

УДК 612.82

DOI 10.34014/2227-1848-2021-4-143-152

ОСОБЕННОСТИ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ μ -РИТМА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВООБРАЖАЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ

Я.А. Туровский^{1,2}, А.С. Давыдова², В.Ю. Алексеев²

¹ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия;

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия

Цель – оценка феноменов частотной модуляции ЭЭГ в условиях выполнения реальных и воображаемых движений, необходимых для управления ИМК.

Материалы и методы. Для получения данных была сформирована группа из 30 добровольцев обоих полов в возрасте от 17 до 23 лет. Участники эксперимента должны были выполнить четыре команды и повторить их в неизвестном для них порядке, заданном программой. Эксперимент проводился двумя способами: физически и мысленно. То есть при первом способе каждая команда соответствовала определенному движению человека, при втором те же команды выполнялись воображаемо, движение представлялось мысленно. Команда считалась успешно исполненной, если добровольцу удавалось повторить и удержать заданное программой положение в течение 2 с.

Анализ результатов проводился для пяти частотных диапазонов: 7–10 Гц, 9–12 Гц, 12–15 Гц, 15–20 Гц, 20–25 Гц.

Результаты. Сгенерированные электроэнцефалографические показатели обрабатывались методом корреляционного анализа и методами разведочной статистики, такими как анализ соответствий и кластерный анализ. Реально выполняемые движения испытуемых связаны с высоким количеством низкочастотных модуляций в диапазоне 12–20 Гц при отсутствии модулирующих влияний в диапазоне ниже 12 Гц. Для случаев невыполнения команд характерны выраженные паттерны высокочастотной модуляции.

Выводы. Результаты корреляционного анализа демонстрируют положительную связь между числом случаев высокочастотной модуляции в диапазоне 9–12 Гц с числом случаев низкочастотной модуляции во всех других исследуемых диапазонах сигнала в случае успешного выполнения команд.

Ключевые слова: интерфейс «мозг – компьютер», μ -ритм, частотная модуляция, ЭЭГ.

Введение. В настоящее время развитие интерфейсов «мозг – компьютер» (нейрокомпьютерный интерфейс, ИМК, НКИ) [1] сталкивается с проблемами, связанными с необходимостью не только совершенствования скорости и точности работы данного класса устройств [1–2], но и оценивания потенциальной возможности оператора управлять с использованием той или иной технологии. Как и любая эргатическая система [3], ИМК в своём функционировании критически зависит от характеристик оператора, генерирующего управляющие команды. Как известно, ИМК представляет собой большой пласт различных технологий [4], связанных с изменениями активности головного мозга, зарегистрированной опять же разными методами [3, 5], среди которых одним из наиболее распространённых яв-

ляется регистрация электрической активности с поверхности скальпа – электроэнцефалография (ЭЭГ). В свою очередь технологии ИМК разделяются на синхронные и асинхронные [6]. Лидером среди асинхронных ИМК является ИМК на основе паттернов μ -ритма, связанного с реальными или воображаемыми движениями [7]. При этом, помимо подходов, связанных с показателями спектрального оценивания, интерес представляют подходы на основе частотной модуляции ЭЭГ [8], традиционно изученные существенно слабее, чем подходы на основе анализа амплитуд разночастотных компонентов исследуемого сигнала.

Цель исследования. Оценка феноменов частотной модуляции ЭЭГ в условиях выполнения реальных и воображаемых движений, необходимых для управления ИМК.

Материалы и методы. Для исследования была сформирована группа из 30 испытуемых обоих полов в возрасте от 17 до 23 лет (12 девушек и 18 юношей), не имеющих неврологических и психиатрических патологий. Перед экспериментом участники не принимали психотропных препаратов и имели нормальное или скорректированное до нормального зрение. Данные электроэнцефалограммы фиксировались прибором «Нейрон-спектр-4ВП» (ООО «Ней-рософт», Россия) на отведениях F3, F7, C3, T3, F4, F8, C4, T4 с частотой дискретизации 5000 Гц, включенным режекторным фильтром и отключенным фильтром высоких и низких частот. Для сбора и анализа данных было разработано оригинальное ПО на основе SDK и API, предоставленных ООО «Нейрософт».

Эксперимент состоял из двух этапов: калибровка и обследование, каждый из которых осуществлялся двумя способами.

