

УДК 612.825; 616:613.6

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПИКОВОЙ ЧАСТОТОЙ АЛЬФА-РИТМА ЭЭГ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБЩЕГО ИНТЕЛЛЕКТА

Начарова М. А., Махин С. А., Павленко В. Б.

*Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: alikina93@gmail.com*

У 68 здоровых мужчин и женщин (18–35 лет) исследовали связь между значениями индивидуальной частоты максимального пика альфа-активности и показателями общего интеллекта, измеренными с помощью прогрессивных матриц Равена. Индивидуумы с высокими показателями интегральной оценки общего интеллекта характеризовались более высокими значениями частоты максимального пика мощности альфа-ритма в отведениях F4 и F8. Выявлены значимые положительные корреляционные связи между индивидуальной частотой пика альфа-ритма в лобных отведениях (Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7) и оценками по шкале «Принцип взаимосвязи в структуре матриц», а также пиковой частотой альфа-ритма в отведении F8 и оценками по шкале «Принцип перегруппировки фигур» в тесте для оценки общего интеллекта «Стандартные прогрессивные матрицы Равена». Результаты исследования говорят в пользу гипотезы о связи индивидуальных показателей пиковой частоты альфа-ритма и когнитивных способностей человека и указывают при этом на особую роль коры лобных полушарий. Закономерности, выявленные для верхнелобных отведений ЭЭГ правого полушария, могут представлять интерес в контексте исследований, посвященных анализу взаимосвязей между реактивностью моторного компонента сенсомоторного мю-ритма и функционированием т.н. «зеркальной» системы мозга.

Ключевые слова: общий интеллект, стандартные прогрессивные матрицы Равена, пиковая частота альфа-ритма, ЭЭГ.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из центральных задач когнитивной нейробиологии является идентификация и анализ анатомических и функциональных свойств головного мозга, опосредующих индивидуальные различия в особенностях когнитивного развития, в частности, уровня общего интеллекта. Идея о том, что особенности электроэнцефалограммы человека могут отражать количественные показатели интеллекта, была высказана еще Гансом Бергером, который обратил внимание на более медленный характер альфа-волн у пациентов с диагностированной умственной отсталостью [1]. Представление о том, что «умный» мозг работает быстрее, имеет продолжительную историю изучения, и на данный момент в рамках данного направления исследований накоплен существенный материал, который, тем не менее, сложно трактовать однозначно.

Согласно мнению ряда исследователей, эффективность базовых когнитивных процессов головного мозга может положительно коррелировать с величиной индивидуальной частоты максимального пика альфа-активности (ИЧМПА) ЭЭГ, которая, как полагают, отражает скоростные характеристики работы ЦНС. Так, при более высокой частоте альфа-ритма наблюдается более быстрое чередование фаз возбуждения и торможения и, соответственно, возрастает скорость обработки информации и моторных реакции [2–4]. При этом показано, что индивидуальная частота максимального спектрального пика альфа-ритма в задних отделах головного мозга в состоянии покоя с закрытыми глазами — показатель инвариантный, высоковоспроизводимый в тест-ретест-исследованиях и составляет $10,0 \pm 0,5$ Гц у большинства индивидов 25–40 лет [5–8].

ИЧМПА положительно коррелирует с эффективностью выполнения когнитивных [9, 10] и креативных заданий [9], положительно связана со скоростью обработки информации и отрицательно – с временем принятия решения в задаче реакции выбора [11, 12]. Кроме этого, беглость выполнения когнитивных [13–15] и психомоторных заданий [16], а также степень владения профессиональными навыками [17] выше у лиц с высокой (> 10 Гц), чем с низкой (< 10 Гц) частотой альфа-ритма. Снижение ИЧМПА наблюдается при психических и неврологических заболеваниях: болезни Альцгеймера, болезни Паркинсона, депрессии, шизофрении, расстройствах аутистического спектра [18–22].

Положительные взаимосвязи между частотой пика альфа-активности и показателями интеллекта были найдены в группе детей с умеренной умственной отсталостью [23] и у взрослых с ухудшенными интеллектуальными функциями вследствие старения или повреждения мозга [24]. Хотя имеются четкие указания на значимость ИЧМПА в исследовании индивидуальных различий в умственной деятельности, вопрос о том, связана ли ИЧМПА с общего интеллекта в нормальной взрослой популяции, остается спорным. В ряде исследований с участием здоровых взрослых испытуемых не обнаруживаются значимые связи между ИЧМПА и уровнем общего интеллекта [23, 25, 26], тогда как в единичных работах такие взаимосвязи выявлены [10].

Наряду с этим установлена внутрииндивидуальная вариабельность частоты максимального пика альфа в зависимости от фактора каудальности (в теменно-затылочных локусах пиковая частота альфа-ритма больше, чем в лобно-центральных) [27, 28], возраста [29] и выраженности процессов утомления [30].

В большинстве работ в качестве пиковой частоты альфа-ритма принимается значения в теменно-затылочных отведениях [10]. Нам известна лишь одна работа, в которой были обнаружены значимые корреляции между пиковыми частотами альфа-ритма во фронтальных локусах ЭЭГ и уровнем общего интеллекта (прогрессивные матрицы Равена) [31]. Однако выводы данного исследования, как указывают сами авторы, имеют ограничения: все испытуемые были мужчинами (военные пилоты и технический персонал) и рассматривались лишь восемь отведений ЭЭГ (Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, O1, O2). Кроме того, не анализировались корреляции с субшкалами методики оценки интеллекта.

В последующих исследованиях было показано, что функционирование фронтальных областей тесно связано с такими процессами как память, внимание и когнитивный контроль, а альфа-ритм в соответствующих отведениях – с эффективной нейрокогнитивной обработкой информации [32, 33].

