

УДК 612.821

ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ВЕГЕТАТИВНЫЕ КОРРЕЛЯТЫ ВООБРАЖАЕМЫХ И РЕАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ НОГ У ПРАВШЕЙ И ЛЕВШЕЙ

© 2022 г. О. А. Ведясова¹, *, К. А. Моренова¹, С. И. Павленко¹

¹Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

*E-mail: o.a.vedyasova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.01.2022 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 18.03.2022 г.

Изучены изменения спектральной мощности (СМ) электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в α -диапазоне и variability сердечного ритма (ВСР) у испытуемых с правым и левым профилями моторного доминирования при воображаемом и реальном сгибании правой и левой стоп. При реализации двигательных заданий выявлена выраженная десинхронизация α -ритма во фронтальных и центральных отведениях и менее значимые его изменения в теменной и затылочной зонах обеих гемисфер. Особенностью правой при мысленных и реальных движениях ног был variability и асимметричный характер изменений СМ α -ритма в билатеральных отведениях от различных областей коры. У левой при воображении и выполнении движений десинхронизация α -ритма в разных отведениях имела одинаковую выраженность и межполушарных различий СМ практически не наблюдалось. У правой в ходе выполнения моторных задач отмечался относительно стабильный вегетативный статус, изменения ВСР возникали в основном при реальных движениях ног. У левой параметры ВСР менялись сильнее и главным образом при мысленных действиях ногами. Между СМ α -ритма и параметрами ВСР выявлены корреляционные связи, зависящие от вида движения и профиля моторного доминирования испытуемых. Полученные данные отражают особенности механизмов регуляции произвольных движений ног и различия вегетативного обеспечения двигательной активности у правой и левой.

Ключевые слова: α -ритм, variability сердечного ритма, корреляционные связи, правши, левши, воображаемые и реальные движения ног.

DOI: 10.31857/S0131164622700047

Одним из очевидных проявлений функциональной межполушарной асимметрии (ФМА) является моторная асимметрия [1–3], представления о которой развиваются благодаря анализу внутрицентральных, в том числе межполушарных, взаимодействий в процессе воображения двигательных актов [4–6] и их выполнения [7, 8]. Важным инструментом изучения данного аспекта ФМА служит сравнительный анализ электроэнцефалограммы (ЭЭГ) у правой и левой, выявляющий особенности центральных механизмов регуляции движений у лиц с разными профилями моторного доминирования [7].

Паттерн ЭЭГ при воображаемых и реальных движениях изучен преимущественно на примере рук. Основным маркером корковой активности в этих случаях являются синхронизация или десинхронизация α -ритма [9, 10], причем двигательное воображение обычно сопровождается уменьшением μ -ритма, регистрируемого в α -диапазоне

над сенсомоторными областями коры больших полушарий [11]. У правой воображаемые движения правой и левой руки вызывают контралатеральную десинхронизацию μ -ритма и его ипсилатеральную синхронизацию [12]. У левой при этом наблюдаются синфазные изменения когерентности α -волн справа и слева, что говорит о преобладании межполушарного взаимодействия. При реальных движениях у правой и левой выявлена зависимость увеличения/уменьшения когерентности ритмов ЭЭГ разных частот от использования ведущей или неведущей руки [7]. Что касается исследований динамики ЭЭГ при мысленных и реальных движениях ног, то они не многочисленны и аспект ФМА в них практически не рассматривается [13, 14].

Выполнение двигательных актов отражается на вегетативном статусе организма, что подтверждается изменениями variability сердечного ритма (ВСР). Во время движений некоторые

показатели ВСР (*SDNN*, *RMSSD*) снижаются, а в динамике спектральных характеристик кардиоритма выявляется увеличение доли *HF*-волн, уменьшение *LF*-компонента и индекса вагосимпатического взаимодействия [15]. Закономерно ожидать определенные вегетативные реакции и на фоне воображения движений, поскольку оно основано на создании мысленного эквивалента двигательного акта, что является типичной когнитивной деятельностью [14, 16], разные виды которой сопровождаются изменениями ВСР [17–19]. В ряде работ отмечены функциональная значимость α -ритма в регуляции мыслительных процессов и корреляции между паттернами α -активности и ВСР [20–22]. Показано, что на разных этапах когнитивной деятельности изменения межполушарной когерентности α -ритма совпадают с динамикой *RR*-интервалов и спектральных параметров ВСР, отражающих активность отделов вегетативной нервной системы (ВНС) [20]. Значительно меньше внимания уделяется связям между ВСР и ЭЭГ в процессе выполнения в уме двигательных заданий. Имеются отдельные данные о корреляциях активности механизмов кардиорегуляции с изменениями ЭЭГ в центральных отведениях при мысленных движениях рук [12]. Выявлены замедление частоты сердечных сокращений (ЧСС) и сопутствующая этому периферическая десинхронизация ЭЭГ в ситуации планирования и подготовки движений ног [23]. Однако вопрос о взаимосвязи ВСР с ЭЭГ при воображении и выполнении движений ног у лиц с разными профилями моторного доминирования остается открытым. Вместе с тем, его разработка важна для развития представлений о произвольной регуляции движений и понимания вегетативных механизмов адаптации к двигательным нагрузкам у правшей и левшей, а также для решения прикладных задач в аспекте создания интерфейсов мозг-компьютер.

Цель исследования состояла в анализе изменений спектральной мощности (СМ) α -ритма и параметров ВСР и выявлении их корреляционных связей при мысленных и реальных движениях ног у правшей и левшей.

МЕТОДИКА

Исследование выполняли на 26 правшах и 22 левшах в возрасте 18–23 лет. Индивидуальный профиль моторного доминирования испытуемых оценивали по результатам тестов на определение ведущей руки и ноги [1, 7]. ЭЭГ и ВСР регистрировали в состоянии покоя и при выполнении двигательных задач в виде реальных и мысленных сгибаний и разгибаний ног в голеностопном суставе. Испытуемые размещались в удобном кресле в темной звукоизолированной комнате и находились с закрытыми глазами в течение всего ис-

следования. Двигательные задания выполняли в следующем порядке: реальное движение правой стопы, реальное движение левой стопы, воображаемое движение правой стопы, воображаемое движение левой стопы.

Для регистрации ЭЭГ использовали нейровизор *NVX 36 digital DC EEG* (Россия) и набор отводящих электродов, располагаемых на голове по системе “10–20”. Электроды фиксировали при помощи шлема-сетки, референтный (объединенный ушной) электрод закрепляли на мочке правого уха. Сначала записывали ЭЭГ в состоянии покоя (в течение 1 мин). После этого давали словесную команду к выполнению двигательного задания (например, “согните правую стопу”). Через 3 с следовала команда “разогните стопу”. Данный сценарий применяли ко всем заданиям, пауза между которыми составляла 10 с. Учитывая значимость α -ритма в осуществлении движений [10, 12], мы сопоставляли паттерны волн ЭЭГ α -диапазона (8–13 Гц) в симметричных фронтальных (F_{p1} – F_{p2} , F_7 – F_8), центральных (C_3 – C_4), парietoальных (P_3 – P_4) и окципитальных (O_1 – O_2) отведениях. ЭЭГ-сигналы усиливали, пропускали через фильтр нижних частот 100 Гц и оцифровывали с частотой дискретизации 250 Гц с помощью программы “Нейрокортекс-С” (версия 2.10, Россия). Анализировали СМ α -ритма (мкВ²) в покое и при выполнении двигательных заданий.