На первом этапе (калибровка, рис. 1) человек выполнял определенные движения

(первый способ), соответствующие 4 командам, генерируемым программой:

- влево – напряжение мышц левой руки и левой ноги,
- вправо – напряжение мышц правой руки и правой ноги,
- стоп – полное расслабление мышц,
- вперед – напряжение рук и ног вместе.

При втором способе испытуемый мысленно представлял движения первого этапа. По результатам этапа калибровки в частотном диапазоне 5–15 Гц с эпохой анализа 1 с и со сдвигом окна временной области на 0,2 с производилось преобразование Фурье. Строилась матрица, где каждая ячейка обозначала пару (электрод левого полушария – электрод правого полушария). Для каждой пары считалась сумма правильно выполненных команд. В итоге пара с наибольшим числом правильно выполненных команд выставлялась как лучшая. Таким образом, выбиралось по 1 отведению для каждого полушария.

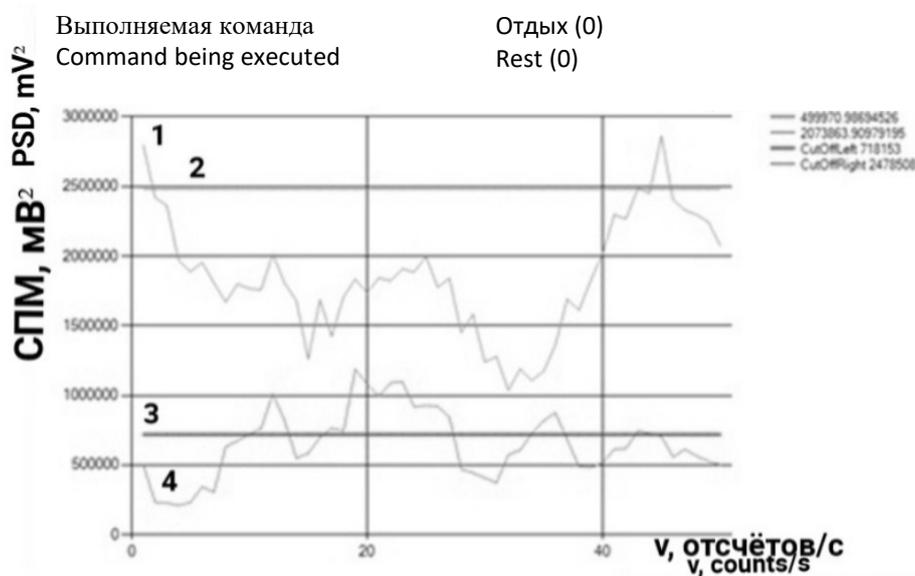


Рис. 1. Вид программы на этапе калибровки

- (1 – сигнал с лучшего для детекции канала для левого полушария,
 2 – рассчитанное среднее значение канала правого полушария,
 3 – рассчитанное среднее по каналу левого полушария,
 4 – сигнал с лучшего для детекции канала для правого полушария)

Fig. 1. Program at calibration stage

- (1 – signal from the best detection channel for the left hemisphere,
 2 – calculated average channel value of the right hemisphere,
 3 – calculated average channel value for the left hemisphere,
 4 – signal from the best detection channel for the right hemisphere)



Рис. 2. Вид программы на этапе обследования
(1 – команда, которую удаётся выполнить испытуемому в данный момент,
2 – команда, которую нужно выполнить)

Fig. 2. Program at examination stage
(1 – command that the subject is executing at the moment, 2 – command to be executed)

