

УДК 612.821-053.4/.7(470.1/.2)

ОСОБЕННОСТИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПАТТЕРНА ЭЭГ У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ НА СЕВЕРЕ В РАЗНЫЕ ВОЗРАСТНЫЕ ПЕРИОДЫ

© 2016 г. С. И. Сороко, В. П. Рожков, С. С. Бекшаев

Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург

С помощью оригинального метода оценки структуры взаимодействия компонентов (волн) ЭЭГ изучена динамика формирования паттернов биоэлектрической активности мозга и возрастных изменений взаимосвязей между основными частотными составляющими ЭЭГ, характеризующими особенности развития ЦНС у детей и подростков, проживающих в сложных экологических условиях Севера Российской Федерации. Установлено, что статистическая структура взаимодействия компонентов ЭЭГ претерпевает существенные перестройки с возрастом и имеет свои топографические и гендерные различия. В период от 7 до 18 лет уменьшается вероятность взаимодействия волн всех диапазонов частот ритмики ЭЭГ с волнами дельта- и тета-диапазонов с одновременным увеличением взаимодействия с волнами бета- и альфа2-диапазонов. В наибольшей степени динамика анализируемых показателей ЭЭГ проявляется в теменных, височных и затылочных областях коры мозга. Наибольшие половые различия по анализируемым параметрам ЭЭГ приходятся на пубертатный период. К 16–17 годам у девочек функциональное ядро взаимодействия волновых компонентов, поддерживающее структуру паттерна ЭЭГ, формируется в альфа2–бета1-диапазоне, тогда как у мальчиков – в альфа2–альфа1-диапазоне. Выраженность возрастных перестроек паттерна ЭЭГ отражает постепенное формирование электрогенеза различных структур мозга и имеет индивидуальные особенности, обусловленные как генетическими, так и внешнесредовыми факторами. Полученные количественные показатели формирования с возрастом динамических взаимоотношений основных ритмов позволяют выявить детей с нарушенным или замедленным развитием ЦНС.

Ключевые слова: дети, подростки, возрастное развитие, мозг, ЭЭГ, Север, адаптация

CHARACTERISTICS OF TIME AND FREQUENCY EEG PATTERN IN CHILDREN AND ADOLESCENTS LIVING IN THE NORTH IN DIFFERENT AGE PERIODS

S. I. Soroko, V.P., Rozhkov, S. S. Bekshaev

I. M. Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia

Features of CNS development have been investigated in children and adolescents living under the severe ecological conditions in the North of Russia. The original method for estimating a time structure of the EEG frequency components interrelations was used to study the dynamics of maturation of bioelectrical brain activity pattern and age-related changes of the interplay between the main EEG rhythms. It was found that the statistical structure of the interaction of the frequency components of EEG is undergoing a significant restructuring with age and has certain topography and gender differences. The period from 7 to 18 years of age is marked by decrease the probability of interaction of wave components of the main EEG frequency bands with components of delta and theta bands while simultaneously increasing interaction with the components of beta and alpha2 frequency bands. The dynamics of studied indices EEG manifested in the parietal, temporal and occipital regions of the cerebral cortex to the greatest extent. The largest sex-related differences in the EEG parameters occur in puberty. Functional core of the wave components interaction that maintain the structure of the frequency-temporal EEG pattern is formed to 16-18 years in girls in alpha2-beta1 range, while in boys - in alpha1-alpha2 range. Intensity of age-related rearrangements of the EEG pattern reflects the gradual maturation of electrogenesis in different brain structures and has individual features due to both genetic and environmental factors. Obtained quantitative indicators of formation with age of dynamic relationships between basic EEG rhythms permit to reveal children with disturbed or delayed development of the central nervous system.

Keywords: children, adolescents, brain development, EEG, the North, adaptation

Библиографическая ссылка:

Сороко С. И., Рожков В. П., Бекшаев С. С. Особенности частотно-временной организации паттерна ЭЭГ у детей и подростков на Севере в разные возрастные периоды // Экология человека. 2016. № 5. С. 36–43.

Soroko S. I., Rozhkov V. P., Bekshaev S. S. Characteristics of Time and Frequency EEG Pattern in Children and Adolescents Living in the North in Different Age Periods. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2016, 5, pp. 36-43.

Социально-экономическое развитие Арктической зоны определено в качестве одного из приоритетных направлений государственной политики Российской Федерации [11]. В связи с этим весьма актуальным является всестороннее изучение медицинских и социально-экономических проблем населения Севера, охраны здоровья и повышения качества жизни [3].

Известно, что комплекс экстремальных факторов внешней среды Севера (природных, техногенных,

социальных) оказывает выраженные стрессогенные воздействия на организм человека, при этом наибольшее напряжение испытывает детское население [8, 9]. Повышенные нагрузки на физиологические системы и напряжение центральных механизмов регуляции функций у детей, проживающих в неблагоприятных климатических условиях Севера, обуславливают развитие двух видов негативных реакций: сокращения резервных возможностей и задержки

темпов возрастного развития. В основе этих негативных реакций лежит повышенный уровень затрат на гомеостатическое регулирование и обеспечение обмена веществ с формированием дефицита биоэнергетического субстрата [1, 14]. Кроме того, через гены высшего порядка, контролирующие возрастное развитие, неблагоприятные факторы внешней среды могут оказывать эпигенетические влияния на темпы возрастного развития путем временной остановки или сдвига той или иной стадии развития [16]. Не выявленные в детстве отклонения от нормального развития могут привести в последующем к нарушению тех или иных функций или к выраженным дефектам уже в зрелом возрасте, существенно снижая качество жизни человека.