В связи с этим целью нашего исследования стал поиск возможных взаимосвязей между уровнем общего интеллекта (определяемого с помощью прогрессивных матриц Равена), а также оценками по отдельным субшкалам методики, с одной стороны, и значениями ИЧМПА в более широком наборе локусов ЭЭГ, с другой, при участии выборки испытуемых, представленной обоими полами. Особенный интерес представляло сопоставление результатов с данными других авторов, которые для диагностики уровня интеллекта использовали прогрессивные матрицы Равена. Данная методика считается одним из наиболее фундаментальных и точных тестов, измеряющих т.н. «текущий» интеллект, в основе которого лежит базовая способность к пространственному анализу геометрических фигур и их соотношений [34, 35]. Представляется важным дифференцировать степень ассоциированности интеллектуальных способностей с индивидуальными отличиями в альфа-активности, генерируемой разными зонами коры, в частности, затылочно-теменной, центральной (т.н. сенсомоторный мю-ритм), височной и лобной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 73 здоровых взрослых испытуемых в возрасте от 18 до 35 лет (48 женщин, 25 мужчин), все правши. ЭЭГ регистрировалась при помощи 24-канального энцефалографа «Нейрон-Спектр-3» (фирма «Нейрософт», Иваново) в диапазоне частот от 1 до 30 Гц. ЭЭГ-потенциалы отводились при помощи чашечковых хлор-серебряных электродов монополярно от фронтальных ($Fp1$, $Fp2$, $F3$, $F4$, Fz , $F7$, $F8$), центральных ($C3$, $C4$, Cz), височных ($T3$, $T4$, $T5$, $T6$), теменных ($P3$, $P4$, Pz), затылочных ($O1$, $O2$) локусов в соответствии с международной системой 10-20. В качестве референтного электрода служили объединенные датчики, закрепленные на мочках ушей. Частота оцифровки ЭЭГ-сигналов составляла 1000 Гц.

Запись ЭЭГ производилась в состоянии относительного покоя при зрительной фиксации на статическом изображении и в ситуации спокойного бодрствования с закрытыми глазами.

Участки записей ЭЭГ с амплитудой более 250 мкВ, а также отрезки, содержащие большое количество артефактов, исключались из обработки. Безартефактные отрезки ЭЭГ разбивали на эпохи по 5,12 с. Фрагменты ЭЭГ подвергались быстрым преобразованиям Фурье с перекрытием 50 % и использованием фильтра Баттерворта (порядок 4) с полосой пропускания 2–25 Гц. Применялось сглаживание окном Блэкмена.

Частота максимального пика альфа-ритма определялась по стандартной методике (сравнение графиков спектров ЭЭГ при открытых и закрытых глазах [26]) в каждом из отведений ЭЭГ. Индивидуальная ширина диапазона альфа-активности определялась как ширина частотного диапазона, в котором происходит снижение спектральной мощности ЭЭГ при открывании глаз более, чем на 20 % и которая

включает все частотные полосы, справа и слева от частоты максимального пика альфа-активности [3, 36].

Из анализа были исключены испытуемые, у которых нельзя было определить индивидуальную частоту максимального пика альфа ритма. В итоговой выборке насчитывалось 68 испытуемых от 17 до 35 лет (средний возраст $21,2 \pm 3,6$ лет, 43 женщины, 25 мужчин).

Уровень общего интеллекта у испытуемых оценивали с помощью теста «Стандартные прогрессивные матрицы Равена». Этот тест требует выявления отношений между абстрактными графическими элементами и является одним из традиционных инструментов для измерения фактора «g» интеллекта [37].

«Сырые» баллы, принимающие значение от нуля до 60, переводились в стандартизированную шкалу, имеющую для выборки взрослых испытуемых максимальную величину, равную 130 баллам. В корреляционном анализе также учитывались оценки испытуемых по отдельным субшкалам (сериям) методики: «А» (взаимосвязи в структуре матриц), «В» (аналогии между парами фигур), «С» (прогрессивные изменения в фигурах матриц), «D» (перегруппировка фигур в матрице) и «Е» (разложение фигур на элементы).

Статистические связи между частотой максимального пика альфа-ритма и уровнем интеллекта анализировались с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена. Различия между показателями ИПМЧА в группах с разным уровнем интеллекта оценивались с помощью непараметрического U-критерия Манна-Уитни для несвязанных выборок.

Настоящее исследование соответствовало этическим принципам Хельсинкской декларации [38] и было одобрено этическим комитетом Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно рассчитывались средние значения индивидуальных частот максимального пика альфа-ритма и границ частотных диапазонов альфа-ритма в 19 отведениях ЭЭГ, которые представлены в таблице 1.

Психологическое тестирование с помощью методики «Стандартные прогрессивные матрицы Равена» показало, что значения коэффициента интеллекта варьировали в относительно широком диапазоне от 80 до 130 баллов, среднее значение коэффициента интеллекта в выборке участников исследования составило 108,5 балла (стандартное отклонение 11,5 балла). В целом, оценки всех испытуемых были в пределах нормы и находились в диапазоне от средних до высоких показателей.