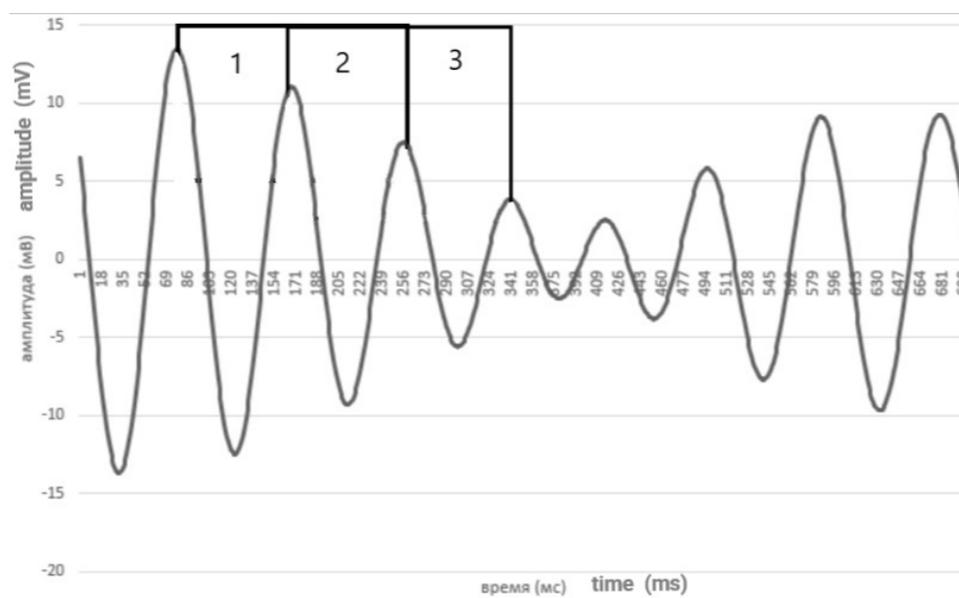


Рис. 3. Демонстрация построения последовательности пик-пик на основе отфильтрованного сигнала ЭЭГ

Fig. 3. Demonstration of a peak-to-peak sequence based on the filtered EEG signal

На этапе обследования доброволец точно так же, как при калибровке, выполнял указания (вперед, вправо, влево, стоп). Но теперь задача заключалась в прохождении случайной

последовательности из 20 команд, которая заранее ему не была известна. Команда считалась успешно исполненной, если сгенерированные пользователем электроэнцефалогра-

фические показатели совпадали с полученными на этапе калибровки и сохранялись в течение 2 с. Если на протяжении 20 с достичь результата не удавалось, команда считалась неисполненной и программа переходила к следующей по последовательности. Во время эксперимента испытуемый мог наблюдать гистограммы, адаптированно представляющие активность мозга, связанные с эффективностью выполнения задачи. Также на экране отображался статус выполнения команд (рис. 2).

В статистическом анализе использовали методы разведочной статистики на основе множественного анализа соответствий [9]. Данный метод был выбран как один из наиболее хорошо зарекомендовавших себя в задачах классификации качественных переменных и дающий возможность физиологически значимо интерпретировать полученные результаты. После вычисления координат исследуемых переменных и наблюдений они подвергались кластерному анализу в евклидовом пространстве, где кластеры формировались методом дальнего соседа. Полученные «деревья расстояний» могли быть интерпретиро-

ваны как мера близости выполняемых пользователем команд, успешности их выполнения и феноменов частотной перестройки ЭЭГ в исследуемом диапазоне.

Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствовали этическим стандартам Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих изменений. От всех участников предварительно было получено информированное добровольное согласие.

Результаты и обсуждение. В ходе отбора переменных для анализа соответствий был выбран показатель числа случаев высокочастотной и низкочастотной модуляции, содержащих от нуля до трёх и более событий на эпохе анализа. При этом три и более события рассматривались как одно значение переменной. При этом очевидно, что выполняемые команды, их успешность и характер движений (реальное или воображаемое) формируют общее для всей группы пространство, которое позволит определить, какие именно электрофизиологические феномены ЭЭГ наиболее тесно связаны с успешностью достижения или недостижением цели.

