

УДК 612.821:612.822.3

РЕЗОНАНСНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗРЕЛОСТИ КОРКОВОЙ РИТМИКИ У МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

© 2022 г. Л.В. Савчук*, С.А. Полевая*, С.Б. Парин*, А.Т. Бондарь**, А.И. Федотчев**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

**Институт биофизики клетки РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», 142290, Пушкино, Московской области, ул. Институтская, 3
E-mail: fedotchev@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 31.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Экспериментально тестируется возможность оценки уровней активности резонансных и адаптационных механизмов и механизмов нейропластичности у школьников семи-восьми лет путем резонансного сканирования и анализа электроэнцефалограммы. При ритмической фотостимуляции с увеличивающейся от 4 до 15 Гц частотой у каждого школьника оценивали наличие электроэнцефалограммных реакций усвоения ритма (резонанс на частоте стимуляции) и реакций мультипликации ритма (резонанс на кратных частотах), а также сформированность и устойчивость альфа-диапазона электроэнцефалограммы. Предложен индекс зрелости корковой ритмики как индивидуальная сумма этих признаков. Установлено, что между индексом зрелости корковой ритмики и уровнем выполнения теста Тулуз-Пьерона, оценивающим когнитивные и исполнительские функции ребенка, существует тесная взаимосвязь. Эти показатели достоверно отличались от контроля у групп школьников, демонстрирующих отклонения от нормы и признаки школьной дезадаптации. Полученные данные свидетельствуют, что индекс зрелости корковой ритмики может служить маркером готовности ребенка к обучению в школе.

Ключевые слова: резонансное сканирование, электроэнцефалограмма, зрелость корковой ритмики, готовность детей к обучению, школьная дезадаптация, когнитивные и исполнительские функции.

DOI: 10.31857/S0006302922020181

Прием резонансного сканирования заключается в динамическом спектральном анализе электроэнцефалограммы (ЭЭГ) при предъявлении человеку ритмических световых стимулов с постепенно возрастающей частотой в диапазоне основных ритмов ЭЭГ [1]. Данный подход позволяет выявлять частотные компоненты в спектре ЭЭГ, характерные и значимые для данного испытуемого [2]. Выявляя тонко настроенные осцилляторы в индивидуальных спектрах ЭЭГ, метод позволяет использовать их в процедурах ЭЭГ-синхронизированной сенсорной стимуляции для нефармакологической регуляции функциональных состояний организма [3, 4].

К настоящему времени ряд закономерностей проявления резонансных ЭЭГ реакций человека на ритмические световые воздействия с изменя-

ющейся частотой уже исследован. Так, показано, что конкретные параметры резонансных ЭЭГ-эффектов проявляют высокую стабильность у каждого индивида [5]. В то же время они демонстрируют значительное варьирование от человека к человеку [6, 7], отражая индивидуальное соотношение уровней активности резонансных и адаптационных механизмов центральной нервной системы (ЦНС) и механизмов нейропластичности [8, 9].

Перечисленные данные позволяют предположить, что закономерности проявления резонансных ЭЭГ-реакций на фотостимуляцию с частотой, изменяющейся в пределах основных ритмов электрической активности мозга, могут быть использованы в качестве маркера сформированности базовых механизмов деятельности ЦНС у отдельных категорий испытуемых. В частности, результаты резонансного сканирования и анализа ЭЭГ могут способствовать решению таких актуальных проблем современной науки и образова-

Сокращения: ЭЭГ – электроэнцефалограмма, ЦНС – центральная нервная система, СДВГ – синдром дефицита внимания с гиперактивностью.

ния, как определение готовности детей к школьному обучению [10] и выяснение причин школьной дезадаптации у учащихся младших классов [11].

Проверка данного предположения осуществлена в ходе выполнения социального проекта «Здоровое будущее», который реализуется в Нижнем Новгороде и предполагает междисциплинарное взаимодействие клиницистов, психофизиологов, школьных психологов и педагогов при комплексном мониторинге учащихся начальных классов, демонстрирующих трудности в обучении и признаки школьной дезадаптации [12]. В ходе клинических исследований у этих детей были диагностированы разнообразные отклонения от нормы, включая органическую задержку мозгового развития (энцефалопатии), синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) и тревожное расстройство. В качестве контроля к обследованиям привлекались школьники того же возраста без отклонений от нормы, которые не демонстрировали трудности в обучении и признаки школьной дезадаптации.