Таблица 1.
Средние значения частоты максимального пика и границ диапазона альфа-ритма у 68 обследованных испытуемых

Локус	Частота максимального пика альфа-ритма, Гц	Частота левой границы альфа-ритма, Гц	Частота правой границы альфа-ритма, Гц
Fp1	10,3 ± 0,7 (8,8; 11,7)	8,8 ± 0,8 (7,5; 10,8)	12,0 ± 0,6 (11,2; 12,8)
Fp2	10,3 ± 0,7 (8,8; 11,7)	8,7 ± 0,8 (7,5; 10,7)	11,9 ± 0,5 (11,2; 12,7)
Fz	10,3 ± 0,7 (8,8; 11,7)	8,4 ± 0,7 (7,6; 10,8)	12,1 ± 0,3 (11,7; 12,7)
F3	10,3 ± 0,7 (8,8; 11,7)	8,3 ± 0,7 (7,5; 10,8)	12,2 ± 0,4 (11,8; 12,8)
F4	10,3 ± 0,7 (8,8; 12,2)	8,3 ± 0,6 (7,5; 10,6)	12,3 ± 0,5 (11,6; 12,8)
F7	10,3 ± 0,7 (8,8; 12,2)	8,2 ± 0,7 (7,5; 10,4)	12,1 ± 0,5 (11,3; 12,9)
F8	10,3 ± 0,7 (9,3; 12,2)	8,3 ± 0,7 (7,4; 10,8)	12,0 ± 0,5 (11,2; 12,8)
Cz	10,4 ± 0,7 (9,3; 12,2)	8,2 ± 0,9 (7,2; 10,6)	12,1 ± 0,5 (11,5; 12,8)
C3	10,4 ± 0,7 (9,3; 12,2)	8,2 ± 0,8 (7,4; 10,6)	12,1 ± 0,4 (11,5; 12,6)
C4	10,4 ± 0,7 (9,3; 12,2)	8,2 ± 0,8 (7,2; 10,8)	12,1 ± 0,5 (11,4; 12,6)
T3	10,4 ± 0,7 (8,8; 12,2)	8,3 ± 0,8 (7,3; 10,7)	12,1 ± 0,5 (11,2; 12,8)
T4	10,4 ± 0,7 (8,8; 12,2)	8,4 ± 0,7 (7,3; 10,7)	12,0 ± 0,7 (10,8; 12,7)
T5	10,3 ± 0,7 (8,8; 12,2)	8,3 ± 0,9 (7,0; 10,8)	12,0 ± 0,7 (10,6; 12,7)
T6	10,4 ± 0,7 (8,8; 12,2)	8,2 ± 0,8 (7,0; 10,7)	12,0 ± 0,7 (10,8; 12,8)
Pz	10,4 ± 0,6 (9,3; 12,2)	8,1 ± 0,8 (7,0; 10,6)	12,2 ± 0,4 (11,6; 12,7)
P3	10,4 ± 0,6 (9,3; 12,2)	8,1 ± 0,9 (6,7; 10,7)	12,3 ± 0,3 (12,0; 12,7)
P4	10,4 ± 0,7 (9,3; 12,2)	8,2 ± 0,9 (7,0; 10,8)	12,4 ± 0,4 (11,8; 12,9)
O1	10,3 ± 0,7 (9,3; 12,2)	7,9 ± 1,0 (6,4; 10,8)	12,4 ± 0,3 (12,0; 13,0)
O2	10,4 ± 0,7 (9,3; 12,2)	7,8 ± 1,0 (6,7; 10,4)	12,4 ± 0,4 (11,8; 13,0)

Примечание: Приведены средние значения ± стандартное отклонение. В скобках указаны минимальные и максимальные значения указанных величин.

Первый этап статистической обработки подразумевал поиск линейных зависимостей между частотой максимального пика альфа-ритма ЭЭГ и оценками, полученными испытуемыми в тесте «Стандартные прогрессивные матрицы Равена». Рассчитанные коэффициенты корреляции (по Спирмену) представлены в таблице 2.

Были обнаружены достигающие уровня статистической значимости корреляции между оценками по шкале «Принцип взаимосвязи в структуре матриц» теста «Стандартные прогрессивные матрицы Равена» и частотой максимального пика альфа-ритма в отведениях Fp1, Fp2, Fz, F3, F4 и F7. Положительная взаимосвязь также была выявлена между оценками по шкале «Принцип перегруппировки фигур» и ИПМЧА в локусе F8. Корреляции между общим баллом интеллекта и частотой пика альфа-активности во всех исследуемых локусах ЭЭГ не достигали уровня статистической значимости.

Таблица 2.

Корреляционные связи между значениями ИЧМПА и оценками в тесте «Стандартные прогрессивные матрицы Равена»

Шкала Локус	Серия А	Серия В	Серия С	Серия D	Серия Е	Общий балл IQ
Fp1	0,29*	0,14	0,04	0,22	0,18	0,18
Fp2	0,29*	0,14	0,04	0,22	0,18	0,18
Fz	0,31*	0,17	0,03	0,23	0,18	0,18
F3	0,31*	0,17	0,03	0,23	0,18	0,18
F4	0,31*	0,11	0,04	0,25	0,24	0,22
F7	0,33*	0,09	0,05	0,21	0,23	0,21
F8	0,28	0,17	-0,02	0,37*	0,24	0,24
Cz	0,26	0,07	0,01	0,24	0,21	0,14
C3	0,21	0,25	0,11	0,06	0,25	0,21
C4	0,12	0,26	0,08	0,03	0,25	0,12
T3	0,19	0,07	-0,05	0,21	0,15	0,14
T4	0,11	0,02	-0,12	0,12	0,15	0,10
T5	0,15	0,06	-0,08	0,11	0,12	0,09
T6	0,13	0,06	-0,08	0,06	0,08	0,07
Pz	0,28	-0,02	-0,04	0,16	0,06	0,06
P3	0,22	-0,03	-0,04	0,12	0,09	0,08
P4	0,13	0,02	-0,10	0,09	0,06	0,04
O1	0,10	0,04	-0,07	0,18	0,17	0,16
O2	0,03	-0,04	-0,16	0,02	0,06	0,03

Примечание: «*» отмечены коэффициенты корреляции с уровнем значимости $p < 0,05$.