Параметры ВСР регистрировали с помощью приборно-программного обеспечения “ЭЛОКС-01С2” (Россия), используя фотооптический датчик, надеваемый на указательный палец левой руки. Ритмограммы в покое и при реальных и мысленных движениях записывали в течение 5 мин. Каждое задание испытуемые выполняли по команде экспериментатора и повторяли с 15-секундным интервалом на протяжении вышеуказанного времени. Оценивали статистические и диагностические показатели ВСР: ЧСС (*HR*, уд./мин), коэффициенты активности симпатического (*SIM*, усл. ед.) и парасимпатического (*PAR*, усл. ед.) отделов ВНС, индекс напряжения по Бавескому (*IB*, усл. ед.). Анализ спектра ВСР проводили по общей СМ колебаний кардиоритма (*Total*, мс²), СМ в диапазонах очень низких (*VLF*, мс²), низких (*LF*, мс²) и высоких (*HF*, мс²) частот и индексу централизации (*IC*, усл. ед.) [24].

Для статистической обработки применяли программный пакет *SigmaPlot 12.5 (Systat Incorporated, США)*. Нормальность распределения выборок оценивали по критерию Шапиро–Уилка. Данные, имеющие нормальное распределение, представлены как средние значения (*M*) \pm стандартная ошибка среднего (*m*) и как разница средних значений (*D*) \pm стандартная ошибка разницы (*m_D*). Для выборок, не имеющих нормального распределения, указаны медианы (*Me*) с межк-

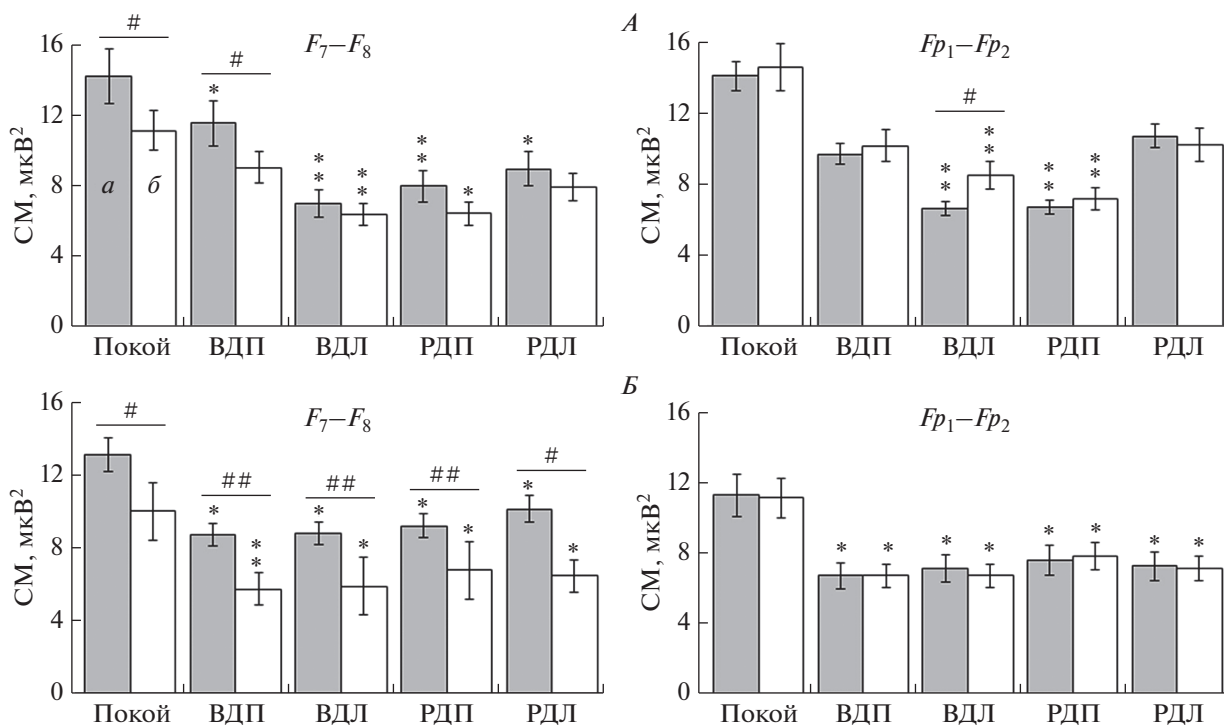


Рис. 1. Межполушарные различия спектральной мощности (СМ) фронтального α -ритма у правшей (А) и левшей (Б). *a* – Левосторонние отведения, *b* – правосторонние; ВДП и ВДЛ – воображаемые движения правой и левой ног; РДП и РДЛ – реальные движения правой и левой ног; * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) – достоверность изменений относительно покоя; # ($p < 0.05$), ## ($p < 0.01$) – достоверность межполушарных различий.

вартильным размахом ($P25-P75$). Достоверность различий выявляли в тестах Стьюдента, Уилкоксона и Манна–Уитни. Коэффициенты корреляции (r) определяли по Спирмену. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В аспекте зависимости ЭЭГ-коррелятов реальных и мысленных движений от ФМА особый интерес вызывают фронтальные отведения F_7 и F_8 , где у правшей и левшей десинхронизация α -ритма была сильнее, чем в других областях коры. У правшей в F_7 СМ α -волн при всех двигательных заданиях снижалась относительно покоя в среднем на 6.8 ± 1.8 мкВ² ($p < 0.05$). В F_8 уменьшение СМ происходило только при воображаемом движении левой и реальном действии правой ногой в среднем на 5.1 ± 1.2 мкВ² ($p < 0.05$). Следует отметить межполушарную асимметрию α -ритма в F_7-F_8 . У правшей (рис. 1, А) фоновая СМ слева (F_7) была на 26.7% ($p < 0.05$) выше, чем справа (F_8). В случае воображения движения ведущей ногой асимметрия сохранялась за счет левостороннего преобладания СМ на 30.9% ($p < 0.05$). При выполнении других заданий асимметрия α -волн у правшей сглаживалась за счет преимущественной де-

синхронизации слева (F_7). У левшей в покое асимметрия α -ритма в F_7-F_8 также выражалась левосторонним преобладанием СМ (на 30.8%; $p < 0.05$). При мысленных и реальных движениях ног у них, в отличие от правшей, в F_7 и F_8 СМ α -ритма снижалась примерно одинаково, в среднем на 4.6 ± 1.6 мкВ² ($p < 0.05$) от уровня покоя, и поэтому межполушарные различия сохранялись (рис. 1, Б).

