km}(f)$ и спектры мощности $S_{kk}(f)$ и $S_{mm}(f)$, которые использовались для вычисления функции когерентности по формуле:

$$C_{km}(f) = |S_{km}(f)| / \sqrt{S_{kk}(f)S_{mm}(f)}.$$

Для анализа функций когерентности были выбраны четыре частотных диапазона, границы которых определялись индивидуально для каждого испытуемого с помощью следующей процедуры. В качестве априорных стандартных границ частотных диапазонов были выбраны: 4–7 Гц для θ , 7–9 Гц для α_1 , 9–12 для α_2 и 12–15 Гц для β_1 . Для каждого испытуемого строилась общая для всех пар отведений гистограмма частотных положений (взятых с шагом 0.5 Гц в диапазоне от 3 до 16 Гц) локальных максимумов функции когерентности. Эта гистограмма сглаживалась путем свертки ее с 11-точечным окном Бохмана. Далее, последовательно анализировались все четыре априорных частотных диапазона на предмет наличия в них локальных максимумов сглаженной гистограммы. Если в пределах очередного диапазона присутствовал один максимум, то в качестве индивидуального диапазона принимался интервал шириной в 2 Гц, центр которого соответствовал частот-

ному положению этого максимума. Если были найдены два и более максимума, то выбирался наибольший из них, и диапазон определяли как и в предыдущем случае. Если такие максимумы вообще отсутствовали, то в качестве индивидуального диапазона выбирался весь соответствующий априорный частотный диапазон. В качестве индивидуальных оценок функции когерентности, использованных в последующем групповом статистическом анализе, вычислялись средние значения когерентности по каждому индивидуальному частотному диапазону.

Статистическое тестирование осуществлялось с помощью многомерного дисперсионного анализа (*MANOVA*), а парные сравнения – с помощью *ANOVA*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью многовариационного дисперсионного анализа (*MANOVA*) исследовалось влияние возраста (фактор ВОЗРАСТ, 2 уровня: 7–8 лет и 9–10 лет) и наличия фронтальных θ -волн (фактор ФТВ, 2 уровня) на величину когерентности ЭЭГ в 4 частотных диапазонах (фактор ДИАПАЗОН, 4 уровня: θ , α_1 , α_2 и β) для межполушарных и всех внутрислошарных пар отведений. Для выявления особенностей связей в правом и левом полушарии в схему *MANOVA* был включен фактор ПОЛУШАРИЕ (2 уровня), для оценки их регионарных различий – фактор ЛОКАЛИЗАЦИЯ. В связи с тем, что в сравниваемых группах детей было разное соотношение девочек и мальчиков (см. табл. 1), этот фактор пола также учитывался при дисперсионном анализе. Для минимизации количества парных сравнений при статистическом анализе влияния фактора ЛОКАЛИЗАЦИЯ процедура *MANOVA* применялась отдельно к нескольким подмножествам пар отведений вида $F-X$, $C-X$, $P-X$, $Ta-X$, $Tr-O$, где X соответствует каждому из оставшихся отведений того же полушария. При этом одинаковые пары отведений в разных подмножествах не повторялись.

Анализ влияния межиндивидуальных факторов показал, что ни в одном подмножестве отведений ни возраст, ни пол, ни наличие ФТВ на ЭЭГ не оказывали значимого основного эффекта на величину когерентности ЭЭГ-сигналов. В тех случаях, когда влияние межиндивидуальных факторов было обнаружено, оно было опосредовано взаимодействием с другими факторами.

В связи с тем, что основная задача настоящего исследования состояла в оценке особенностей корково-корковых функциональных связей у детей с фронтальными θ -волнами на ЭЭГ, мы анализировали только влияния фактора ФТВ или его взаимодействия с другими независимыми переменными, перечисленными выше. В табл. 2. пред-

Таблица 2. Значимые влияния присутствия фронтальных θ -волн (ФТВ) в фоновой ЭЭГ на величину когерентности ЭЭГ сигналов в состоянии спокойного бодрствования. Результаты *MANOVA*

| Факторы | Пары отведений | | | | | Межполушарные |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
| | <i>F-O, F-P, F-C, F-Ta, F-Tr</i> | <i>C-O, C-P, C-Ta, C-Tr</i> | <i>P-O, P-Ta, P-Tr</i> | <i>Ta-O, Ta-Tr</i> | <i>Tr-O</i> | |
| ФТВ × ВОЗРАСТ | $F(1, 92) = 3.70, p = 0.057$ | | | | | $F(1, 92) = 3.81, p = 0.045$ |
| ФТВ × ПОЛУШАРИЕ | $F(1, 92) = 6.61, p = 0.012$ | | | | | |
| ФТВ × ЛОКАЛИЗАЦИЯ | $F(4, 89) = 3.16, p = 0.018$ | $F(3, 90) = 3.30, p = 0.024$ | | | | $F(5, 88) = 2.62, p = 0.03$ |
| ФТВ × ЛОКАЛИЗАЦИЯ × ВОЗРАСТ | $F(4, 89) = 2.86, p = 0.028$ | | | | | $F(5, 88) = 2.44, p = 0.041$ |
| ФТВ × ПОЛУШАРИЕ × ЛОКАЛИЗАЦИЯ | | $F(3, 90) = 5.98, p = 0.001$ | $F(2, 91) = 5.97, p = 0.004$ | $F(1, 92) = 7.73, p = 0.007$ | | |

ставлены значимые различия когерентности для всех подмножеств отведений. Табл. 3 содержит данные дескриптивной статистики величины когерентности ЭЭГ-сигналов для отдельных пар отведений.