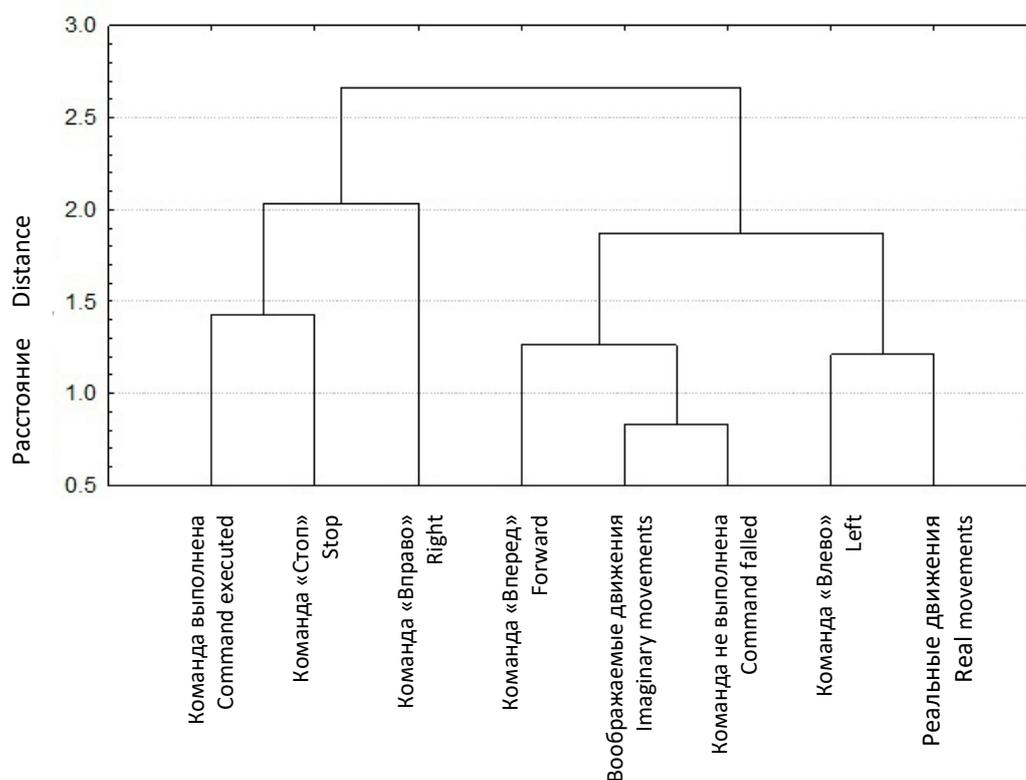


Рис. 4. Результаты кластерного анализа характеристик частотной модуляции ЭЭГ в диапазоне 7–10 Гц

Fig. 4. Results of cluster analysis of EEG frequency modulation (7–10 Hz)

Полученные результаты демонстрируют (рис. 4), что воображаемые движения чаще приводят к невыполнению команды и наиболее часто этой командой оказывается команда «вперёд». В то же время выполненные команды в большей степени связаны с движением вправо или невыполнением каких-либо действий. Вероятно, сложности с командой «вперёд» связаны в первую очередь с невозможностью значительной части пользователей одновременно обеспечить достаточно синхронный уровень депрессии μ -ритма, в то время как для команды «стоп» необходимо не совершать никаких движений, т.е. быть максимально, в рамках эксперимента, расслабленным, что приводит к восстановлению исходного баланса между амплитудами μ -ритма в обоих полушариях. Поскольку все испытуемые были правшами, то выполнение команды «вправо», когда надо осуществлять движения правой рукой, вызывает гораздо меньше сложностей, чем аналогичное задание для левой руки. В то же время воображаемые движения не содержат компонента обратной связи в виде проприоцепции, что, вероятно, является одним из механизмов менее успешного выполнения команд в этом режиме работы по сравнению с реально выполняемыми движениями.

Рассмотрим теперь взаимосвязь генерируемых испытуемым команд, успешности их выполнения, характера движений и собственно феноменов ЭЭГ-модуляции в заданном частотном канале (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что реально выполняемые движения испытуемых связаны с высоким количеством низкочастотных модуляций в диапазоне 12–20 Гц при отсутствии модулирующих влияний в диапазоне ниже 12 Гц. Таким образом, мы можем говорить о выявлении

2 разных механизмов низкочастотной, т.е. увеличивающей период сигнала, модуляции при выполнении реальных движений. Для одного механизма характерны интенсивные модулирующие влияния, локализованные в диапазоне выше высокочастотного α -ритма. Для другого характерно отсутствие таких влияний, и он связан с низкочастотным диапазоном μ -ритма. Однако именно в этом диапазоне присутствуют высокочастотные модулирующие воздействия, т.е. события, вызывающие уменьшение периода волн ЭЭГ в данном частотном диапазоне.