В передних лобных отведениях ЭЭГ регистрировалась иная картина. В частности, фоновая асимметрия α -волн между Fp_1 и Fp_2 у испытуемых отсутствовала. У правшей СМ α -ритма снижалась при воображении движения неведущей ногой, в том числе в Fp_1 на 7.8 ± 1.5 мкВ² и Fp_2 на 5.9 ± 1.3 мкВ² ($p < 0.01$) относительно покоя, что приводило к правостороннему преобладанию α -волн (рис. 1, А). Во время реального действия ведущей ногой у правшей на ЭЭГ наблюдалось симметричное снижение СМ в среднем на 7.6 ± 1.8 мкВ² ($p < 0.01$). У левшей при всех заданиях СМ α -ритма одинаково уменьшалась в Fp_1 и Fp_2 , в среднем на 4.7 ± 0.9 мкВ² ($p < 0.05$) от уровня покоя, и, таким образом, межполушарных различий ЭЭГ в данном диапазоне не наблюдалось (рис. 1, Б).

В центральных (C_3, C_4), парietальных (P_3, P_4) и окципитальных (O_1, O_2) отведениях изменения

Таблица 1. Спектральная мощность α -ритма (мкВ^2) в центральных, париетальных и окципитальных отведениях у правой и левой при выполнении двигательных заданий

Отведения	Покой	ВДП	ВДЛ	РДП	РДЛ
Правши					
C_3	16.7 ± 2.8	$13.7 \pm 1.6^*$	$8.5 \pm 3.2^*$	$14.8 \pm 2.4^*$	$11.2 \pm 3.1^*$
C_4	15.1 ± 2.4	$10.3 \pm 2.9^*$	$7.6 \pm 2.8^*$	$8.5 \pm 2.1^{**}$	$11.9 \pm 1.8^*$
P_3	18.9 ± 3.3	15.4 ± 0.7	$13.7 \pm 2.9^{***}$	$10.8 \pm 2.0^{***}$	$13.4 \pm 1.3^{***}$
P_4	19.5 ± 2.0	14.6 ± 0.9	$12.3 \pm 2.7^{**}$	$12.0 \pm 1.8^{***}$	$14.3 \pm 2.1^*$
O_1	17.9 ± 1.7	$13.3 \pm 2.7^*$	$14.1 \pm 1.2^*$	$9.3 \pm 2.9^{***, \#}$	$12.1 \pm 2.6^{***}$
O_2	18.2 ± 3.2	$13.7 \pm 2.4^{***}$	$14.0 \pm 1.5^*$	$11.1 \pm 3.2^{**}, \#$	$11.7 \pm 2.9^{**}$
Левши					
C_3	14.5 ± 2.3	$9.9 \pm 1.6^{***}$	$8.4 \pm 2.7^{**}, ^+$	$8.7 \pm 0.8^{***}$	$9.5 \pm 1.1^{**}, ^+$
C_4	13.6 ± 1.8	$8.9 \pm 1.1^{**}$	$8.1 \pm 2.3^{**}, ^+$	$10.1 \pm 0.7^*$	$9.6 \pm 1.5^{**}, ^+$
P_3	$20.8 \pm 3.5^\#$	$13.5 \pm 2.4^{***}$	$12.7 \pm 2.1^{***}$	$13.9 \pm 2.9^{***}$	$12.9 \pm 2.6^{**}$
P_4	$17.5 \pm 2.7^\#$	$12.1 \pm 2.7^{**}$	$11.6 \pm 1.9^{***}$	$11.7 \pm 2.1^{***}$	$13.1 \pm 2.8^{**}$
O_1	17.1 ± 1.8	$11.2 \pm 2.0^{***}$	$10.2 \pm 1.7^{***}$	$14.8 \pm 1.8^{***}$	$12.0 \pm 1.4^{**}$
O_2	16.5 ± 2.2	14.7 ± 1.8	$11.0 \pm 1.4^{***}, ^+$	11.9 ± 1.5	$14.9 \pm 1.9^+$

Примечание: ВДП и ВДЛ – воображаемые движения правой и левой стоп; РДП и РДЛ – реальные движения правой и левой стоп; * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), *** ($p < 0.001$) – достоверность изменений относительно покоя; # ($p < 0.05$) – достоверность межполушарных различий; + ($p < 0.05$) – достоверность различий между изменениями при ВДЛ и РДЛ.

СМ α -ритма у правшей при мысленных и реальных движениях правой и левой ног имели примерно одинаковую выраженность (табл. 1). У левшей же более значимые реакции отмечались при задачах на воображение. Например, при мысленном действии ведущей ногой СМ α -ритма в C_3 , C_4 и O_2 снижалась у них сильнее, чем при реальном движении на 8.4, 8.6 и 21.0% соответственно. Что касается межполушарных различий, то у правшей во время реального движения правой ногой устанавливалась асимметрия α -ритма в O_1 – O_2 за счет преобладания СМ справа, тогда как у левшей СМ α -ритма распределялась асимметрично в покое в P_3 – P_4 , преобладая слева (табл. 1).

Связь паттерна ЭЭГ с профилем моторного доминирования в процессе движений подтвердилась результатами межгруппового сравнения абсолютных значений СМ α -ритма у правшей и левшей. Выявлено, что во время двигательного воображения более высокий уровень СМ α -ритма отмечался у правшей, в частности, в отведениях F_7 и C_3 для ведущей ноги, а в O_1 и O_2 – для неведущей. У левшей в большинстве отведений ЭЭГ α -ритм преобладал при реальных движениях, особенно неведущей ногой (рис. 2).

Изучение динамики ВСР в ходе выполнения двигательных задач также показало наличие некоторых различий между испытуемыми с разными типами ФМА. Например, для правшей было типичным увеличение значений HR во время ре-

альных движений как правой, так и левой ногами в среднем на 13.9% ($p < 0.05$) от исходного уровня (58.7 (56.3–63.1) уд./мин). У левшей, напротив, рост HR происходил при воображаемых движениях ног в среднем на 12.3% ($p < 0.05$) от исходной величины (57.9 (55.8–65.1) уд./мин). Это сочеталось с динамикой SIM , величина которого в ходе воображения и выполнения действий левой ногой составляла у левшей 3.0 (1.8–4.0) и 2.0 (1.8–2.3) усл. ед. соответственно, что в 3 и 2 раза ($p < 0.05$) превышало значения SIM у правшей. Такая разница, возможно, связана с различиями в активации вегетативных механизмов при решении моторных задач.