Прежде всего, следует отметить, что в данной выборке детей основной эффект ФТВ выявлен не был. Влияние фактора ФТВ было опосредовано другими условиями, чаще всего связанными с локализацией отведений ЭЭГ (факторами ПОЛУШАРИЕ и/или ЛОКАЛИЗАЦИЯ). Ни для одного подмножества отведений не было обнаружено связи влияния ФТВ с полом испытуемых и частотным диапазоном ЭЭГ. В связи с этим *post-hoc* анализ ЭЭГ-данных проводился без учета пола испытуемых и отдельных частотных диапазонов ЭЭГ. Таким образом, ниже представлены результаты сопоставления величины когерентности, усредненной по 4 частотным диапазонам.

Влияние фактора ФТВ на взаимодействие фронтальных зон с другими корковыми зонами в исследованной выборке зависело от возраста детей. Эта зависимость отразилась во взаимодействии ФТВ × ВОЗРАСТ на уровне тенденции и в значимом взаимодействии ФТВ × ЛОКАЛИЗАЦИЯ × ВОЗРАСТ. *Post-hoc* анализ взаимодействия ФТВ × ВОЗРАСТ показал, что средняя (для 4 частотных диапазонов) величина когерентности ЭЭГ-сигналов в парах отведений вида *F-X* в 7–8 лет выше у детей контрольной группы ($C = 0.456 \pm 0.021$), чем у детей с фронтальными θ -волнами ($C = 0.424 \pm 0.022$). Эти различия в младшей возрастной группе оказались значимыми ($F(1, 59) = 4.546, p = 0.037$). У детей 9–10 лет значимых различий по данному фактору выявлено не было ($F(1, 37) = 1.043, p = 0.314$), при этом значения когерентности были в контрольной группе ниже, чем в группе с ФТВ ($C = 0.428 \pm 0.029$ и $C =$

$= 0.447 \pm 0.24$ соответственно). Что касается другого “участника” этого взаимодействия – возраста, то ни в контрольной группе, ни в группе с ФТВ возрастные различия не достигали значимого уровня. В контрольной группе от 7–8 к 9–10 годам величина когерентности уменьшалась ($C = 0.456 \pm 0.02$ в 7–8 лет, $C = 0.428 \pm 0.028$ в 9–10 лет, $F(1, 46) = 2.778, p = 0.103$), в группе с ФТВ – увеличивалась ($C = 0.425 \pm 0.023$ в 7–8 лет, $C = 0.447 \pm 0.026$ в 9–10 лет, $F(1, 50) = 1.834, p = 0.182$).

Значимое взаимодействие ФТВ × ЛОКАЛИЗАЦИЯ × ВОЗРАСТ указывает на то, что влияние ФТВ на величину когерентности в парах отведений, объединяющих лобные области коры с другими корковыми зонами, зависело не только от возраста, но и от локализации второго электрода в паре. В связи с этим в каждой из 5 пар отведений, входящих в это подмножество (без учета фактора ПОЛУШАРИЕ) было проведено сопоставление по фактору ФТВ отдельно в группах детей 7–8 и 9–10 лет. В качестве значимых, с учетом поправки для множественных сравнений (5 пар отведений), рассматривались различия с уровнем $p < 0.01$. У детей 7–8 лет были выявлены различия на уровне тенденции для пары отведений *F-P* ($F(1, 59) = 5.20, p = 0.02$) и значимые различия для пары отведений *F-Ta* ($F(1, 59) = 8.62, p = 0.005$). При этом в обоих случаях степень функционального взаимодействия корковых зон у детей с ФТВ была ниже, чем в контрольной группе. У детей 9–10 лет в этой паре отведений когерентность была также ниже у детей с ФТВ, однако значимые различия были выявлены только в левом полушарии ($F(1, 37) = 5.85, p = 0.004$). В других парах отведений с участием лобных областей ни у детей 7–8 лет, ни у детей 9–10 лет не было обнаружено влияния фактора ФТВ. В завершение анализа функциональных связей лобных областей необходимо отметить, что в целом (без учета возраста и локализации отведений) вли-

Таблица 3. Средние значения и стандартные отклонения величины когерентности ЭЭГ-сигналов* в отдельных парах отведений левого (ЛП) и правого (ПП) полушарий фронтальными θ -волнами

