

УДК 612.821

doi: 10.17223/19988591/45/6

А.И. Кайда, С.А. Махин, Е.В. Эйсмонт, В.Б. Павленко

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

Возрастная динамика и топография реактивности индивидуального мю-ритма ЭЭГ у детей 4–14 лет

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского на 2015–2024 гг.

Исследование посвящено изучению паттернов реактивности индивидуально определенного мю-ритма ЭЭГ у детей следующих возрастных групп: «дошкольники» (4–6 лет), «младшие школьники» (7–10 лет), «подростки» (11–14 лет) в условиях реализации самостоятельных движений с помощью компьютерной мыши, а также синхронной имитации, зрительно-слуховом и слуховом восприятии аналогичных движений, выполняемых другим человеком. В исследовании принял участие 121 испытуемый в возрасте 4–14 лет. Дисперсионный анализ различий в амплитуде мю-ритма в ситуации выполнения детьми самостоятельных движений с помощью компьютерной мыши продемонстрировал значимую десинхронизацию мю-ритма преимущественно левополушарной локализации в центральных и верхнелобных корковых проекциях, а также в теменных отведениях как левого, так и правого полушарий. При этом величина десинхронизации увеличивалась с возрастом. В ситуации синхронной имитации движений другого человека наблюдалась дополнительная к вызванной собственными движениями депрессия мю-ритма в локусах P3 и Pz только в группе подростков. Ситуация зрительно-слухового восприятия движений, выполняемых другим человеком, вызвала значимое подавление мю-ритма исключительно в теменных отведениях. При слуховом восприятии движений мышью, выполняемых другим человеком, подавление мю-ритма наблюдалось в теменных отведениях P3, Pz и P4 также исключительно в группе подростков.

Ключевые слова: дети; ЭЭГ; мю-ритм; движение; имитация движения; наблюдение.

Введение

К настоящему времени известно, что наблюдение за действиями, выполняемыми другими людьми, вызывает у наблюдателя изменения в активности головного мозга, сходные с теми, которые имеют место при самостоятельном выполнении аналогичных действий [1, 2]. Ряд исследователей [3, 4] полагают, что области коры, демонстрирующие сходные паттерны активации для условий выполнения и наблюдения действий, могут являться частью так называемой «зеркальной» системы мозга (ЗСМ), которая обеспечивает

имплицитное понимание целей, лежащих в основе актуального поведения конспецификов. В мозге человека «зеркальные» свойства выявлены в следующих областях коры: прецентральной извилине, задней части нижней лобной извилины и ростральной части нижней теменной доли [5]. Данные регионы являются частью сложной сети, получающей входы от зрительной коры опосредованно через верхнюю височную борозду [6], которая участвует в процессах восприятия биологического движения [7].

В последние годы активно проверяется гипотеза, согласно которой коррелятом процесса активации ЗСМ может выступать реакция десинхронизации мю-ритма ЭЭГ, которая имеет место как при выполнении самостоятельных движений, так и при наблюдении, мысленном представлении и имитации движений других людей [8–10]. В связи с тем, что на мю-ритм, принадлежащий к семейству альфа-ритмов и регистрируемый над сенсомоторной корой, может частично накладываться относительно мощный затылочный альфа-ритм, который модулируется зрительным вниманием, настоятельно рекомендуется расчет индивидуального частотного диапазона мю-ритма в соответствии с его главным функциональным свойством – десинхронизацией в ответ на совершение самостоятельного движения [11, 12]. Дополнительная сложность связана с тем, что ЭЭГ-активность, рассматриваемая как мю-ритм, может демонстрировать различную топологию фокусов десинхронизации и их частотные составляющие в зависимости от особенностей экспериментальной задачи и части тела, с помощью которой осуществляется реальное (или воображаемое) движение [13].

В ряде работ показано, что хотя фокус наибольшей мощности мю-ритма в условиях двигательного покоя находится, как правило, над областями коры, соответствующими центральным локусам ЭЭГ (C3 и C4), максимальная реакция его десинхронизации и у детей, и у взрослых может быть значительно смещена в сторону теменных отведений [14]. В отдельных исследованиях произвольные движения испытуемых сопровождалось подавлением мю-ритма в париетальных и фронтальных отведениях [15, 16]. В частности, обнаружены эффекты активации париетального кортекса в задачах, включающих в себя планирование и осуществление движений [17, 18], представление движений в уме [19, 20] и наблюдение за движениями [21, 22]. Данные факты обычно объясняют тем, что теменная кора активно вовлечена в процессы зрительно-моторной интеграции при реализации движений, направленных на объект [23, 24]. Помимо этого, имеются данные о том, что реакция подавления мю-ритма положительно коррелирует с уровнем оксигенации крови в премоторных и париетальных участках коры [25]. Динамика реактивности мю-ритма отражает эффекты десинхронизации в относительно широко распределенной фронто-париетальной сети, обеспечивающей осуществление и координацию сложных моторных планов. В связи с этим выделение единственного источника мю-подобной активности не всегда оказывается обоснованным; более целесообразно анализировать эффекты десинхронизации

ЭЭГ в диапазоне частот мю-ритма с учетом также префронтальных и парietальных областей коры [14].

В случае работы с детьми приходится учитывать также и тот факт, что частотный диапазон ЭЭГ-активности, соответствующей мю-ритму у взрослых, находится в области более низких частот, нарастая до стандартных величин по мере взросления. Кроме того, мю-ритм у детей, как правило, имеет бóльшую амплитуду по причине меньших толщины костей черепа и сопротивления тканей [26, 27].

Известно, что индивидуальная вариабельность частотных интервалов в диапазоне альфа-ритма, наиболее чувствительных к выполняемым когнитивным и моторным задачам, весьма высока [28]. Исходя из этого, представляется целесообразным предварительное выделение таких интервалов с тем, чтобы наблюдать изменения мощности ритмов именно в той частотной полосе, которая наиболее реактивна при выполнении конкретной задачи. Одной из методик определения индивидуальной частотной полосы мю-ритма является нахождение ее значений, для которых характерна реакция максимальной десинхронизации (относительно исходного уровня) в области соматосенсорной корковой проекции того участка тела, который подвергается сенсорной стимуляции. С данной целью может, например, производиться стимуляция слабым электрическим током указательного пальца правой руки с одновременной регистрацией ЭЭГ в отведении С3 [29, 30]. Другой подход связан с поиском относительно узкого частотного диапазона (шириной в 1–2 Гц) с максимальной депрессией амплитуды ЭЭГ при выполнении самостоятельных движений [31, 32]. В частности, Tamura et al. [33] использовал различные движения, а именно, постукивание указательным пальцем, движения языком и артикуляцию звуков речи. По мнению Thorpe et al. [14], «золотым стандартом» функционального определения мю-ритма следует считать именно условия собственной моторной активности.

Много вопросов остается относительно возрастной динамики изменений в величине и топографической представленности эффектов угнетения мю-ритма. Ранее в нашей работе показано отсутствие явной зависимости от возраста детей ($n=38$; 4–14 лет) в степени десинхронизации мю-ритма как при выполнении самостоятельных движений, так и при имитации, зрительно-слуховом и исключительно слуховом восприятии чужих движений [34]. Однако в указанном исследовании не выделялись индивидуальные для каждого ребенка частотные диапазоны мю-ритма, а также изучались исключительно центральные отведения С3, Сз и С4. В работе других авторов [35], в которой определялся индивидуальный частотный диапазон мю-ритма шириной 2 Гц, также сообщается об отсутствии связанных с возрастом корреляций. Но следует учитывать, что в корреляционном анализе рассматривались показатели лишь 15 испытуемых в возрасте 4–15 лет. При этом имеются результаты исследования [36], согласно которым у детей уже годовалого возраста мю-ритм тем больше десинхронизируется при наблюдении действий, выпол-

няемых другими, чем успешнее они сами справляются с их выполнением. При осуществлении самостоятельных действий детьми в возрасте 3–5 лет более выраженное угнетение мю-ритма в центрально-париетальных (но не лобных и затылочных) отведениях имело место у тех из них, кто имел более высокие показатели развития моторных навыков и способности к воспроизведению наблюдаемых действий [37].