Данному заключению соответствуют изменения PAR и IB (рис. 3). Так, PAR менялся только у левшей, снижаясь на 38.0 и 19.7% ($p < 0.05$) от фона (19.0 (15.0–21.8) усл. ед.) при воображении движения правой и реальном движении левой ногой соответственно. Изменения IB наблюдались у правшей и левшей при мысленном действии неведущей ногой и имели разную направленность. У правшей IB снижался при мысленном движении левой ногой на 20.5% ($p < 0.01$), а у левшей увеличивался при аналогичном действии правой ногой на 56.1% ($p < 0.05$), что говорит о разной напряженности регуляторных систем у лево- и правополушарных лиц. На это также указывают результаты спектрального анализа ВСР, который выявил статистически значимые изменения толь-

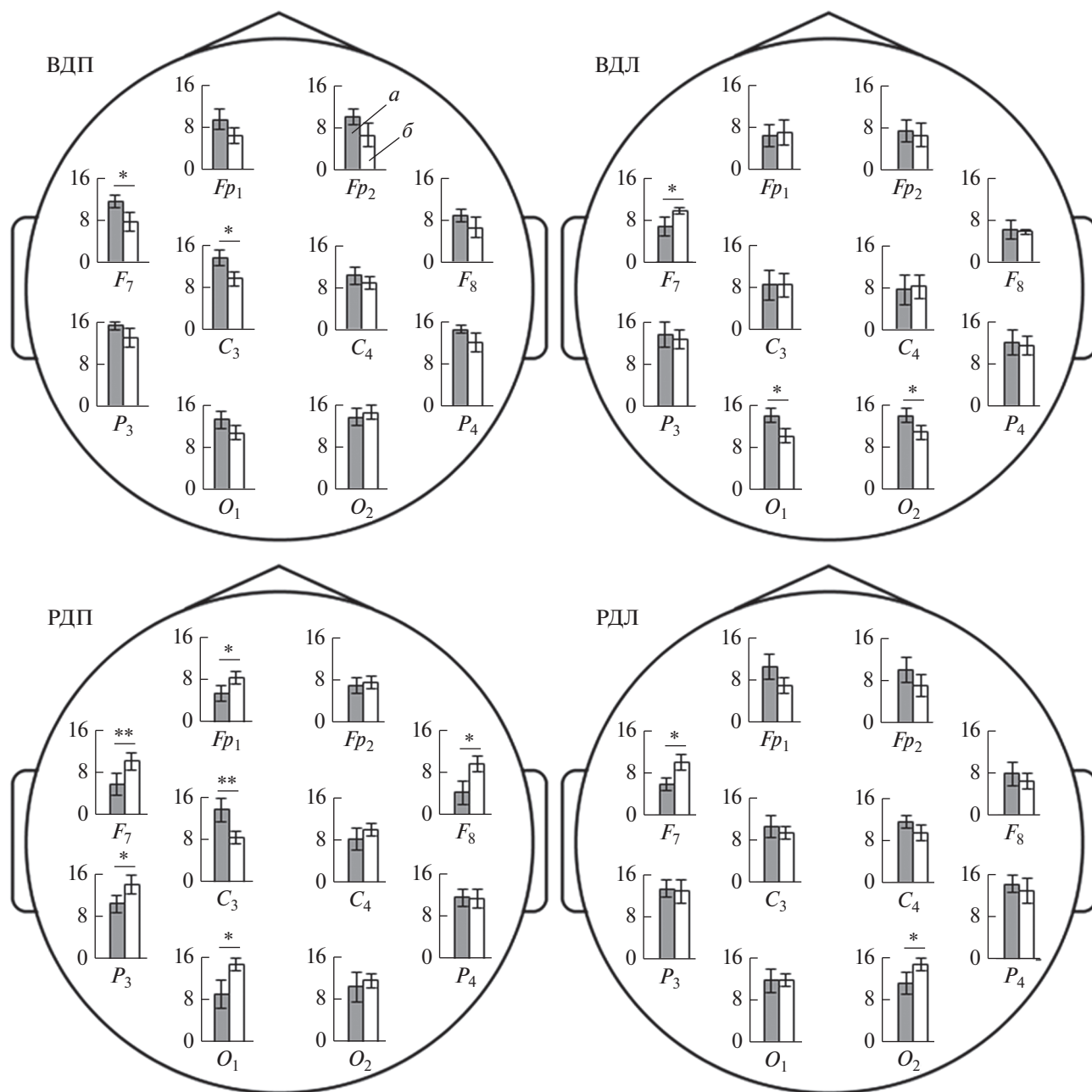


Рис. 2. Различия спектральной мощности (СМ) α -ритма (мкВ^2) у правой и левой при выполнении двигательных задач.

a – Правши, *б* – левши; ВДП и ВДЛ – воображаемые движения правой и левой ног; РДП и РДЛ – реальные движения правой и левой ног; * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) – достоверность межгрупповых различий.

ко у левополушарных испытуемых в виде уменьшения *LF*-компонента от 9545 (6021–9882) мс^2 в покое до 5358 (3449–5744) мс^2 во время реального движения ведущей ногой ($p < 0.05$).

Для оценки взаимодействия процессов центральной регуляции движений и механизмов их вегетативного обеспечения у испытуемых с разными типами ФМА мы исследовали корреляционные связи СМ α -ритма и параметров ВСР.

Установлено, что в покое у правой СМ α -волн во всех отведениях коррелировала положительно ($p < 0.05$) с *VLF* и отрицательно ($p < 0.05$) с *LF*, *TP* и *IC*. У левой в покое наблюдались положительные корреляции ($p < 0.05$) α -волн во фронтальных отведениях с *HF*, *TP* и *PAR*, отрицательные ($p < 0.05$) – с *SIM*, *IB* и *IC*. При движениях ног (мысленных и реальных) у правой отмечались корреляции ВСР с α -ритмом в большинстве отве-