Задача исследования заключалась в сопоставлении результатов резонансного сканирования ЭЭГ у школьников семи-восьми лет, испытывающих и не испытывающих трудности в обучении, для определения зрелости системных механизмов деятельности мозга у младших школьников и уточнения причин школьной дезадаптации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытуемые. В исследовании приняли участие 65 учащихся младших классов в возрасте семи-восьми лет. 45 школьников были направлены на обследование по согласованию с клиницистами, школьными психологами и родителями в связи с трудностями обучения и постановкой предварительного диагноза (энцефалопатии – 12 случаев, СДВГ – 25 случаев, тревожное расстройство – 8 случаев), а 20 школьников составили контрольную группу без признаков отклонений от нормы и школьной дезадаптации.

Схема исследования. Каждое обследование ребенка состояло из нескольких этапов, включая выполнение корректурной пробы, стандартное ЭЭГ-исследование и проведение резонансного сканирования.

Корректурную пробу выполняли в компьютерном варианте, известном как тест Тулуз-Пьерона, который состоял в дифференцировании стимулов, близких по форме и содержанию, при установке на максимальную скорость и точность. Выполнение теста представляет собой интенсивную когнитивную нагрузку, требующую постоянного напряжения внимания. Каждому ребенку присваивается балл от 0 до 2, соответствующий

низкому, среднему и высокому уровню выполнения теста на основании известных возрастных норм скорости и точности его выполнения [13].

ЭЭГ-исследование осуществляли при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21-26 «Энцефалан–131–03» компании «Медиком–МТД» (Таганрог, Россия). Запись вели от 16 электродов, расположенных по стандартной схеме «10–20» с референтными электродами на мочках ушей и электродом заземления в вертексе. Частота дискретизации – 250 Гц. Использовали следующие параметры фильтрации исходного сигнала: частота среза фильтра верхних частот – 0.5 Гц, частота среза фильтра нижних частот – 70 Гц, режекторный фильтр на частоте сети – 50 Гц. Экспертная оценка ЭЭГ проводилась опытным специалистом и состояла в определении наличия реакций усвоения ритма фотостимуляции (резонансных ЭЭГ-реакций на частоте стимуляции), наличия нелинейных реакций на кратных частотах или реакций мультипликации (резонансных ЭЭГ-реакций на частоте гармоник), а также в оценке сформированности и устойчивости альфа-диапазона ЭЭГ. При количественном анализе ЭЭГ использовали метод дискретного преобразования Фурье для определения выраженности ЭЭГ в следующих частотных диапазонах: тета (4–8 Гц), альфа (8–13 Гц), бета (13–21 Гц), а также для определения пиковой частоты альфа-ритма.

В процессе резонансного сканирования фотостимуляцию осуществляли с помощью красных светодиодов с длиной волны 650 нм, смонтированных в очки со светонепроницаемыми линзами. Световые стимулы с мощностью, не превышающей 100 мкВт, подавали на светодиоды через усилитель от компьютера, управляющего стимуляцией по специальной программе. Она предусматривала предъявление серии вспышек со ступенчато нарастающей частотой в диапазоне от 4.0 до 15.0 Гц с шагом 0.25 Гц. Продолжительность стимуляции на каждом шаге с фиксированной частотой составляла 5 с, а общая продолжительность фотостимуляции – 220 с.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ «Сигма-Плот 11.0». После оценки нормальности распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка вычисляли средние для групп значения показателей (M) и стандартные ошибки (m). Для определения уровней значимости различий P каждого группового показателя с контролем использовали непараметрический критерий знаковых рангов для малых выборок Вилкоксона–Манна–Уитни (Mann–Whitney Rank Sum Test). Оценку уровней значимости сдвигов (со знаком) показателей при воздействии относительно фона осуществляли с помощью парного t -критерия Стьюдента. Различия считались статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

