

УДК 612.822

РЕАКТИВНОСТЬ СЕНСОМОТОРНОГО БЕТА-РИТМА ДЕТЕЙ СВЯЗАНА С ИНТЕЛЛЕКТОМ, ТАК КАК ОТРАЖАЕТ АКТИВНОСТЬ ЗЕРКАЛЬНОЙ И АНТИЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМ МОЗГА

Павленко В. Б., Эйсмонт Е. В., Галкин Д. В., Кайда А. И.

*Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: vpav55@gmail.com*

У 36 мальчиков и девочек в возрасте от пяти до четырнадцати лет оценивали уровень когнитивного развития с помощью теста Векслера, а также изучали модуляции центрального бета-ритма ЭЭГ в ситуациях выполнения самостоятельных движений компьютерной мышью, восприятия и имитации движений других людей. Выявлены значимые позитивные корреляции между уровнем интеллекта (прежде всего, невербального) и мощностью бета1-ритма в ситуации выполнения движений и наблюдения за ними. Полученные данные обсуждаются в свете концепции зеркальной и антизеркальной систем мозга.

Ключевые слова: ЭЭГ, интеллект, бета-ритм, движения, дети, система зеркальных и антизеркальных нейронов.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение взаимосвязи индивидуальных особенностей паттерна ЭЭГ и уровня когнитивного развития у детей является актуальным направлением современной нейро- и психофизиологии. Ранее группой исследователей [1] обнаружено влияние значений локальных амплитуд в тета- и альфа-диапазонах ЭЭГ, зарегистрированной в условиях устойчивого внимания, на оценки интеллекта детей в возрасте 5–6 лет. Авторами данной работы подчеркивается, что связи между спектральными характеристиками ЭЭГ и уровнем когнитивного развития необходимо изучать в условиях, когда испытуемые находятся в активном состоянии, а не в покое, при закрытых глазах. Важнейшими активными состояниями ребенка являются ситуации взаимодействия с взрослым. В исследовательской практике нашей лаборатории регистрируется ЭЭГ детей в условиях экспериментальной парадигмы, включающей наблюдение за действиями взрослого экспериментатора и имитацию его действий. Именно в таких ситуациях, как считает ряд исследователей, активируется система зеркальных нейронов мозга (см. обзор [2]). Ранее нами выявлены взаимосвязи между центральным альфа-ритмом, зарегистрированным в условиях указанной экспериментальной парадигмы, и уровнем когнитивного развития детей [3]. Центральный альфа-ритм является одним из компонентов сенсомоторного (роландического), или мю-ритма ЭЭГ. Другим компонентом сенсомоторного ритма является бета-активность. В предыдущей работе [4] нами показано, что в ситуациях

выполнения самостоятельных движений, восприятия и имитации движений других людей у детей в возрасте 4–14 лет развиваются специфические модуляции сенсомоторного бета-ритма, отражающиеся в значениях индекса синхронизации/десинхронизации (ИСД). При этом значения ИСД у разных детей, даже близкого возраста, сильно различались. Поскольку реактивность сенсомоторного бета-ритма, как предполагают, отражает изменение активации зеркальных нейронов, расположенных в моторной зоне коры [5], а зеркальная система является критически важным компонентом понимания действий окружающих [2, 6, 7], мы предполагаем, что индивидуальные особенности ИСД детей могут быть связаны с уровнем их интеллекта. В связи с этим целью настоящего исследования было выявление возможных взаимосвязей уровней вербального, невербального и общего интеллекта детей 5–14 лет с реактивностью сенсомоторного бета-ритма в ситуациях выполнения самостоятельных движений, восприятия и имитации движений других людей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 36 детей в возрасте от пяти до 14 лет (16 мальчиков и 20 девочек, средний возраст в месяцах $113,1 \pm 32,4$ при крайних значениях 63–176, правши). Уровень интеллекта у детей определяли с помощью теста Векслера (WISC, детский вариант, адаптированная и стандартизированная версия А. Ю. Панасюка, дополненная и исправленная Ю. И. Филимоненко и В. И. Тимофеевым) [8]. Тест Векслера позволяет оценивать общий интеллект и его составляющие – вербальный и невербальный интеллекты. Вербальный интеллект рассчитывали на основе выполнения ребенком заданий из следующих субтестов: «осведомленность», «понятливость», «арифметический», «сходство», «словарный». Невербальный интеллект определяли на основе заданий субтестов: «недостающие детали», «последовательные картинки», «кубики Кооса», «складывание фигур», «шифровка».