В литературе имеется огромное число работ, посвященных изучению возрастного развития ЦНС детей и подростков [10, 15 и др.], нозологических форм при отклонениях в развитии [17, 18 и др.]. В условиях Севера воздействие сложных природных и социальных факторов может определять особенности возрастного созревания ЭЭГ детей [4, 5, 10]. Однако достаточно надежных методов раннего выявления отклонений в развитии мозга на разных стадиях постнатального онтогенеза до сих пор нет. Требуется проведение углубленных фундаментальных исследований с целью поиска локальных и пространственных ЭЭГ-маркеров, позволяющих контролировать индивидуальное морфофункциональное развитие мозга в разные возрастные периоды в конкретных условиях проживания.

Целью данного исследования являлось изучение особенностей динамики формирования ритмических паттернов биоэлектрической активности и возрастных изменений взаимосвязей между основными частотными составляющими ЭЭГ, характеризующими созревание как отдельных корковых и подкорковых структур, так и регуляторных подкорково-корковых взаимодействий у здоровых детей, проживающих в условиях Европейского Севера России.

Методы

Контингент обследуемых. В исследовании возрастного формирования биоэлектрической активности мозга приняли участие 44 мальчика и 42 девочки от 7 до 17 лет – учащиеся 1–11 классов сельской общеобразовательной школы Коношского района Архангельской обл. Исследования проводились с соблюдением требований Хельсинкской декларации по утверждению комиссией по этике биомедицинских исследований Института эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Российской академии наук протоколу. Родители учащихся были информированы о целях обследования и дали согласие на его проведение. Школьники участвовали в исследованиях добровольно.

Процедура ЭЭГ-исследования. ЭЭГ регистрировали на компьютерном электроэнцефалографе ЭЭГА 21/26 «Энцефалан-131-03» (НПКФ «Медиком» МТД, Россия) в 21 отведении по международной

системе «10–20» в полосе 0,5–70 Гц с частотой дискретизации 250 Гц. Использовали монополярное отведение с объединенным референтным электродом на мочках ушей. Запись ЭЭГ производилась в положении сидя. Представлены результаты для состояния спокойного бодрствования с закрытыми глазами.

Анализ ЭЭГ. Предварительно применяли цифровую фильтрацию с ограничением диапазона частот ЭЭГ полосой от 1,6 до 30 Гц. Исключали фрагменты ЭЭГ, содержащие глазодвигательные и мышечные артефакты. Для анализа ЭЭГ применены оригинальные методы изучения динамической структуры временной последовательности волн ЭЭГ. ЭЭГ преобразовывали в последовательность периодов (волн ЭЭГ), каждый из которых в зависимости от длительности относится к одному из шести частотных диапазонов ЭЭГ (β_2 : 17,5–30 Гц; β_1 : 12,5–17,5 Гц; α_2 : 9,5–12,5 Гц; α_1 : 7–9,5 Гц; θ : 4–7 Гц и δ : 1,5–4 Гц). Оценивали условную вероятность появления какого-либо частотного компонента ЭЭГ при условии непосредственного предшествования ему какого-либо другого, эта вероятность равна вероятности перехода от предшествующей частотной компоненте к последующей. По численным значениям вероятности переходов между всеми указанными диапазонами частот составляли матрицу вероятностей переходов размером 6×6. Для наглядного представления матриц вероятностей переходов строили ориентированные вероятностные графы. Вершинами служат указанные выше частотные компоненты ЭЭГ, ребра графа соединяют компоненты ЭЭГ различных диапазонов частот, толщина ребра пропорциональна вероятности соответствующего перехода.

Статистический анализ данных. Для выявления взаимосвязи изменений параметров ЭЭГ с возрастом вычисляли коэффициенты корреляции по Пирсону, а также применяли множественный линейный регрессионный анализ с гребневыми оценками параметров регрессии с пошаговым включением предикторов. При анализе топических особенностей возрастных изменений показателей ЭЭГ предикторами служили оценки вероятности переходов между всеми 6 диапазонами частот (36 параметров для каждого отведения ЭЭГ). Анализировали коэффициенты множественной корреляции r , регрессионные коэффициенты и коэффициенты детерминации (r^2).

Для оценки возрастных закономерностей формирования паттерна ЭЭГ все школьники (86 человек) были разделены на три возрастные группы: младшую – от 7 до 10,9 года ($n = 24$), среднюю – от 11 до 13,9 года ($n = 25$), старшую – от 14 до 17,9 года ($n = 37$). С помощью двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) оценивали влияние факторов «Пол» (2 градации), «Возраст» (3 градации), а также эффект их взаимодействия на показатели ЭЭГ. Анализировали эффекты (величины F-критерия) с уровнем значимости $p < 0,01$. Для оценки возможности возрастной классификации детей по описанным выше матрицам вероятностей переходов в 21-м отведении использовали классический дискриминантный анализ

с пошаговым включением предикторов. Статистическая обработка полученных данных производилась при помощи пакета программ Statistica-10.

Результаты

Для 86 учащихся были рассчитаны матрицы вероятностей переходов от одних частотных компонентов ЭЭГ к другим, по которым построены соответствующие графы переходов в 21 отведении ЭЭГ. Примеры таких графов у школьника 7 и 16 лет приведены на рис. 1. На графах видна повторяющаяся во многих отведениях структура переходов, характеризующая определенный алгоритм смены одних частотных компонентов ЭЭГ другими в их временной последовательности. Линии (ребра) на каждом из графов, исходящие из большинства вершин (вершины соответствуют основным диапазонам частот ЭЭГ) левой колонки графа сходятся на правой колонке к 2–3 вершинам (диапазонам ЭЭГ). Такая сходимость линий к отдельным диапазонам отражает формирование «функционального ядра» взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ, играющего основную роль в поддержании данной структуры паттерна биоэлектрической активности. Ядром такого взаимодействия у детей из младших классов (7–10 лет) является тета- и альфа1-диапазоны частот, у подростков из старших классов (14–17 лет) – альфа1- и альфа2-диапазоны частот, то есть происходит «смена» функционального ядра низкочастотного (тета) диапазона высокочастотным (альфа1 и альфа2).