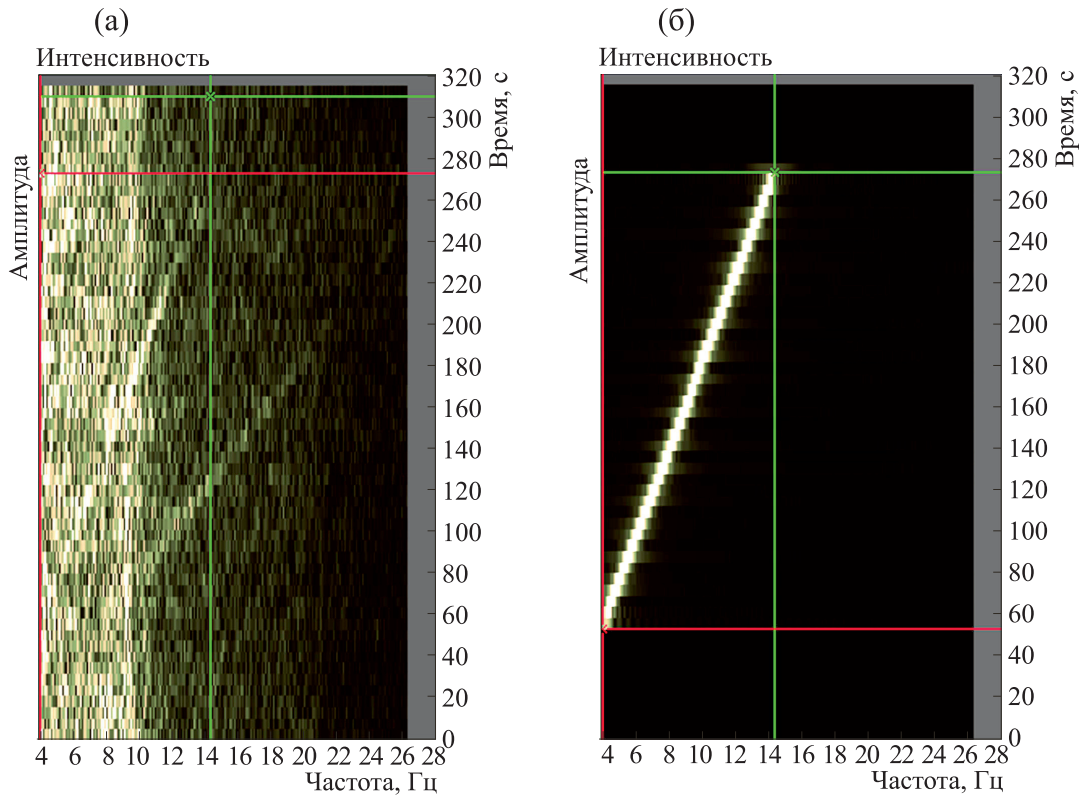


Рис. 1. Динамика спектров ЭЭГ (а) и стимуляции (б) в ходе обследования испытуемого № 310. По оси абсцисс – частота спектра, Гц; по оси ординат – время эксперимента, с. Ось Z – спектральная плотность, отраженная интенсивностью окраски.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Индивидуальные особенности изменений ЭЭГ в ходе резонансного сканирования анализировали путем последовательного вычисления спектров ЭЭГ и спектров стимуляции по ходу каждого обследования, что позволяло наглядно сопоставлять их динамики. Ниже представлен типичный пример такой спектральной динамики для одного из испытуемых (рис. 1).

На рис. 1 можно видеть, что уже при первых световых воздействиях и по мере увеличения их частоты в спектрах ЭЭГ наблюдаются резонансные спектральные пики, точно совпадающие по частоте с действующей в данный момент частотой стимуляции. Кроме того, резонансные спектральные пики наблюдаются также на частоте второй гармоники стимуляции. Эти спектральные пики образуют на левой части рисунка наклонные прямые линии, отражающие резонансную активацию ЭЭГ на частоте стимуляции и ее гармоники. Можно также видеть, что у данного испытуемого альфа-диапазон ЭЭГ сформирован, а альфа-пик устойчиво регистрируется на частоте около 9.5 Гц.