Регистрировали паттерны ЭЭГ в рамках четырех экспериментальных ситуаций, используемых как тест на активацию системы «зеркальных» нейронов: (а) самостоятельные движения мышью по кругу; (б) наблюдение за аналогичными движениями, выполняемыми экспериментатором; (в) имитация движений, выполняемых экспериментатором; (г) слуховое восприятие звуков, сопровождающих выполняемые экспериментатором движения компьютерной мышью (при закрытых глазах испытуемого). Каждая экспериментальная ситуация предварялась просьбой закрыть глаза и расслабиться на протяжении полуминуты.

Анализировали реактивность ЭЭГ в центральных отведениях С3, С4 и Сз. Особенности ЭЭГ-потенциалов, отведенных от других локусов, в настоящей статье не рассматриваются. Среднюю мощность бета1- и бета2-ритмов ЭЭГ (в мкВ^2) вычисляли для каждой экспериментальной ситуации на основании спектров мощности в диапазонах 14–20 и 21–30 Гц соответственно, используя ряд последовательных эпох анализа. В качестве показателей реактивности бета-ритма использовали ИСД. ИСД рассчитывали относительно мощности бета-ритма в исходном состоянии при открытых (для ситуации наблюдения, самостоятельного

движения и его имитации) и закрытых (для ситуации слухового восприятия движения) глазах. Чем больше была степень синхронизации бета-ритма при собственном движении, восприятии движений экспериментатора или их имитации, тем большее значение принимал ИСД. При десинхронизации ритма (супрессии) индекс принимал отрицательное значение.

Анализ связей между интеллектом детей и значениями ИСД проводили с помощью непараметрического критерия Спирмена, так как распределение ИСД в ряде случаев отличалось от нормального. Остальные подробности методики описаны ранее [4].

Группа испытуемых детей была набрана с помощью объявлений, размещенных в детских садах и школах г. Симферополя. Родителям этих детей были предоставлены все необходимые сведения о процедуре исследования, и они дали согласие на бесплатное участие ребенка в данных экспериментах. Настоящее исследование соответствовало этическим принципам Хельсинкской декларации 1964 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения показателей интеллекта обследованных детей по тесту Векслера приведены в таблице 1. Как видно из указанной таблицы, средние значения общего, вербального и невербального интеллектов превышают 100 баллов. Поскольку 100 баллов считают средним значением для популяции, интеллект детей, принявших участие в исследовании, оказался достаточно высоким. В то же время крайние значения указанных показателей варьируют в значительных пределах. Можно предположить, что одной из причин таких вариаций являются особенности функционирования нейронных сетей неокортекса детей.

Таблица 1

Показатели интеллекта у 36 детей в возрасте 5–14 лет

Показатели интеллекта и субтестов (баллы)	Среднее	Стандартное отклонение	Крайние значения
общий интеллект	112,74	11,76	84,00 – 138,00
вербальный интеллект	109,32	14,01	70,00 – 135,00
осведомленность	11,19	3,42	5,00 – 18,00
понятливость	14,41	4,51	3,00 – 20,00
арифметический	10,41	3,70	3,00 – 18,00
сходство	12,87	2,99	5,00 – 20,00
словарный запас	8,78	3,94	3,00 – 20,00
невербальный интеллект	114,22	14,12	85,00 – 146,00
недостающие детали	11,64	4,34	4,00 – 20,00
последовательность	12,00	3,59	5,00 – 19,00
кубики Кооса	13,17	2,99	9,00 – 20,00
складывание фигур	12,56	2,96	7,00 – 19,00
шифровка	11,20	2,87	6,00 – 17,00

Для проверки этого предположения нами вычислены коэффициенты корреляций по Спирмену между значениями ИСД бета-1 и бета2-ритмов, с одной стороны, и показателями интеллекта, с другой. Статистически значимые величины коэффициентов корреляций между значениями общего, вербального, невербального интеллекта и реактивностью ЭЭГ бета-диапазона обнаружены только для бета1-ритма (табл. 2).