У школьников младших классов устойчивая структура переходных вероятностей характерна для

затылочных, теменных и центральных отведений. У большинства подростков 14–17 лет вероятностные переходы уже хорошо структурированы не только в затылочно-теменных и центральных, но и в височных (Т5, Т6, Т3, Т4) областях.

Корреляционный анализ позволяет количественно оценить зависимость изменений вероятностей межчастотных переходов от возраста учащегося. На рис. 2 в ячейках матриц (построены по подобию матриц вероятностей переходов, каждая матрица соответствует определенному отведению ЭЭГ) треугольниками отображены только значимые коэффициенты корреляции: вершина треугольника вверх характеризует увеличение вероятности, вершина вниз – уменьшение вероятности данного перехода. Привлекает внимание наличие регулярной структуры в матрицах для всех отведений ЭЭГ. Так, в столбцах, обозначенных θ и δ , имеются только значки с вершиной, направленной вниз, что отражает уменьшение с возрастом вероятности перехода волны любого диапазона (обозначенного в матрице по вертикали) к волнам дельта- и тета-диапазонов ЭЭГ. В столбцах, обозначенных $\alpha 2$, $\beta 1$, $\beta 2$, имеются только значки с вершиной, направленной вверх, что отражает увеличение с возрастом вероятности перехода волны любого диапазона к волнам бета1-, бета2- и особенно альфа2-диапазону частот ЭЭГ. Видно, что наиболее выраженные возрастные изменения, при этом противоположно направленные, связаны с переходами к альфа2- и тета-диапазонам. Особое место занимает альфа1-диапазон частот. Вероятность переходов к этому диапазону во всех отведениях ЭЭГ обнаруживает возрастную зависимость

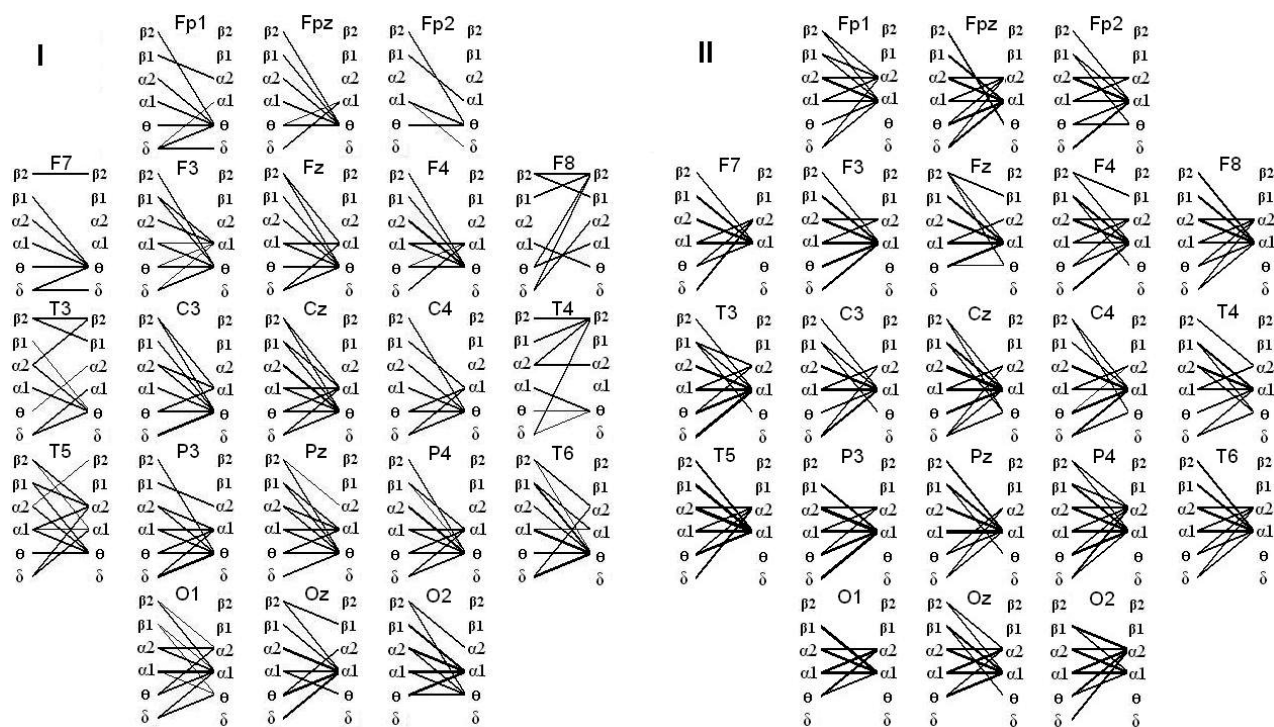


Рис.1. Топические особенности структуры взаимных переходов волн разных диапазонов частот ЭЭГ у учащегося 7 (I) и 16 (II) лет $\beta 1$, $\beta 2$ – бета-, $\alpha 1$, $\alpha 2$ – альфа, θ – тета, δ – дельта компоненты (волны) ЭЭГ. Показаны переходы, условная вероятность которых превышает 0,2. Fp1 ... O2 – отведения ЭЭГ.