При экспертном анализе полученных записей выяснилось, что описанная спектральная дина-

мика с наличием каждого из трех анализируемых признаков ЭЭГ (усвоение ритма, мультипликация и устойчивость альфа-диапазона) регистрируется не у всех испытуемых. У части обследуемых резонансные ЭЭГ-реакции в ответ на фотостимуляцию не отмечались, а доминирующим являлся не альфа-, а тета-диапазон ЭЭГ. Типичный пример динамики спектров ЭЭГ с отсутствием резонансных ЭЭГ-реакций и несформированным альфа-диапазоном представлен на рис. 2.

На рис. 2 можно видеть, что каких-либо закономерных перестроек в спектре ЭЭГ с увеличением частоты фотостимуляции не происходит, а локальные пики на спектральных кривых регулярно отмечаются в диапазоне тета-ритма ЭЭГ.

В результате экспертного анализа ЭЭГ для всех групп испытуемых была установлена частота встречаемости каждого признака ЭЭГ и проведена оценка отличия соответствующих величин от контроля (табл. 1).

Данные табл. 1 показывают, что в контрольной группе регистрируется максимальная встречаемость каждого из трех анализируемых признаков. В группах с отклонениями от нормы эти признаки были представлены значительно реже, особенно при энцефалопатиях, а уровни различия от

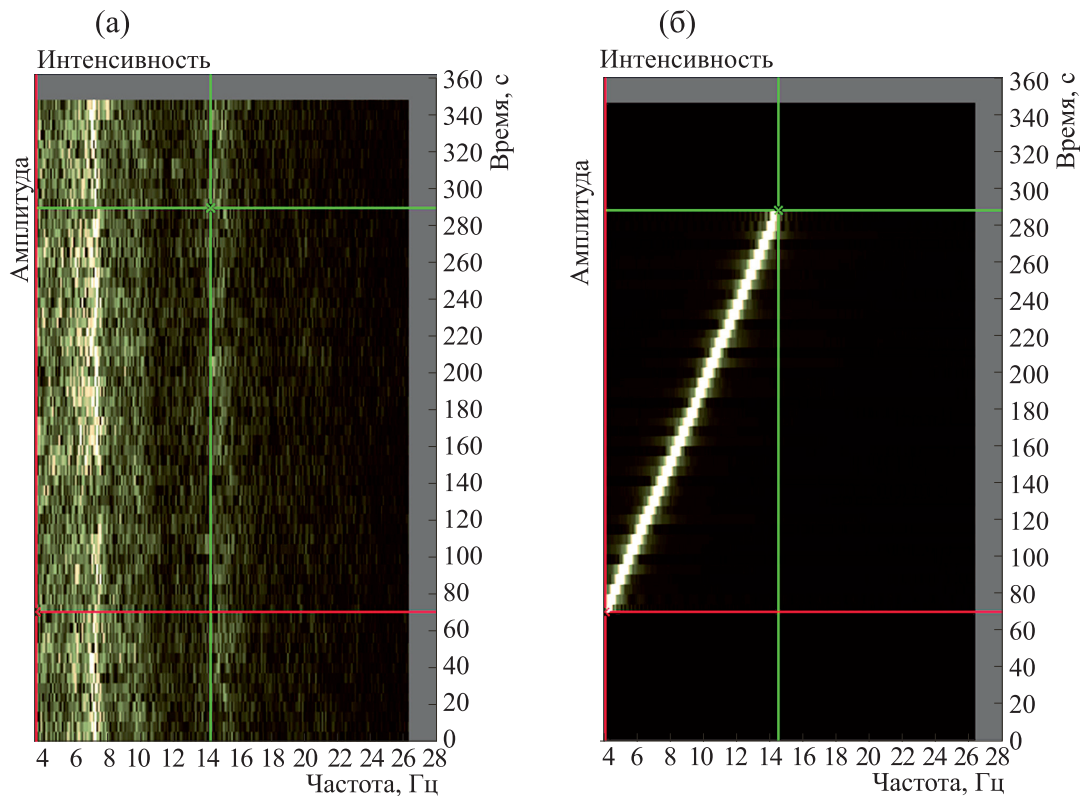


Рис. 2. Динамика спектров ЭЭГ (а) и стимуляции (б) в ходе обследования испытуемого № 307. Обозначения как на рис. 1.