Относительно мало публикаций, особенно в контексте взросления, посвящено анализу реактивности мю-ритма в ответ на восприятие звуковых стимулов, которые связаны с реализацией каких-либо действий. В рамках нашего предшествующего исследования [34] показана значимая десинхронизация мю-ритма в отведении С4 при слуховом восприятии характерных звуков, сопровождавших движения с помощью компьютерной мыши. В работе Lepage et al. [38] удалось обнаружить депрессию мю-ритма на примере одного испытуемого (ребенок 12 лет с диагнозом эпилепсия) при восприятии звуков цоканья языком и щелканья пальцами. McGarry et al. [39] обнаружили эффект усиления десинхронизации мю-ритма в отведении С3 у взрослых при бимодальном (зрительно-слуховом) восприятии действий относительно унимодального. В исследовании Pineda et al. [40] показана депрессия мю-ритма у взрослых испытуемых в левом полушарии при восприятии связанных с действиями (с помощью руки или рта) звуков, а в правом – при восприятии не связанных с действиями (звуки воды, ветра, волн, поезда) звуков. В еще одной работе [41] обнаружено, что подавление мю-ритма не регистрируется при восприятии звуков, не связанных с действиями (стук метронома, всплеск воды, лист бумаги, пропускаемый через шредер). Для звуков, сопровождающих хлопанье ладонями, комканье и разрывание бумаги, степень десинхронизации мю-ритма достигает уровня статистической значимости лишь при их предъявлении с использованием техники объемного звучания.

Основная цель исследования – изучение паттернов реактивности индивидуально определенного мю-ритма в центральных, верхнелобных и теменных отведениях ЭЭГ у детей дошкольного, младшего школьного и младшего подросткового возраста в условиях реализации самостоятельных движений с помощью компьютерной мыши, а также синхронной имитации, зрительно-слуховом и слуховом восприятии аналогичных движений, выполняемых другим человеком. Условие слухового восприятия движений представляет в контексте данного исследования особый интерес в связи с возможностью ограничить влияние на реактивность мю-ритма затылочного альфа-ритма, десинхронизация которого связывается в первую очередь с эффектами зрительного внимания.

Материалы и методики исследования

Экспериментальная схема, использованная в данной работе, в своей основе повторяет примененную нами ранее при изучении реактивности

мю-ритма в выборке детей [34] и взрослых [42]. Специфика настоящего исследования состоит в том, что анализировали существенно расширенную выборку детей и сопоставляли показатели различных возрастных групп. При этом для каждого ребенка функционально определяли индивидуальный частотный диапазон мю-ритма, а реактивность мю-ритма рассматривали не только в центральных, но и прилегающих к ним фронтальных и парietальных отведениях ЭЭГ.

В процессе эксперимента ребенок и экспериментатор располагались за находящимися по соседству столами (экспериментатор справа, на расстоянии 1,5 м), на каждом из которых размещали монитор и компьютерную мышь (далее – КМ) Logitech M185. Параметры чувствительности и ускорения мыши соответствовали настройкам по умолчанию в операционной системе Windows 7. На монитор, находящийся перед ребенком, выводилось видеоизображение участка стола экспериментатора с КМ (в проекции от лица экспериментатора). Эгоцентрическую перспективу использовали для того, чтобы усилить эффект личной вовлеченности ребенка в демонстрируемую на экране сцену, тем самым обеспечив более высокую реактивность мю-ритма при наблюдении действий экспериментатора [43]. Ребенка размещали таким образом, чтобы его глаза находились на средней линии от центра монитора на расстоянии приблизительно 70–80 см, а ноги фиксировали неподвижно на регулируемой по высоте подставке. Перед началом эксперимента ребенка просили совершить пробную серию движений с КМ, чтобы удостовериться, что локоть его правой руки относительно неподвижен, а движения осуществляются с помощью кисти. Движения с КМ осуществлялись по кругу (по часовой стрелке) с периодом повторения не менее одного и не более двух оборотов в секунду. В задачах, в которых ребенку не требовалось выполнять движения с КМ, обе его руки располагались на коленях.

Последовательность выполнения заданий детьми включала в себя фиксированную очередность этапов (длительностью 30 с каждый), в промежутке между которыми ребенок получал инструкции о его последующих действиях. С учетом предъявления инструкций общая продолжительность эксперимента составляла около 5 мин и включала в себя следующие этапы:

1. Фиксация взгляда на видеоизображении КМ, расположенной на столе перед экспериментатором (ФВ.1).
2. Выполнение самостоятельных движений КМ с произвольной скоростью таким образом, чтобы курсор двигался по часовой стрелке вокруг КМ, изображенной на мониторе (ДВИГ.1).
3. Фиксация взгляда на видеоизображении КМ, расположенной на столе перед экспериментатором (ФВ.2).
4. Пассивное наблюдение за движениями руки экспериментатора с КМ – два цикла с ускорением и замедлением (НАБЛ).
5. Фиксация взгляда на видеоизображении КМ, расположенной на столе перед экспериментатором (ФВ.3).

6. Выполнение самостоятельных движений КМ с произвольной скоростью (ДВИГ.2).

7. Имитация скорости движений КМ, выполняемых экспериментатором с переменной скоростью (ИМИТ).

8. Испытуемый сидит неподвижно с закрытыми глазами (ГЗ).

9. Испытуемый слышит (без предварительной инструкции) характерные звуки трения о поверхность стола во время движений мышью, которые совершает экспериментатор с переменной скоростью (СЛУХ).

Порядок выполнения заданий предполагал первоначальную актуализацию моторных программ, связанных с выполнением круговых движений с помощью КМ. Отдельный интерес представляли изменения паттернов реактивности мю-ритма при повторной реализации ранее выполнявшихся движений.

Чтобы в некоторой степени компенсировать эффекты, вызванные использованной последовательностью выполнения заданий, величину десинхронизации мю-ритма рассчитывали в каждом случае относительно непосредственно предшествующей ситуации сравнения, как это рекомендовано Hobson & Bishop [11]. При расчете индивидуальных индексов реактивности мю-ритма для ситуаций ДВИГ.1, ДВИГ.2 и НАБЛ исходным условием сравнения служила предшествующая каждой из них ситуация фиксации взгляда на изображении неподвижной КМ (ФВ.1, ФВ.2, ФВ.3 соответственно). Для ситуации ИМИТ таким условием являлась ситуация ДВИГ.2, а для ситуации СЛУХ – условие ГЗ.

Индексы реактивности рассчитывали по общепринятой схеме [44] в соответствии с формулой $[k = \ln (B/A)]$, где k – коэффициент реактивности мю-ритма, B – амплитуда мю-ритма в основной ситуации, A – амплитуда мю-ритма в исходной ситуации сравнения. Таким образом, положительные значения коэффициента соответствовали реакции синхронизации мю-ритма, а отрицательные – реакции десинхронизации.

Регистрация, обработка и анализ ЭЭГ осуществлены по общепринятой методике с помощью автоматизированного комплекса, состоящего из электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-3» (фирма «Нейрософт», г. Иваново) и персонального компьютера. ЭЭГ-потенциалы отводили монополярно от фронтальных (Fp1, Fp2, F3, Fz, F4, F7, F8), центральных (C3, Cz, C4), теменных (P3, Pz, P4), височных (T3, T4, T5, T6) и затылочных (O1, O2) локусов по системе 10–20. В качестве референтного электрода использовали объединенные контакты, закрепленные на мочках ушей. Частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли соответственно 1,5 и 35 Гц, частота оцифровки ЭЭГ-сигналов – 250 Гц, эпохи анализа – 3 с (с перекрытием 50%). Сигналы обрабатывали с помощью быстрого преобразования Фурье с последующим сглаживанием по методу Баттерворта. Областью интереса в рамках настоящего исследования являлась реактивность ЭЭГ в следующих отведениях: F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4.

В исследовании участвовал 121 ребенок в возрасте от 4 до 14 лет. Детей, принявших участие в исследовании, набирали с помощью объявлений, размещенных в детских садах и школах г. Симферополя. Родители, после предоставления необходимых сведений, давали согласие на участие детей в работе. Настоящее исследование соответствовало этическим принципам Хельсинской декларации 1964 г. и одобрено этическим комитетом Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского.

Первым критерием отбора испытуемых для дальнейшего анализа в рамках настоящего исследования служило наличие нормального (или скорректированного до нормального) уровня зрения и слуха, предпочтение правой руки в работе с КМ, а также достаточный уровень когнитивного развития (IQ не менее 80 баллов по тесту Векслера в вариантах WPPSI и WISC). На данном этапе исключили из исследования 19 детей.

