

КЛИНИЧЕСКАЯ ФИЗИОЛОГИЯ

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ
ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ТРЕМОРА ПРИ ВОСПРИЯТИИ СИГНАЛОВ
С РАЗЛИЧНОЙ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ ЗНАЧИМОСТЬЮ**

© А. Ю. Александров, К. О. Уплисова, О. С. Попов, А. В. Степанов,
В. Ю. Иванова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: k.uplisova@spbu.ru

В работе исследовалась динамика физиологического тремора при изменениях эмоционального состояния человека, вызванных демонстрацией зрительных стимулов с различной эмоциональной значимостью. В условиях автоматизированного эксперимента испытуемому многократно в случайном порядке предъявляли 4 типа зрительных стимулов: его собственную фамилию, последовательность, полученную случайной перестановкой букв фамилии, истинные и ложные элементарные арифметические равенства. Регистрацию физиологического тремора осуществляли трехкоординатными цифровыми акселерометрами, закрепленными на внешней стороне указательных пальцев. Полученные результаты продемонстрировали изменения динамики вызванной неосознаваемой моторной активности, соответствующие возникновению эмоциональных состояний. Особенности ответов на использованные стимулы позволили предположить существование обусловленной типом зрительного стимула специфической латерализации неосознаваемых моторных ответов. Получены достоверные отличия психомоторных реакций правой руки на собственную фамилию — как наиболее эмоционально значимый стимул.

Ключевые слова: физиологический тремор, мгновенная частота, эмоциональные состояния.

Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. Т. 102. № 10. С. 1224—1232. 2016

A. Yu. Aleksandrov, K. O. Uplisova, O. S. Popov, A. V. Stepanov, V. Yu. Ivanova. PHYSIOLOGICAL TREMOR INSTANTANEOUS FREQUENCY DYNAMICS UNDER VARIOUS EMOTIONALLY LOADED STIMULATION. Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, e-mail: k.uplisova@spbu.ru.

Emotionally evoked physiological tremor dynamics was investigated on varying stimulus efficiency. Experimental protocol includes randomized presentation of four variant visual stimuli, one of the followed - subject's second name, random shuffled letters of second name, graphic representation of simple arithmetic expression with correct or incorrect answer. The physiological tremor acquisition was implemented by 3-axial digital accelerometers, fixed on external side of index fingers. The data analysis explained unconscious psychomotor activity dynamics under emotional status transitions. Evoked reactions specificity gives an opportunity to suppose stimulus-dependent lateralization of unconscious motor responses. Valid differences of the right hand psychomotor reactions were achieved for the most emotionally loaded stimulus — second name.

Key words: physiological tremor, instantaneous frequency, emotional status.

RUSSIAN JOURNAL OF PHYSIOLOGY. V. 102. N 10. P. 1224—1232. 2016

Основной задачей работы явилось исследование особенностей физиологического тремора при предъявлении зрительных стимулов с различной степенью эмоциональной значимости. Результаты будут использованы для разработки метода объективной оценки эмоциональных состояний, основанного на анализе динамики психофизиологических и, в частности неосознаваемых психомоторных реакций, вызванных сенсорной стимуляцией.

Под физиологическим тремором в данной работе понимают приблизительно периодические произвольные движения дистальных отделов конечностей, в частности рук и пальцев, в диапазоне 8—12 Гц [1, 5], наблюдаемые у человека в норме. Амплитуда таких движений обычно невелика и не может быть оценена или даже обнаружена без применения технических средств. Непосредственно к физиологическому тремору прилегают рассматриваемые как часть патологической или условно патологической симптоматики усиленный физиологический (enhanced physiological) и психогенный (psychogenic) тремор [3].

В числе наиболее распространенных факторов, приводящих к возникновению изменений параметров тремора, обычно рассматривают введение психотропных веществ, алкоголь, физические упражнения, утомление, гипогликемию, гипотермию, тиреотоксикоз и боль [6]. В частности, к числу основных причин возникновения усиленного физиологического тремора обычно относят нарушения метаболизма (тиреотоксикоз, гипогликемия) и прием психотропных препаратов [11]. Важно отметить, что даже тремор, имеющий выраженную неврологическую этиологию, может быть подвержен модулирующему влиянию эмоционального состояния больного, как это показано для тремора, вызванного болезнью Паркинсона [3, 10], или для эссенциального (essential) тремора [12].