Полученные данные лишь частично согласуются с показанной ранее взаимосвязью частот пика альфа-ритма в лобных отведениях с оценками общего интеллекта [31]. Несмотря на отсутствие корреляций с суммарной оценкой интеллекта, именно для лобных отведений корреляции между ИЧМПА и оценками по отдельным шкалам теста достигали уровня статистической значимости.

Так как корреляции в целом были относительно слабыми, а непосредственно с итоговым баллом общего интеллекта не достигали уровня статистической значимости, с целью более широкого анализа выборка испытуемых была разделена на три группы: первая группа включала 24 человека, уровень интеллекта которых характеризовался как средний (IQ не превышал 102 балла); вторая группа состояла из 20 испытуемых с уровнем интеллекта выше среднего (103–120 баллов); в третью группу входили 24 человека с высокими оценками интеллекта (121–130 баллов). Показатели ИЧМПА сравнивались попарно между каждой из групп с помощью U-критерия Манна-Уитни.

Значимые различия в частоте максимального пика альфа-ритма были выявлены исключительно при сопоставлении групп с высоким и средним уровнем общего интеллекта в отведениях F4 ($U = 193,5$, $p < 0,05$) и F8 ($U = 192,5$, $p < 0,05$). Средние значения частот максимального пика альфа-ритма в отведениях F4 и F8 в группе с средним уровнем общего интеллекта составили 10,16 Гц и 10,18 Гц в группе с высоким уровнем интеллекта – 10,54 Гц и 10,55 Гц соответственно.

Результаты исследования в целом говорят в пользу гипотезы о связи между частотой альфа-ритма, основного компонента ЭЭГ человека, и его когнитивными способностями. Процент дисперсии в показателях отдельных шкал общего интеллекта, который «объясняет» пиковая частота альфа-ритма, относительно невелик. Однако диапазон значимых корреляций (0,29–0,37) в целом соответствует описанным ранее в научной литературе в отношении связей между уровнем IQ и рядом других показателей, которые, как полагают, могут служить его биологической основой, а именно скоростью реакции, латентность связанных с событием потенциалов, скорость нервной проводимости и т.д. [39, 40].

Значимые корреляции оказались топографически локализованы во фронтальных отведениях ЭЭГ и в целом воспроизводят результаты другого, ранее уже упоминавшегося исследования [31], в котором значимые связи были обнаружены между интегральным баллом IQ, измеренным с помощью прогрессивных матриц Равена, и пиковой частотой альфа-ритма в отведениях Fp1, Fp2 и F4. В рамках нашего исследования значимые корреляции были найдены как для указанных отведений, так и для локусов F3, Fz, F7 и F8 (локусы Fz, F7 и F8 в работе упомянутых авторов не рассматривались). Но следует учитывать, что в нашем случае значимо коррелировал не интегральный балл IQ, а оценки по отдельным сериям методики: «А» (принцип взаимосвязи в структуре матриц) и «D» (принцип перегруппировка фигур).

Серия «А» предполагает от тестируемого тщательного анализа графического паттерна основного изображения и поиска недостающей части из набора фрагментов. Она отличается от последующих серий относительной простотой и опирается на способность к дискриминации пространственных соотношений между элементами единого рисунка и целостность восприятия. Поэтому найденная корреляция может быть проинтерпретирована как указывающая на возможную взаимосвязь между пиковой частотой альфа-ритма в лобной коре человека в целом и его когнитивной способностью к произвольной интеграции зрительных элементов восприятия в единую картину.

Серия «D» построена по принципу перегруппировки фигур в матрице из девяти элементов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для успешного выполнения данного задания необходимо одновременно удерживать в рабочей памяти сами фигуры, их свойства и расположение относительно друг друга. Обнаруженная нами положительная корреляция между оценками за выполнение данной серии заданий и пиковой частотой альфа-ритма в отведении F8 указывает на специфическую для данного типа когнитивной обработки роль дорсолатеральной лобной коры правого полушария, активность которой, как известно, связана с

успешностью выполнения задач, актуализирующих зрительно-пространственную память [41].

Сравнительный анализ пиковых частот альфа-ритма между группами с разным уровнем общего интеллекта (в соответствии с интегральной оценкой методики) позволил все же выявить значимые отличия в правополушарных локусах F4 и F8 между группами со средним и высоким уровнем IQ. При этом группа с уровнем IQ выше среднего не отличалась значимо от двух других групп. По-видимому, такой способ разделения выборки позволил сделать различия статистически более «рельефными» и тем самым еще более приблизил наши результаты к результатам ранее опубликованного исследования.

Помимо этого, в нашей работе показан более широкий характер взаимосвязей между уровнем IQ и пиковой частотой альфа-ритма, т.к. значимые корреляции так или иначе были найдены для всех рассмотренных фронтальных отведений ЭЭГ. В основном, корреляции не имели явной лево- или правосторонней локализации. Однако необходимо обратить внимание на правополушарную корреляцию (самую высокую из найденных) между оценками по шкале «перегруппировка фигур» и пиковой частотой альфа-ритма в отведении F8.