Во втором кластере, объединившем воображаемые движения и невыполнение команд, наблюдается иная картина. В этом кластере выражены высокочастотные модулирующие влияния в диапазоне выше 15 Гц. В рамках моделирования процессов частотной модуляции сигнала ЭЭГ было показано, что высокочастотная модуляция приводит к формированию паттернов, характеризующихся признаками десинхронизации: снижением амплитуды и появлением волн разной формы и частоты. Как известно, феномен десинхронизации ЭЭГ может быть связан с умственной активностью. Таким образом, можно предположить, что высокочастотная модуляция отражает перестройку ЭЭГ моторных зон коры, вызванную двумя причинами: во-первых, активной мыслительной деятельностью испытуемого, так как речь идёт о воображаемых движениях, во-вторых, сменой испытуемым стратегии поведения при невыполнении команд, выражающейся в представлении разных вариантов движений.

Рассмотрим корреляции случаев частотной модуляции в исследуемых диапазонах. В этом случае считалось всё число событий частотной модуляции (табл. 1).

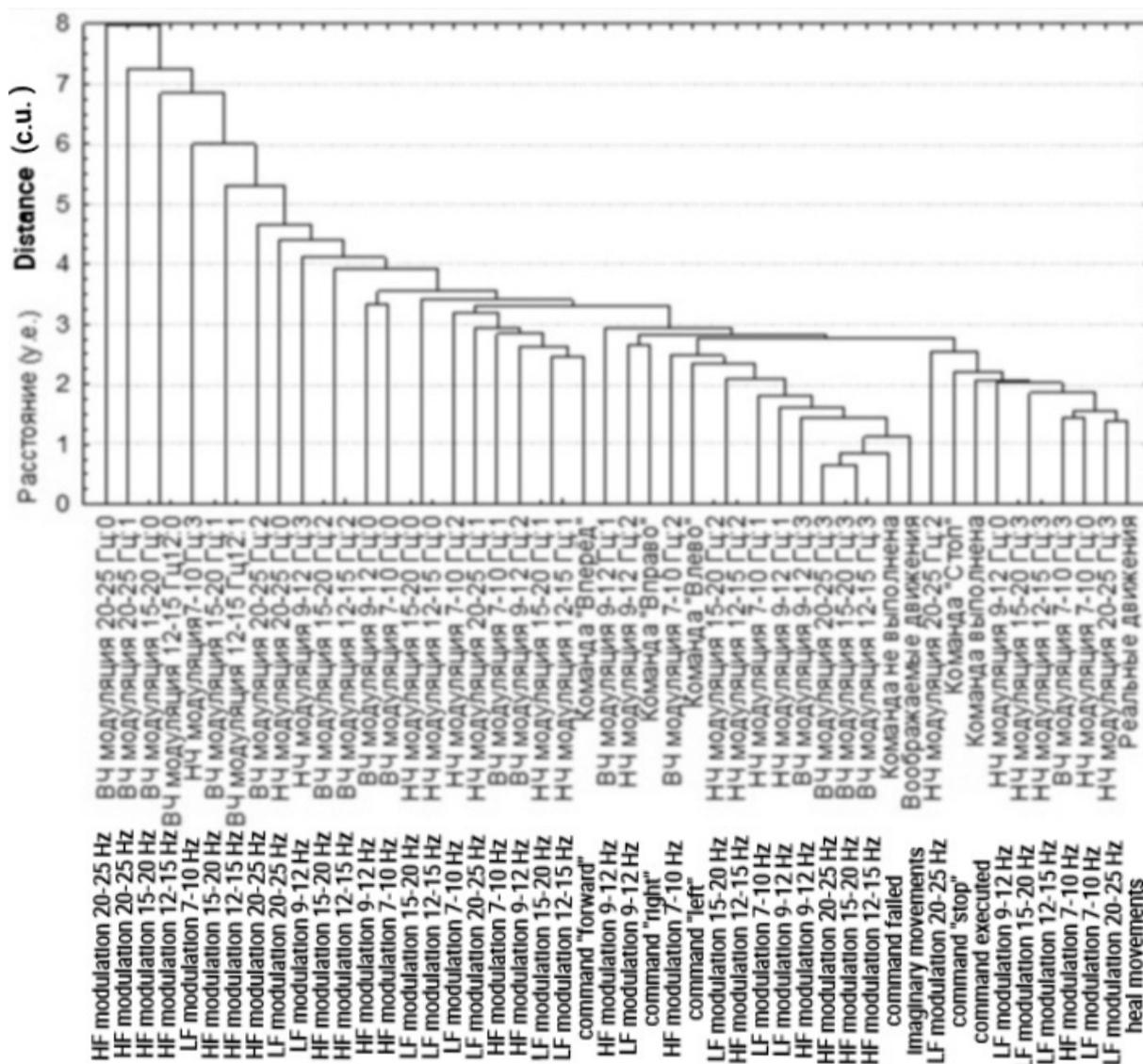


Рис. 5. Кластеризация результатов анализа соответствий методом дальнего соседа (НЧ – низкочастотная модуляция, ВЧ – высокочастотная модуляция. После «:» следует число случаев данного феномена на двухсекундном отрезке, предшествующем либо успешному выполнению команд, либо завершению времени, отведённого на выполнение команды.

Цифра «3» означает, что число событий модуляции было три и больше)

Fig. 5. Clustering correspondence analysis results according to a furthest neighbour method (LF – low-frequency modulation, HF – high-frequency modulation. After ":" there is a number of cases in a two-second interval preceding either a successful command execution or the end of the time allotted for the command execution. Number "3" means that the number of modulation events was three or more)

Таблица 1
Table 1

**Корреляции общего числа случаев частотной модуляции
в зависимости от успешного выполнения команды**

**Correlations of the total number of frequency modulation cases depending
on a successful command execution**

		7–10 Гц Hz		9–12 Гц Hz		12–15 Гц Hz		15–20 Гц Hz		20–25 Гц Hz	
		НЧ LF	ВЧ HF	НЧ LF	ВЧ HF	НЧ LF	ВЧ HF	НЧ LF	ВЧ HF	НЧ LF	ВЧ HF
7–10 Гц Hz	НЧ LF		◆		■						
	ВЧ HF	▼		■	◆					■	
9–12 Гц Hz	НЧ LF		●		◆						
	ВЧ HF			▼			■		■		