Связь между тремором и изменениями эмоционального состояния наиболее часто используют в связи с исследованиями вокального тремора. Данная особенность, замеченная еще в донаучную эпоху, по сей день активно разрабатывается и используется в практических применениях, направленных на создание систем автоматического распознавания эмоций и выявление сокрытия информации по психофизиологическим параметрам речевого ответа [2]. Здесь также следует отметить, что патологические формы вокального тремора демонстрируют не менее выраженную зависимость от эмоционального состояния, чем те же формы, наблюдаемые в норме [7].

Нестационарность и аperiodичность тремора делают неэффективным применение традиционных методов цифрового анализа сигналов. В связи с этим использование огибающей сигнала и мгновенной частоты для описания динамики физиологического и патологического тремора является распространенной практикой [4, 13]. Данный подход позволяет с высоким временным разрешением рассматривать динамику амплитудно-частотных характеристик сигнала с ограниченным спектром. Для получения мгновенной частоты и огибающей сигнала могут быть использованы преобразование Гильберта и преобразование Гильберта—Хуанга. Оба этих подхода, особенно последний, широко используют в настоящее время при анализе акселерометрических и миографических данных [4, 13].

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 19 человек — студенты СПбГУ, учащиеся 2—3-го курсов в возрасте 19—22 лет, среди которых было 3 мужчин и 16 женщин. Все испытуемые предварительно прошли обследование, направленное на определение предпочитаемой руки, и оказались праворукими.

В ходе эксперимента испытуемый располагался в экранированной звукоизолированной камере, в кресле, в положении сидя с симметричным расположением обеих рук. Кисти рук и предплечья должны были находиться в безопорном и, по возможности, комфортном для испытуемого положении. Регистрацию физиоло-

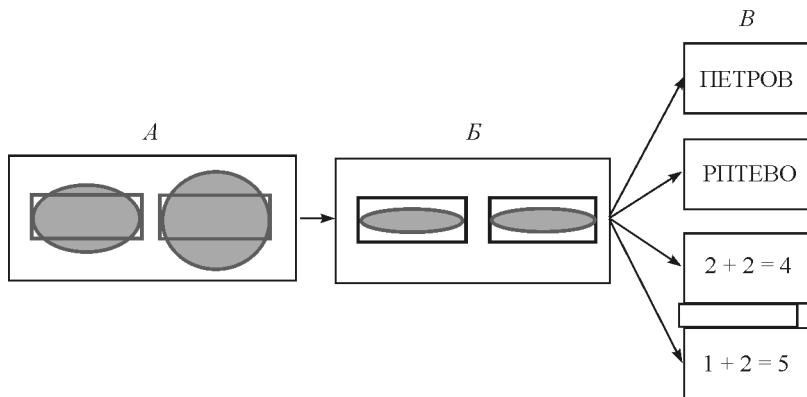


Рис. 1. Схематическое изображение зрительных стимулов.

Вид сигналов: *A* — обратной связи; *B* — обратной связи при успешном удержании рук в горизонтальной плоскости; *B* — варианты тестирующих стимулов.

гического тремора осуществляли трехкоординатными цифровыми акселерометрами типа ADXL345 («Analog Devices», США). Акселерометры закрепляли симметрично на внешней стороне указательных пальцев правой и левой руки испытуемого. Для увеличения стабильности регистрируемых параметров моторной активности и снижения количества артефактов регистрации испытуемому предоставляли зрительную обратную связь по положению обеих рук в горизонтальной плоскости (рис. 1, *A, B*). Монитор, на экран которого транслировали эмоционально значимые сигналы и отображали индикаторы сигналов обратной связи, находился по средней линии перед испытуемым на расстоянии приблизительно 1 м.

В условиях автоматизированного эксперимента испытуемому многократно в случайном порядке предъявляли 4 типа стимулов — его собственную фамилию, последовательность, полученную случайной перестановкой букв фамилии, истинные и ложные элементарные арифметические равенства типа ($3 + 2 = 5$, $2 + 4 = 3$) (рис. 1, *B*).

Протокол эксперимента выглядел следующим образом. Для выполнения программы от испытуемого требовалось удерживать ладони на весу горизонтально, руководствуясь сигналами обратной связи (рис. 1, *A*). После каждого 3-секундного успешного (соответствующие критерии демонстрировались в индикаторе обратной связи) удержания (рис. 1, *B*) изображение сигнала обратной связи на мониторе сменялось демонстрацией эмоционально значимого сигнала (рис. 1, *B*). Длительность предъявления зрительного стимула была равна 3 с. После его окончания на экран автоматически возвращались индикаторы обратной связи, и испытуемый получал возможность своими действиями вызвать демонстрацию следующего сигнала или предоставить себе небольшой отдых. Программа эксперимента включала 80 предъявлений тестирующих сигналов по 20 для каждого типа зрительных стимулов с различной эмоциональной значимостью. Продолжительность эксперимента обычно не превышала 12 мин в зависимости от длительности пауз, которые делал испытуемый при выполнении задачи.