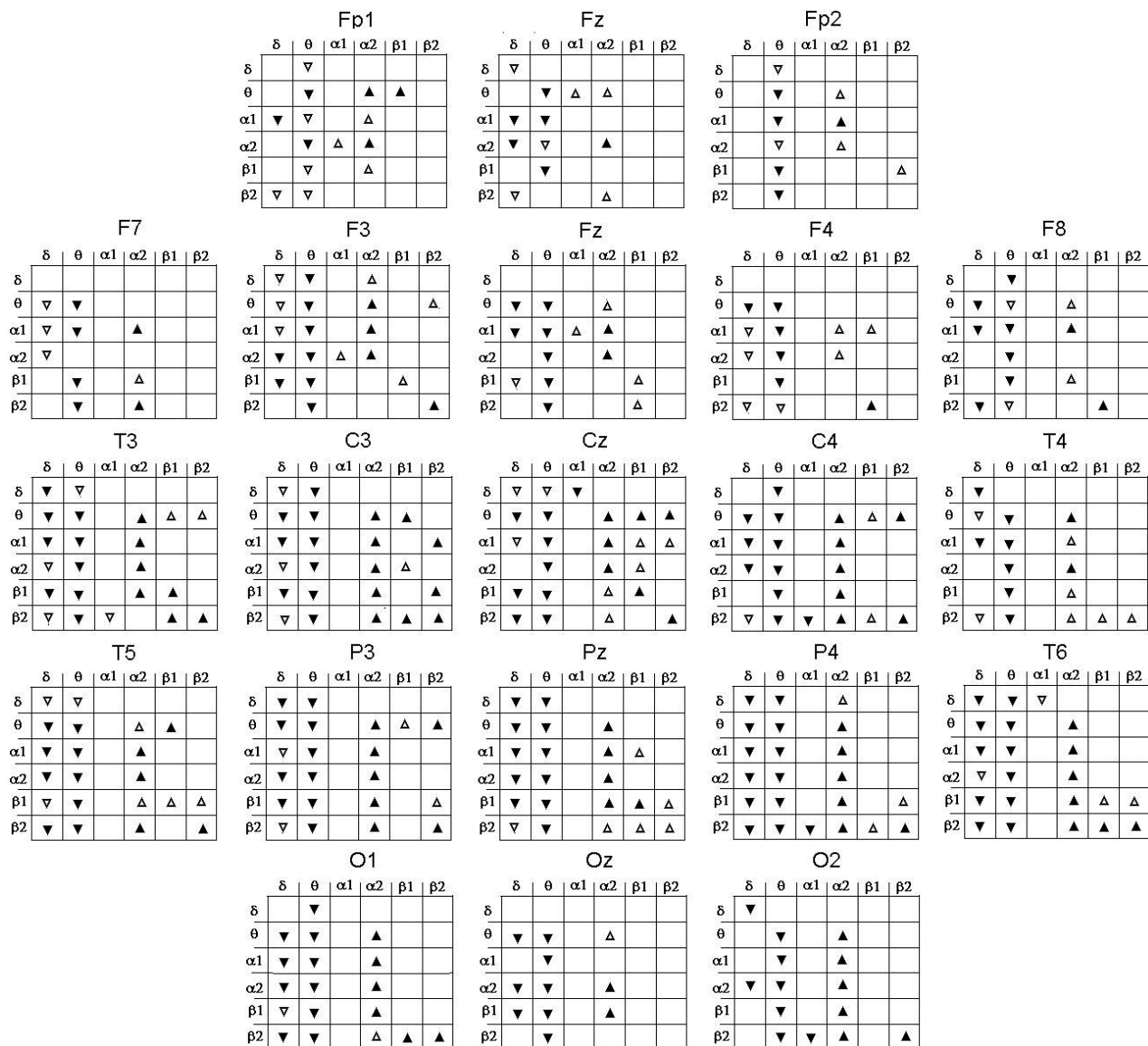


Рис. 2. Изменения вероятностей переходов между волновыми компонентами основных ритмов ЭЭГ в различных отведениях с возрастом у школьников (86 человек)
 δ ... $\beta2$ – диапазоны частот ЭЭГ, Fp1 ... O2 – отведения ЭЭГ. Треугольник в ячейке: вершиной вниз – уменьшение, вершиной вверх – увеличение с возрастом вероятности переходов между компонентами ЭЭГ разных частотных диапазонов. Уровень значимости: $p < 0,05$ – светлый треугольник, $p < 0,01$ – темный треугольник.

лишь в единичных случаях. Однако если проследить за заполнением строк, то альфа1-диапазон частот ЭЭГ с возрастом у школьников уменьшает связь с медленноволновыми диапазонами и увеличивает связь с альфа2-диапазоном, выступая тем самым в качестве фактора, регулирующего устойчивость волнового паттерна ЭЭГ

Для сравнительной оценки степени связи между возрастом детей и изменениями волнового паттерна в каждом отведении ЭЭГ мы использовали метод множественной регрессии, который позволил оценить эффект сочетанных перестроек взаимных переходов между компонентами всех диапазонов частот ЭЭГ с учетом их взаимной корреляции (с целью уменьшения избыточности предикторов нами была применена гребневая регрессия). Коэффициенты детерминации, характеризующие долю изменчивости изучаемых

показателей ЭЭГ, которая может быть объяснена влиянием возрастного фактора, варьируют в различных отведениях от 0,20 до 0,49 (табл. 1). Изменения структуры переходов с возрастом имеют определенные топические особенности. Так, наиболее высокие коэффициенты детерминации между анализируемыми параметрами и возрастом выявляются в затылочных (O1, O2), теменных (P3, Pz, P4) и задневисочных (T6, T5) отведениях, снижаясь в центральных и височных (T4, T3) отведениях, а также в F8 и F3, достигая наименьших значений в лобных отведениях (Fp1, Fpz, Fp2, F7, F4, Fz). Исходя из абсолютных значений коэффициентов детерминации, можно предположить, что в школьном возрасте наиболее динамично развиваются нейрональные структуры затылочных, височных и теменных областей. При этом изменения структуры переходов в теменно-височных областях в

правом полушарии (P4, T6, T4) более тесно связаны с возрастом, чем в левом (P3, T5, T3).