12–15 Гц Hz	НЧ LF				●		◆		◆		
	ВЧ HF			●		▼		◆		■	
15–20 Гц Hz	НЧ LF				●		▼		◆		
	ВЧ HF			●		▼		▼		■	
20–25 Гц Hz	НЧ LF					●		●			◆
	ВЧ HF	▼	●		●					▼	

Примечания: 1. Выше главной диагонали таблицы располагаются данные, полученные при невыполнении команды, ниже – при выполнении.

2. Отмечены только статистически значимые коэффициенты корреляции: ▼ – отрицательный для успешного выполнения команд, ● – положительный для успешного выполнения команд, ◆ – отрицательный для невыполненной команды, ■ – положительный для выполненной команды.

Notes: 1. Above the main table diagonal there are data obtained when the command was not executed, below – when it was executed.

2. Only statistically significant correlation coefficients are marked: ▼ – negative for a successful command execution, ● – positive for a successful command execution, ◆ – negative for an unexecuted command, ■ – positive for an executed command.

Полученные результаты демонстрируют положительную связь между числом случаев высокочастотной модуляции в диапазоне 9–12 Гц и числом случаев низкочастотной модуляции в других исследуемых диапазонах сигнала в случае успешного выполнения команд. Таким образом, активная частотная модуляция, направленная на уменьшение периода

волн ЭЭГ, в этом диапазоне связана с увеличением периода волн во всех других частотных диапазонах в том случае, если команда выполнялась верно. Если же команда не выполнялась, то данный феномен не наблюдался. Обращает на себя внимание, что во всех частотных диапазонах высокочастотная и низкочастотная модуляции находились в реци-

прокных отношениях, т.е. рост числа случаев высокочастотной модуляции приводил к снижению числа случаев низкочастотной модуляции и наоборот.

Заключение. На основе оригинальных алгоритмов оценки частотной модуляции были изучены феномены изменения периода пик-пик для волн ЭЭГ в каждом из пяти частотных диапазонов: 7–10 Гц, 9–12 Гц, 12–15 Гц, 15–20 Гц, 20–25 Гц. С использованием как методов корреляционного анализа, так и разведочной статистики показано, что реально выполняемые движения испытуемых связаны с высоким количеством низкочастотных модуляций в диапазоне 12–20 Гц при отсутствии модулирующих влияний в диапазоне ниже 12 Гц, что позволяет предположить наличие минимум двух контуров для каждого (ВЧ и НЧ) варианта модуляции, работающих в рамках сво-