Таблица 2

Связь между величиной индекса синхронизации/ десинхронизации бета1-ритма ЭЭГ у 36 детей в четырех экспериментальных ситуациях с показателями интеллекта

Ситуация	Локус	Общий интеллект		Вербальный интеллект		Невербальный интеллект	
		r	P	r	P	r	P
Выполнение движений	Cz	0,252	0,149	-0,002	0,992	0,525	0,001
	C3	0,138	0,436	-0,033	0,849	0,255	0,140
	C4	0,244	0,164	0,100	0,562	0,405	0,016
Наблюдение за движением	Cz	0,359	0,034	-0,026	0,879	0,428	0,009
	C3	0,276	0,109	0,044	0,795	0,497	0,002
	C4	0,321	0,061	-0,005	0,977	0,411	0,013
Имитация движений	Cz	0,105	0,548	0,041	0,810	0,188	0,273
	C3	0,239	0,167	0,205	0,223	0,199	0,244
	C4	0,108	0,536	0,014	0,933	0,192	0,263
Слуховое восприятие движений	Cz	-0,145	0,403	0,050	0,767	-0,221	0,195
	C3	-0,166	0,399	-0,048	0,766	-0,085	0,622
	C4	-0,127	0,468	0,077	0,650	-0,213	0,212

Примечание: представлены величины коэффициентов корреляций (r) и уровни их статистической значимости (P). Выделены значения показателей при $P \leq 0,05$.

Как видно из таблицы 2, значимые взаимосвязи значений ИСД бета1-ритма имеются только для двух экспериментальных ситуаций (самостоятельное движение и наблюдение за движением). Наибольшее их количество – с уровнем невербального интеллекта детей. Кроме того, выявлена значимая взаимосвязь между ИСД в локусе Cz в ситуации наблюдения за движениями и величиной общего интеллекта. Все значимые коэффициенты корреляций – положительные. Т. е. чем больше мощность бета-ритма при выполнении самостоятельных движений компьютерной мышью по кругу или наблюдении за подобными движениями, тем выше уровень интеллекта данного ребенка. Характер связей наглядно представлен на рис. 1, А, который отражает корреляционную зависимость между значениями ИСД в локусе C3 в ситуации наблюдения за движениями и уровнем невербального интеллекта детей.

Нужно отметить, что значимые взаимосвязи значений ИСД имелись не только с показателями невербального и общего интеллекта, но и с результатами

тестирования по отдельным субтестам теста Векслера. Наибольшее количество таких взаимосвязей выявлено с субтестами «последовательные картинки», «кубики Кооса», «складывание фигур». Один из примеров таких связей представлен на рис. 1, Б, который отражает корреляционную зависимость между значениями ИСД в локусе СЗ в ситуации наблюдения за движениями и уровнем выполнения заданий субтеста «последовательные картинки».