Таблица 1

Результаты множественной регрессии между переменной «возраст школьника» и вероятностями переходов между всеми частотными компонентами ЭЭГ (36 переменных) отдельно для каждого отведения

Отведение ЭЭГ	r	F	df	r ²
Fp1	0,504	5,47*	5,80	0,208
Fpz	0,532	5,55*	5,70	0,232
Fp2	0,264	4,73*	6,79	0,208
F7	0,224	7,91*	3,82	0,196
F3	0,383	6,91**	7,78	0,327
Fz	0,596	5,90**	7,75	0,295
F4	0,524	4,23*	7,78	0,210
F8	0,635	5,72**	9,76	0,333
T3	0,632	5,01**	10,75	0,320
C3	0,703	7,32**	10,75	0,426
Cz	0,625	6,90**	7,75	0,335
C4	0,674	9,29**	7,78	0,405
T4	0,671	10,83**	6,79	0,409
T5	0,689	10,07**	7,78	0,427
P3	0,692	12,15**	6,79	0,440
Pz	0,682	13,40**	5,77	0,430
P4	0,712	11,46**	7,78	0,462
T6	0,723	9,26**	9,76	0,466
O1	0,732	12,88**	7,78	0,494
Oz	0,675	6,14**	9,66	0,381
O2	0,723	9,27**	9,76	0,466

Примечание. r – коэффициент множественной корреляции между переменной «возраст школьника» и независимыми переменными, F – соответствующее ему значение F-критерия, уровни значимости: * p < 0,0005, ** p < 0,0001; r² – скорректированный на число степеней свободы (df) коэффициент детерминации.

Множественный коэффициент корреляции между возрастом школьников и значениями вероятностей переходов, рассчитанный по всей совокупности отведений (при этом из полного перечня переходов были заранее исключены переходы, корреляция которых с возрастом не достигала уровня значимости 0,05) составил 0,89, скорректированный r² = 0,72 (F (21,64) = 11,3, p < 0,0001). То есть 72 % от исходной изменчивости зависимой переменной (возраст) могут быть объяснены в рамках модели множественной линейной регрессии, где предикторами являются вероятности переходов в определенном наборе отведений ЭЭГ. В числе предикторов оказались: P3 (t/t) = -0,21; O2 (b2/t) = -0,18; C3 (b1/t) = -0,16; F7 (a1/t) = 0,25; T6 (d/t) = -0,20; P4 (b2/a1) = -0,21; O1 (t/t) = -0,21; T5 (a1/a2) = -0,20; F8 (t/d) = -0,18; O1 (d/t) = -0,08; F8 (t/t) = 0,22; T6 (a1/t) = -0,26; C3 (d/t) = -0,19; C3 (b2/b1) = 0,16; F8 (b2/t) = 0,19; Fp1 (a1/a2) = -0,17; P4 (t/t) = -0,15; P3 (a2/d) = 0,11; C4 (a2/a2) = 0,16;

Fp2 (b2/b1) = 0,11; O2 (t/a2) = -0,11 (в скобках i/j – переход от компонента i к компоненту j). Знак при регрессионном коэффициенте характеризует направления связи между переменными: если знак положительный, вероятность данного перехода с возрастом увеличивается, если знак отрицательный, вероятность данного перехода с возрастом уменьшается.

С помощью дискриминантного анализа по значениям вероятностей переходов ЭЭГ проведено разделение школьников по возрастным группам. Из всей совокупности переходных вероятностей для классификации были использованы только 26 параметров – по числу предикторов, полученных по результатам множественного линейного регрессионного анализа с гребневыми оценками параметров регрессии. Результаты разделения представлены на рис. 3. Видно, что полученные множества для разных возрастных групп перекрываются незначительно. По степени отклонения от центра кластера того или иного школьника или его попадания в другую возрастную группу можно судить о задержке или опережении темпов формирования волнового паттерна ЭЭГ.

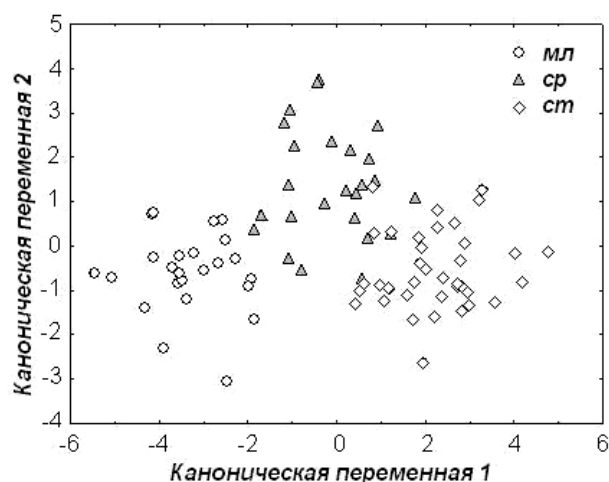


Рис. 3. Распределение школьников различных возрастных групп (мл – младшая, ср – средняя, ст – старшая) на дискриминантном поле. В качестве предикторов в дискриминантном анализе выбраны переходные вероятности компонентов (волн) ЭЭГ, значимые по результатам множественной регрессии.