контроля оказались высоко значимыми. Наименьшие различия от контроля зарегистрированы в группе с тревожными расстройствами.

На основании полученных индивидуальных оценок встречаемости признаков каждому ребен-

ку присваивался балл от 0 до 3, равный сумме зарегистрированных у него признаков. Этот показатель рассматривался как интегральный индекс зрелости корковой ритмики, характерный для данного испытуемого.

Таблица 1. Экспертные оценки ключевых признаков ЭЭГ при фотостимуляции и уровень их отличия от контроля в разных группах испытуемых

Признак ЭЭГ	Группа	Наличие признака, %	Уровень отличия P от контроля
Резонанс на частоте стимуляции – усвоение ритма	Контроль	95.0±5.0	–
	Энцефалопатии	50.0 ± 15.1	0.002
	СДВГ	48.0 ± 10.2	0.001
	Тревожное расстройство	50.0 ± 18.9	0.007
Резонанс на частоте гармоник – мультипликация	Контроль	65.0 ± 10.9	–
	Энцефалопатии	8.3 ± 8.3	0.002
	СДВГ	24.0 ± 8.7	0.006
	Тревожное расстройство	25.0 ± 16.4	0.064
Сформированность и устойчивость альфа-диапазона ЭЭГ	Контроль	95.0 ± 5.0	–
	Энцефалопатии	41.7 ± 14.9	0.001
	СДВГ	60.0 ± 10.0	0.008
	Тревожное расстройство	62.5 ± 18.3	0.032

Примечание. Жирным шрифтом выделены величины с уровнем значимости $P < 0.05$.

Таблица 2. Показатели зрелости корковой ритмики и выполнения корректурной пробы, а также их отличия от контроля в разных группах испытуемых

Показатель	Группа	Среднее значение	Уровень отличия <i>P</i> от контроля
Индекс зрелости корковой ритмики (баллы)	Контроль	2.60 ± 0.13	—
	Энцефалопатии	1.00 ± 0.24	0.001
	СДВГ	1.32 ± 0.16	0.001
	Тревожное расстройство	1.25 ± 0.31	0.001
Уровень выполнения теста Тулуз-Пьерона (баллы)	Контроль	1.90 ± 0.06	—
	Энцефалопатии	0.50 ± 0.15	0.001
	СДВГ	0.84 ± 0.12	0.001
	Тревожное расстройство	0.75 ± 0.25	0.001

Примечание. Жирным шрифтом выделены величины с уровнем значимости различий $P < 0.05$.

Выяснилось, что индекс зрелости корковой ритмики тесно взаимосвязан с уровнем выполнения теста Тулуз-Пьерона. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между этими показателями оказался высоким и достоверным ($r = 0.557$, $P < 0.001$). Значения обоих показателей для разных групп испытуемых представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что у контрольной группы экспертные оценки ЭЭГ и результаты выполнения теста демонстрируют максимальные значения. Оба этих показателя во всех группах с

отклонениями от нормы были достоверно ниже, чем в контроле. Наибольшие отличия от нормы зарегистрированы в группе с энцефалопатиями.

У всех исследуемых групп школьников были также сопоставлены количественные показатели ЭЭГ: сдвиги мощности тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ, а также пиковой частоты альфа-ритма ЭЭГ при фотостимуляции относительно фона (табл. 3).