В ходе предварительного инструктажа испытуемому разъясняли его задачу и проверяли освоение навыков использования обратной связи, необходимых для выполнения программы эксперимента. Затем испытуемый подписывал информированное согласие на проведение эксперимента в соответствии с Хельсинкской декларацией о правах человека (1965 г.).

Данные с двух 3-координатных акселерометров регистрировали со встроенных 12-разрядных аналого-цифровых преобразователей с частотой дискретизации 200 Гц при аппаратном диапазоне амплитуд ± 2 г. Метку синхронизации с

началом демонстрации тестирующего зрительного стимула регистрировали с экрана монитора аппаратно датчиком яркости светового потока OPT101 («Texas Instruments», США).

Для последующей обработки данные психомоторной активности группировали в соответствии с типом предъявляемого эмоционально значимого стимула. По 3-координатным реализациям, соответствующим единичному предъявлению, вычисляли евклидову норму:

$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_i |x_i|^2}.$$

Полученный одномерный временной ряд подвергали дискретному преобразованию Гильберта с окном длительностью 1.5 с, с последующим вычислением мгновенной частоты.

Преобразование Гильберта в обобщенном виде понимается как:

$$x(t) = \int \frac{u(t)}{\pi(t-\tau)} dt,$$

где $x(t)$ — действительная функция, определенная во временной области, а интеграл понимается в смысле главного значения Коши.

Вместо прямого интегрирования с заменой интеграла суммой была использована следующая эквивалентная последовательность вычислений, использующая вращение фазы в спектральной плоскости:

вычисление комплексного дискретного преобразования Фурье анализируемого временного ряда;

получение Фурье-образа аналитического представления временного ряда посредством преобразования в частотной области по формуле

$$Z(f) = X(f) + j\tilde{X}(f) = \begin{cases} 2X(f), & f > 0; \\ 0, & f < 0; \\ X(0), & f = 0, \end{cases}$$

где $Z(f)$ — преобразование Фурье аналитического сигнала;

обратное дискретное комплексное преобразование Фурье образа аналитического сигнала $[Z(f)]$ с получением аналитического сигнала соответствующего исследуемому временному ряду;

разделение действительной и мнимой частей аналитического сигнала, вычисление мгновенной амплитуды и мгновенной фазы.

Мгновенную частоту, понимаемую как производную мгновенной фазы аналитического сигнала, вычисляли численным дифференцированием фазы аналитического сигнала.

Единичные реализации мгновенной частоты отдельно по группам подвергали когерентному усреднению от момента начала демонстрации зрительного стимула. В качестве оценки среднего значения распределения использовали вычисление медианы.

Таким образом, для оценки вызванной динамики физиологического тремора вычисляли усредненные значения мгновенной частоты, накапливаемые на временном интервале 0—750 мс от момента появления эмоционально значимого сигнала.

Для статистической оценки полученных результатов использовали предназначенный для связанных выборок Бутстреп-метод с полной рандомизацией знаков парных разностей. Вычисления достигаемого уровня значимости различий

осуществляли по алгоритму, описанному в работе Манли [9]. Для оценки однородности использовали как попарные сравнения групп, соответствующих типу сигнала, так и сравнения каждой группы с совокупностью остальных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее характерной формой усредненного вызванного психомоторного ответа при анализе динамики мгновенной частоты являлась пологая кривая с выраженным максимумом во временном диапазоне 550—650 мс. Данный тип реакции при различной степени выраженности максимума встречался у большинства испытуемых. Общий характер вызванных реакций оказался аналогичным для обеих рук, как это можно видеть на рис. 2, где данные реакции показаны в одних координатах.

В то же время амплитуда максимума изменения мгновенной частоты усредненного ответа продемонстрировала зависимость как от типа тестирующего