Выявляются особенности в возрастной динамике формирования волнового паттерна ЭЭГ у девочек и мальчиков (табл. 2). По данным дисперсионного анализа, главный эффект фактора Пол более выражен в теменно-височных областях, чем в лобно-центральных и имеет акцент в отведениях правой гемисферы. Влияние фактора Пол состоит в том, что у мальчиков больше выражена связь альфа2- с низкочастотным альфа1-диапазоном, а у девочек связь альфа2- с высокочастотными – бета-диапазонами частот.

Эффект взаимодействия факторов, связанный с возрастной динамикой, лучше проявляется в параметрах ЭЭГ лобных и височных (также преимущественно справа) областях. В основном он связан с уменьшением по мере увеличения возраста школьников вероят-

Таблица 2

Различия вероятностей переходов между частотными компонентами ЭЭГ и их возрастной динамики у девочек и мальчиков (данные ANOVA по отведениям ЭЭГ)

Отведение ЭЭГ	Переход между частотными компонентами ЭЭГ	
	Главный эффект фактора Пол	Эффект взаимодействия факторов Пол*Возраст
Fp1		$\beta 1-\theta \alpha 1-\delta \theta-\theta$
Fp2		$\beta 2-\theta \alpha 1-\theta \theta-\beta 1$
Fz	$\alpha 2-\beta 1$	$\theta-\beta 1$
T4	$\beta 2-\alpha 1 \theta-\alpha 1$	$\beta 2-\theta \alpha 2-\theta \alpha 1-\theta \alpha 1-\delta$
C3	$\alpha 2-\alpha 1$	$\theta-\theta$
C4		$\alpha 1-\theta$
T5	$\alpha 2-\alpha 1$	
T6	$\alpha 2-\alpha 1 \alpha 2-\beta 1 \alpha 1-\beta 1$	$\alpha 2-\theta \alpha 1-\theta$
P3	$\alpha 2-\alpha 1$	
Pz		$\beta 1-\theta$
P4	$\alpha 2-\alpha 1 \beta 2-\alpha 1 \alpha 1-\theta$	$\alpha 1-\delta$
O1	$\alpha 2-\alpha 1$	$\theta-\delta$
O2	$\alpha 2-\alpha 1 \alpha 2-\beta 1 \alpha 1-\beta 2 \alpha 1-\alpha 1 \theta-\theta$	

Примечание. $\beta 2 \dots \delta$ — компоненты ЭЭГ. Представлены вероятности переходов с уровнем значимости влияния фактора Пол (взаимодействия факторов Пол и Возраст) $p < 0,01$. Отведения Fpz, F7, F8, F3, F4, T3, Cz, Oz в таблице не представлены из-за отсутствия значимых эффектов влияния фактора Пол и взаимодействия факторов.

ности переходов из альфа- и бета-диапазонов частот к тета-диапазону. При этом более быстрое снижение вероятности перехода от бета- и альфа-диапазонов к тета-диапазону частот у мальчиков отмечается между младшей и средней школьной возрастной группой, тогда как у девочек — между средней и старшей возрастной группой.

Обсуждение результатов

Таким образом, на основании проведенного анализа были выявлены частотные компоненты ЭЭГ, определяющие возрастную реорганизацию и специфику паттернов биоэлектрической активности мозга у школьников-северян. Получены количественные показатели формирования с возрастом динамических взаимоотношений основных ритмов ЭЭГ у детей и подростков с учетом гендерных особенностей, позволяющие контролировать темпы возрастного развития и возможные отклонения в динамике развития.

Так, у школьников младших классов устойчивая структура временной организации ритмики ЭЭГ обнаружена в затылочных, теменных и центральных отведениях. У большинства подростков 14–17 лет паттерн ЭЭГ хорошо структурирован не только в затылочно-теменных и центральных, но и в височных областях. Полученные данные подтверждают представления о последовательном развитии структур головного мозга и этапном становлении ритмогенеза и интегративных функций соответствующих областей мозга. Известно, что сенсорные и моторные зоны коры

созревают к начальному школьному периоду, позже созревают полимодальные и ассоциативные зоны, причем формирование лобной коры продолжается до зрелого возраста [10, 19]. В младшем возрасте волновая структура паттерна ЭЭГ носит менее организованный (диффузный) характер. Постепенно с возрастом структура паттерна ЭЭГ начинает приобретать организованный характер и к 17–18 годам приближается к таковой взрослых лиц.

Ядром функционального взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ у детей младшего школьного возраста является тета- и альфа1-диапазоны частот, в старшем школьном возрасте — альфа1- и альфа2-диапазоны частот. В период от 7 до 18 лет уменьшается вероятность взаимодействия волн всех диапазонов частот ритмики ЭЭГ с волнами дельта- и тета-диапазонов с одновременным увеличением взаимодействия с волнами бета- и альфа2-диапазонов. В наибольшей степени динамика анализируемых показателей ЭЭГ проявляется в теменных и височно-затылочных областях коры мозга. Наибольшие половые различия по анализируемым параметрам ЭЭГ приходится на пубертатный период. К 16–17 годам у девочек функциональное ядро взаимодействия волновых компонентов, поддерживающее структуру паттерна ЭЭГ, формируется в альфа2–бета1-диапазоне, тогда как у мальчиков — в альфа2–альфа1-диапазоне. Однако следует отметить, что возрастное формирование паттерна ЭЭГ в разных зонах коры больших полушарий идет гетерохронно, претерпевая некоторую дезорганизацию с увеличением тета-активности в периоды полового созревания. Эти отклонения от общей динамики наиболее выражены в пубертатный период у девочек.