Данные табл. 3 показывают, что под влиянием фотостимуляции в группе контроля происходит достоверный рост выраженности альфа- и бета-

Таблица 3. Сдвиги мощности основных ритмов и пиковой частоты ЭЭГ при стимуляции относительно фона и уровень значимости этих сдвигов в разных группах испытуемых

Показатель	Группа	$M \pm m$	Уровень значимости <i>P</i>
Сдвиг мощности тета-ритма ЭЭГ (отн.ед.)	Контроль	-0.40 ± 0.60	0.528
	Энцефалопатии	-0.50 ± 0.33	0.203
	СДВГ	-0.96 ± 0.55	0.098
	Тревожное расстройство	-0.50 ± 0.86	0.582
Сдвиг мощности альфа-ритма ЭЭГ (отн.ед.)	Контроль	1.45 ± 0.65	0.025
	Энцефалопатии	1.16 ± 0.50	0.039
	СДВГ	0.96 ± 0.42	0.018
	Тревожное расстройство	0.25 ± 0.31	0.451
Сдвиг мощности бета-ритма ЭЭГ (отн.ед.)	Контроль	0.40 ± 0.15	0.017
	Энцефалопатии	0.16 ± 0.20	0.438
	СДВГ	0.04 ± 0.15	0.847
	Тревожное расстройство	0.25 ± 0.16	0.170
Сдвиг пиковой частоты ЭЭГ (Гц)	Контроль	0.40 ± 0.13	0.008
	Энцефалопатии	0.25 ± 0.13	0.250
	СДВГ	0.16 ± 0.09	0.156
	Тревожное расстройство	0.18 ± 0.26	0.504

Примечание. Жирным шрифтом выделены величины сдвигов с уровнем значимости $P < 0.05$.

ритмов, а также увеличение пиковой частоты ЭЭГ. Достоверный рост мощности альфа-ритма при фотостимуляции происходит также при энцефалопатиях и СДВГ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного исследования подтверждают высказанное предположение о том, что при фотостимуляции с частотой, изменяющейся в пределах ЭЭГ-ритмов, появляется возможность оценивать сформированность базовых механизмов деятельности ЦНС у младших школьников. Показано, что в этих условиях можно наглядно наблюдать три признака резонансных ЭЭГ реакций на фотостимуляцию. При этом проявление резонансных ЭЭГ-ответов на частоте стимуляции (усвоение ритма) можно считать критерием адаптационного потенциала мозга, а наличие резонанса на частоте гармоник (мультипликация ритма) – отражением уровня активности механизмов нейропластичности [6]. Кроме того, при резонансном сканировании ЭЭГ можно оценивать также сформированность и устойчивость альфа-диапазона ЭЭГ в соответствии с возрастными нормами становления доминирующей ритмики мозга у младших школьников [14].

Важно подчеркнуть, что индивидуальная сумма анализируемых ЭЭГ-признаков, или индекс зрелости корковой ритмики, демонстрирует высокозначимую взаимосвязь с уровнем выполнения теста Тулуз-Пьерона, который позволяет адекватно оценивать когнитивные и исполнительские функции ребенка [15]. Поскольку оба этих показателя достоверно выше у школьников контрольной группы, не испытывающих трудностей в обучении, индекс зрелости корковой ритмики может быть предложен в качестве объективного маркера готовности детей к школьному обучению.

Полученные в работе данные могут быть также использованы при уточнении возможных причин школьной дезадаптации у учащихся младших классов. Из литературы известно, что успешность ребенка в обучении зависит как от личностных характеристик, так и от психофизиологической зрелости базовых механизмов деятельности мозга [16]. В то же время отсутствуют однозначные данные о том, снижение каких функций наиболее специфично для неуспевающих школьников [17]. Судя по полученным данным, наибольшие отклонения от нормы зарегистрированы у детей с наличием различных органических поражений ЦНС в виде энцефалопатий. Среди выявленных отличительных признаков выделяются такие показатели, как минимальный уровень активности адаптационных и резонансных механизмов ЦНС, значимо сниженный индекс зрелости корковой ритмики, а также минимальный уровень когни-

тивных и исполнительских функций по тесту Тулуз-Пьерона.

В современной литературе подчеркивается важность проведения сеансов ЭЭГ-мониторинга у детей с органическими заболеваниями головного мозга [18]. В то же время отмечается недостаточность и противоречивость сведений о количественных признаках ЭЭГ при разных типах психопатологий [19] и при энцефалопатиях [20]. Поэтому полученные нами данные об отличительных особенностях ЭЭГ у младших школьников с энцефалопатиями носят приоритетный характер и могут рассматриваться как ЭЭГ-маркеры данного вида мозговой патологии.