его частотного диапазона ЭЭГ. Для случаев невыполнения команд характерны выраженные паттерны высокочастотной модуляции. Результаты корреляционного анализа демонстрируют положительную связь между числом случаев высокочастотной модуляции в диапазоне 9–12 Гц и числом случаев низкочастотной модуляции во всех других исследуемых диапазонах сигнала в случае успешного выполнения команд. Таким образом, активная частотная модуляция, направленная на уменьшение периода волн ЭЭГ в этом диапазоне, связана с увеличением периода волн во всех других частотных диапазонах в том случае, если команда выполнялась верно. Полученные результаты позволяют рассмотреть частотную модуляцию ЭЭГ как один из феноменов, потенциально представляющих интерес для ИМК на основе паттернов μ -ритма.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-29-01156.мк.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. *Yadav D., Yadav S., Veer K.* A comprehensive assessment of Brain Computer Interfaces: Recent trends and challenges. *Journal of Neuroscience Methods.* 2020; 346: 108918.
2. *Qin L., Kamousi B., Liu, ZM., Ding L., He B.* Classification of motor imagery tasks by means of time-frequency-spatial analysis for brain-computer interface applications: International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, 2005, March 16–20. Arlington; 2005: 374–376.
3. *McFarland D.J., Wolpaw J.R.* EEG-based brain-computer interface. *Current opinion in biomedical engineering.* 2017; 4: 194–200.
4. *Chang S. Nam, Anton Nijholt, Fabien Lotte.* Brain-Computer Interfaces Handbook. Technological and Theoretical Advances. New York: CRC Press; 2018. 814.
5. *Bettina S., Rainer G.* Real-time fMRI for brain-computer interfacing. *National Center for Biotechnology Information.* 2020; 168: 289–302.
6. *Chen C.W., Ju M.S., Sun Y.N., Lin C.C.K.* Model analyses of visual biofeedback training for EEG-based brain-computer interface. *J. Compt. Neurosci.* 2009; 27: 357–368.
7. *Фролов А.А., Гусек Д., Бобров П.Д., Мокиенко О.А., Черникова Л.А., Коновалов Р.Н.* Локализация источников электрической и фокусов гемодинамической активности мозга при воображении движения. *Физиология человека.* 2014; 40: 45–56.
8. *Туровский Я.А., Борзунов С.В., Алексеев В.Ю., Карпова М.А.* Частотная модуляция электроэнцефалограммы при фотостимуляции. *Биофизика.* 2021; 66 (3): 583–589.
9. *Литвин А.А., Калинин А.Л., Тризна Н.М.* Использование данных доказательной медицины в клинической практике. *Проблемы здоровья и экологии.* 2008: 4.

Поступила в редакцию 13.09.2021; принята 08.10.2021.

Авторский коллектив

Туровский Ярослав Александрович – доктор технических наук, кандидат медицинских наук, доцент кафедры цифровых технологий, заведующий лабораторией медицинской кибернетики факультета компьютерных наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1; ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем

управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. 117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5290-885X>.

Давыдова Анастасия Сергеевна – студентка 4 курса, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-0986>.

Алексеев Виктор Юрьевич – студент 2 курса магистратуры, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4541-9978>.

Образец цитирования

Туровский Я.А., Давыдова А.С., Алексеев В.Ю. Особенности частотной модуляции μ -ритма при выполнении воображаемых движений. Ульяновский медико-биологический журнал. 2021; 4: 143–152. DOI: 10.34014/2227-1848-2021-4-143-152.

CHARACTERISTICS OF μ -RHYTHM FREQUENCY MODULATION UNDER IMAGINARY MOVEMENTS

Ya.A. Turovskiy^{1,2}, A.S. Davydova², V.Yu. Alekseev²

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
² Voronezh State University, Voronezh, Russia

The aim of the paper is to assess the phenomena of EEG frequency modulation while performing real and imaginary movements necessary for BCI control.

Materials and Methods. The study enrolled a group of 30 volunteers of both sexes, aged 17 to 23. The subjects had to execute four commands and to run them randomly following the program instruction. The experiment was carried out in two ways: physically and mentally. Firstly, each command corresponded to a certain subject's movement. Secondly, the same commands were not performed, they were only imaginary. The command was considered successfully executed if a volunteer was able to follow the program instruction and to hold the position for 2 seconds. The analysis of the results was carried out for five frequency ranges: 7–10 Hz, 9–12 Hz, 12–15 Hz, 15–20 Hz, 20–25 Hz.