Вторым критерием отбора испытуемых для дальнейшего статистического анализа данных являлось требование наличия как минимум 20 с безартефактной записи ЭЭГ в рамках каждого из этапов эксперимента, а также возможность выделения индивидуального частотного диапазона мю-ритма в соответствии с его ключевым свойством – реакцией десинхронизации в ответ на запуск и осуществление самостоятельных движений. Методика его расчета основана на выделении отрезка ЭЭГ шириной 2 Гц в диапазоне от 6 до 13 Гц, которому соответствует максимальная реакция десинхронизации в отведении С3 при совершении самостоятельных движений правой рукой относительно условия зрительной фиксации на изображении КМ. Сравнивали усредненные мощности биопотенциалов, зарегистрированных на протяжении около одной минуты (2×30 с), соответствующие экспериментальным ситуациям фиксации взгляда на неподвижной компьютерной мыши и самостоятельных движений. Для этого полный частотный диапазон мю-ритма разбивали на полосы шириной в 1 Гц, каждую из которых оценивали с целью поиска реакции максимальной десинхронизации. Далее оценивали два прилегающих к ней отрезка с целью поиска десинхронизации, величина которой превышает 10%, при этом, если обе прилегающие полосы соответствовали требуемому условию, выбирали ту, в которой падение более выражено, и после этого объединяли с полосой, имеющей максимальную десинхронизацию, в результате чего их общая ширина составляла 2 Гц. Если в прилегающих к полосе с максимальной десинхронизацией участках подавление мю-ритма составляло менее 10% или отсутствовало, от каждого из них отделяли отрезок шириной в 0,5 Гц и после этого объединяли с полосой, имеющей максимальную десинхронизацию, в результате чего их общая ширина составляла 2 Гц. Далее они рассматривались как индивидуальный частотный диапазон мю-ритма. Как результат, для итогового статистического анализа отобрали 87 испытуемых, показатели ЭЭГ которых соответствовали предъявляемым требованиям.

Для дальнейшего статистического анализа и сравнения показателей выборку детей разделили на три группы в соответствии с возрастом. В первую

группу («дошкольники») вошли 23 ребенка в возрасте от 4 до 6 лет (9 девочек и 14 мальчиков; средний возраст и стандартное отклонение составили $5,3 \pm 0,8$ года; уровень IQ – $112,4 \pm 13,8$ балла при крайних значениях 88 и 130 баллов). Во вторую группу («младшие школьники») вошли 47 детей в возрасте от 7 до 10 лет (17 девочек и 30 мальчиков; $8,4 \pm 1,2$ года; уровень IQ – $113,5 \pm 13,6$ балла при крайних значениях 80 и 138 баллов). Третью группу («подростки») составили 17 детей в возрасте от 11 до 14 лет (12 девочек и 7 мальчиков; $12,8 \pm 1,1$ года; уровень IQ – $113,5 \pm 12,5$ балла при крайних значениях 95 и 137 баллов).

Для оценки возможной активации премоторной и теменной коры анализировали ЭЭГ не только в центральных (C3, Cz, C4), но и в прилегающих фронтальных (F3, Fz, F4) и парietальных (P3, Pz, P4) локусах. Целесообразность анализа мю-активности в более широких корковых проекциях диктуется, в частности, тем, что источники ее подавления при осуществлении движений могут обнаруживаться не только в центральных, но и префронтальных и теменных областях [15, 16, 45, 46].

Различия в амплитуде мю-ритма при сопоставлении исходных и экспериментальных условий оценивали с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями (repeated measures ANOVA). С целью нормализации распределений анализируемых величин значения амплитуд предварительно подвергали log-трансформации с помощью натурального логарифма. Оценивали влияние такого межсубъектного фактора, как возрастная группа (ВОЗР), а также двух внутрисубъектных факторов: ситуация (СИТ) и локус ЭЭГ (ЛОК) по схеме $3 \times 2 \times 9$. Далее для расчета статистической значимости эффектов угнетения мю-ритма в привязке отдельно к каждому из девяти отведений ЭЭГ в рамках каждой возрастной группы использовали метод априорных контрастов (оценка F-распределения).

Результаты исследования и обсуждение

Анализ паттернов реактивности ЭЭГ детей в условиях реализации самостоятельных движений с помощью компьютерной мыши, а также синхронной имитации, зрительно-слуховом и слуховом восприятии аналогичных движений, выполняемых другим человеком, выявил депрессию мощности в частотном диапазоне от 6 до 13 Гц. Это указывает на участие в таких изменениях ЭЭГ феномена подавления осцилляций мю-ритма. Для наиболее эффективного выявления подобных реакций и оценки их особенностей у детей разного возраста диапазоны мю-ритма, в отличие от предыдущего исследования [34], определены индивидуально для каждого ребенка. Средние значения медианной частоты в границах выделенных индивидуальных диапазонов мю-ритма шириной 2 Гц составили в группе дошкольников $10,1 \pm 1,2$ Гц, в группе младших школьников – $9,9 \pm 1,4$ Гц и в группе подростков – $10,6 \pm 1,1$ Гц. Несмотря на то, что значение медианной частоты в

группе подростков выглядят как заметно более высокие по сравнению с детьми младшего возраста, различия по данному показателю между группами, оцененные с помощью однофакторного дисперсионного анализа, не достигали уровня статистической значимости: $F(2;84) = 1,85$; $p = 0,16$; $\eta_p^2 = 0,04$.

Дисперсионный анализ различий в амплитуде мю-ритма в ситуации ДВИГ.1 относительно ситуации ФВ.1 с учетом возрастной группы и локуса отведения ЭЭГ показал значимое влияние факторов СИТ ($F(1;84) = 31,06$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,27$), ВОЗР ($F(2;84) = 4,73$; $p = 0,011$; $\eta_p^2 = 0,1$) и ЛОК ($F(8;672) = 27,89$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,25$), а также взаимодействия факторов СИТ×ЛОК ($F(8;672) = 32,6$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,28$). Для оценки значимости эффектов угнетения мю-ритма в каждом из девяти локусов ЭЭГ рассчитывались априорные контрасты на основе F-статистики. Гистограммы, демонстрирующие коэффициенты реактивности индивидуального мю-ритма в сравнении между различными возрастными группами, представлены на рис. 1.

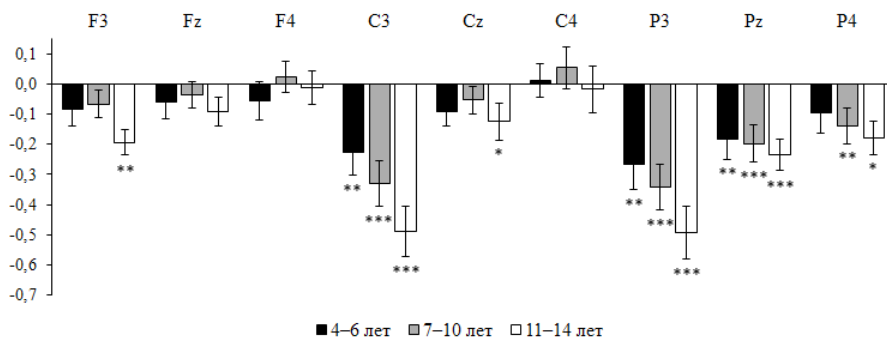


Рис. 1. Коэффициенты реактивности (с обозначением стандартной ошибки среднего) для мю-ритма ЭЭГ в группах дошкольников (4–6 лет), младших школьников (7–10 лет) и подростков (11–14 лет) при условии выполнения самостоятельных движений (ДВИГ.1) относительно условия зрительной фиксации на изображении неподвижной компьютерной мыши (ФВ.1). Статистически значимые модуляции в амплитуде мю-ритма обозначены символом «*»: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

[Fig. 1. Mean suppression indices (with standard errors) of the EEG mu rhythm in the groups of preschool children (4–6 years old), junior schoolchildren (7–10 years old), and adolescents (11–14 years old) under condition of self-controlled right-hand movement relative to the situation of sight fixed at the stationary computer mouse. On the X-axis – EEG loci for each age group; on the Y-axis – Log ratio of the mu rhythm amplitudes. Statistically significant modulations in the mu rhythm amplitude are indicated by the symbol “*”. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$]

Имеет место выраженная левополушарная латерализация эффектов подавления мю-ритма во всех возрастных группах. Существенная и даже несколько бóльшая десинхронизация в теменных отведениях по сравнению с центральными подтверждает наблюдения других авторов [14] и может указывать на активность процессов реafferентации от кинестетических рецепторов, характерную для условия реализации относительно медленных

движений, предполагающих наличие постоянной обратной связи [47]. Обращают на себя внимание более высокие индексы значимой десинхронизации в выборке детей старшего возраста. Группа подростков также демонстрирует значимое падение амплитуды мю-ритма в премоторной коре левого полушария (локус F3), а также в медианном центральном отведении (Cz).

Сравнение ситуаций НАБЛ и ФВ.2 обнаружило значимое влияние факторов СИТ ($F(1;84) = 6,69$; $p = 0,011$; $\eta^2 = 0,07$) и ЛОК ($F(8;672) = 25,68$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,23$), а также их взаимодействия СИТ $\times$ ЛОК ($F(8;672) = 12,01$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,13$). Коэффициенты реактивности мю-ритма во всех отведениях для каждой группы показаны на рис. 2.