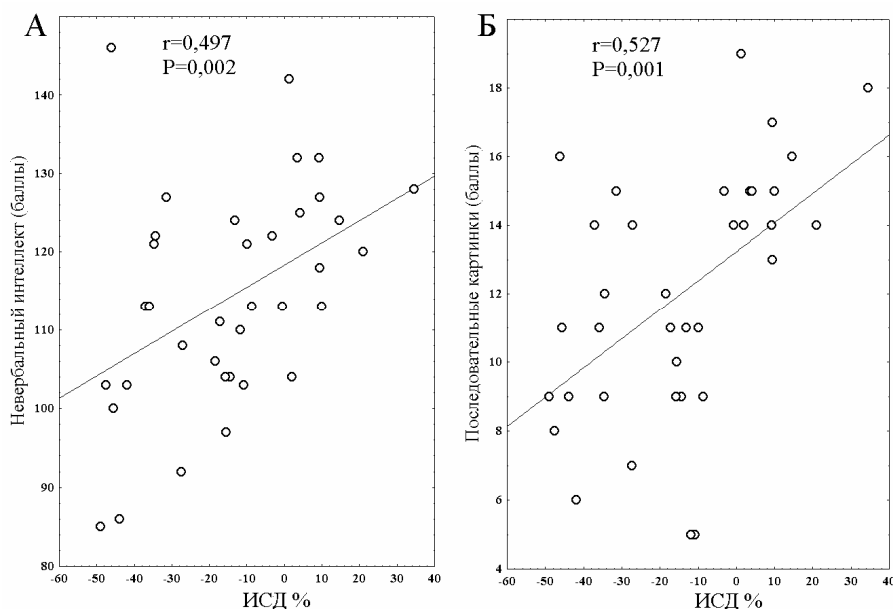


Рис. 1. Корреляционная связь между индексом синхронизации/десинхронизации (ИСД) бета1-ритма ЭЭГ центрального отведения левого полушария (локус СЗ) 36 детей при наблюдении ими за движениями компьютерной мышь, выполняемыми экспериментатором, и показателями невербального интеллекта (фрагмент А), а также субтеста «последовательные картинки» (фрагмент Б).

Представлены корреляционные поля значений ИСД бета1-ритма (ось абсцисс, %) и когнитивных показателей испытуемых (ось ординат, баллы), а также функция линейной регрессии.

Имелись также значимые позитивные взаимосвязи между одним из субтестов вербального интеллекта («арифметический») и ИСД бета1-ритма в ситуациях слухового восприятия движений и самостоятельного их выполнения (отведения Сз и С4, $r=0,362$ и $0,464$, $P=0,030$ и $0,004$, соответственно). Однако взаимосвязей реактивности бета-ритма с субтестами вербального интеллекта было намного меньше, чем с субтестами невербального интеллекта. Были также выявлены единичные значимые взаимосвязи показателей субтестов с бета2-ритмом.

Таким образом, обнаружены значимые позитивные взаимосвязи между мощностью бета1-ритма при наблюдении за движением и самостоятельным его

выполнением, с одной стороны, и уровнем интеллекта детей, с другой. Известно [9], что синхронизация бета-ритма отражает активацию тормозящих ГАМК-эргических клеток и, как следствие, снижение активности основной массы нейронов данного коркового региона. Исходя из этого, логично заключить, что чем выше у ребенка уровень интеллекта, тем менее активирована в указанных экспериментальных ситуациях его моторная кора. Полученный результат может показаться парадоксальным: у детей с высокоразвитыми когнитивными способностями степень вовлечения центральных областей коры при выполнении движений и наблюдении за ними ниже, чем у других детей. Эти факты могут найти следующие объяснения.

У детей с большим уровнем невербального интеллекта при выполнении круговых движений мышкой отмечена меньшая десинхронизация или даже синхронизация бета1-ритма. Известно, что усиление бета-ритма наблюдается по окончании выполнения целенаправленного движения («феномен отдачи»). Если задача требует точности, то чем меньше ошибка, тем мощнее синхронизация бета-активности [10]. Усиление бета-ритма отражает стабилизацию и закрепление текущей двигательной программы при ГАМК-эргическом торможении нейронных цепей, реализующих альтернативные программы. Круговое перемещение компьютерной мыши в нашем эксперименте фактически представляет цепь отдельных движений (формирующих последовательность окружностей), выполняемых с постоянной коррекцией. Успешное выполнение задачи обеспечивается с участием тормозящих влияний на нейроны моторной коры. Такие влияния, обеспечивающие оптимальную траекторию движения, проявляются в синхронизации бета-ритма. Кроме того, выраженный бета-ритм свидетельствует о достижении оптимального для данного вида деятельности баланса возбуждения и торможения, что поддерживает исполнение текущей двигательной программы [11]. Дети, чья нервная система позволяет добиться такого баланса, легко справляются с заданием по круговому движению мышки, а также успешны во многих видах деятельности, что и проявляется в высоких показателях их невербального интеллекта.