| Возраст | Пары | Контрольная группа | | | Дети с ФТВ | | |
|-------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| | | ПП | ЛП | среднее | ПП | ЛП | среднее |
| 7–8 лет | <i>F–C</i> | 0.741(0.082) | 0.766(0.064) | 0.753(0.065) | 0.711(0.082) | 0.735(0.081) | 0.723(0.076) |
| | <i>F–P</i> | 0.433(0.104) | 0.474(0.074) | 0.454(0.084) | 0.392(0.094) | 0.413(0.104) | 0.402(0.093) |
| | <i>F–Ta</i> | 0.602(0.082) | 0.612(0.077) | 0.607(0.072) | 0.557(0.085) | 0.545(0.099) | 0.551(0.077) |
| | <i>F–Tp</i> | 0.240(0.086) | 0.283(0.075) | 0.262(0.067) | 0.238(0.071) | 0.257(0.070) | 0.247(0.057) |
| | <i>F–O</i> | 0.205(0.069) | 0.205(0.070) | 0.205(0.065) | 0.196(0.061) | 0.197(0.058) | 0.196(0.054) |
| | <i>C–P</i> | 0.739(0.071) | 0.769(0.054) | 0.754(0.054) | 0.714(0.064) | 0.714(0.074) | 0.714(0.061) |
| | <i>C–Ta</i> | 0.710(0.093) | 0.720(0.086) | 0.715(0.082) | 0.655(0.076) | 0.666(0.108) | 0.661(0.078) |
| | <i>C–Tp</i> | 0.449(0.097) | 0.510(0.074) | 0.479(0.071) | 0.425(0.109) | 0.456(0.100) | 0.440(0.086) |
| | <i>C–O</i> | 0.320(0.085) | 0.312(0.084) | 0.316(0.078) | 0.319(0.085) | 0.305(0.089) | 0.312(0.076) |
| | <i>P–Ta</i> | 0.531(0.105) | 0.570(0.089) | 0.550(0.087) | 0.503(0.089) | 0.540(0.113) | 0.522(0.086) |
| | <i>P–Tp</i> | 0.711(0.066) | 0.754(0.050) | 0.733(0.047) | 0.704(0.095) | 0.736(0.063) | 0.720(0.067) |
| | <i>P–O</i> | 0.695(0.050) | 0.648(0.070) | 0.671(0.047) | 0.706(0.066) | 0.681(0.079) | 0.693(0.066) |
| | <i>Ta–Tp</i> | 0.503(0.103) | 0.557(0.092) | 0.530(0.084) | 0.490(0.090) | 0.541(0.122) | 0.516(0.082) |
| | <i>Ta–O</i> | 0.236(0.078) | 0.249(0.070) | 0.242(0.065) | 0.246(0.075) | 0.255(0.088) | 0.250(0.060) |
| 9–10 лет | <i>Tp–O</i> | 0.645(0.082) | 0.696(0.070) | 0.671(0.057) | 0.668(0.076) | 0.661(0.085) | 0.664(0.069) |
| | <i>F–C</i> | 0.705(0.082) | 0.766(0.080) | 0.736(0.068) | 0.725(0.081) | 0.751(0.077) | 0.738(0.073) |
| | <i>F–P</i> | 0.341(0.098) | 0.420(0.108) | 0.381(0.099) | 0.412(0.104) | 0.451(0.100) | 0.432(0.096) |
| | <i>F–Ta</i> | 0.579(0.102) | 0.643(0.064) | 0.611(0.078) | 0.577(0.131) | 0.571(0.135) | 0.574(0.119) |
| | <i>F–Tp</i> | 0.199(0.050) | 0.254(0.090) | 0.226(0.059) | 0.267(0.085) | 0.270(0.082) | 0.268(0.074) |
| | <i>F–O</i> | 0.184(0.066) | 0.186(0.079) | 0.185(0.063) | 0.217(0.090) | 0.230(0.089) | 0.223(0.087) |
| | <i>C–P</i> | 0.700(0.072) | 0.721(0.111) | 0.710(0.082) | 0.716(0.110) | 0.739(0.079) | 0.727(0.084) |
| | <i>C–Ta</i> | 0.707(0.089) | 0.744(0.057) | 0.726(0.061) | 0.664(0.088) | 0.691(0.108) | 0.678(0.081) |
| | <i>C–Tp</i> | 0.365(0.080) | 0.457(0.105) | 0.411(0.073) | 0.449(0.135) | 0.448(0.120) | 0.449(0.118) |
| | <i>C–O</i> | 0.295(0.084) | 0.258(0.094) | 0.277(0.070) | 0.302(0.107) | 0.313(0.088) | 0.307(0.090) |
| | <i>P–Ta</i> | 0.496(0.080) | 0.547(0.110) | 0.521(0.088) | 0.518(0.096) | 0.566(0.097) | 0.542(0.083) |
| | <i>P–Tp</i> | 0.672(0.076) | 0.719(0.106) | 0.696(0.084) | 0.738(0.084) | 0.733(0.059) | 0.735(0.066) |
| | <i>P–O</i> | 0.686(0.119) | 0.622(0.098) | 0.654(0.097) | 0.686(0.082) | 0.664(0.064) | 0.675(0.059) |
| | <i>Ta–Tp</i> | 0.436(0.080) | 0.536(0.107) | 0.486(0.081) | 0.501(0.113) | 0.540(0.102) | 0.520(0.079) |
| <i>Ta–O</i> | 0.218(0.042) | 0.213(0.098) | 0.215(0.056) | 0.244(0.102) | 0.281(0.109) | 0.263(0.097) | |
| <i>Tp–O</i> | 0.669(0.091) | 0.691(0.063) | 0.680(0.062) | 0.685(0.088) | 0.709(0.091) | 0.697(0.077) | |

* В таблице приведена дескриптивная статистика без учета фактора ДИАПАЗОН, в ячейках таблицы использован формат СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ (СТАНДАРТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ). Жирным шрифтом выделены значения когерентности, которые при парном сравнении по фактору ФТВ значительно различались.

яние фактора ФТВ было более выражено в левом полушарии. В левом полушарии у детей с ФТВ ЭЭГ-сигналы в лобных областях оказались менее “связанными” с ЭЭГ-сигналами других зон того же полушария, чем у детей контрольной группы ($C = 0.475 \pm 0.015$ в контрольной группе, $C = 0.442 \pm 0.015$ в группе с ФТВ, $F(1, 92) = 4.73$, $p = 0.015$). В парах отведений правого полушария значимых различий в показателях когерентности ЭЭГ между детьми контрольной группы и детьми с

ФТВ обнаружено не было. Такое избирательное влияние ФТВ на функциональные связи лобной коры в левом полушарии отразилось в значимом взаимодействии ПОЛУШАРИЕ \times ФТВ (см. табл. 2).

Зависимость влияния фактора ФТВ от возраста детей была обнаружена также для межполушарных связей (табл. 2). Дескриптивная статистика значений межполушарной когерентности представлена в табл. 4.