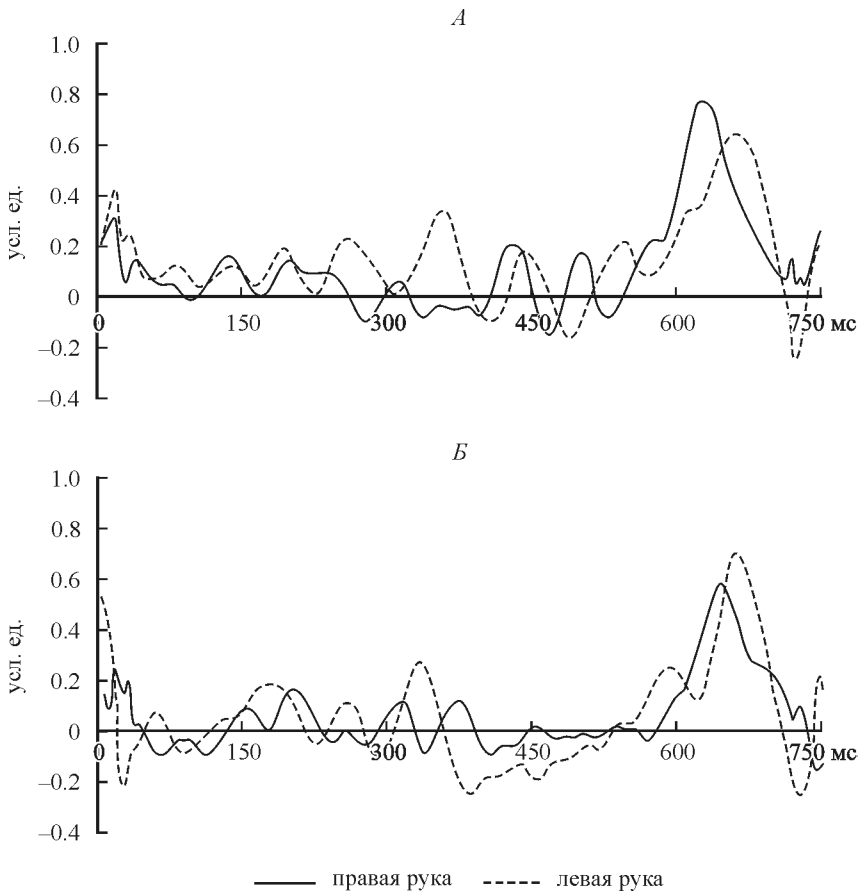


Рис. 2. Усредненная динамика мгновенной частоты физиологического тремора при экспозиции фамилии испытуемого и неверного арифметического выражения для правой и левой руки.

Динамика мгновенной частоты: А — при экспозиции имени; Б — при экспозиции ложного арифметического равенства. По горизонтальной оси — время, мс. Отсчет времени ведется от начала предъявления зрительного стимула; по вертикальной оси — амплитуда, усл. ед.

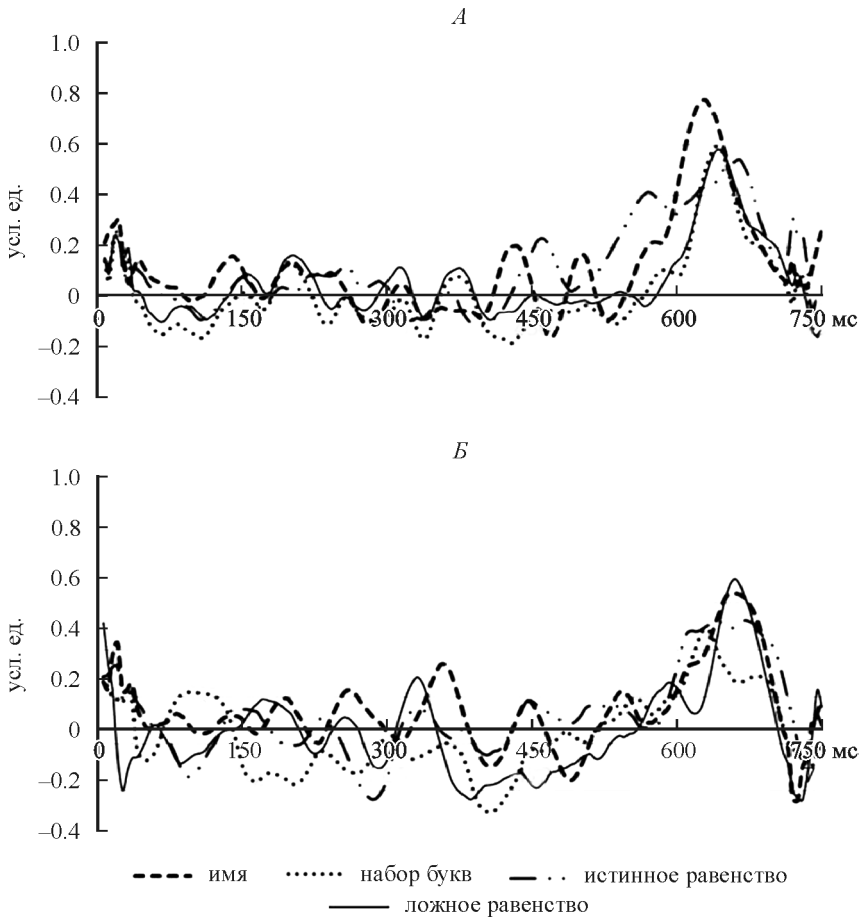


Рис. 3. Усредненная динамика мгновенной частоты физиологического тремора при экспозиции зрительных стимулов с различной эмоциональной значимостью.