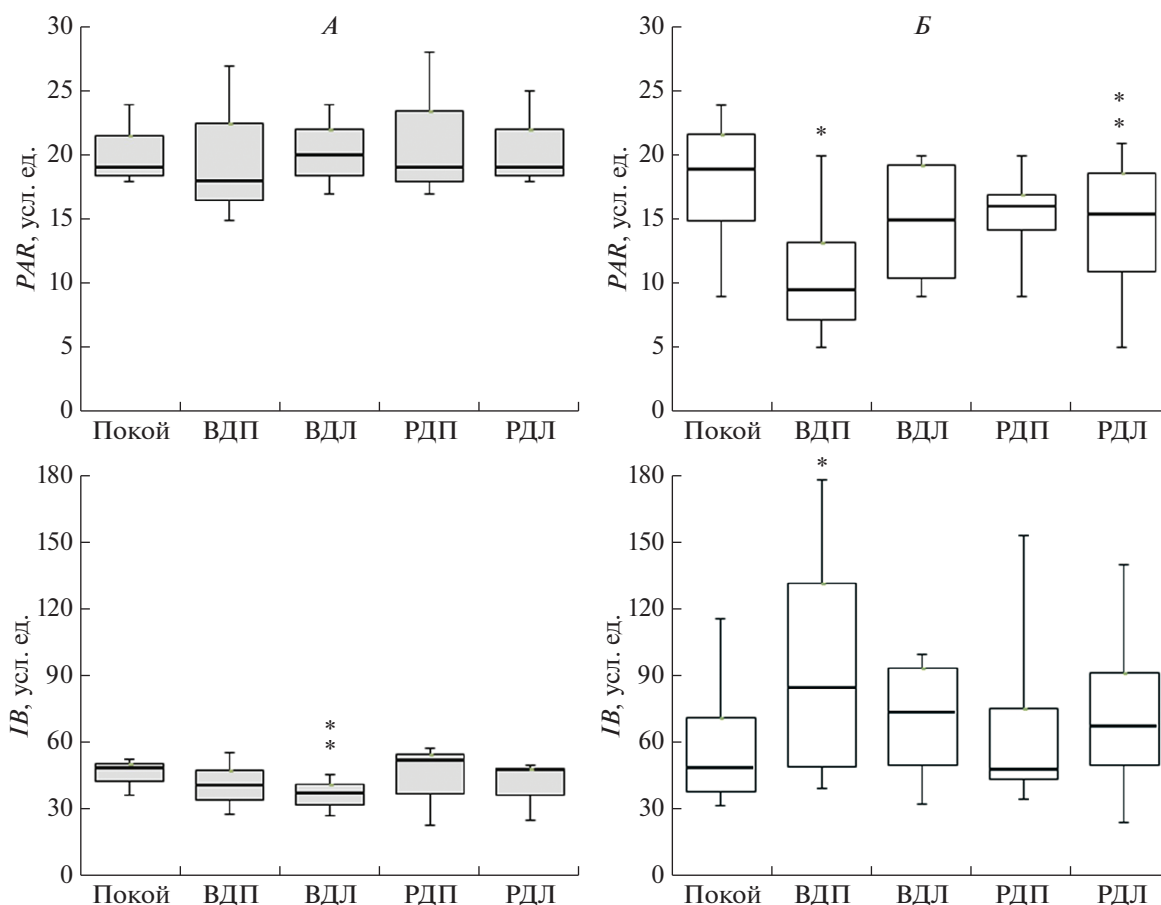


Рис. 3. Изменения значений *PAR* и *IB* у правшей и левшей при выполнении двигательных задач.

A (темные боксы) – правши, *B* (светлые) – левши (на боксах указаны: медианы – линия внутри боксов; квартили – верхняя и нижняя границы боксов; 10-й и 90-й перцентили – нижняя и верхняя границы “усов”); ВДП и ВДЛ – воображаемые движения правой и левой ног; РДП и РДЛ – реальные движения правой и левой ног; * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) – достоверность изменений относительно покоя.

дений ЭЭГ, у левшей доминировали связи ВСП со СМ фронтального α -ритма. Следует обратить внимание на то, что более выраженные корреляции формировались при воображаемых движениях, однако у правшей они количественно преобладали при мысленном действии ведущей ногой, тогда как у левшей число связей при мысленных движениях обеих ног было примерно одинаковым (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных результатов следует, что характерной реакцией на воображение и выполнение движений ногами у правшей и левшей является десинхронизация α -ритма, более выраженная во фронтальных и центральных областях коры, что соответствует данным об активации при реальном и мысленном движениях одних и тех же нейронных сетей [25]. Считается, что инициация произвольного движения и его выполнение начи-

наются с возбуждения префронтальных регионов коры, распространяющегося в первичные моторные и сенсомоторные зоны [26]. Вовлечение фронтальных областей в двигательное воображение может объясняться модулирующим влиянием премоторных зон на эфферентные сигналы из первичной моторной коры [27]. Десинхронизация или синхронизация α -ритма в центральных отведениях C_3 – C_4 расценивается как основной показатель когнитивной и двигательной деятельности человека [12, 14, 28], а кроме того, десинхронизация фронтального и центрального α -ритма может быть связана с активацией мотивационной системы и усилением внимания [22].

В настоящем исследовании на ЭЭГ у испытуемых с разными типами ФМА регистрировалось снижение СМ центрального α -ритма при реальных и воображаемых движениях обеих ног, однако при использовании левой ноги в отведении C_3 у левшей отмечался более низкий уровень СМ, чем у правшей. Низкая мощность α -ритма в ле-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (r) между параметрами ВСП и СМ α -ритма в разных отведениях у правой и левой при воображении движений

Воображение движения правой ноги										
параметры	правши									
	Fp_1	Fp_2	F_7	F_8	C_3	C_4	P_3	P_4	O_1	O_2
<i>HR</i>						-0.64				-0.76
<i>VLF</i>	-0.65	-0.63	-0.55	-0.61	-0.77	-0.92				-0.97
<i>LF</i>	-0.95	-0.84	-0.90	-0.93	-0.89	-0.89	-0.85	-0.79	-0.75	-0.96
<i>HF</i>								-0.53	-0.58	
<i>TP</i>	-0.83	-0.89	-0.97	-0.86	-0.92	-0.95	-0.94	-0.89	-0.86	-0.88
<i>SIM</i>	0.97	0.98	0.89	0.98	0.92	0.77	0.91	0.94	0.89	0.66
<i>PAR</i>										0.54
<i>IB</i>	0.77	0.78	0.84	0.79	0.64		0.89	0.94	0.96	
<i>IC</i>	-0.63	-0.61	-0.53	-0.59	-0.75	-0.90				-0.96
параметры	левши									
	Fp_1	Fp_2	F_7	F_8	C_3	C_4	P_3	P_4	O_1	O_2
<i>HR</i>					0.97			0.74		-0.50
<i>VLF</i>							0.70			
<i>LF</i>	0.97	0.94	0.97	0.98		0.61	0.87		0.93	
<i>HF</i>	0.96	0.91	0.93	0.97		0.74	0.90		0.95	
<i>TP</i>	0.95	0.97	0.97	0.98		0.69	0.92		0.92	
<i>SIM</i>	-0.92	-0.82	-0.92	-0.90			-0.67		-0.93	-0.50
<i>PAR</i>	0.97	0.95	0.94	0.97		0.68	0.94		0.88	
<i>IB</i>	-0.80	-0.68	-0.76	-0.77			-0.67		-0.72	-0.50
<i>IC</i>	-0.64	-0.60	-0.72	-0.65					-0.82	
Воображение движения левой ноги										
параметры	правши									
	Fp_1	Fp_2	F_7	F_8	C_3	C_4	P_3	P_4	O_1	O_2
<i>HR</i>					-0.65	-0.80				-0.97
<i>VLF</i>					-0.67	-0.82				-0.98
<i>LF</i>	-0.98	-0.98	-0.92	-0.97	-0.86	-0.73	-0.91	-0.93	-0.94	-0.40
<i>HF</i>									-0.63	0.74
<i>TP</i>	-0.87	-0.88	-0.98	-0.83	-0.66	-0.48	-0.98	-0.98	-0.91	
<i>PAR</i>						0.64				0.90
<i>IB</i>						-0.66				-0.90
<i>IC</i>	-0.58	-0.56		-0.63	-0.81	-0.92				-0.94
параметры	левши									
	Fp_1	Fp_2	F_7	F_8	C_3	C_4	P_3	P_4	O_1	O_2
<i>HR</i>					0.61			0.55	0.66	
<i>VLF</i>										0.73
<i>HF</i>					0.79			0.69	0.74	
<i>TP</i>					0.67			0.52	0.53	
<i>SIM</i>	-0.91	-0.98	-0.92	-0.97	-0.78	-0.95	-0.83	-0.85	-0.77	-0.91
<i>PAR</i>	0.92	0.97	0.97	0.98	0.69	0.89	0.77	0.77	0.67	0.92
<i>IB</i>	-0.90	-0.84	-0.93	-0.90		-0.69	-0.54	-0.53		-0.90
<i>IC</i>	-0.68	-0.71	-0.64	-0.61	-0.97	-0.90	-0.79	-0.98	-0.93	-0.63