Таблица 4. Средние значения и стандартные отклонения величины межполушарной когерентности ЭЭГ-сигналов у детей контрольной группы и детей с ФТВ 7–8 и 9–10 лет

| Возраст | Пары отведений | контрольная группа | дети с ФТВ |
|----------|----------------|---------------------|---------------------|
| 7–8 лет | F_4-F_3 | 0.764(0.056) | 0.723(0.076) |
| | C_4-C_3 | 0.601(0.082) | 0.565(0.115) |
| | P_4-P_3 | 0.592(0.107) | 0.539(0.113) |
| | T_4-T_3 | 0.192(0.083) | 0.202(0.077) |
| | T_6-T_5 | 0.224(0.059) | 0.220(0.065) |
| 9–10 лет | O_2-O_1 | 0.600(0.092) | 0.616(0.068) |
| | F_4-F_3 | 0.736(0.101) | 0.744(0.062) |
| | C_4-C_3 | 0.570(0.083) | 0.596(0.088) |
| | P_4-P_3 | 0.534(0.084) | 0.557(0.111) |
| | T_4-T_3 | 0.195(0.087) | 0.234(0.117) |
| | T_6-T_5 | 0.180(0.060) | 0.207(0.074) |
| | O_2-O_1 | 0.592(0.100) | 0.629(0.115) |

Примечание. Обозначения см. в табл. 3.

В младшей возрастной группе у детей с ФТВ межполушарное взаимодействие симметричных корковых зон было ниже, чем в контрольной группе (в контрольной группе $C = 0.497 \pm 0.018$, в группе с ФТВ $C = 0.457 \pm 0.020$; $F(1, 57) = 3.930$, $p = 0.027$). У детей 7–8 лет эффект ФТВ в разной степени проявлялся для разных пар симметричных областей (ФТВ \times ЛОКАЛИЗАЦИЯ, $F(5, 53) = 3.36$, $p = 0.01$). Снижение когерентности у детей с ФТВ по сравнению с детьми контрольной группы достигало значимого уровня с учетом поправки для множественных сравнений (6 пар отведений) для межполушарных связей между лобными зонами ($F(1, 57) = 6.767$, $p = 0.002$). В старшей возрастной группе соотношения величины межполушарной когерентности были обратными: у детей с ФТВ уровень межполушарного взаимодействия оказался выше, чем в контрольной группе, однако различия при этом не достигали значимого уровня (в контрольной группе $C = 0.472 \pm 0.026$, в группе с ФТВ $C = 0.494 \pm 0.027$; $F(1, 35) = 1.618$, $p = 0.121$). Значимых регионарных различий во влиянии ФТВ на межполушарные связи симметричных областей коры у детей 9–10 лет также обнаружено не было.

Поскольку для других подмножеств отведений не было выявлено зависимости влияния фактора ФТВ от возраста, все *post-hoc* сравнения, представленные ниже, были проведены без учета возрастных особенностей. Наличие значимых взаимодействий ФТВ \times ПОЛУШАРИЕ \times ЛОКАЛИЗАЦИЯ (см. табл. 2) позволяет сразу перейти к анализу влияния фактора ФТВ на величину когерентности ЭЭГ-сигналов в отдельных парах каждого подмножества отведений.

При анализе когерентности ЭЭГ-сигналов в парах отведений с участием центральных областей

вновь проявилось более выраженное влияние ФТВ на организацию функциональных связей в коре левого полушария. В левом полушарии в парах отведений C_3-T_3 и C_3-T_5 когерентность была выше у детей контрольной группы, чем у детей с ФТВ. С учетом множественных сравнений (8 пар отведений левого и правого полушарий), значимые различия были обнаружены только для отведений C_3-T_3 ($F(1, 98) = 7.798$, $p = 0.006$). В правом полушарии подобные различия отмечались только для пары отведений C_4-T_4 ($F(1, 98) = 8.454$, $p = 0.005$), а когерентность ЭЭГ-сигналов в паре отведений C_4-T_6 не различалась даже по средним значениям. При анализе когерентности в парах отведений с участием теменных зон, различия на уровне тенденции были обнаружены только в паре отведений P_3-O_1 левого полушария ($F(1, 98) = 5.705$, $p = 0.019$). Необходимо отметить, что в каудальных отделах левого полушария, в отличие от передних отделов того же полушария, величина когерентности была выше у детей с ФТВ, чем у детей контрольной группы (см. табл. 3). В правом полушарии различия по фактору ФТВ отсутствовали. Фактор ФТВ не оказывал значимого влияния на функциональные связи передневисочных зон коры с нижневисочными и затылочными областями, а также нижневисочных зон с затылочными ни в правом, ни в левом полушариях.

Таким образом, анализ когерентности фоновой ЭЭГ показал, что общим для детей 7–8 и 9–10 лет с ФТВ было снижение по сравнению с детьми контрольной группы степени функционального взаимодействия корковых зон в лобно-височно-центральных отделах преимущественно левого полушария. В теменно-затылочных отделах левого полушария, напротив, у детей с ФТВ была отмечена

на тенденция к увеличению степени корково-коркового взаимодействия.