В исследованиях [6, 12, 14] показано, что у детей в Архангельской области в сравнении с детьми, проживающими в Московской области, имеется отставание в половом созревании на один-два года. Это может быть обусловлено влиянием климатогеографических условий среды обитания, определяющих особенности гормонального развития детей в северных регионах [14].

Одним из факторов экологического неблагополучия среды обитания для человека на Севере является недостаток или избыток химических элементов в почве и воде. У жителей Архангельской области отмечен недостаток кальция, магния, фосфора, йода, фтора, железа, селена, кобальта, меди и других элементов [2]. Нарушения микро- и макроэлементного баланса было выявлено и у детей и подростков, чьи данные по ЭЭГ представлены в настоящей работе [13]. Это также может сказываться на характере возрастного морфофункционального развития различных систем организма, в том числе и ЦНС, поскольку эссенциальные и другие химические элементы являются составной частью многих белков и участвуют в важнейших молекулярно-биохимических процессах, а некоторые из них являются токсичными [7].

Характер адаптационных перестроек и степень

их выраженности во многом определяется адаптационными возможностями организма, зависящими от индивидуально-типологических особенностей, чувствительности и устойчивости к тем или иным воздействиям. Изучение особенностей развития организма ребенка и становление структуры ЭЭГ является важной основой для формирования представлений о разных этапах онтогенеза, раннего выявления нарушений и разработки возможных методов их коррекции.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований № 18 президиума РАН.

Список литературы

1. Бойко Е. Р. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 190 с.
2. Горбачев А. Л., Добродеева Л. К., Теддер Ю. Р., Шацова Е. Н. Биогеохимическая характеристика Северных регионов. Микроэлементный статус населения Архангельской области и прогноз развития эндемических заболеваний // Экология человека. 2007. № 1. С. 4–11.
3. Гудков А. Б., Лукманова И. Б., Раменская Е. Б. Человек в Приполярном регионе Европейского Севера. Эколого-физиологические аспекты. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. 184 с.
4. Демин Д. Б., Поскотинова Л. В., Кривоногова Е. В. Варианты возрастного формирования структуры ЭЭГ подростков Приполярных и Заполярных районов Европейского Севера // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия «Медико-биологические науки». 2013. № 1. С. 41–45.
5. Джос Ю. С., Нехорошкова А. Н., Грибанов А. В. Особенности электроэнцефалограммы и распределения уровня постоянного потенциала головного мозга у детей-северян младшего школьного возраста // Экология человека. 2014. № 12. С. 15–20.
6. Кубасов Р. В., Демин Д. Б., Типисова Е. В., Ткачев А. В. Гормональное обеспечение системой гипофиз – щитовидная железа – гонады у мальчиков в процессе полового созревания, проживающих в Коношском районе Архангельской области // Экология человека. 2004. Прил. Т. 1, № 4. С. 265–268.
7. Кудрин А. В., Громова О. А. Микроэлементы в неврологии. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2006. 304 с.
8. Лукманова И. Б., Волокитина Т. В., Гудков А. Б., Сафонова О. А. Динамика параметров психомоторного развития детей 7–9 лет // Экология человека. 2014. № 8. С. 13–19.
9. Нифонтова О. Л., Гудков А. Б., Щербакова А. Э. Характеристика параметров ритма сердца у детей коренного населения Ханты-Мансийского автономного округа // Экология человека. 2007. № 11. С. 41–44.
10. Новикова Л. А., Фарбер Д. А. Функциональное созревание коры и подкорковых структур в различные периоды по данным электроэнцефалографических исследований // Руководство по физиологии / под ред. Черниговского В. Н. Л. : Наука, 1975. С. 491–522.
11. Постановление Правительства РФ от 21.04.2014 г. № 366 «Об утверждении Государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
12. Сороко С. И., Бурых Э. А., Бекшаев С. С., Сидо-

ренко Г. В., Сергеева Е. Г., Хованских А. Е., Кормилицын Б. Н., Моралев С. Н., Ягодина О. В., Добродеева Л. К., Максимова И. А., Протасова О. В. Особенности формирования системной деятельности мозга у детей в условиях Европейского Севера (проблемная статья) // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. 2006. Т. 92, № 8. С. 905–929.

13. Сороко С. И., Максимова И. А., Протасова О. В. Возрастные и половые особенности содержания макро- и микроэлементов в организме детей на Европейском Севере // Физиология человека. 2014. Т. 40. № 6. С. 23–33.

14. Ткачев А. В. Влияние природных факторов Севера на эндокринную систему человека // Проблемы экологии человека. Архангельск, 2000. С. 209–224.

15. Цицерошин М. Н., Шеповальников А. Н. Становление интегративной функции мозга. СПб. : Наука, 2009. 250 с.

16. Baars, B. J. The conscious access hypothesis: Origins and recent evidence // Trends in Cognitive Sciences. 2002. Vol. 6, N 1. P. 47–52.

17. Clarke A. R., Barry R. J., Dupuy F. E., McCarthy R., Selikowitz M., Heaven P. C. L. Childhood EEG as a predictor of adult attention-deficit/hyperactivity disorder // Clinical Neurophysiology. 2011. Vol. 122. P. 73–80.

18. Loo S. K., Makeig S. Clinical utility of EEG in attention-deficit/hyperactivity disorder: a research update // Neurotherapeutics. 2012. Vol. 9, N 3. P. 569–587.

19. Sowell E. R., Trauner D. A., Gamst A., Jernigan T. L. Development of cortical and subcortical brain structures in childhood and adolescence: a structural MRI study // Developmental Medicine and Child Neurology. 2002. Vol. 44, N 1. P. 4–16.