Примечание: ВСП – вариабельность сердечного ритма, СМ – спектральная мощность. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции с уровнем статистической значимости $p < 0.01$, остальные корреляции значимы при $p < 0.05$.

вой центральной области соотносится с высокой тревожностью [22], которая является особенностью лиц с доминированием правого полушария [2, 29, 30]. С позиций ФМА также важно отметить разную степень изменений α -ритма в симметричных фронтальных отведениях F_7 и F_8 при выполнении двигательных задач у левополушарных испытуемых и их сходную выраженность у правополушарных. Это согласуется с представлениями о более лабильных механизмах мозговой активности правой, что позволяет им быстрее адаптироваться к изменяющимся условиям, по сравнению с левшами [7, 31]. Интересно добавить, что у правшей снижение СМ α -волн в Fp_1 , Fp_2 , F_7 , F_8 преобладало в случае реального действия ведущей ногой, что в целом совпадает с результатами других исследований [9]. У левшей такая реакция доминировала при воображаемом действии ведущей ногой и чаще возникала в отведениях C_3 и C_4 . При задачах на неведущую ногу у правшей более выраженное угнетение α -волн отмечалось во фронтальных отведениях ЭЭГ при воображении движения, а у левшей эффекты мысленного и реального движений неведущей ногой проявлялись одинаковым уровнем десинхронизации по всей коре. Эти данные свидетельствуют о зональных особенностях активности нейронных сетей, участвующих в создании двигательных образов, подготовке к движению и его осуществлению у лиц с разными типами ФМА. Со ссылкой на представления о динамической нейронной сети, обеспечивающей мысленные двигательные манипуляции [4], и результаты наших предыдущих исследований [31] можно считать, что у правшей данная нейросеть более тесно связана с моторной и премоторной корой, чем у левшей.

В управлении двигательными актами на этапе подготовки к движению и в ходе его выполнения также участвует теменно-затылочная кора [26], что обусловлено необходимостью построения перцептивных моделей движения, особенно при его мысленном представлении [5]. В нашей работе включение теменных и затылочных областей в воображение и выполнение движений ног подтвердилось уменьшением СМ α -ритма в P_3 , P_4 , O_1 и O_2 у всех испытуемых, однако у левшей в O_2 такой эффект отмечался только в случае мысленного действия ведущей ногой, что, согласно данным литературы, может быть связано с сенсорной модальностью, в рамках которой формируется движение или его образ [32]. Например, угнетение α -волн в теменно-затылочных областях объясняется преимущественно зрительным типом воображения [10], которое, возможно, у обследованных левшей менее выражено, чем у правшей. В целом задача выявления конкретных различий паттерна ЭЭГ при движениях правой и левой ног требует дальнейшего изучения, тем более что не-

которые авторы указывают на наблюдаемое при этом сходство активации корковых зон [12].

В условиях воображения и выполнения движений ногами тип ФМА влиял не только на паттерн ЭЭГ, но и на параметры ВСР, изменения которых у правшей и левшей имели некоторые особенности. К примеру, значения HR у правшей возрастали при реальных движениях, а у левшей — при воображаемых, что, на наш взгляд, связано с особенностями активации регуляторных механизмов. Как известно, HR увеличивается при физической и умственной нагрузке, психологическом стрессе [15]. Рост HR также расценивается как признак концентрации на осуществлении целенаправленной деятельности, тогда как снижение HR трактуется в качестве кардио-компонента ориентировочного рефлекса [33], сопровождающего целенаправленный акт. С учетом этого, можно полагать, что напряжение механизмов кардиорегуляции при реальном движении выше у правшей и связано с высокой степенью психического усилия, сосредоточенностью на выполняемом действии. Воображаемые движения ног, очевидно, вызывают большее напряжение вегетативных механизмов у левшей, что дополнительно подтверждается снижением у них PAR и ростом IB и может быть обусловлено высокой эмоциональностью и чувствительностью к стрессам правополушарных лиц [7].

В пользу представлений об особенностях вегетативного обеспечения двигательных актов у правшей и левшей также говорят результаты корреляционного анализа связей α -ритма с ВСР, в характере которых у представителей с разными типами моторной асимметрии отмечались как сходства, так и различия. Так, существенным общим признаком правшей и левшей при выполнении двигательных задач была корреляция между десинхронизацией α -волн и ростом IC , отражающим преобладание центрального контура регуляции сердца над автономным [24]. В тоже время у левшей, в отличие от правшей, были выявлены устойчивые отрицательные связи α -ритма с SIM и IB , что, опираясь на мнение [34], можно объяснить более сильной активацией центрального контура регуляции синусного узла при моторных актах у лиц с доминированием правого полушария. Различия между группами испытуемых проявились также в динамике положительных корреляционных связей α -ритма и ВСР, количество которых при воображении и выполнении движений ног преобладало у левшей. На основании установленных закономерностей допустимо говорить о различиях в динамическом взаимодействии механизмов регуляции движений и кардиоритма у правшей и левшей в ходе мысленных и реальных двигательных актов ногами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у лиц с правым и левым профилями моторного доминирования двигательный контроль осуществляется при разной степени вовлечения кортикальных нейронных сетей и механизмов вегетативной регуляции сердечного ритма в процессы воображения и выполнения движений ног. Для правшей при этом типичен более лабильный характер изменений ЭЭГ и стабильный вегетативный статус организма, что, вероятно, позволяет им быстрее и легче адаптироваться к перестройке двигательных программ. У левшей воображение и выполнение двигательных актов ногами вызывает выраженную десинхронизацию α -ритма, сконцентрированную преимущественно во фронтальных и центральных областях мозга, в сочетании со значительным ростом напряженности вегетативных механизмов. Выявленная взаимосвязь в динамике СМ α -волн и параметров ВСР у правшей и левшей отражает особенности взаимодействия механизмов произвольного моторного контроля и отделов мозга, участвующих в вегетативном обеспечении движений ног у лиц с разными профилями моторного доминирования. Очевидно, что левшам присущи более тесные связи коры больших полушарий со структурами, обеспечивающими симпатический контроль висцеральных функций, что определяет у них большую, чем у правшей, активацию центрального контура регуляции кардиоритма во время выполнения и, особенно, воображения движений ног.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева (Самара).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-14073).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. О.А. Ведясова — идея, планирование, разработка дизайна и координация исследования, анализ и трактовка результатов, подготовка текста, оформление рукописи. К.А. Моренова — участие в планировании исследования, подготовка и проведение исследования, расчеты и анализ результатов, подготов-