Особый интерес представляют позитивные взаимосвязи между мощностью бета1-ритма ЭЭГ в ситуации наблюдения за движениями и уровнем когнитивного развития детей. Для большинства детей в этой экспериментальной ситуации была характерна десинхронизация указанного ритма ЭЭГ, подобная той, которая наблюдалась при выполнении самостоятельных движений [4]. Такой паттерн реакций, как принято считать [2, 6, 7], свидетельствует об активации сети зеркальных нейронов моторной зоны коры. В то же время чем выше был уровень когнитивного развития детей, тем меньше бета-ритм супрессировался, а у некоторых детей с высоким уровнем когнитивного развития даже усиливался (см. рис. 1). На первый взгляд, такие особенности ЭЭГ участников исследования с наибольшими значениями общего и невербального интеллекта противоречат представлениям о функциях зеркальных нейронов мозга. Ведь чем в большей степени зеркальная система способна к активации (и чем сильнее десинхронизируется бета-ритм), тем успешнее должно протекать обучение ребенка при восприятии действий других людей и подражания им. Мы считаем, что противоречие снимается, если учитывать роль «антизеркальной» системы мозга. Антизеркальные нейроны, активирующиеся при

собственных движениях и тормозящиеся при наблюдении за таковыми, были обнаружены при микроэлектродном исследовании мозга больных эпилепсией [12]. Функциональная роль антизеркальной системы состоит в предотвращении нежелательного копирования движений при наблюдении за действиями другого человека, что могло бы происходить за счет активации зеркальных нервных клеток моторной коры [2, 5]. Если функционирование антизеркальных нейронов по каким-либо причинам нарушается (например, в результате кровоизлияний в некоторые области фронтальных отделов неокортекса), у человека развивается эхопраксия – бесконтрольное имитирование движений окружающих. Активация этой сети нейронов также лежит в основе различения собственных действий от действий окружающих. Мы предполагаем, что дети, у которых в ситуации наблюдения бета1-ритм синхронизируется, имеют более развитую антизеркальную систему, что уменьшает некритичное подражание чужим действиям. Особенно это важно для детей и подростков школьного возраста, которые часто бессознательно подражают сверстникам в различных проявлениях асоциального поведения. Таким образом, развитая антизеркальная система является одним из природных факторов становления самостоятельности ребенка, сознательного поиска решений в проблемной ситуации. Оптимальное взаимодействие зеркальной и антизеркальной систем обеспечивает наилучшие способности к обучению при одновременной активации самостоятельного мышления, что и отражается у таких детей в высоких показателях когнитивного развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены значимые позитивные взаимосвязи между мощностью бета1-ритма при наблюдении за движением и самостоятельным его выполнением, с одной стороны, и уровнем интеллекта детей, с другой. Т. е. чем больше мощность бета-ритма при выполнении самостоятельных движений компьютерной мышью или наблюдении за подобными движениями, тем выше уровень интеллекта (главным образом, невербального) данного ребенка.
2. Мы считаем, что выявленные взаимосвязи являются подтверждением существования т. н. антизеркальной системы нейронов. Дети, у которых в ситуации наблюдения бета1-ритм синхронизируется, имеют более развитую антизеркальную систему, что уменьшает некритичное подражание чужим действиям. Высокоразвитые зеркальная и антизеркальная системы обеспечивают наилучшие способности к обучению при одновременной активации самостоятельного мышления, что и отражается у таких детей в высоких показателях когнитивного развития.

Список литературы

1. Новикова С. И. Взаимосвязь спектральной амплитуды θ - и α -диапазонов ЭЭГ с оценками когнитивных способностей в дошкольном возрасте / С. И. Новикова, Е. В. Малаховская, Н. П. Пушина [и др.] // Физиология человека. – 2009. – Т. 35, № 4. – С. 20–27.
2. Rizzolatti G. Mirrors in the brain: how our minds share actions and emotions / G. Rizzolatti, C. Sinigaglia. – Oxford University Press, 2008. – 242 p.