Важно указать, что данное верхнелобное отведение ЭЭГ, для которого были найдены значимые закономерности как для отдельной шкалы методики, так и для интегральной оценки общего интеллекта, может отражать, в том числе, функциональные особенности моторного компонента сенсомоторного ритма в силу его относительной чувствительности (наряду с центральными и верхнетеменными локусами ЭЭГ) к совершению человеком произвольных движений [42, 43]. А т.к. реактивность амплитудных показателей данного ритма широко анализируется в контексте изучения функциональных характеристик т.н. системы зеркальных нейронов, это открывает дополнительное поле потенциальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены значимые положительные корреляционные связи между индивидуальной частотой максимального пика альфа-ритма в лобных отведениях (Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7) и оценками по шкале «Принцип взаимосвязи в структуре матриц», а также пиковой частотой альфа-ритма в отведении F8 и оценками по шкале «Принцип перегруппировки фигур» в тесте для оценки общего интеллекта «Стандартные прогрессивные матрицы Равена».
2. Индивидуумы с высокими показателями общего интеллекта характеризуются более высокими значениями частоты максимального пика альфа-ритма в отведениях F4 и F8 по сравнению с испытуемыми, уровень интеллекта которых был определен как средний.
3. Результаты исследования в целом говорят в пользу гипотезы о связи индивидуальных показателей пиковой частоты альфа-ритма и когнитивных способностей человека и указывают при этом на особую роль коры лобных полушарий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-015-00074 А

Использовано оборудование ЦКП ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» «Экспериментальная физиология и биофизика».

Список литературы

1. Berger H. Über das Elektroenzephalogramm des Menschen / H. Berger // V. Eur. Arch. Psychiatry Clin. Neurosci. – 1933. – Vol. 98. – P. 231–254.
2. Klimesch W. Alpha frequency, reaction time, and the speed of processing information / W. Klimesch, M. Doppelmayr, H. Schimke, T. Pachinger // J. Clin. Neurophysiol. – 1996. – Vol. 13(6). – P. 511–518.
3. Умрюхин Е. А. Связь результативности целенаправленной деятельности с параметрами ЭЭГ студентов в ситуации экзаменационного стресса / Е. А. Умрюхин, Т. Д. Джебраилова, И. И. Коробейникова // Психологический журнал. – 2003. – Том 24, №3. – С. 88–93.
4. Jin Y. Alpha EEG predicts visual reaction time / Y. Jin, J.P. O'Halloran, L. Plon, C.A. Sandman, S. G. Potkin // Int. J. Neurosci. – 2006. – Vol. 116(9). – P. 1035–1044.
5. Базанова О.М. Вариабельность и воспроизводимость индивидуальной частоты максимального пика в различных экспериментальных условиях / О.М. Базанова / Журн. высш. нервн. деятельности. – 2011. – Т. 61, № 1. – С. 102–111.
6. Kaiser D.A. Rethinking standard bands / Kaiser D.A. // J. Neurotherapy. – 2001. – Vol. 5(1/2). – P. 96–101.
7. Anokhin A.P. / Genetic influences on dynamic complexity of brain oscillations / A.P. Anokhin, V. Muller, U. Lindenberger, A.C. Heath, E. Myers // Neurosci. Lett. – 2006. – Vol. 397(1–2). – P. 93–98.
8. Nunez P. Spatialtemporal structures of human alpha rhythms: theory, microcurrent sources, multiscale measurements, and global binding of networks / P. Nunez, B. Wingeier, R. Silberstein // Hum. Brain Mapp. – 2001. – Vol. 13(3). – P. 125–164.
9. Базанова О.М. Индивидуальные показатели альфа-активности электроэнцефалограммы и невербальная креативности / О. М. Базанова, Л. И. Афтанас // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. – 2007. – Т. 93, № 1. – С. 14–26.
10. Grandy T. H. Individual alpha peak frequency is related to latent factors of general cognitive abilities / Grandy T. H., Werkle-Bergner M., Chicherio C., Lövdén M., Schmiedek F., Lindenberger U. // Neuroimage. – 2013. – Vol. 79. – P. 10–18.
11. Cooper N.R. Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses / N.R. Cooper, R. J. Croft, S. J. Dominey, A. P. Burgess, J. H. Gruzelier // Int. J. Psychophysiol. – 2003. – Vol. 47. – P. 65–74.
12. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis / W. Klimesch // Brain Res. Rev. – 1999. – Vol. 29. – P. 169–195.
13. Doppelmayr, M. Intelligence related upper alpha desynchronization in a semantic memory task / M. Doppelmayr, W. Klimesch, K. Hodlmoser, P. Sauseng, W. Gruber // Brain Res. Bull. – 2005. – Vol. 66. – P. 171–177.
14. Klimesch W. EEG alpha oscillations: The inhibitiontiming hypothesis / W. Klimesch, P. Sauseng, S. Hanslmayr // Brain Res. Rev. – 2007. – Vol. 53. – P. 63–88.
15. Moretti D.V. Vascular damage and EEG markers in subjects with mild cognitive impairment / D. V. Moretti, C. Miniussi, G.B. Frisoni, O. Zanetti, G. Binetti, C. Geroldi, S. Galluzzi, P. M. Rossini // Clin Neurophysiol. – 2007. – Vol. 118(8). – P. 1866–1876.
16. Hummel F. To act or not to act: neural correlates of executive control of learned motor behavior / F. Hummel, R. Saur, S. Lasogga, C. Plewnia, M. Erb, D. Wildgruber, W. Grodd, C. Gerloff // NeuroImage. – 2004. – Vol. 23. – P.1391–1401.
17. Bazanova O.M. Interpreting EEG alpha activity / O.M. Bazanova, D. Vernon // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. – 2014. – Vol. 44. – P. 94–110.
18. Besthorn C. Discrimination of Alzheimer's disease and normal aging by EEG data / C. Besthorn, R. Zerfass, C. Geiger-Kabisch, H. Sattel, S. Daniel, U. Schreiter-Gasser, H. Förstl // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. – 1997. – Vol. 103. – P. 241–248.