Results. Correlation analysis and exploratory statistics (namely, correspondence analysis and cluster analysis) were used to process the generated electroencephalographic parameters. The actually performed subjects' movements were associated with a high number of low-frequency modulations in the 12–20 Hz range in the absence of modulating influences in the range below 12 Hz. Pronounced patterns of high-frequency modulation were peculiar for unexecuted commands.

Conclusion. The results of the correlation analysis demonstrate a positive relationship between the number of cases of high-frequency modulation in the range of 9–12 Hz with the number of cases of low-frequency modulation in all other studied signal ranges in case of successful command execution.

Key words: brain-computer interface, μ -rhythm, frequency modulation, EEG.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 19-29-01156 МК)

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

References

1. Yadav D., Yadav S., Veer K. A comprehensive assessment of Brain Computer Interfaces: Recent trends and challenges. *Journal of Neuroscience Methods*. 2020; 346: 108918.
2. Qin L., Kamousi B., Liu, ZM., Ding L., He B. *Classification of motor imagery tasks by means of time-frequency-spatial analysis for brain-computer interface applications*: International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering. 2005, March 16–20. Arlington; 2005: 374–376.

3. McFarland D.J., Wolpaw J.R. EEG-based brain-computer interface. *Current opinion in biomedical engineering*. 2017; 4: 194–200.
4. Chang S. Nam, Anton Nijholt, Fabien Lotte. Brain-Computer Interfaces Handbook. *Technological and Theoretical Advances*. New York: CRC Press; 2018. 814.
5. Bettina S., Rainer G. Real-time fMRI for brain-computer interfacing. *National Center for Biotechnology Information*. 2020; 168: 289–302.
6. Chen C.W., Ju M.S., Sun Y.N., Lin C.C.K. Model analyses of visual biofeedback training for EEG-based brain-computer interface. *J. Compt. Neurosci*. 2009; 27: 357–368.
7. Frolov A.A., Gusek D., Bobrov P.D., Mokienco O.A., Chernikova L.A., Konovalov R.N. Lokalizatsiya istochnikov elektricheskoy i fokusov gemodinamicheskoy aktivnosti mozga pri voobrazhenii dvizheniya [Localization of sources of electrical brain function and foci of brain hemodynamic activity under imaginary movements]. *Fiziologiya cheloveka*. 2014; 40: 45–56 (in Russian).
8. Turovskiy Ya.A., Borzunov S.V., Alekseev V.Yu., Karpova M.A. Chastotnaya modulyatsiya elektroentsefalogrammy pri fotostimulyatsii [Electroencephalogram frequency modulation under photostimulation]. *Biofizika*. 2021; 66 (3): 583–589 (in Russian).
9. Litvin A.A., Kalinin A.L., Trizna N.M. Ispol'zovanie dannykh dokazatel'noy meditsiny v klinicheskoy praktike [Use of evidence-based medicine data in clinical practice]. *Problemy zdorov'ya i ekologii*. 2008: 4 (in Russian).

Received September 13, 2021; accepted October 08, 2021.

Information about the authors

Turovskiy Yaroslav Aleksandrovich, Doctor of Sciences (Engineering), Candidate of Sciences (Medicine), Associate Professor, Chair of Digital Technologies, Head of the Laboratory of Medical Cybernetics, Department of Computer Science, Voronezh State University. 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1; Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute for Control Sciences, Russian Academy of Sciences. 117997, Russia, Moscow, Profsoyuznaya St., 65; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5290-885X>.

Davydova Anastasiya Sergeevna, 4th-year Student, Voronezh State University. 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-0986>.

Alekseev Viktor Yur'evich, 2nd-year MSc Student, Voronezh State University. 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1; e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4541-9978>.

For citation

Turovskiy Ya.A., Davydova A.S., Alekseev V.Yu. Osobennosti chastotnoy modulyatsii μ -ritma pri vypolnenii voobrazhaemykh dvizheniy [Characteristics of μ -rhythm frequency modulation under imaginary movements]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskiy zhurnal*. 2021; 4: 143–152. DOI: 10.34014/2227-1848-2021-4-143-152 (in Russian).