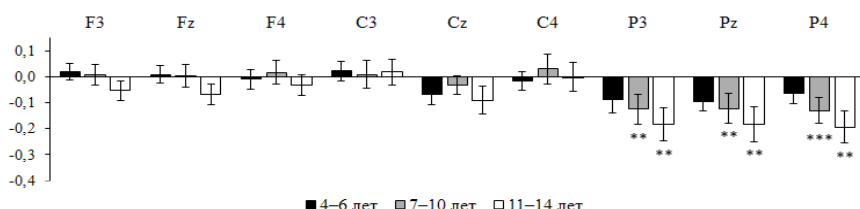


Рис. 2. Коэффициенты реактивности (с обозначением стандартной ошибки среднего) мю-ритма ЭЭГ в группах дошкольников (4–6 лет), младших школьников (7–10 лет) и подростков (11–14 лет) при условии наблюдения движений (НАБЛ) относительно условия зрительной фиксации на изображении неподвижной компьютерной мыши (ФВ.2). ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$ [Fig. 2. Mean suppression indices (with standard errors) of the EEG mu rhythm in the groups of preschool children (4-6 years old), junior schoolchildren (7-10 years old), and adolescents (11-14 years old) under condition of movement observation relative to the situation of sight fixed at the stationary computer mouse. On the X-axis - EEG loci for each age group; on the Y-axis - Log ratio of the mu rhythm amplitudes. ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$]

При наблюдении инструментальных движений, выполняемых другим человеком, значимое подавление мю-ритма проявлялась исключительно в теменных отведениях ЭЭГ. И хотя из рисунка видно, что величина депрессии мю-ритма тем больше, чем старше испытуемые, дисперсионный анализ не выявил значимых возрастных различий в силе данной реакции. Следует указать на отсутствие выраженной реактивности ЭЭГ в индивидуально определенном частотном диапазоне мю-ритма в центральных и фронтальных отведениях. Можно предположить, что данный результат обусловлен относительно продолжительным предъявлением стимула. В этом смысле наше наблюдение подтверждает выводы некоторых других авторов, которые анализировали эффекты подавления мю-ритма в центральных отведениях ЭЭГ при длительном наблюдении (до двух минут) манипуляций рукой с различными объектами [48].

Повторное выполнение самостоятельных движений (ДВИГ.2 относительно ФВ.3) продемонстрировало картину, в соответствии с которой влияние

отдельных факторов и их взаимодействия относительно условия ДВИГ.1 несколько изменились. Влияние фактора СИТ оказалось еще более выражено ($F(1;84) = 52,73$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,39$), фактор ЛОК характеризовался сопоставимыми показателями ($F(8;672) = 24,91$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,23$), однако влияние ВОЗР как основного фактора уже не достигало уровня статистической значимости ($F(2;84) = 2,47$; $p = 0,091$; $\eta_p^2 = 0,06$). Значимым оказалось взаимодействие факторов СИТ×ЛОК ($F(8;672) = 28,99$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,26$), а также СИТ×ВОЗР ($F(2;84) = 5,32$; $p = 0,007$; $\eta_p^2 = 0,11$). Величины коэффициентов реактивности мю-ритма в каждом из отведений ЭЭГ представлены на рис. 3.

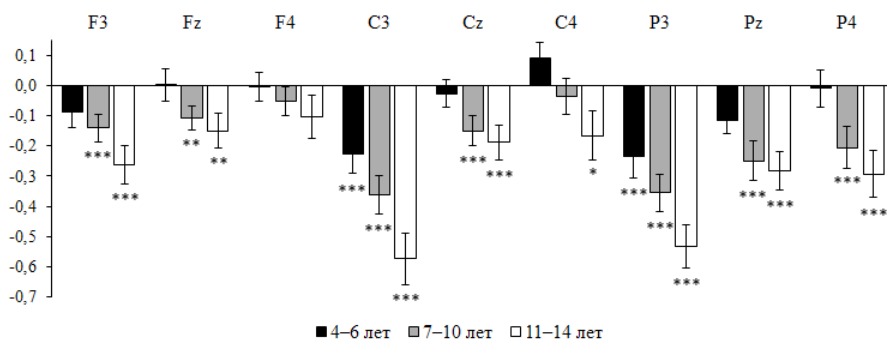


Рис. 3. Коэффициенты реактивности (с обозначением стандартной ошибки среднего) мю-ритма ЭЭГ в группах дошкольников (4–6 лет), младших школьников (7–10 лет) и подростков (11–14 лет) при условии выполнения самостоятельных движений (ДВИГ.2) относительно условия зрительной фиксации на изображении неподвижной компьютерной мыши (ФВ.3). * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

[Fig. 3. Mean suppression indices (with standard errors) of the EEG mu rhythm in the groups of preschool children (4-6 years old), junior schoolchildren (7-10 years old), and adolescents (11-14 years old) under condition of self-controlled right-hand movement relative to the situation of sight fixed at the stationary computer mouse. On the X-axis - EEG loci for each age group; on the Y-axis - Log ratio of the mu rhythm amplitudes. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$].

Исходя из полученных результатов, можно говорить о том, что повторное выполнение серии инструментальных движений вызывает в целом еще более выраженные и дифференцированные в отношении возраста эффекты угнетения мю-ритма. Если в ситуации ДВИГ.1 взаимодействие факторов СИТ и ВОЗР не достигало уровня достоверности, то для условия ДВИГ.2 оно уже оказалось статистически значимо. Значимая десинхронизация мю-ритма регистрируется в группе младших школьников дополнительно в локусах F3, Fz и Cz, в группе подростков – в локусах Fz и C4. Такие особенности пространственного распределения реакций могут быть связаны с тем, что дети старшего возраста быстрее овладевали навыком манипуляции компьютерной мышью в соответствии с данным заданием, из-за чего несколько модифицировался характер регуляции ими собственных движений, вовлекая

уже более широкие корковые проекции, включая левополушарную премоторную (F3), дополнительную моторную (Cz-Fz) и правополушарную сенсомоторную (C4) кору.

Далее мы оценивали изменение амплитуды мю-ритма в ситуации ИМИТ относительно условия выполнения самостоятельных движений (ДВИГ.2). Значимое влияние продемонстрировали все основные факторы: СИТ ($F(1;84) = 7,0; p = 0,01; \eta_p^2 = 0,08$), ВОЗР ($F(2;84) = 7,07; p = 0,001; \eta_p^2 = 0,14$) и ЛОК ($F(8;672) = 25,0; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,23$), а также взаимодействия факторов СИТ×ЛОК ($F(8;672) = 2,36; p = 0,017; \eta_p^2 = 0,03$). Индексы реактивности мю-ритма для каждого отведения отдельно показаны на рис. 4.

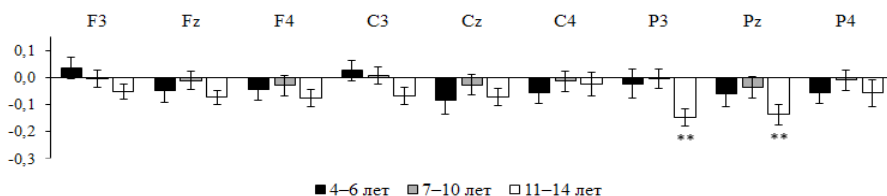


Рис. 4. Коэффициенты реактивности (с обозначением стандартной ошибки среднего) мю-ритма ЭЭГ в группах дошкольников (4–6 лет), младших школьников (7–10 лет) и подростков (11–14 лет) при условии имитации движений в режиме реального времени (ИМИТ) относительно условия выполнения самостоятельных движений (ДВИГ.2). ** – $p < 0,01$

[Fig. 4. Mean suppression indices (with standard errors) of the EEG mu rhythm in the groups of preschool children (4-6 years old), junior schoolchildren (7-10 years old), and adolescents (11-14 years old) under condition of synchronous imitation relative to the situation of self-paced movements. On the X-axis - EEG loci for each age group; on the Y-axis - Log ratio of the mu rhythm amplitudes. ** $p < 0,01$]

Условие синхронной с наблюдаемым движением имитации, по всей видимости, требует вовлеченности дополнительных когнитивных механизмов, обеспечивающих оптимальное восприятие и контроль за выполнением задания. Как мы видели при анализе ситуации ДВИГ.2, она уже сама по себе вызывала выраженную десинхронизацию мю-ритма в центральных и теменных отведениях ЭЭГ. Необходимость соотнесения собственных движений с наблюдаемыми вызывала дополнительное угнетение мю-ритма только в группе подростков. Она регистрировалась исключительно в теменных отведениях и имела преимущественно левополушарную и вертексную локализацию. Интересно отметить, что в нашей предыдущей работе со взрослыми при анализе реактивности классического мю-ритма (8–13 Гц) в центральных отведениях дополнительная депрессия имела место в локусе Cz [42].