19. Stoffers D. Slowing of oscillatory brain activity is a stable characteristic of Parkinson's disease without dementia / D. Stoffers, J.L.W. Bosboom, J.B. Deijon, E.C. Wolters, H.W. Berendse, C.J. Stam // *Brain*. – 2007. – Vol. 130, № 7. – P. 1847–1860.
20. Harris A. Dynamic spectral analysis findings in first episode and chronic schizophrenia / A. Harris, D. Melkonian, L. Williams, E. Gordon // *Int. J. Neurosci.* – 2006. – Vol. 116 (3). – P. 223–246.
21. Гарах Ж.В. Частота спектрального пика альфа-активности и психопатологическая симптоматика при шизофрении / Ж. В. Гарах, В. Ю. Новотоцкий-Власов, Ю. С. Зайцева, А. Б. Ребрейкина, В. Б. Стрелец // *Журн. высш. нерв. деят.* – 2011. – Т. 61(4). – С. 444–451.
22. Dickinson A. Peak alpha frequency is a neural marker of cognitive function across the autism spectrum / A. Dickinson, C. DiStefano, D. Senturk, S.S. Jeste // *Eur. J. Neurosci.* – 2017. – Vol. 47, № 6. – P. 643–651.
23. Vogel W. Relationship between EEG and test intelligence: A critical review / W. Vogel, D. A. Broverman // *Psychological Bulletin*. – 1964. – Vol. 62. – P. 132–144.
24. Juolasmaa A. Relationship of quantitative EEG and cognitive test performance in patients with cardiac valvular disease / A. Juolasmaa, E. Toivakka, J. Outakovski, K. Sotaniemi, P. Tienari, R. Hirvenoja // *Scandinavian Journal of Psychology*. – 1966. – Vol. 27. – P. 30–38.
25. Ellingson R.J. Relationship between EEG and test intelligence: A commentary / R. J. Ellingson // *Psychological Bulletin*. – 1966. – Vol. 65. – P. 91–98.
26. Posthuma D. Are smarter brains running faster? Heritability of alpha peak frequency, IQ, and their interrelation / D. Posthuma, M.C. Neale, D.I. Boomsma, E.J. de Geus // *Behavior Genetic.* – 2001. – Vol. 31. – P. 567–579.
27. Гриндель О.М. Исследование пространственной структуры альфа-ритма здорового человека методом картирования ЭЭГ / О. М. Гриндель, О. Б. Сазонова, С. Б. Жирнов // *Журн. высш. нервн. деят.* – 1992. – Т. 42(3). – С. 491–499.
28. Pfurtscheller G. Inter- and intrahemispheric differences in the peak frequency of rhythm inactivity within the alpha band / G. Pfurtscheller, H. Maresch, S. Schuy // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* – 1977. – Vol. 42. – P.77–83.
29. Clark R.C. Spontaneous alpha peak frequency predicts working memory performance across the age span / R. C. Clark, D. Veltmeyer, R.J. Hamilton, E. Simms, R. Paul, D. Hermens, E. Gordon // *Int. J. Psychophysiol.* – 2004. – Vol. 53. – P. 1–9.
30. Kamei T. Decrease in serum cortisol during yoga exercise is correlated with alpha wave activation / T. Kamei, Y. Toriumi, H. Kimura, S. Ohno, H. Kumano, K. Kimura // *Percept. Mot. Skills.* – 2000. – Vol. 90 (3). – P. 1027–1032.
31. Anokhin A. EEG alpha rhythm frequency and intelligence in normal adults / A. Anokhin, F. Vogel // *Intelligence*. – 1996. – Vol. 23, № 1. – P. 1–14.
32. Botvinick M. M. Conflict monitoring and cognitive control / M.M. Botvinick, T.S. Braver, D.M. Barch, C. S. Carter, J. D. Cohen // *Psychol. Rev.* – 2001. – Vol. 108. – P. 624–652.
33. Berger A. M. Frontal alpha oscillations and attentional control: a virtual reality neurofeedback study / A. M. Berger, E. J. Davelaar // *Neuroscience*. – 2018. – Vol. 378. – P. 189–197.
34. Ackerman P.L. Individual differences in working memory within a nomological network of cognitive and perceptual speed abilities / P. L. Ackerman, M. E. Beier, M. O. Boyle // *J. Exp. Psychol. Gen.* – 2002. – Vol. 131(4). – P. 567–589.
35. Jensen A.R. *The g Factor: The Science of Mental Ability.* / Jensen A.R. – Praeger Westport, CT., 1998. – 664 p.
36. Doppelmayr M. Individual differences in brain dynamics: important implications for the calculation of event-related band power / M. Doppelmayr, W. Klimesch, T. Pachinger, B. Ripper // *Biol. Cybern.* – 1998. – Vol. 79(1). – P. 49–57.
37. Равен Дж. К. Руководство к Прогрессивным Матрицам Равена и Словарным Шкалам / Дж. К. Равен, Дж. Х. Корг, Равен Дж. – М. : Когито-Центр, 2012. – 144 с.
38. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. – *JAMA*. – 2013. – Vol. 310(20). – P. 2191–2194.
39. McGarry-Roberts P.A. Intelligence, reaction time, and event-related potentials / P.A. McGarry-Roberts, R. M. Stelmack, K. B. Campbell // *Intelligence*. – 1992. – Vol. 16. – P. 289–313.
40. Reed T.E. Conduction velocity in a brain nerve pathway of normal adults correlates with intellectual level / T. E. Reed, A. R. Jensen // *Intelligence*. – 1992. – Vol. 16. – P. 259–272.

41. Smith E.E. Dissociating Verbal and Spatial Working Memory Using PET / E.E. Smith, J. Jonides, R. A. Koepp // *Cerebral Cortex*. – 1996 – Vol. 6, № 1. – P. 11–20.
42. Cochin S. Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography / S. Cochin, C. Barthelemy, S. Roux, J. Martineau // *Eur. J. Neurosci*. – 1999. – Vol. 11, № 5. – P. 1839–1842.
43. Frenkel-Toledo S. Dynamics of the EEG power in the frequency and spatial domains during observation and execution of manual movements / S. Frenkel-Toledo, S. Bentin, A. Perry, D. G. Liebermann, N. Soroker // *Brain. Res.* – 2013. – Vol. 1509. – P. 43–57.