ка рисунков и текста, оформление рукописи. С.И. Павленко — участие в проведении исследования, анализ результатов, подготовка текста, оформление рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагина Н.Н., Доброхотова Т.А. Функциональные асимметрии человека. М.: Медицина, 1988. 240 с. *Bragina N.N., Dobrokhotova T.A. Functional asymmetry of a human. Moscow: Medicine, 1988. 240 p.*
2. Игнатова Ю.П., Макарова И.И., Зенина О.Ю., Аксенова А.В. Современные аспекты изучения функциональной межполушарной асимметрии мозга (обзор литературы) // Экология человека. 2016. № 9. С. 30. *Ignatova J.P., Makarova I.I., Zenina O.J., Aksenova A.V. [Current aspects of functional hemispheric asymmetry studying (literature review)] // Ekologiya Cheloveka. 2016. № 9. P. 30.*
3. Berenguer-Rocha M., Baltar A., Rocha S. et al. Interhemispheric asymmetry of the motor cortex excitability in stroke: relationship with sensory-motor impairment and injury chronicity // *Neurol. Sci.* 2020. V. 41. № 9. P. 2591.
4. Sasaoka T., Mizuhara H., Inui T.J. Dynamic parietopremotor network for mental image transformation revealed by simultaneous EEG and fMRI measurement // *Cogn. Neurosci.* 2014. V. 26. № 2. P. 232.
5. Lazurenko D.M., Kirov V.N., Aslanyan E.V. et al. Electrophysiological properties of movement-related potentials // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2018. V. 48. № 9. P. 1078.
6. Liburkina S.P., Vasilyev A.N., Yakovlev L.V. et al. A motor imagery-based brain-computer interface with vibrotactile stimuli // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2018. V. 48. № 9. P. 1067.
7. Жаворонкова Л.А. Правши — левши: межполушарная асимметрия электрической активности мозга человека. М.: Наука, 2006. 222 с. *Zhavoronkova L.A. Right-handers — left-handers: interhemispheric asymmetry of electrical activity of the human brain. M.: Nauka, 2006. 222 p.*
8. Боброва Е.В., Богачева И.Н., Ляховецкий В.А. и др. Запоминание последовательностей движений правой и левой руки правшами и левшами: векторное кодирование // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 1. С. 18. *Bobrova E.V., Bogacheva I.N., Lyakhovetskii V.A. et al. Memorization of sequences of right and left hand movements in right- and left-handers: vector coding // Human Physiology. 2017. V. 43. № 1. P. 13.*
9. Morash V., Bai O., Furlani S. Classifying EEG signals preceding right hand, left hand, tongue, and right foot movements and motor imageries // *Clin. Neurophysiol.* 2008. V. 119. № 11. P. 2570.
10. Фролов А.А., Федотова И.Р., Гусек Д., Бобров П.Д. Ритмическая активность мозга и интерфейс мозг-компьютер, основанный на воображении движений // Успехи физиологических наук. 2017. Т. 48. № 3. С. 72. *Frolov A.A., Fedotova I.R., Husek D., Bobrov P.D. [Rhythmic brain activity and brain computer interface*