Последняя анализируемая ситуация представляла собой слуховое восприятие (СЛУХ) характерных звуков, сопровождающих выполнение круговых движений с помощью КМ, относительно состояния расслабленного бодрствования с закрытыми глазами (ГЗ). Значимо влияли на изменения ам-

плитуды мю-ритма только факторы СИТ ($F(1;84) = 5,13; p = 0,026; \eta_p^2 = 0,06$) и ЛОК ($F(8;672) = 94,2; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,53$). Индексы реактивности во всех отведениях ЭЭГ представлены на рис. 5.

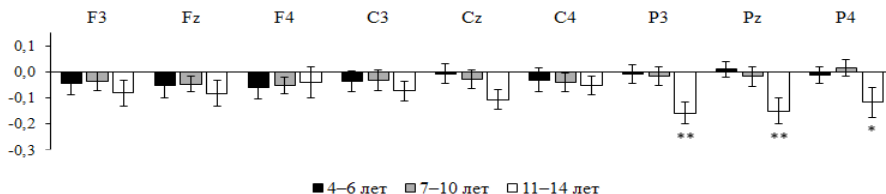


Рис. 5. Коэффициенты реактивности (с обозначением стандартной ошибки среднего) мю-ритма ЭЭГ в группах дошкольников (4–6 лет), младших школьников (7–10 лет) и подростков (11–14 лет) при условии слухового восприятия движений (СЛУХ) относительно условия расслабленного бодрствования с закрытыми глазами (ГЗ). * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$

[Fig. 5. Mean suppression indices (with standard errors) of the EEG mu rhythm in the groups of preschool children (4-6 years old), junior schoolchildren (7-10 years old), and adolescents (11-14 years old) under condition of audial perception of movements relative to the situation of rest with eyes closed. On the X-axis - EEG loci for each age group; on the Y-axis - Log ratio of the mu rhythm amplitudes. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$]

Данная экспериментальная ситуация представляла особенный интерес в связи с тем, что анализировалась относительно исходного состояния при условии закрытых глаз. Так как на этом этапе не предполагалась никакая зрительная стимуляция, условие закрытых глаз являлось предпочтительным (в соответствии с рекомендацией Barry et al. [49]). Тем самым мы могли ограничить влияние связанных со зрительной модальностью аттенциональных процессов, активация которых, как правило, вызывает выраженную десинхронизацию затылочного альфа-ритма. Значимые реакции подавления мю-ритма имели место лишь в теменных отведениях в группе подростков. Зарегистрированные эффекты нельзя объяснить простыми процессами зрительно-моторной интеграции. Их локализация и статистическая значимость могут указывать на возможность участия в их генерации париетального компонента ЗСМ, который различные авторы ассоциируют с кодированием целей, лежащих в основе наблюдаемых действий [50, 51], или же «семантической эквивалентности» действий, выполняемых в разных контекстах и разными агентами [52]. Кроме того, можно предположить, что более успешное (относительно детей младших групп) владение подростками навыками самостоятельного выполнения и имитации инструментальных движений вызывало у них формирование более отчетливого образа знакомого движения без необходимости полагаться на зрительный анализатор.

Таким образом, результаты настоящего исследования показали, что эффекты десинхронизации индивидуально определяемого мю-ритма ЭЭГ с возрастом становятся более выраженными как при условии реализации

собственных движений, так и при имитации, наблюдении и слуховом восприятии движений других людей. Однако следует принимать во внимание, что результаты данного исследования получены в условиях относительно продолжительной стимуляции и наблюдаемые эффекты, по всей видимости, обусловлены скоростью и эффективностью овладения связанным с выполняемым заданием двигательными навыками. Вхождение ребенка в период пубертата существенно изменяет паттерны реактивности мю-ритма, в связи с чем данную возрастную категорию детей следует рассматривать отдельно от выборки детей более младшего возраста.

Выводы

1. Реализация детьми в возрасте 4–14 лет самостоятельных движений правой рукой с помощью компьютерной мыши сопровождается подавлением индивидуального мю-ритма преимущественно левополушарной локализации в центральных и верхнелобных корковых проекциях, а также в теменных отведениях как левого, так и правого полушарий.

2. Повторное выполнение серии движений младшими школьниками и подростками демонстрирует еще более выраженные эффекты десинхронизации мю-ритма с задействованием более широких корковых проекций (премоторная, дополнительная моторная, правая сенсомоторная кора). При этом величина депрессии значительно увеличивается с возрастом.

3. Зрительно-слуховое восприятие серии движений, выполняемых другим человеком, вызывает значимое угнетение индивидуального мю-ритма исключительно в теменных отведениях без заметной латерализации эффектов.

4. Условие синхронной имитации инструментальных движений другого человека сопровождается дополнительной к вызванной собственными движениями депрессией индивидуального мю-ритма только в группе подростков. Статистически значимая десинхронизация выявляется в теменных отведениях, соответствующих локусам ЭЭГ P3 и Pz.

5. Восприятие на слух знакомых инструментальных движений другого человека сопровождается значимым угнетением мю-ритма также исключительно в группе подростков. Десинхронизация локализуется в теменных отведениях P3, Pz и P4.

Литература

1. Hardwick R.M., Caspers S., Eickhoff S.B., Swinnen S.P. Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution // *Neurosci Biobehav Rev.* 2018. № 94. PP. 31–44.
2. Лебедева Н.Н., Зуфман А.И., Мальцев В.Ю. Система зеркальных нейронов мозга: ключ к обучению, формированию личности и пониманию чужого сознания // *Успехи физиологических наук.* 2017. Т. 48, № 4. С. 16–28.
3. Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex // *Brain.* 1996. № 119. PP. 593–609.

4. Rizzolatti G., Fadiga L., Gallese V., Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions // *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 1996. № 3. PP. 131–141.
5. Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system // *Annu. Rev. Neurosci.* 2004. № 27. PP. 169–192.
6. Nishitani N., Avikainen S., Hari R. Abnormal imitation-related cortical activation sequences in Asperger's syndrome // *Ann. Neurol.* 2004. № 55. PP. 558–562.
7. Puce A., Perrett D. Electrophysiology and brain imaging of biological motion // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2003. № 358. PP. 435–445.
8. Braadbaart L., Williams J.H.G., Waiter G.D. Do mirror neuron areas mediate mu rhythm suppression during imitation and action observation? // *International Journal of Psychophysiology.* 2013. № 89. PP. 99–105.
9. Fox N.A., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H., Bowman L.C., Cannon E.N., Vanderwert R.E., Ferrari P.F. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis // *Psychol. Bull.* 2016. № 142 (3). PP. 291–313.
10. Лебедева Н.Н., Каримова Е.Д., Карпычев В.В., Мальцев В.Ю. Зеркальная система мозга при наблюдении, выполнении и представлении моторных задач – нейрофизиологическое отражение восприятия чужого сознания // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2018. Т. 68. № 2. С. 204–215.
11. Hobson H.M., Bishop D.V.M. Mu suppression—a good measure of the human mirror neuron system? // *Cortex.* 2016. № 82. PP. 290–310.
12. Hobson H.M., Bishop D.V.M. The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future // *R. Soc. Open Sci.* 2017. № 4. PP. 1606–1662.
13. Pfurtscheller G., Lopes da Silva F.H. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles // *Clin. Neurophysiol.* 1999. № 110. PP. 1842–1857.
14. Thorpe S.G., Cannon E.N., Fox N.A. Spectral and source structural development of mu and alpha rhythms from infancy through adulthood // *Clin. Neurophysiol.* 2016. № 127 (1). PP. 254–269.
15. Cochin S., Barthelemy C., Roux S., Martineau J. Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography // *Eur. J. Neurosci.* 1999. № 11. PP. 1839–1842.
16. 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.* 2013. Vol. 1509. PP. 43–57.
17. Buneo C.A., Jarvis M.R., Batista A.P., Andersen R.A. Direct visuomotor transformations for reaching // *Nature.* 2002. № 416. PP. 632–633.
18. Connolly J.D., Andersen R.A., Goodale M.A. fMRI evidence for a «parietal reach region» in the human brain // *Exp. Brain Res.* 2003. № 153. PP. 140–145.
19. Hanakawa T., Immisch I., Toma K., Dimyan M., Van Gelderen P., Hallett M. Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery // *J. Neurophysiol.* 2003. № 89. PP. 989–1002.
20. Solodkin A., Hlustik P., Chen E.E., Small S.L. Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery // *Cereb. Cortex.* 2004. № 14. PP. 1246–1255.
21. Van Overwalle F., Baetens K. Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: a meta-analysis // *Neuroimage.* 2009. № 48. PP. 564–584.
22. Molenberghs P., Cunnington R., Mattingley J.B. Brain regions with mirror properties: A meta-analysis of 125 human fMRI studies // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews.* 2012. № 36. PP. 341–349.
23. Culham J.C., Valyear K.F. Human parietal cortex in action // *Curr. Opin. Neurobiol.* 2006. № 16. PP. 205–212.
24. Iacoboni M. Visuo-motor integration and control in the human posterior parietal cortex: evidence from TMS and fMRI // *Neuropsychologia.* 2006. № 44. PP. 2691–1699.