Значимые возрастные изменения не были обнаружены ни в группе с ФТВ, ни в контрольной группе. Вместе с тем, результаты анализа когерентности продемонстрировали влияние возраста на выраженность межгрупповых различий: в целом относительная “слабость” функциональных связей лобной коры с другими корковыми зонами у детей с ФТВ оказалась более выраженной в 7–8 лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На поставленный в исследовании вопрос: отличается ли пространственно-временная организация фоновой ЭЭГ, свободной от отклоняющихся паттернов, у детей с ФТВ и детей контрольной группы, результаты проведенного исследования позволяют ответить утвердительно. Качественное сопоставление результатов данной работы с результатами нашего предыдущего исследования когерентности фоновой ЭЭГ у детей с ФТВ [29], проведенного на другой выборке испытуемых, с помощью другой аппаратуры и других методов вычисления когерентности, позволяет говорить о принципиальном сходстве этих данных. В настоящем исследовании, также как и в предыдущем, снижение когерентности фоновой ЭЭГ касалось преимущественно близко расположенных пар отведений, куда входила передневисочная область левого полушария (T_3). Сходство результатов двух независимых исследований свидетельствует об их неслучайном характере. Оно позволяет рассматривать “ослабление” связей передневисочной области левого полушария с другими близко расположенными зонами этого же полушария как особенность корково-коркового взаимодействия в состоянии спокойного бодрствования у детей с трудностями обучения и фронтальными θ -волнами на ЭЭГ. Вместе с тем, в данном исследовании в большей степени, чем в предыдущем, проявилась “слабость” функциональных связей лобной и передневисочной областей левого полушария и межполушарных фронтальных связей у детей с ФТВ по сравнению с контрольной группой. Вероятной причиной того, что эти различия не были обнаружены в предыдущем исследовании, является его ограниченность анализом ритмических составляющих α -диапазона. Можно предположить, что учет корково-корковых “связей” по θ - и β -ритмам, более широко представленным в передних отделах мозга, позволил более точно оценить степень функционального взаимодействия этих отделов коры с другими корковыми зонами. В настоящем исследовании, в отличие от предыдущего, в каудальных отделах левого полушария также были обнаружены межгрупповые различия когерентности с противоположным знаком, т.е. более высокая

степень функционального взаимодействия между затылочной и теменной областью у детей с ФТВ по сравнению с детьми контрольной группы. Возможно, причиной расхождения результатов в этом случае является разный возрастной диапазон сравниваемых выборок: в предыдущем исследовании влияние ФТВ на характер корковых связей анализировалось только для детей 7–8 лет, тогда как в настоящем исследовании в выборку при сравнении когерентности в каудальных отделах мозга входили дети как 7–8, так и 9–10 лет. Последнее обстоятельство (включение детей 9–10 лет) могло способствовать выявлению более высоких значений когерентности у детей с ФТВ по сравнению с контрольной группой, поскольку в контрольной группе с возрастом не наблюдалось изменений когерентности, а в группе детей с ФТВ тенденция к увеличению, хотя и не значимая, прослеживалась.

Вопрос о возрастных изменениях функционального взаимодействия корковых зон в состоянии покоя заслуживает отдельного обсуждения. В настоящем исследовании ни в контрольной группе, ни в группе детей с ФТВ значимых возрастных изменений когерентности обнаружено не было, тогда как в предыдущем исследовании [29] было показано увеличение когерентности α -колебаний в затылочно-теменных и височно-центральных отведениях обоих полушарий у детей с ФТВ при переходе от 7–8 к 9–10 годам и напротив, снижение когерентности α -колебаний в лобно-центральных и теменно-задневисочных парах отведений левого полушария в контрольной группе. Повидимому, и здесь некоторое расхождение результатов двух исследований объясняется анализом только α -ритма в первом исследовании и анализом когерентности с учетом 4 частотных диапазонов ЭЭГ – во втором. Как показал лонгитюдный анализ степени синхронизации различных ритмов ЭЭГ у детей с типичным развитием [32], в период от 6 до 12 лет именно когерентность α -ритма претерпевает наибольшие изменения с возрастом. В цитируемой работе было обнаружен рост α -когерентности между последовательными записями ЭЭГ с интервалом около 4 лет, поэтому ее результаты свидетельствуют об общем тренде изменений когерентности с возрастом. Вместе с тем, в ряде электроэнцефалографических исследований [19, 33] выявлен нелинейный характер зависимости величины когерентности ЭЭГ-сигналов от возраста детей. Снижение когерентности α -ритма в отведениях левого полушария в контрольной группе, обнаруженное в нашем исследовании [29], согласуется с данными работы [33] о переходе “инициативы” в росте когерентности ЭЭГ сигналов от левого к правому полушарию в период от 8 до 10 лет. Снижение когерентности α -ритма в возрасте от 8 до 10–11 лет, преимущественно выраженное в отведениях левого полушария, а затем новый подъем к 16 годам, описаны также в работе [19]. На осно-

вании данных настоящего и предыдущего исследований можно лишь предположить разные траектории формирования корково-коркового взаимодействия у детей с ФТВ и детей контрольной группы

Следующий вопрос, который необходимо обсудить в рамках настоящего исследования, направленного на поиск нейрофизиологических механизмов трудностей обучения у детей, это вопрос о том, каким образом связаны между собой два ряда явлений — функциональная организация коры головного мозга в состоянии покоя и эффективность когнитивной деятельности. Важная роль функционального взаимодействия корковых зон в состоянии спокойного бодрствования как условия, определяющего в значительной степени готовность к обработке информации и реализации деятельности, была показана в ряде электрофизиологических исследований, начиная с 90-х годов прошлого века [20, 28, 33, 34]. Во многом, именно благодаря исследованиям возрастных преобразований пространственно-временной организации ритмической ЭА мозга, удалось обнаружить, что даже когда человек просто отдыхает и не занят никакой конкретной деятельностью, различные зоны коры головного мозга объединяются в относительно стабильные системы. Было также обнаружено, что характер и степень связей между корковыми зонами в состоянии спокойного бодрствования закономерно видоизменяются в процессе онтогенеза [20, 28, 32, 35, 36]. В последние годы с помощью анализа медленных (около 0.1 Гц) осцилляций метаболических процессов в нейронных сетях (*BOLD* сигналов) были обнаружены топографически специфичные функциональные связи между различными структурами мозга не только во время деятельности, но и в состоянии спокойного бодрствования. Такие функциональные объединения мозговых структур получили название “сети состояния покоя” (*resting state networks — RSNs*) [37, 38] или сети внутренних взаимосвязей (*intrinsic connectivity networks — ICNs*) [39]. В большинстве случаев в состав сетей состояния покоя включают структуры, которые также активируются при осуществлении моторных актов или различных когнитивных операций [37, 40], а также структуры, которые, наоборот, при когнитивных операциях “молчат” (*default mode networks — DMN*) [41]. По мнению С. Бресслера [39], существование в состоянии спокойного бодрствования нейронных объединений, по своей топографии близких к “когнитивным нейронным сетям”, свидетельствует о том, что мозг человека организован “по умолчанию” в отдельные относительно жесткие распределенные системы. Системы состояния покоя являются своего рода каркасом для формирования более динамичных функциональных объединений во время деятельности. Сопоставление данных ЭЭГ и функциональной магнитно-резонансной томогра-