References

1. Bojko E. R. *Fiziologo-biochimicheskie osnovy zhiznedeyatelnosti cheloveka na Severe* [Physiological and biochemical basis of human life in the North]. Yekaterinburg, 2005. 190 p. [in Russian]
2. Gorbachev A. L., Dobrodeeva L. K., Tedder Yu. R., Shacova E. N. Biogeochemical characteristics of the northern regions. Trace element status of the population of the Arkhangelsk region and the forecast of endemic diseases. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology], 2007, 1, pp. 4–11. [in Russian]
3. Gudkov A. B., Lukmanova I. B., Ramenskaya E. B. *Chelovek v Pripolyarnom regione Evropejskogo Severa. Ekologo-fiziologicheskie aspekty* [The man in the circumpolar region of the European North. Ecological and physiological aspects]. Arkhangelsk, 2013, 184 p.
4. Demin D. B., Poskotinova L. V., Krivonogova E. V. Variants of EEG Formation in Adolescents Living in Subpolar and Polar Regions of the Northern Russia. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federalnogo universiteta, seriya «Medikobiologicheskoe nauki»* [Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University, a series of “Life Sciences”]. 2013, 1, pp. 41–45. [in Russian]
5. Dzhos Yu. S., Nekhoroshkova A. N., Griбанov A. V. Peculiarities of EEG and DC-potential of the Brain in Northern Schoolchildren. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2014, 12, pp. 15–20. [in Russian]
6. Kubasov R. V., Demin D. B., Tipisova E. V., Tkachev A. V. Hormonal provision of pituitary-thyroid-gonad gland system in boys during puberty living in Konosha District of the Arkhangelsk Region. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2004, 1 (4), pp. 265–268. [in Russian]

7. Kudrin A. V., Gromova O. A. *Mikroelementy v neurologii* [Microelements in neurology]. Moscow, 2006, 304 p.

8. Lukmanova N. B., Volokitina T. V., Gudkov A. B., Safonova O. A. Changes of Psychomotor development parameters in 7-9 y. o. children. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2014, 8, pp. 13-19. [in Russian]

9. Nifontova O. L., Gudkov A. B., Shherbakova A. Je. Description of parameters of cardiac rhythm in indigenous children in Khanty-Mansiisky autonomous area. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2007, 11, pp. 41-44. [in Russian]

10. Novikova L. A., Farber D. A. *Funkcionalnoe sozrevanie kory i podkorkovykh struktur v razlichnye periody po dannym elektroencefalograficheskikh issledovaniy. Rukovodstvo po fiziologii* [Functional maturation of the cortex and subcortical structures in different periods according to electroencephalographic studies. Manual of Physiology]. Ed. V. N. Chernigovsky. Leningrad, 1975, pp. 491-522.

11. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 21.04.2014 g. № 366 «Ob utverzhenii Gosudarstvennoy programmy Rossijskoj Federacii «Socialno-ekonomicheskoe razvitie Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda» Dostup iz sprav.- pravovoj sistemy «KonsultantPlyus»* [Government Decree of 04.21.2014, № 366 "On approval of the State program of the Russian Federation "Social-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period till 2020". Access from the reference and legal system "ConsultantPlus"].

12. Soroko S. I., Burykh E. A., Bekshaev S. S., Sidorenko G. V., Sergeeva E. G., Khovanskich A. E., Kormilicyn B. N., Moralev S. N., Yagodina O. V., Dobrodeeva L. K., Maksimova I. A., Protasova O. V. Characteristics of the brain system activity and vegetative function formation in children under conditions of the European north (a problem study). *Rossiiskii fiziologicheskii jurnal imeni I. M. Sechenova / Rossiiskaia akademiia nauk*. 2006, 92 (8), pp. 905-929. [in Russian]

13. Soroko S. I., Maksimova I. A., Protasova O. V. Age and gender characteristics of the content of macro- and trace elements in the organisms of the children from the European North. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2014, 40 (6), pp. 23-33. [in Russian]

14. Tkachev A. V. *Vliyanie prirodnykh faktorov Severa na endokrinnuyu sistemu cheloveka. Problemy ekologii cheloveka* [The influence of natural factors on the North human endocrine system. Problems of Human Ecology]. Arkhangelsk. 2000, pp. 209-224.

15. Ciceroshin M. N., Shepovalnikov A. N. *Stanovlenie integrativnoj funkicii mozga* [Formation of integrative function of the brain]. St. Petersburg, 2009, 250 p.

16. Baars B. J. The conscious access hypothesis: Origins and recent evidence. *Trends in Cognitive Sciences*. 2002, 6 (1), pp. 47-52.

17. Clarke A. R., Barry R. J., Dupuy F. E., McCarthy R., Selikowitz M., Heaven P. C. L. Childhood EEG as a predictor of adult attention-deficit/hyperactivity disorder. *Clinical Neurophysiology*. 2011, 122, pp. 73-80.

18. Loo S. K., Makeig S. Clinical utility of EEG in attention-deficit/hyperactivity disorder: a research update. *Neurotherapeutics*. 2012, 9 (3), pp. 569-587.

19. Sowell E. R., Trauner D. A., Gamst A., Jernigan T. L. Development of cortical and subcortical brain structures in childhood and adolescence: a structural MRI study. *Developmental Medicine and Child Neurology*. 2002, 44 (1), pp. 4-16.

Контактная информация:

Рожков Владимир Павлович — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Российской академии наук»
 Адрес: 194223, г. Санкт-Петербург, пр. Тореца, д. 44
 E-mail: vlozhkov@mail.ru