Существенные отличительные особенности зарегистрированы также у школьников с СДВГ. У них выявлены значимо сниженные показатели индекса зрелости корковой ритмики и показатели выполнения корректурной пробы. Полученные данные дополняют общепринятые представления об особенностях спектральной структуры ЭЭГ [21] и низком когнитивном темпе [22] у детей с СДВГ.

При тревожных расстройствах у младших школьников, испытывающих трудности в обучении, зарегистрированы наименьшие отклонения от нормы. У них отмечены сниженные показатели индекса зрелости корковой ритмики и менее успешное, чем в контроле, выполнение корректурной пробы. Эти данные позволяют предположить, что тревожность является психологическим аспектом академической адаптации учащихся младшего школьного возраста к обучению, отражающим трудности включения ребенка в образовательную среду [11].

Таким образом, проведенное исследование позволило уточнить, какие функции учащихся младших классов являются главными причинами неуспешного включения ребенка в образовательную среду. Среди наиболее значимых можно назвать такие, как недостаточная зрелость резонансных и адаптационных механизмов ЦНС и механизмов нейропластичности, а также пониженный уровень когнитивных и исполнительских функций.

Важными представляются полученные данные о количественных ЭЭГ-эффектах резонансного сканирования, демонстрирующие достоверный рост мощности альфа-ритма ЭЭГ при фотостимуляции относительно фона у большинства испытуемых. По-видимому, фотостимуляция «высвечивает» посредством резонанса тонкую структуру индивидуального спектра ЭЭГ и выявляет потенциальные резонансно-активные осцилляторы мозга [2]. Такая резонансная активация потенциальных резонаторов в ЭЭГ может служить приемом стимуляции механизмов нейропластичности и повышения отзывчивости мозга к адап-

тивной нейростимуляции. В пользу данного предположения свидетельствуют недавние данные о том, что успешная когнитивная реабилитация пациентов с инсультами достигается только при условии, что лечебным сеансам ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции предшествуют процедуры резонансного сканирования [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резонансное сканирование путем предъявления световых ритмических стимулов со ступенчато увеличивающейся частотой позволяет наблюдать у семи-восьмилетних школьников наличие ЭЭГ реакций усвоения ритма (резонанс на частоте стимуляции) и реакций мультипликации ритма (резонанс на кратных частотах), а также сформированность и устойчивость альфа-диапазона ЭЭГ. Индивидуальная сумма этих признаков, или индекс зрелости корковой ритмики, демонстрирует тесную взаимосвязь с уровнем выполнения теста Тулуз-Пьерона, оценивающим когнитивные и исполнительские функции ребенка. Оба этих показателя достоверно отличаются от контроля у групп школьников, демонстрирующих отклонения от нормы и признаки школьной дезадаптации. Резонансное сканирование и анализ ЭЭГ как элементы методологии цифрового психофизиологического картирования являются эффективным инструментом выявления точных количественных признаков, которые определяют психофизиологический статус младших школьников, испытывающих и не испытывающих трудности при обучении. Выявленные особенности каждой из обследованных групп могут способствовать объективному уточнению причин школьной дезадаптации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Пущинского научного центра биологических исследований РАН (проект АААА-А20-120101390066-3) и Государственного задания Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (АААА-А20-120122190088-2).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (принятой в июне 1964 г. в Хельсинки, Финляндия и пересмотрен-