25. Arnstein D., Cui F., Keysers C., Maurits N.M., Gazzola V. μ -suppression during action observation and execution correlates with BOLD in dorsal premotor, inferior parietal, and SI cortices // *J. Neurosci.* 2011. № 31. PP. 14243–14249.
26. Segalowitz S.J., Santesso D.L., Jetha M.K. Electrophysiological changes during adolescence: a review // *Brain Cogn.* 2010. № 72. PP. 86–100.
27. Berchicci M., Zhang T., Romero L., Peters A., Annett R., Teuscher U., Comani S. Development of Mu Rhythm in infants and preschool children // *Dev. Neurosci.* 2011. № 33. PP. 130–143.
28. Bazanova O.M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews.* 2014. T. 44. PP. 94–110.
29. Gundlach C., Müller M.M., Nierhaus T., Villringer A., Sehm B. Phasic modulation of human somatosensory perception by transcranially applied oscillating currents // *Brain Stimul.* 2016. № 9. PP. 712–719.
30. Gundlach C., Müller M.M., Nierhaus T., Villringer A., Sehm B. Modulation of somatosensory alpha rhythm by transcranial alternating current stimulation at mu-frequency // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. № 11. PP. 432.
31. Babiloni C., Carducci F., Cincotti F., Rossini P.M., Neuper C., Pfurtscheller G., Babiloni F. Human movement-related potential vs desynchronization of EEG alpha rhythm: A high-resolution EEG study // *NeuroImage.* 1999. № 1. PP. 658–665.
32. Muthukumaraswamy S.D., Johnson B.W. Changes in rolandic mu rhythm during observation of a precision grip // *Psychophysiology.* 2004. № 41. PP. 152–156.
33. Tamura T., Gunji A., Takeichi H., Shigemasu H., Inagaki M., Kaga M., Kitazaki M. Audio-vocal monitoring system revealed by mu-rhythm activity // *Front. Psychol.* 2012. № 3. P. 225.
34. Эйсмонт Е.В., Махин С.А., Бакунова А.В., Кайда А.И., Павленко В.Б. Особенности μ -ритма ЭЭГ и его реактивности в задачах на выполнение, наблюдение, имитацию и слуховое восприятие движений у детей 4–14 лет // *Физиология человека.* 2017. № 3. С. 43–50.
35. Lepage J.F., Théoret H. EEG evidence for the presence of an action-observation matching system in children // *European Journal of Neuroscience.* 2006. № 23. PP. 2505–2510.
36. Cannon E.N., Simpson E.A., Fox N.A., Vanderwert R.E., Woodward A.L., Ferrari P.F. Relations between infants' emerging reach-grasp competence and event-related desynchronization in EEG // *Developmental Science.* 2016. № 19. PP. 50–62.
37. Bowman L.C., Thorpe S.G., Cannon E.N., Fox N.A. Action mechanisms for social cognition: Behavioral and neural correlates of developing theory of mind // *Developmental science.* 2017. № 20 (5).
38. Lepage J.F., Tremblay S., Nguyen D.K., Champoux F., Lassonde M., Théoret H. Action related sounds induce early and late modulations of motor cortex activity // *Neuroreport.* 2010. № 21 (4). PP. 250–253.
39. McGarry L.M., Russo F.A., Schalles M.D., Pineda J.A. Audio-visual facilitation of the mu rhythm // *Exp Brain Res.* 2012. № 218 (4). PP. 527–38.
40. Pineda J.A., Grichanik M., Williams V., Trieu M., Chang H., Keysers C. EEG sensorimotor correlates of translating sounds into actions // *Front Neurosci.* 2013. № 7. P. 203.
41. Tsuchida K., Ueno K., Shimada S. Motor area activity for action-related and nonaction-related sounds in a three-dimensional sound field reproduction system // *Neuroreport.* 2015. № 26 (5). PP. 291–295.
42. Махин С.А., Макаричева А.А., Луцюк Н.В., Павленко В.Б. Исследование реактивности μ -ритма при наблюдении, слуховом восприятии и имитации движений: Взаимосвязь со свойствами личности, определяющими эмпатию // *Физиология человека.* 2015. Т. 41, № 6. С. 28.
43. Nishimura Y., Ikeda Y., Suematsu A., Higuchi S. Effect of visual orientation on mu suppression in children: a comparative EEG study with adults // *Journal of physiological anthropology.* 2018. № 37 (1). P. 16.

44. Raymaekers R., Wiersema J.R., Roeyers H. EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism // Brain research. 2009. № 1304. PP. 113–121.
45. Salmelin R., Hämäläinen M., Kajola M., Hari R. Functional segregation of movement-related rhythmic activity in the human brain // NeuroImage. 1995. № 2. PP. 237–243.
46. Manshanden I., De Munck J.C., Simon N.R., Lopes da Silva F.H. Source localization of MEG sleep spindles and the relation to sources of alpha band rhythms // Clin. Neurophysiol. 2002. № 113. PP. 1937–1947.
47. Stancok A., Pfurtscheller G. Event-related desynchronisation of central beta-rhythms during brisk and slow self-paced finger movements of dominant and non-dominant hand // Cogn. Brain Res. 1996. № 3. PP. 171–183.
48. Alexandrov A.A., Tugin S.M. Changes in the mu rhythm in different types of motor activity and on observation of movement // Neuroscience and behavioral physiology. 2012. № 42(3). PP. 302–307.
49. Barry R.J., Clarke A.R., Johnstone S.J., Brown C.R. EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions // Clinical Neurophysiology. 2007. № 118. PP. 2765–2773.
50. Bonini L., Rozzi S., Serventi F.U., Simone L., Ferrari P.F., Fogassi L. Ventral premotor and inferior parietal cortices make distinct contribution to action organization and intention understanding // Cereb. Cortex. 2010. № 20. PP. 1372–1385.
51. Fogassi L., Ferrari P.F., Gesierich B., Rozzi S., Chersi F., Rizzolatti G. Parietal lobe, from action organization to intention understanding // Science. 2005. № 308. PP. 662–667.
52. Yamazaki Y., Yokochi H., Tanaka M., Okanoya A., Iriki A. Potential role of monkey inferior parietal neurons coding action semantic equivalences as precursors of parts of speech // Social Neurosci. 2010. № 5. PP. 105–117.

*Поступила в редакцию 05.12.2018 г.; повторно 20.02.2019 г.;
принята 27.02.2019 г.; опубликована 21.03.2019 г.*

Авторский коллектив:

Кайда Анна Ивановна – аспирант кафедры физиологии человека и животных и биофизики, факультет биологии и химии, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4).

E-mail: kaydaanna@gmail.com

Махин Сергей Анатольевич – канд. биол. наук, доцент кафедры общей психологии и психофизиологии, факультет психологии, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4).

E-mail: smakhin@inbox.ru

Эйсмонт Евгения Владимировна – канд. биол. наук, доцент кафедры физиологии человека и животных и биофизики, факультет биологии и химии, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4).

E-mail: evgenija.eismont@mail.ru

Павленко Владимир Борисович – д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой общей психологии и психофизиологии, факультет психологии, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4).