RELATIONSHIP BETWEEN THE EEG INDIVIDUAL ALPHA PEAK FREQUENCY AND GENERAL INTELLIGENCE INDICES

Nacharova M. A., Makhin S. A., Pavlenko V. B.

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: alikina93@gmail.com*

According to a number of studies, human cognitive abilities can positively correlate with the EEG individual alpha peak frequency (IAPF) whose higher numbers may reflect faster cognitive functioning. The IAPF is characterized by a rather high relative and mean test–retest stability in healthy subjects and has been found to show considerable heritability. The extent and consistency of the relationships between IAPF and individual differences in cognitive abilities are a matter of debate. There have been reported significant correlations between IAPF and memory performance, verbal abilities, general intelligence, reaction times, speed of information processing, etc. At the same time, some studies failed to identify any relationship between IAPF and cognitive performance indicators. The present study involved 73 healthy subjects aged 18–35 years (48 women, 25 men). The EEG was recorded in 19 loci (Fp1, Fp2, F3, Fz, F4, F7, F8, C3, Cz, C4, T3, T4, T5, T6, P3, Pz, P4, O1, O2) and fast Fourier transformed. Individual alpha rhythm frequency range and IAPF in each individual were functionally defined by means of comparing the spectral fragments of EEG in 8–13 Hz frequency range for the two conditions with eyes closed and open and identifying the most responsive interval and peak values. We failed to find IAPF in five participants. As a result, the final sample to be further analyzed consisted from 68 subjects. IQ scores were measured using the Raven's standard progressive matrices (SPM) which are considered to provide the most robust indices of general intelligence. The IAPF values in EEG loci Fp1, Fp2, Fz, F3, F4 and F7 positively correlated with individual scores for the A set of the SPM and in locus F8 – with the D set. The significant correlation coefficient varied between 0.29 and 0.37, with the highest value for the relationship between the IAPF in F8 and the D set. The integral SPM score did not demonstrate significant relationships. As the IQ scores varied within the range of values characteristic for normal, higher than normal and high indices, the subjects were divided into three respective subgroups to be then compared in pairs by means of the Mann–Whitney U test. The high IQ subgroup happened to be significantly different from the normal IQ subgroup in their IAPF mean indices in loci F4 (10.16 Hz vs

10.54 Hz) and F8 (10.18 Hz vs 10.55 Hz). The overall results of the study can be interpreted in favor of the hypothesis stating the positive correlation between cognitive development indices and IAPF specifically in human prefrontal cortex.

Keywords: general intelligence, Raven's standard progressive matrices, individual alpha peak frequency, EEG.

References

- Berger H. Über das Elektroenzephalogramm des Menschen., *V. Eur. Arch. Psychiatry Clin. Neurosci.*, **98**, 231 (1933).
- Klimesch W., Doppelmayr M., Schimke H., Pachinger T. Alpha frequency, reaction time, and the speed of processing information. *J. Clin. Neurophysiol.*, **13(6)**, 511 (1996).
- Umyukhin E.A., Dzebrailova T.D., Korabeinikova I.I. Correlation between efficacy of purposeful activity and EEG parameters in students in situation of examination stress, *Psikhol. zh.*, **24(3)**, 88 (2003).
- Jin Y., O'Halloran J.P., Plon L., Sandman C.A., Potkin S.G. Alpha EEG predicts visual reaction time, *Int. J. Neurosci.*, **116 (9)**, 1035 (2006).
- Bazanova O.M. Individual alpha peak frequency variability and reproducibility in various experimental conditions, *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I. P. Pavlova*, **61 (1)**, 102 (2011).
- Kaiser D.A. Rethinking standard bands, *J. Neurotherapy*, **5(1/2)**, 96 (2001).
- Anokhin A.P., Muller V., Lindenberger U., Heath A.C., Myers E. Genetic influences on dynamic complexity of brain oscillations, *Neurosci. Lett.*, **397(1-2)**, 93 (2006).
- Nunez P., Wingeier B., Silberstein R. Spatialtemporal structures of human alpha rhythms: theory, microcurrent sources, multiscale measurements, and global binding of networks, *Hum. Brain Mapp*, **13(3)**, 125 (2001).
- Bazanova O.M., Aftanas L.I. Individual measures of electroencephalogram alpha activity and non-verbal creativity, *Neuroscience and Behavioral Physiology*, **38 (3)**, 227 (2008).
- Grandy T. H., Werkle-Bergner M., Chicherio C., Lövdén M., Schmiedek F., Lindenberger U. Individual alpha peak frequency is related to latent factors of general cognitive abilities, *Neuroimage*, **79**, 10 (2013).
- Cooper N.R., Croft R.J., Dominey S.J.J. et al. Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses, *Int. J. Psychophysiol.*, **47**, 65 (2003).
- Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis, *Brain Res. Rev.*, **29**, 169 (1999).
- Doppelmayr M., Klimesch W., Hodlmoser K., Sauseng P., Gruber W. Intelligence related upper alpha desynchronization in a semantic memory task, *Brain Res. Bull.*, **66**, 171 (2005).
- Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: The inhibitiontiming hypothesis, *Brain Res. Rev.*, **53**, 63 (2007).
- Moretti D.V., Miniussi C., Frisoni G.B., Zanetti O., Binetti G., Geroldi C. Vascular damage and EEG markers in subjects with mild cognitive impairment, *Clin Neurophysiol.*, **118 (8)**, 1866 (2007).
- Hummel F., Saur R., Lasogga S., Plewnia C., Erb M., Wildgruber D., Grodd W., Gerloff C. To act or not to act: neural correlates of executive control of learned motor behavior, *NeuroImage*, **23**, 1391 (2004).
- Bazanova O. M. and Vernon D. Interpreting EEG alpha activity, *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **44**, 94 (2014).
- Besthorn C., Zerfass R., Geiger-Kabisch C., Sattel H., Daniel S., Schreiter-Gasser U., Förstl H. Discrimination of Alzheimer's disease and normal aging by EEG data. Electroencephalogr, *Clin. Neurophysiol.*, **103**, 241 (1997).
- Stoffers D., Bosboom J.L.W., Deijen J.B., Wolters E.C., Berendse H.W., Stam C.J. Slowing of oscillatory brain activity is a stable characteristic of Parkinson's disease without dementia, *Brain*, **130 (7)**, 1847 (2007).
- Harris A., Melkonian D., Williams L., Gordon E. Dynamic spectral analysis findings in first episode and chronic schizophrenia, *Int. J. Neurosci.*, **116 (3)**, 223 (2006).
- Garakh ZhV, Novitskii-Vlasov VYu, Zaitseva YuS, Rebreikona AB, Strelets VB. Frequency of spectral peak of alpha-activity and psychopathological symptoms in schizophrenia, *Zh. Vyssh. Nervn. Deyat.*, **61(4)**, 444 (2011).