фии (фМРТ) [41–43] свидетельствует о том, что в состоянии покоя конфигурация функциональных объединений, выявленных с помощью анализа медленных колебаний мозгового метаболизма, и конфигурация функциональных корковых связей, выявленных с помощью анализа ритмов ЭЭГ, во многом сходны. Эти данные являются экспериментальным подтверждением связи между пространственно-временной организацией ритмической ЭА в состоянии покоя и структурно-функциональной организацией актуальных нейронных объединений в мозге, эффективность связей внутри которых определяет эффективность различных компонентов когнитивной деятельности. Приведенные выше литературные данные позволяют рассматривать результаты настоящего исследования как свидетельство специфики структурно-функциональной организации мозга у детей с ФТВ.

Рассматривая результаты настоящего исследования с точки зрения отражения в фоновой ЭЭГ особенностей функциональной организации мозга, можно предположить, что неоптимальное состояние фронто-таламической системы препятствует актуальному взаимодействию между лобными, височными и центральными корковыми зонами, при этом негативное влияние дисфункции или незрелости фронто-таламической системы преимущественно сказывается на функциональной организации левого полушария. Возрастные особенности различий между детьми экспериментальной (с ФТВ) и контрольной групп указывают на то, что неоптимальное состояние фронто-таламической системы и снижение степени внутрикоркового взаимодействия в левом полушарии не являются однозначно сопряженными процессами. А раз это так, то предположение об особенностях структурно-функционального созревания нейронных сетей коры в онтогенезе у детей с ФТВ представляется оправданным. Одной из возможных причин особой “чувствительности” нейронных сетей левого полушария к неоптимальному состоянию фронто-таламической системы может быть его нейрохимическая специфичность, т.е. большая, чем в правом полушарии, активность дофаминергических нейронных связей [43]. В свою очередь фронто-таламическая система через МД связана с лимбико-кортикальными дофаминергическими проекциями, и снижение “активного использования” этих связей может отрицательно повлиять на формирование нейронных сетей левого полушария. Другая возможная причина — недостаточность избирательных модулирующих влияний со стороны неспецифических ядер таламуса, что может оказывать более выраженное негативное влияние на морфофункциональное созревание нейронных сетей в коре левого полушария, структура которых является более дифференцированной [44].

Ранее в комплексных нейропсихологических и электроэнцефалографических исследованиях было показано, что дети с ФТВ, помимо выраженной недостаточности произвольной регуляции деятельности, демонстрируют дефицит номинативной функции речи. Это проявляется в обеднении словарного запаса и семантических заменах при выполнении как речевых (диктанты, пересказ рассказа), так и зрительно-пространственных (узнавание и описание зрительных объектов) заданий [6, 45]. Представленный в данной работе количественный анализ фоновой ЭЭГ содержит дополнительную информацию о нейрофизиологических механизмах описанных выше когнитивных дефицитов. Номинативная функция речи, согласно клиническим исследованиям А.Р. Лурия [46], обеспечивается структурами левого полушария и нарушается специфическим образом при поражении заднелобных и височных областей этого полушария. Именно в этих зонах мозга у детей с ФТВ была выявлена относительная “слабость” корково-коркового взаимодействия. В совокупности, результаты электрофизиологических и нейропсихологических исследований детей с ФТВ при их сопоставлении с синдромами локальных поражений мозга позволяют предположить, что в основе недостаточного развития номинативной функции речи у детей с незрелостью или дисфункцией фронто-таламической системы лежит снижение эффективности взаимодействия между лобными и височными структурами левого полушария.

Результаты настоящего исследования позволяют предположить, что одним из нейрофизиологических факторов познавательных дефицитов и связанных с ними трудностей обучения у детей младшего школьного возраста на ЭЭГ которых регистрируются фронтальные билатерально-синхронные θ -волны, является относительная слабость внутрикоркового взаимодействия в лобно-височных отделах левого полушария головного мозга.

ВЫВОДЫ

1. Анализ когерентности ритмических составляющих θ , α_1 , α_2 и β_1 -частотных диапазонов фоновой ЭЭГ, свободной от девиантных паттернов, показал, что у детей 7–8 и 9–10 лет с трудностями обучения и фронтальными θ -волнами (ФТВ) снижена, по сравнению с детьми контрольной группы того же возраста, степень функционального взаимодействия лобных и передневисочных зон коры, преимущественно в левом полушарии.

2. Особенности функционального взаимодействия корковых зон в состоянии спокойного бодрствования у детей с ФТВ, выявленные при анализе когерентности ритмической электрической активности мозга, не зависели от пола детей и анализируемого частотного диапазона ЭЭГ.