- based on motor imagery] // *Usp. Fiziol. Nauk.* 2017. V. 48. № 3. P. 72.
11. *Xiao R., Qi X., Patino A. et al.* Characterization of infant mu rhythm immediately before crawling: A high-resolution EEG study // *NeuroImage.* 2017. V. 146. P. 47.
 12. *Alonso-Valerdi L.M., Gutiérrez-Begovich D.A., Argüello-García J. et al.* User experience may be producing greater heart rate variability than motor imagery related control tasks during the user-system adaptation in brain-computer interfaces // *Front. Physiol.* 2016. № 7. P. 279.
 13. *Боброва Е.В., Решетникова В.В., Фролов А.А., Герасименко Ю.П.* Воображение движений нижних конечностей для управления системами “интерфейс мозг-компьютер” // *Ж. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2019. Т. 69. № 5. С. 529.
Bobrova E.V., Reshetnikova V.V., Frolov A.A., Gerasimenko Y.P. [Motor imagery of lower limbs movements to control brain-computer interface] // *Zh. Vyssh. Nerv. Deyat. Im. I.P. Pavlova.* 2019. V. 69. № 5. P. 529.
 14. *Tariq M., Trivailo P.M., Simic M.* Mu-beta event-related (de)synchronization and EEG classification of left-right foot dorsiflexion kinaesthetic motor imagery for BCI // *PLoS One.* 2020. V. 15. № 3. P. e0230184.
 15. *Шлык Н.И.* Сердечный ритм и тип регуляции у детей, подростков и спортсменов. Ижевск: “Удмуртский университет”, 2009. 259 с.
Shlyk N.I. Heart rate and type of regulation in children, adolescents and athletes. Izhevsk: Udmurtskij universitet, 2009. 259 p.
 16. *Mokienko O.A., Chervyakov A.V., Kulikova S.N. et al.* Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects // *Front. Comput. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 168.
 17. *Terkelsen A.J., Mølgaard H., Hansen J. et al.* Heart rate variability in complex regional pain syndrome during rest and mental and orthostatic stress // *Anesthesiology.* 2012. V. 116. № 1. P. 133.
 18. *Ведясова О.А., Павленко С.И., Кретова И.Г., Комарова М.В.* Влияние информационной нагрузки на динамику спектральных параметров variability сердечного ритма у студентов с разными хронотипами // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* 2016. Т. 102. № 8. С. 990.
Vedyasova O.A., Pavlenko S.I., Kretova I.G., Komarova M.V. [The influence of information load on the timecourse of spectral parameters of heart rate variability in students with different chronotypes] // *Ross. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenova.* 2016. V. 102. № 8. P. 990.
 19. *Андреанов В.В., Василюк Н.А., Бирюкова Е.В.* Когнитивная деятельность студентов и ее гемодинамическое обеспечение // *Вестн. новых мед. технологий.* 2017. Т. 24. № 2. С. 130.
Andrianov V.V., Vasilyuk N.A., Biryukova E.V. [Cognitive activity of the students and its haemodynamic ensuring] // *Vest. Nov. Med. Tekhnol.* 2017. V. 24. № 2. P. 130.
 20. *Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А., Дудник Е.Н.* Динамика параметров альфа-активности ЭЭГ и variability сердечного ритма при интеллектуальной деятельности человека // *Физиология человека.* 2015. Т. 41. № 6. С. 36.
Dzhebrailova T.D., Korobeinikova I.I., Karatygin N.A., Dudnik E.N. Dynamics of EEG α activity and heart rate variability in subjects performing cognitive tests // *Human Physiology.* 2015. V. 41. № 6. P. 599.
 21. *Павлов К.И., Мухин В.Н., Сырцев А.В. и др.* Связь периодических модуляций сердечного ритма с уровнем активности сенсомоторной коры // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* 2020. Т. 106. № 2. С. 205.
Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V. et al. [Association between periodic modulations of the heart rate and sensorimotor cortex activation] // *Ross. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenova.* 2020. V. 106. № 2. P. 205.
 22. *Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А. и др.* Динамика спектральных характеристик ЭЭГ у лиц с разной личностной тревожностью при когнитивной деятельности // *Физиология человека.* 2021. Т. 47. № 1. С. 20.
Dzhebrailova T.D., Korobeinikova I.I., Karatygin N.A. et al. Dynamics of EEG spectral characteristics in subjects with various trait anxiety levels performing cognitive tests // *Human Physiology.* 2021. V. 47. № 1. P. 14.
 23. *Pfurtscheller G., Solis-Escalante T., Barry R.J.* Brisk heart rate and EEG changes during execution and withholding of cue-paced foot motor imagery // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 379.
 24. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др.* Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // *Вестник аритмологии.* 2002. № 24. С. 65.
Baevskij R.M., Ivanov G.G., Chirejkin L.V. et al. [Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma pri ispol'zovanii razlichnykh elektrokardiograficheskikh sistem (metodicheskie rekomendatsii)] // *Vestnik Aritmologii.* 2002. № 24. P. 65.
 25. *Pelletier R., Higgins J., Bourbonnais D.* Addressing neuroplastic changes in distributed areas of the nervous system associated with chronic musculoskeletal disorders // *Phys. Ther.* 2015. V. 95. № 11. P. 1582.
 26. *Desmurget M., Sirigu A.* A parietal-premotor network for movement intention and motor awareness // *Trends Cogn. Sci.* 2009. V. 13. № 10. P. 411.
 27. *Côté S.L., Hamadjida X.A., Quessy X.S., Dancause X.N.* Contrasting modulatory effects from the dorsal and ventral premotor cortex on primary motor cortex outputs // *J. Neurosci.* 2017. V. 37. № 24. P. 5960.
 28. *Kurgansky M.E., Bobrov P.D., Frolov A.A., Semenova E.I.* Corticomuscular interactions in real and imaginary arm movements // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2021. V. 51. № 6. P. 724.
 29. *Куликов В.Ю., Антропова Л.К., Козлова Л.А.* Влияние функциональной асимметрии мозга на стратегию поведения индивида в стрессовой ситуации // *Медицина и образование в Сибири.* 2010. № 5. С. 10.
Kulikov V.Y., Antropova L.K., Kozlova L.A. [Effect of functional brain asymmetry to adopt strategies of individual behavior in stressful situations] // *Meditsina i Obrazovanie v Sibiri.* 2010. № 5. P. 10.

30. Logue D.D., Logue R.T., Kaufmann W.E., Belcher H.M. Psychiatric disorders and left-handedness in children living in an urban environment // *Laterality*. 2015. V. 20. № 2. P. 249.
31. Моренова К.А., Ведясова О.А. Изменение паттерна электроэнцефалограммы у правой и левой при воображении движений // Ульяновский медико-биологический журн. 2019. № 1. С. 85.
Morenova K.A., Vedyasova O.A. [Changes in electroencephalogram pattern in right- and left-handers during imaginary movements] // *Ulyanovsk. Med. Biol. Zh.* 2019. № 1. P. 85.
32. Gonzalez-Rosa J.J., Natali F., Tettamanti A. et al. Action observation and motor imagery in performance of complex movements: evidence from EEG and kinematics analysis // *Behav. Brain Res.* 2015. V. 281. P. 290.
33. Данилова Н.Н., Астафьев С.В. Внимание человека как специфическая связь ритмов ЭЭГ с волновыми модуляторами сердечного ритма // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2000. Т. 50. № 5. С. 791.
Danilova N.N., Astafiev S.V. [Human attention as a specific correlation between the EEG rhythms and activity of heart rate wave modulators] // *Zh. Vyssh. Nerv. Deyat. Im. I.P. Pavlova*. 2000. V. 50. № 5. P. 791.
34. Капустян Е.Г. Спектральные характеристики вариабельности сердечного ритма у женщин в послеродовом периоде в зависимости от латеральной конституции и гестационных асимметрий // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 6. С. 11.
Kapustyan E.G. [Spectral characteristics of heart rate variability with women in postnatal period depending on lateral constitution and gestational asymmetry] // *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2016. № 6. P. 11.

Electroencephalographic and Vegetative Correlates of Imaginary and Real Movements of Legs in Right-Handers and Left-Handers

O. A. Vedyasova^{a,*}, K. A. Morenova^a, S. I. Pavlenko^a

^aSamara National Research University, Samara, Russia

*E-mail: o.a.vedyasova@gmail.com

Changes in the spectral power (SP) of EEG in the α -band and the heart rate variability (HRV) were studied in subjects with right and left motor dominance profiles during imaginary and real flexion of right and left feet. During the implementation of motor tasks, a pronounced desynchronization of the α -rhythm in frontal and central leads and its less significant changes in parietal and occipital zones of both hemispheres were revealed. The peculiarity of right-handers during mental and real leg movements was the variable and asymmetric character of changes in the SP of α -rhythm in the bilateral leads from various cortical areas. In left-handed subjects, when imagining and performing movements, the desynchronization of the α -rhythm in different leads had the same severity and there were practically no hemispheric asymmetry in SP. Right-handers had a relatively stable vegetative status during the performance of motor tasks, and HRV changes occurred mainly with real leg movements. In left-handers, HRV parameters changed more strongly and mainly during mental actions with their feet. Correlations were found between the α -rhythm SP and HRV parameters, depending on the type of movement and the profile of motor dominance of subjects. The obtained data reflect the peculiarities of regulation mechanisms of voluntary leg movements and the differences in the vegetative support of motor activity in right-handed and left-handed people.

Keywords: α -rhythm, heart rate variability, correlations, right-handers, left-handers, imaginary and real leg movements.