E-mail: vpav55@gmail.com

For citation: Kaida AI, Makhin SA, Eismont EV, Pavlenko VB. Age dynamics and topography of an individual EEG mu rhythm reactivity in children aged 4-14 years. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2019;45:106-127. doi: 10.17223/19988591/44/6
In Russian, English Summary

Anna I. Kaida¹, Sergej A. Makhin¹, Evgeniya V. Eismont¹, Vladimir B. Pavlenko¹

VI Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation

Age dynamics and topography of an individual EEG mu rhythm reactivity in children aged 4-14 years

Within the framework of the mirror neuron system related studies, there is a line of research dedicated to examining the effects of the EEG mu rhythm reactivity under conditions of observation and imitation of actions performed by others. It is hypothesized that the analysis of the mu rhythm activity at central electrode sites can be taken as a relatively easy non-invasive method for examining the mirror neuron system activity in human. At that, it is important to take into account possible individual differences in the frequency of the mu rhythm which is thought to reflect the activation level of the primary sensorimotor cortex. It is necessary to differentiate it from other alpha-like EEG oscillations related to different functional systems of the neocortex. Besides, in children the frequency of the mu rhythm tends to gradually increase with age. Hence, it seems important in such studies in the first place to functionally define the individual mu rhythm frequency for each participant under relevant conditions of a self-paced motor activity. The main aim of our research was to study the reactivity patterns of the individual mu rhythm under different conditions in children in the following age groups: “preschoolers” (4-6 years), “younger schoolchildren” (7-10 years), “adolescents” (11-14 years). In 87 typically developing children aged 4-14 years, we analyzed the EEG recorded at the following electrode sites: F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, and P4. The experimental conditions (30-second long each) were as follows: fixation of one’s sight at a motionless computer mouse, self-controlled circular right-hand movements (prior to and after the condition of movement observation), visual observation of similar movements performed by another person, real time imitation of observed movements, and hearing of familiar sounds produced by the computer mouse movements with eyes closed. We used repeated measures ANOVA to assess the main effects of the age group and experimental condition variables and their interaction on the amplitude of the individual mu rhythm. In this research, we discovered patterns of individual EEG mu rhythm reactivity under conditions of observation, imitation, and auditory perception of movements with the computer mouse. The mean values of the median frequency within the individual mu-ranges were as follows: 10.1 ± 1.2 Hz for “preschoolers”, 9.9 ± 1.4 Hz in the group of “younger schoolchildren” and 10.6 ± 1.1 Hz for “adolescents”. 121 children aged 4-14 years took part in the study. This research was conform to ethical principles of the declaration of Helsinki, 1964. Parents, after being provided with necessary information, gave their consent to their children’s participation in the research.

The condition of performing self-paced circular mouse movements showed distinct left hemisphere lateralization of the individual mu rhythm suppression in all age groups, mainly, in central and parietal leads (*See Fig. 1*). Higher indices of desynchronization were found for the sample of older children. The observation condition revealed significant mu rhythm suppression effects solely for the parietal leads (*See Fig. 2*). Even though the figure shows that the mu rhythm desynchronization is greater for older participants, the variance analysis revealed no significant age differences. It is of interest that the condition of the repeated execution of movements demonstrated even more pronounced and widely spread mu rhythm suppression, if compared to the first movement condition, with statistically significant interaction effect between the condition and age group factors (*See Fig. 3*). A significant decrease in the mu rhythm

amplitude is discovered at the F3, Fz and Cz electrode sites for the group of younger schoolchildren and at the Fz and C4 electrode sites for the group of adolescents. The imitation condition, relative to one's own movements, had an additional suppression effect of the individual mu rhythm only in the group of adolescents. Significant suppression was discovered in the parietal leads P3 and Pz (See Fig. 4). The condition of the auditory recognition of the computer mouse movement sounds showed significant suppression of the mu rhythm only in the group of adolescents, as well. The suppression was found in the parietal leads P3, Pz and P4 (See Fig. 5). Since the eyes were closed for the two conditions to be compared, we could effectively limit the effects of visual attention modulations which are typically followed by a considerable occipital alpha rhythm desynchronization. As a result, the discovered effects cannot be explained by a mere process of a visual-motor integration but rather by a possible activation of the mirror neuron system parietal component which is thought by some authors to mediate one's action goal coding when observing actions performed by others. Regarding the mu rhythm reactivity in general, the results of the present study showed that the desynchronization of the individually determined EEG mu rhythm becomes more pronounced with age. Reaching the puberty seems to change significantly the reactivity patterns of the mu rhythm.

The paper contains 5 Figures and 52 References.

Key words: children; EEG; mu rhythm; movement performance; imitation; observation; mirror neurons.

Funding: This research was supported by the VI Vernadsky Crimean Federal University Development Program for 2015-2024.

References

1. Hardwick RM, Caspers S, Eickhoff SB, Swinnen SP. Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution. *Neurosci Biobehav Rev.* 2018;94:31-44. doi: [10.1016/j.neubiorev.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.08.003)
2. Lebedeva NN, Zufman AI, Malcev VYU. Mirror neuron system as a key to learning, personality formation and understanding of another's mind. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk.* 2017;48(4):16-28. In Russian
3. Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex. *Brain.* 1996;119:593-609.
4. Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 1996;3:131-141.
5. Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci.* 2004; 27:169-192. doi: [10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230](https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230)
6. Nishitani N, Avikainen S, Hari R. Abnormal imitation-related cortical activation sequences in Asperger's syndrome. *Ann Neurol.* 2004;55:558-562. doi:[10.1002/ana.20031](https://doi.org/10.1002/ana.20031)
7. Puce A, Perrett D. Electrophysiology and brain imaging of biological motion. *Philos. Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2003;358:435-445. doi:[10.1098/rstb.2002.1221](https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1221)
8. Braadbaart L, Williams JHG, Waiter GD. Do mirror neuron areas mediate mu rhythm suppression during imitation and action observation? *Int J Psychophysiology.* 2013;89:99-105. doi: [10.1016/j.ijpsycho.2013.05.019](https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.05.019)
9. Fox NA, Bakermans-Kranenburg MJ, Yoo KH, Bowman LC, Cannon EN, Vanderwert RE, Ferrari PF. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychol Bull.* 2016;142(3):291-313. doi: [10.1037/bul0000031](https://doi.org/10.1037/bul0000031)
10. Lebedeva NN, Karimova ED, Karpichev VV, Maltsev VYu. The human brain mirror system in the observation, implementation and representation motor tasks - neurophysiological

- reflection of another conscious perception. *Zh Vyssh Nerv Deiat Im IP Pavlova = I.P. Pavlov Journal Of Higher Nervous Activity*. 2018;68(2):204-215. doi: [10.7868/S0044467718020065](https://doi.org/10.7868/S0044467718020065)
11. Hobson HM, Bishop DVM. Mu suppression - a good measure of the human mirror neuron system? *Cortex*. 2016;82:290-310. doi: [10.1016/j.cortex.2016.03.019](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.03.019)
 12. Hobson HM, Bishop DVM. The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *R Soc Open Sci*. 2017;4:1606-62. doi: [10.1098/rsos.160662](https://doi.org/10.1098/rsos.160662)
 13. Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin Neurophysiol*. 1999;110:1842-1857.
 14. Thorpe SG, Cannon EN, Fox NA. Spectral and source structural development of mu and alpha rhythms from infancy through adulthood. *Clin Neurophysiol*. 2016;127(1):254-269. doi: [10.1016/j.clinph.2015.03.004](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.03.004)
 15. Cochin S, Barthelemy C, Roux S, Martineau J. Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography. *Eur J Neurosci*. 1999;11:1839-1842.
 16. Frenkel-Toledo S, Bentin S, Perry A, Liebermann DG, Soroker N. Dynamics of the EEG power in the frequency and spatial domains during observation and execution of manual movements. *Brain Res*. 2013;1509:43-57. doi: [10.1016/j.brainres.2013.03.004](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.03.004)
 17. Buneo CA, Jarvis MR, Batista AP, Andersen RA. Direct visuomotor transformations for reaching. *Nature*. 2002;416:632-633. doi: [10.1038/416632a](https://doi.org/10.1038/416632a)
 18. Connolly JD, Andersen RA, Goodale MA. FMRI evidence for a "parietal reach region" in the human brain. *Exp Brain Res*. 2003;153:140-145. doi: [10.1007/s00221-003-1587-1](https://doi.org/10.1007/s00221-003-1587-1)
 19. Hanakawa T, Immisch I, Toma K, Dimyan M, Van Gelderen P, Hallett M. Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *J Neurophysiol*. 2003;89:989-1002. doi: [10.1152/jn.00132.2002](https://doi.org/10.1152/jn.00132.2002)
 20. Solodkin A, Hlustik P, Chen EE, Small SL. Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery. *Cereb Cortex*. 2004;14:1246-1255. doi: [10.1093/cercor/bhh086](https://doi.org/10.1093/cercor/bhh086)
 21. Van Overwalle F, Baetens K. Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: a meta-analysis. *Neuroimage*. 2009;48:564-584. doi: [10.1016/j.neuroimage.2009.06.009](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.009)
 22. Molenberghs P, Cunnington R, Mattingley JB. Brain regions with mirror properties: A meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 2012;36:341-349. doi: [10.1016/j.neubiorev.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.07.004)
 23. Culham JC, Valyear KF. Human parietal cortex in action. *Curr Opin Neurobiol*. 2006;16:205-212. doi: [10.1016/j.conb.2006.03.005](https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.005)
 24. Iacoboni M. Visuo-motor integration and control in the human posterior parietal cortex: evidence from TMS and fMRI. *Neuropsychologia*. 2006;44:2691-699. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2006.04.029](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.04.029)
 25. Arnstein D, Cui F, Keyser C, Maurits NM, Gazzola V. μ -suppression during action observation and execution correlates with BOLD in dorsal premotor, inferior parietal, and SI cortices. *J. Neurosci*. 2011;31:14243-49. doi: [10.1523/jneurosci.0963-11.2011](https://doi.org/10.1523/jneurosci.0963-11.2011)
 26. Segalowitz SJ, Santesso DL, Jetha MK. Electrophysiological changes during adolescence: A review. *Brain Cogn*. 2010;72:86-100. doi: [10.1016/j.bandc.2009.10.003](https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.10.003)
 27. Berchicci M, Zhang T, Romero L, Peters A, Annett R, Teuscher U, Comani S. Development of Mu Rhythm in infants and preschool children. *Dev Neurosci*. 2011;33:130-143. doi: [10.1159/000329095](https://doi.org/10.1159/000329095)
 28. Bazanova OM, Vernon D. Interpreting EEG alpha activity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2014;44:94-110. doi: [10.1016/j.neubiorev.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.05.007)