3. Влияние неоптимального состояния фронто-таламической системы, отражающееся в наличии ФТВ, на характер взаимодействия лобных отделов коры с другими корковыми зонами было больше выражено у детей 7–8 лет, чем у детей 9–10 лет.

Работа выполнена при поддержке РГНФ (грант № 10-06-00693а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мачинская Р.И., Лукашевич И.П., Фишман М.Н.* Динамика электрической активности мозга у детей 5–8-летнего возраста в норме и при трудностях обучения // Физиология человека. 1997. Т. 23. № 5. С. 5.
2. *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.
3. *Семенова О.А., Мачинская Р.И.* Нейропсихологический и нейрофизиологический анализ возрастных преобразований познавательных функций и рисков учебной дезадаптации в дошкольном возрасте // Альманах “Новые исследования”. 2012. № 1. С. 45.
4. *Lubar J.F., Bianchini K.J., Calhoun W.H. et al.* Spectral analysis of EEG differences between children with and without learning disabilities // J. Learn Disabil. 1985. V. 18(7). P. 403.
5. *Chabot R.J., Michele F., Prichep L.E., John R.* The clinical role of computerized EEG in the evaluation and treatment of learning and attention disorders in children and adolescents // J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci. 2001. V. 13. P. 171.
6. *Мачинская Р.И., Семенова О.А.* Особенности формирования высших психических функций у младших школьников с различной степенью зрелости регуляторных систем мозга // Журн. эволюц. биохимии и физиологии. 2004. Т. 40. № 5. С. 427.
7. *Майорчик В.Е.* Изменения ЭЭГ в зависимости от локализации опухоли мозга // Клиническая электроэнцефалография / Под ред. В.С. Русина. М.: Медицина, 1973. С. 106–146.
8. *Лукашевич И.П., Сазонова О.Б.* Влияние поражения различных отделов зрительного бугра на характер биоэлектрической активности мозга человека // Журн. высш. нерв. деятельности. 1996. Т. 46. № 5. С. 866.
9. *Terao Y., Sakurai Y., Sakuta M. et al.* FDG-PET in an amnesic and hypersomnic patient with bilateral paramedian thalamic infarction // Rinsho. Shinkeigaku. 1993. V. 33. P. 951.
10. *Kalashnikova L.A., Gulevskaya T.S., Kashina E.M.* Disorders of higher mental function due to single infarctions in the thalamus and in the area of the thalamo-frontal tracts // Neurosci. Behav. Physiol. 1999. V. 29. P. 397.
11. *Zoppelt D., Koch B., Schwarz M., Daum I.* Involvement of the mediodorsal thalamic nucleus in mediating recollection and familiarity // Neuropsychologia. 2003. V. 41. P. 1160.