22. Dickinson A., DiStefano C., Senturk D., Jeste S. S. Peak alpha frequency is a neural marker of cognitive function across the autism spectrum, *Eur. J. Neurosci.* **47**, 643 (2017).
23. Vogel W. and Broverman, D.A. Relationship between EEG and test intelligence: A critical review., *Psychological Bulletin*, **62**, 132 (1964).
24. Juolasmaa A., Toivakka, E., Outakovski, J., Sotaniemi, K., Tienari, P., & Hirvenoja, R. Relationship of quantitative EEG and cognitive test performance in patients with cardiac valvular disease, *Scandinavian Journal of Psychology*, **27**, 30 (1986).
25. Ellingson R.J. Relationship between EEG and test intelligence: A commentary, *Psychological Bulletin*, **65**, 91 (1966).
26. Posthuma D., Neale M. C., Boomsma D. I., & de Geus E. J. Are smarter brains running faster? Heritability of alpha peak frequency, IQ, and their interrelation, *Behavior Genetic*, **31**, 567 (2001).
27. Grindel' O.M., Sazonova O.B., Zhirov S.B. The spatial structure of the alpha rhythm in the healthy human being studied by EEG mapping, *Zh Vyssh Nerv Deiat Im I P Pavlova*, **42(3)**, 491 (1992).
28. Pfurtscheller G., Maresch H., Schuy S. Inter- and intrahemispheric differences in the peak frequency of rhythm inactivity within the alpha band. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **42**, 77 (1977).
29. Clark R.C., Veltmeyer D., Hamilton R.J., Simms E., Paul R., Hermens D., Gordon E. Spontaneous alpha peak frequency predicts working memory performance across the age span, *Int. J. Psychophysiol.*, **53**, 1 (2004).
30. Kamei T., Toriumi, Y., Kimura, H., Ohno, S., Kumano, H., Kimura, K. Decrease in serum cortisol during yoga exercise is correlated with alpha wave activation, *Percept. Mot. Skills*, **90 (3)**, 1027 (2000).
31. Anokhin A., Vogel, F. EEG alpha rhythm frequency and intelligence in normal adults, *Intelligence*, **23 (1)**, 1 (1996).
32. Botvinick M.M., Braver T.S., Barch D.M., Carter C.S., Cohen J.D. Conflict monitoring and cognitive control, *Psychol. Rev.*, **108**, 624 (2001).
33. Berger A. M., Davelaar E. J. Frontal alpha oscillations and attentional control: a virtual reality neurofeedback study, *Neuroscience*, **378**, 189 (2018).
34. Ackerman P.L., Beier M.E., Boyle M.O. Individual differences in working memory within a nomological network of cognitive and perceptual speed abilities, *J. Exp. Psychol. Gen.*, **131 (4)**, 567 (2002).
35. Jensen A.R. The g Factor: The Science of Mental Ability, 664 p. (Praeger Westport, CT 1998).
36. Doppelmayr M., Klimesch W., Pachinger T., Ripper B. Individual differences in brain dynamics: important implications for the calculation of event-related band power, *Biol. Cybern.*, **79 (1)**, 49 (1998).
37. Raven Dzh. K., Raven Dzh. and Kurt Dzh. Kh., *Rukovodstvo k Progressivnym Matritsam Ravena i Slovarnym shkalam* (Moscow: Kogito-Tsentr, 1997).
38. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects, *JAMA*, **310(20)**, 2191 (2013).
39. McGarry-Roberts P.A., Stelmack R.M., Campbell K.B. Intelligence, reaction time, and event-related potentials, *Intelligence*, **16**, 289 (1992).
40. Reed T.E., & Jensen, A.R. Conduction velocity in a brain nerve pathway of normal adults correlates with intellectual level, *Intelligence*, **16**, 259(1992).
41. Smith E.E., Jonides J., Koeppel R.A. Dissociating Verbal and Spatial Working Memory Using PET, *Cerebral Cortex*. **6 (1)**, 11 (1996).
42. Cochin S., Barthelemy C., Roux S., Martineau J. Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography, *Eur. J. Neurosci.*, **11(5)**, 1839 (1999).
43. Frenkel-Toledo S., Bentin S., Perry A., Liebermann D. G., Soroker N. Dynamics of the EEG power in the frequency and spatial domains during observation and execution of manual movements, *Brain. Res.*, **1509**, 43 (2013).