29. Gundlach C, Müller MM, Nierhaus T, Villringer A, Sehm B. Phasic modulation of human somatosensory perception by transcranially applied oscillating currents. *Brain Stimul.* 2016;9:712-19. doi: [10.1016/j.brs.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.014)
30. Gundlach C, Müller MM, Nierhaus T, Villringer A, Sehm B. Modulation of somatosensory alpha rhythm by transcranial alternating current stimulation at mu-frequency. *Front Hum Neurosci.* 2017;11:432. doi: [10.3389/fnhum.2017.00432](https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00432)
31. Babiloni C, Carducci F, Cincotti F, Rossini PM, Neuper C, Pfurtscheller G, Babiloni F. Human movement-related potential vs desynchronization of EEG alpha rhythm: A high-resolution EEG study. *NeuroImage.* 1999;1:658-665. doi: [10.1006/nimg.1999.0504](https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0504)
32. Muthukumaraswamy SD, Johnson BW. Changes in rolandic mu rhythm during observation of a precision grip. *Psychophysiology.* 2004;41:152-156. doi: [10.1046/j.1469-8986.2003.00129.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8986.2003.00129.x)
33. Tamura T, Gunji A, Takeichi H, Shigemasa H, Inagaki M, Kaga M, Kitazaki M. Audio-vocal monitoring system revealed by mu-rhythm activity. *Front Psychol.* 2012;3:225. doi: [10.3389/fpsyg.2012.00225](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00225)
34. Eismont EV, Makhin SA, Bakunova AV, Kaida AI, Pavlenko VB. Properties of the EEG μ rhythm and its reactivity during the performance, observation, imitation, and auditory recognition of movements in children aged 4-14 years. *Human Physiology.* 2017;43(3):274-279. doi:[10.1134/S0362119717030057](https://doi.org/10.1134/S0362119717030057)
35. Lepage JF, Théoret H. EEG evidence for the presence of an action-observation matching system in children. *European J Neuroscience.* 2006;23:2505-2510. doi: [10.1111/j.1460-9568.2006.04769.x](https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.04769.x)
36. Cannon EN, Simpson EA, Fox NA, Vanderwert RE, Woodward AL, Ferrari PF. Relations between infants' emerging reach-grasp competence and event-related desynchronization in EEG. *Developmental Science.* 2016;19:50-62. doi: [10.1111/desc.12295](https://doi.org/10.1111/desc.12295)
37. Bowman LC, Thorpe SG, Cannon EN, Fox NA. Action mechanisms for social cognition: Behavioral and neural correlates of developing theory of mind. *Developmental Science.* 2017;20(5). doi: [10.1111/desc.12447](https://doi.org/10.1111/desc.12447)
38. Lepage JF, Tremblay S, Nguyen DK, Champoux F, Lassonde M, Théoret H. Action related sounds induce early and late modulations of motor cortex activity. *Neuroreport.* 2010;21(4):250-253. doi: [10.1097/WNR.0b013e328334ddcc](https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e328334ddcc)
39. McGarry LM, Russo FA, Schalles MD, Pineda JA. Audio-visual facilitation of the mu rhythm. *Exp Brain Res.* 2012;218(4):527-38. doi: [10.1007/s00221-012-3046-3](https://doi.org/10.1007/s00221-012-3046-3)
40. Pineda JA, Grichanik M, Williams V, Trieu M, Chang H, Keysers C. EEG sensorimotor correlates of translating sounds into actions. *Front Neurosci.* 2013;7:203. doi: [10.3389/fnins.2013.00203](https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00203)
41. Tsuchida K, Ueno K, Shimada S. Motor area activity for action-related and nonaction-related sounds in a three-dimensional sound field reproduction system. *Neuroreport.* 2015;26(5):291-5. doi: [10.1097/WNR.0000000000000347](https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000000347)
42. Makhin SA, Makaricheva AA, Lutsuk NV, Pavlenko VB. Study of the reactivity of the μ rhythm during observation, auditory perception, and movement imitation: correlation with empathic ability. *Human Physiology.* 2015;41(6):593-598. doi: [10.1134/S0362119715040118](https://doi.org/10.1134/S0362119715040118)
43. Nishimura Y, Ikeda Y, Suematsu A, Higuchi S. Effect of visual orientation on mu suppression in children: a comparative EEG study with adults. *J Physiological Anthropology.* 2018;37(1):16. doi: [10.1186/s40101-018-0175-9](https://doi.org/10.1186/s40101-018-0175-9)
44. Raymaekers R, Wiersema JR, Roeyers H. EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism. *Brain Research.* 2009;1304:113-121. doi: [10.1016/j.brainres.2009.09.068](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.09.068)
45. Salmelin R, Hämäläinen M, Kajola M, Hari R. Functional segregation of movement-related rhythmic activity in the human brain. *NeuroImage.* 1995;2:237-243.

46. Manshanden I, De Munck JC, Simon NR, Lopes da Silva FH. Source localization of MEG sleep spindles and the relation to sources of alpha band rhythms. *Clin Neurophysiol.* 2002;113:1937-1947.
47. Stancok A, Pfurtscheller G. Event-related desynchronisation of central beta-rhythms during brisk and slow self-paced finger movements of dominant and non-dominant hand. *Cogn. Brain Res.* 1996;3:171-183.
48. Alexandrov AA, Tugin SM. Changes in the mu rhythm in different types of motor activity and on observation of movement. *Neuroscience and Behavioral Physiology.* 2012;42(3):302-307. doi: [10.1007/s11055-012-9566-2](https://doi.org/10.1007/s11055-012-9566-2)
49. Barry RJ, Clarke AR, Johnstone SJ, Brown CR. EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions. *Clinical Neurophysiology.* 2007;118:2765-2773. doi: [10.1016/j.clinph.2007.07.028](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.07.028)
50. Bonini L, Rozzi S, Serventi FU, Simone L, Ferrari PF, Fogassi L. Ventral premotor and inferior parietal cortices make distinct contribution to action organization and intention understanding. *Cereb Cortex.* 2010;20:1372-1385. doi: [10.1093/cercor/bhp200](https://doi.org/10.1093/cercor/bhp200)
51. Fogassi L, Ferrari PF, Gesierich B, Rozzi S, Chersi F, Rizzolatti G. Parietal lobe, from action organization to intention understanding. *Science.* 2005;308:662-667. doi: [10.1126/science.1106138](https://doi.org/10.1126/science.1106138)
52. Yamazaki Y, Yokochi H, Tanaka M, Okanoya A, Iriki A. Potential role of monkey inferior parietal neurons coding action semantic equivalences as precursors of parts of speech. *Social Neurosci.* 2010;5:105-117. doi: [10.1080/17470910802625306](https://doi.org/10.1080/17470910802625306)

Received 05 December 2018; Revised 20 February 2019;

Accepted 27 February 2019; Published 21 March 2019

Author info:

Kaida Anna I, Postgraduate Student, Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, Faculty of Biology and Chemistry, VI Vernadsky Crimean Federal University, 4 Vernadskogo Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.

E-mail: kaydaanna@gmail.com

Makhin Sergej A, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of General Psychology and Psychophysiology, Faculty of Psychology, VI Vernadsky Crimean Federal University, 4 Vernadskogo Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.

E-mail: smakhin@inbox.ru

Eismont Evgeniya V, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, Faculty of Biology and Chemistry, VI Vernadsky Crimean Federal University, 4 Vernadskogo Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.

E-mail: evgenija.eismont@mail.ru

Pavlenko Vladimir B, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Department of General Psychology and Psychophysiology, Faculty of Psychology, VI Vernadsky Crimean Federal University, 4 Vernadskogo Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.

E-mail: vpav55@gmail.com