12. *Goldman-Rakic P.S., Porrino L.J.* The primate mediodorsal (MD) nucleus and its projection to the frontal lobe // *J. Comp. Neurol.* 1985. V. 242. P. 535.
13. *Zhang D., Snyder A.Z., Shimony J.S. et al.* Noninvasive functional and structural connectivity mapping of the human thalamocortical System // *Cerebral Cortex.* 2010. V. 20. P. 1187.
14. *Lujan J.L., Chaturvedi A., McIntyre C.C.* Tracking the mechanisms of deep brain stimulation for neuropsychiatric disorders // *Front Biosci.* 2010. V. 13. P. 5892.
15. *Kim J., Woo J., Park Y-G. et al.* Thalamic T-Type Ca²⁺ channels mediate frontal lobe dysfunctions caused by a hypoxia-like damage in the prefrontal cortex // *J. Neurosci.* 2011. V. 31. № 11. P. 4063.
16. *Курганский А.В., Мачинская Р.И.* Фронтальные билатерально-синхронные θ -волны на ЭЭГ детей 7–8 лет с трудностями обучения: качественный и количественный анализ // *Физиология человека.* 2012. Т. 38. № 3. С. 37.
17. *Kaminski M.* Determination of transmission patterns in multichannel data // *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2005. V. 360. P. 947.
18. *Fingelkurts A., Fingelkurts A., Kahkonen S.* Functional connectivity in the brain—is it an elusive concept? // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2005. V. 28. № 8. P. 827.
19. *Алферова В.В., Фарбер Д.А.* Отражение возрастных особенностей функциональной организации мозга в электроэнцефалограмме покоя // *Структурно-функциональная организация развивающегося мозга.* Л.: Наука, 1990. С. 45.
20. *Князева М.Г., Фарбер Д.А.* Пространственная структура внутри- и межполушарных связей. Факторный анализ когерентности ЭЭГ покоя // *Физиология человека.* 1996. Т. 22. № 5. С. 37.
21. *Мачинская Р.И.* Нейрофизиологические механизмы произвольного внимания. (Аналитический обзор) // *Журн. высш. нерв. деятельности.* 2003. Т. 53. № 2. С. 133.
22. *Joseph R.* Neuroscience: Neuropsychology, Neuropsychiatry, Behavioral Neurology, Brain & Mind. (Advanced Text) // 4th ed. University Press Science Publishers, 2011. 778 p.
23. *Watanabe Y., Funahashi Sh.* Thalamic mediodorsal nucleus and working memory // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2012. V. 36. № 1. P. 134.
24. *Huttenlocher P.R.* Neural Plasticity. The Effects of Environment on the Development of the Cerebral Cortex. Cambridge, Massachusetts; London, England: Harvard University Press, 2002. 274 p.
25. *Hagmann P., Sporns O., Madan N. et al.* White matter maturation reshapes structural connectivity in the late developing human brain // *PNAS.* 2010. V. 107. № 44. P. 9067.
26. *Segalowitz S.J.* The role of neuroscience in historical and contemporary theories of human development // *Human behavior, learning, and the developing brain /* Eds. C. Coch, K.W. Fischer & G. Dawson. New York: Guilford, 2007. P. 3.
27. *Galvan A.* Neural plasticity of development and learning // *Human Brain Mapping.* 2010. V. 31. P. 879.
28. *Thatcher R.W., North Duane M., Biver Carl J.* Development of cortical connections as measured by EEG coherence and phase delays // *Human Brain Mapping.* 2008. V. 29(12). P. 1400.
29. *Мачинская Р.И., Соколова Л.С., Крупская Е.В.* Формирование функциональной организации коры больших полушарий в покое у детей младшего школьного возраста с различной степенью зрелости регуляторных систем мозга. Сообщение II. Анализ когерентности α -ритма ЭЭГ // *Физиология человека.* 2007. Т. 33. № 2. С. 5.
30. *Курганский А.В.* Некоторые вопросы исследования корково-корковых функциональных связей с помощью векторной авторегрессионной модели многоканальной ЭЭГ // *Журн. высш. нерв. деятельности.* 2010. Т. 60. № 5. С. 30.
31. *Cui J., Xu L., Bressler S.L. et al.* BSMART: A Matlab/C toolbox for analysis of multichannel neural time series // *Neural Networks.* 2008. V. 21. P. 1094.
32. *Gmehlin D., Thomas C., Weisbrod M. et al.* Development of brain synchronisation within school-age—individual analysis of resting (α) coherence in a longitudinal data set // *Clin. Neurophysiol.* 2011. V. 122(10). P. 1973.
33. *Thatcher R.W.* Cyclic Cortical Re-Organization: Origins of Human Cognitive Development // *Human Behavior and the Developing Brain /* Eds. G. Dawson and K. Fischer. New York: Guilford Press, 1994. P. 232.
34. *Marosi E., Harmony T., Sanchez L. et al.* Maturation of the coherence of EEG activity in normal and learning-disabled children // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1992. V. 83. № 6. P. 350.
35. *Шеновальников А.Н., Цицерошин М.Н., Погосян А.А.* О роли различных зон коры и их связей в формировании пространственной упорядоченности поля биопотенциалов мозга в постнатальном онтогенезе // *Физиология человека.* 1997. Т. 23. № 2. С. 12.
36. *Безруких М.М., Теребова Н.Н.* Функциональная организация коры больших полушарий головного мозга в состоянии покоя у детей 5, 6 и 7 лет // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 6. С. 61.
37. *Damoiseaux J.S., Rombouts S.A.R.B., Barkhof F. et al.* Consistent resting-state networks across healthy subjects // *PNAS.* 2006. V. 103. № 37. P. 13848.
38. *van den Heuvel M.P., Mandl R.C.W., Kahn R.S., Hulshoff P. H.E.* Functionally linked resting state networks reflect the underlying structural connectivity architecture of the human brain // *Human Brain Mapping.* 2009. V. 30. № 10. P. 3127.
39. *Bressler S.L., Menon V.* Large-scale brain networks in cognition: emerging methods and principles // *Trends Cogn. Sci.* 2010. V. 14. № 6. P. 277.
40. *Britz J., Van De Ville D., Michel Ch.M.* BOLD correlates of EEG topography reveal rapid resting-state network dynamics // *NeuroImage.* 2010. V. 52. P. 1162.
41. *Greicius M.D., Kaustubh S., Menon V., Dougherty R.F.* Resting-state functional connectivity reflects structural connectivity in the default mode network // *Cerebral Cortex.* 2009. V. 19(1). P. 72.
42. *Mantini D., Perrucci M.G., Del Gratta C. et al.* Electrophysiological signatures of resting state networks in the human brain // *PNAS.* 2007. V. 104. № 32. P. 13170.
43. *Toga A.W., Thompson P.M.* Mapping brain asymmetry // *Nat. Rev. Neurosci.* 2003. V. 4. № 1. P. 37.

44. *Hutsler J., Galuske R.A.W.* Hemispheric asymmetries in cerebral cortical networks // *Trends in Neurosci.* 2003. V. 26. № 8. P. 429. 8 лет с признаками СДВГ // *Экология человека.* 2010. № 11. С. 19.
45. *Сугрובה Г.А., Семенова О.А., Мачинская Р.И.* Особенности регуляторных и информационных компонентов познавательной деятельности у детей 7–8 лет с признаками СДВГ // *Экология человека.* 2010. № 11. С. 19.
46. *Лурия А.Р.* Высшие корковые функции и их нарушения при локальных поражениях мозга. М.: Изд-во МГУ, 1962. 426 с.

Frontal Bilateral Synchronous Theta-Waves and the Resting EEG Coherence in Children Aged 7–8 and 9–10 with Learning Difficulties

R. I. Machinskaya, A. V. Kurgansky

The resting state cortical functional connectivity was studied in children of 7–8 ($N = 29$) and 9–10 ($N = 23$) years with learning difficulties whose EEG showed the frontal bilateral synchronous theta waves (FTW) and in the control children of 7–8 ($N = 32$) and 9–10 ($N = 16$) years who did not experience school difficulties and whose EEG did not show signs of abnormality. The functional connectivity was estimated in the theta, alpha1, alpha2, and beta1 frequency bands via measuring the coherence for the resting EEG that was free from any abnormal patterns. Compared to control children, there was a reduction in the strength of the functional coupling between the frontal and anterior temporal cortices found predominantly in the left hemisphere of FTW children. The relative weakness of the coupling between the frontal cortex and the other cortical areas was more pronounced in children of 7–8 than in children of 9–10 years. These between-group differences were unaffected by the frequency band or gender factors.

Keywords: frontal theta-waves, resting EEG coherence, children with learning difficulties.