3. Павленко В. Б. Связь реактивности сенсомоторного ритма ЭЭГ с психологическими характеристиками детей и взрослых / В. Б. Павленко, Ю. О. Дягилева, А. А. Михайлова [и др.] // Журнал фундаментальной медицины и биологии. – 2016. – № 2. – С. 30–36.
4. Галкин Д. В. Реактивность сенсомоторного бета-ритма ЭЭГ у детей четырех-четырнадцати лет / Д. В. Галкин, Е. В. Эйсмонт, А. И. Кайда [и др.] // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2016. – Т. 2 (68), № 4. – С. 8–20.
5. Babiloni C. Alpha, beta and gamma electrocorticographic rhythms in somatosensory, motor, premotor and prefrontal cortical areas differ in movement execution and observation in humans / C. Babiloni, C. D. Percio, F. Vecchio [et al.] // Clinical Neurophysiology. – 2016. – Vol. 127, No 1. – P. 641–654.
6. Pineda J. A. The functional significance of mu rhythms: Translating “seeing” and “hearing” into “doing” / J. A. Pineda // Brain Research Reviews. – 2005. – Vol. 50, No 1. – P. 57–68.
7. Pineda J. A. Sensorimotor cortex as a critical component of an ‘extended’ mirror neuron system: does it solve the development correspondence and control problems in mirroring? / J. A. Pineda // Behavioral and Brain Functions. – 2008. – Vol. 4, No 47. – P. 1–16.
8. Ильина М. Н. Психологическая оценка интеллекта у детей / М. Н. Ильина. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.
9. Kropotov J. D. Quantitative EEG, event-related potentials and neurotherapy / J. D. Kropotov. – Academic Press, 2009. – 542 p.
10. Tan H. Dynamic neural correlates of motor error monitoring and adaptation during trial-to-trial learning / H. Tan, N. Jenkinson, P. Brown // The Journal of Neuroscience. – 2014. – Vol. 34, No 16. – P. 5678–5688.
11. Engel A. K. Beta-band oscillations: signalling the status quo? / A. K. Engel, P. Fries // Current Opinion in Neurobiology. – 2010. – Vol. 20, No 2. – P. 156–165.
12. Mukamel R. Single neuron responses in humans during execution and observation of actions / R. Mukamel, A. Ekstrom, J. Kaplan [et al.] // Curr. Biol. – 2010. – Vol. 20, No 8. – P. 750–756.

REACTIVITY OF SENSORIMOTOR BETA-RHYTHM IS CONNECTED WITH INTELLIGENCE IN CHILDREN AS IT REFLECTS THE ACTIVITY OF MIRROR AND ANTI-MIRROR BRAIN SYSTEMS

Pavlenko V. B., Eismont E. V., Galkin D. V., Kayda A. I.

***V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: vpav55@gmail.com***

The aim of the work was to examine the interrelations between verbal, nonverbal and general intelligence and the reactivity of the sensorimotor beta-rhythm in children. The study involved 36 children aged 5 to 14 years (16 boys and 20 girls). The intelligence level was assessed with the help of the Wechsler test (WISC). The EEG was recorded in four experimental situations: (a) self-paced rhythmic circular hand movements with a computer mouse; (B) observation of similar movements performed by the experimenter; (C) imitation of the experimenter’s movements; (D) auditory perception of sounds accompanying the movements performed by the experimenter (subject’s eyes closed). There was analyzed the EEG reactivity under the central leads C3, C4 and Cz. The average powers of the EEG beta1 and beta2 rhythms were calculated for the frequency bands of respectively 14–20 and 21–30 Hz. The synchronization / desynchronization index (SDI) was used as a measure of reactivity level. The higher the beta-rhythm power was during self-paced movements, observation of the experimenter’s movements or movement imitation relative to the baseline, the bigger the SDI values were.