ной в октябре 2000 г. в Эдинбурге, Шотландия). От родителей каждого ребенка получено информированное согласие на его участие в обследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. И. Федотчев, А. Т. Бондарь, А. А. Маевский и Л. П. Якупова, Журн. высш. нерв. деятельности им. И.П. Павлова **46** (3), 447 (1996).
2. А. И. Федотчев, Физиология человека **23** (4), 117 (1997).
3. N. Salansky, A. Fedotchev, and A. Bondar. Neurosci. Biobehav. Rev. **22** (3), 395 (1998).
4. А. И. Федотчев. Биофизика **64** (2), 358 (2019).
5. A. I. Fedotchev, A. T. Bondar, and V. F. Kononov. Int. J. Psychophysiol. **9** (2), 189 (1990).
6. А. И. Федотчев, Биофизика **46** (1), 112 (2001).
7. А. Т. Бондарь, А. В. Ларионова, О. В. Пивоварова и А. И. Федотчев, Биофизика **49** (5), 928 (2004).
8. А. И. Федотчев, А. Т. Бондарь и И. Г. Акоев, Журн. высш. нерв. деятельности им. И.П. Павлова **51** (1), 17 (2001).
9. А. И. Федотчев, С. Б. Парин и С. А. Полевая. Биофизика **66** (2), 408 (2021).
10. Н. Т. Колесник, Новое в психолого-педагогических исследованиях, № 1 (61), 72 (2021).
11. М. В. Григорьева, Р. М. Шамионов, Е. С. Гринина и др., Перспективы науки и образования, № 4 (52), 247 (2021).
12. О. В. Баландина, Е. Д. Божкова, В. В. Дворянинова и др., Мед. альманах, № 2 (59), 24 (2019).
13. Л. А. Ясюкова, *Методика определения готовности к школе: прогноз и профилактика проблем обучения в начальной школе: методическое пособие* (ИМА-ТОН, СПб, 2006).
14. В. Б. Войнов. Успехи физиол. наук **45** (3), 66 (2014).
15. N. Babkina, Behav. Sci. (Basel) **9** (12), 158 (2019).
16. В. Л. Ефимова, Психология образования в поликультурном пространстве, № 2 (50), 28 (2020).
17. Н. А. Хохлов и Е. Д. Словенко, Вестн. ММГУ. Сер. 14. Психология, № 3, 291 (2020).
18. X. L. Bozarth, J. McGuire, and E. Novotny. Pediatr. Neurol. **101**, 11 (2019).
19. M. McVoy, S. Lytle, E. Fulchiero, et al., Psychiatry Res. **279**, 331 (2019).
20. A. Yuliati and A. R. B. Weber, J. Clin. Neurophysiol. **36** (3), 181 (2019).
21. A. R. Clarke, R. J. Barry, and S. Johnstone, Clin. Neurophysiol. **131** (7), 1463 (2020).

22. Б. М. Коган и Т. Г. Куликова, Системная психология и социология, № 2 (26), 47 (2018). 23. E. A. Mukhina, S. A. Polevaya, S. B. Parin, and A. I. Fedotchev. *Opera Med. Physiol.* **8** (4), 90 (2021).

Resonance Scanning and Analysis of the Electroencephalogram in Determining the Maturity of Cortical Rhythms in Younger Schoolchildren

L.V. Savchuk*, S.A. Polevaya*, S.B. Parin*, A.T. Bondar, and A.I. Fedotchev****

**National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, prosp. Gagarina 23, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

***Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Institutskaya ul. 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

The possibility of assessing the levels of activity of resonant and adaptive mechanisms and mechanisms of neuroplasticity in schoolchildren 7–8 years old by means of resonant scanning and analysis of the electroencephalogram is being experimentally tested. During rhythmic photostimulation with a smoothly increasing frequency from 4 to 15 Hz, each schoolchildren was assessed for the presence of electroencephalogram reactions of rhythm entrainment (resonance at the stimulation frequency) and rhythm multiplication (resonance at multiple frequencies), as well as the formation and stability of the electroencephalogram alpha range. The maturity index of cortical rhythms is proposed as an individual sum of these features. It has been established that there is a close relationship between the maturity index of the cortical rhythms and the performance level of the Toulouse-Pieron test, which assesses the cognitive and executive functions of the child. These indicators significantly differed from the control in groups of schoolchildren demonstrating deviations from the norm and signs of school maladaptation. The data obtained indicate that the cortical rhythms maturity index can serve as a marker of a child's readiness for schooling.

Keywords: resonant scanning; electroencephalogram; maturity of cortical rhythms; children's readiness for learning; school maladjustment; cognitive and executive functions