Динамика мгновенной частоты: *A* — для правой руки; *B* — для левой руки. По оси абсцисс — время, мс. Отсчет времени ведется от начала предъявления зрительного стимула; по оси ординат — амплитуда, усл. ед.

сигнала (рис. 3), так и от стороны его регистрации (рис. 2, 3). Этот параметр оказался наиболее информативным при регистрации вызванной реакции на предъявление зрительных стимулов с различной эмоциональной значимостью. Полученные вызванные ответы показали значительные амплитудные различия максимумов, причем зависимость амплитуды реакции от типа сигнала оказалась различной для левой и правой руки. Как видно из рис. 3, наиболее высокоамплитудный ответ для правой руки вызвала экспозиция фамилии испытуемого (рис. 3, *A*), в то время как для левой — арифметического действия с неправильным ответом (рис. 3, *B*).

Дальнейший анализ показал, что как выраженность амплитудных различий, так и их достоверность возрастают при уменьшении количества усредняемых реализаций, если накопление реализаций производить от начала опыта. Указанная особенность была использована для статистической оценки достоверности различий. Сводные данные о достоверности различий амплитуд максимумов вызванных изменений мгновенной частоты физиологического тремора, представленные в табл. 1 и 2, получены при усреднении первых 8 реализаций, данные

Т а б л и ц а 1

Достижимые уровни значимости различий амплитуд максимумов вызванных изменений мгновенной частоты физиологического тремора, полученные при статистическом анализе парных разностей средних по 8 первым реализациям для всех паросочетаний исследуемых сигналов для правой руки

		Условный номер сигнала			
		1	2	3	4
Условный номер сигнала	1	—	0.0327* (0.0679)	0.0126* (0.0327)	0.0122* (0.0126)
	2	0.0327*	—	0.3609 (0.5464)	0.4536 (0.0679)
	3	0.0126*	0.3609	—	0.2709 (0.3609)
	4	0.0122*	0.4536	0.2709	—

Примечание. В скобках приведены аналогичные данные по всем реализациям. * Достоверные результаты с достигаемым уровнем значимости ≤ 0.05 . Соответствие сигналов условным номерам: 1 — фамилия испытуемого, 2 — последовательность букв фамилии, 3 — истинное арифметическое равенство, 4 — ложное арифметическое равенство.

усреднения по всем реализациям для реакций правой руки приводятся для сравнения.

Наиболее достоверные различия, таким образом, были получены для сочетания «правая рука — демонстрация фамилии». Здесь различия оказались достоверны при всех попарных сравнениях с постоянно высокими значениями достигаемого уровня значимости. Обращает на себя внимание почти синхронное снижение достоверности различий при увеличении количества накапливаемых реализаций (табл. 1, данные в скобках). Статистическая оценка средних при сравнении реакции на демонстрацию фамилии против совокупности остальных сигналов показала высокий достигаемый уровень значимости — 0.009.

Психомоторные реакции левой руки можно охарактеризовать как менее зависимые от типа сигнала. Максимальное значение максимума изменения мгновенной частоты тремора было зарегистрировано при экспозиции ложных арифметических равенств, однако при попарном сравнении, как следует из табл. 2, различия оказались недостоверными. Вместе с тем при сравнении средних в группе против остальной совокупности получены достоверные различия с достигаемым уровнем значимости 0.036.

Т а б л и ц а 2

Достижимые уровни значимости различий амплитуд максимумов вызванных изменений мгновенной частоты физиологического тремора, полученные при статистическом анализе парных разностей средних по 8 первым реализациям для всех паросочетаний исследуемых сигналов для левой руки

		Условный номер сигнала			
		1	2	3	4
Условный номер сигнала	1	—	0.0680	0.2709	0.8109
	2	0.0680	—	0.9472	0.9216
	3	0.2709	0.9472	—	0.4536
	4	0.8109	0.9216	0.4536	—

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенный методический подход, связанный с анализом психомоторных реакций на фоне демонстрации сигнала зрительной обратной связи, показал свою жизнеспособность как средство снижения вариабельности и повышения качества регистрации вызванных изменений физиологического тремора. Как указывалось выше, попытки использовать физиологический тремор как средство оценки эмоциональных состояний предпринимались и ранее, однако все они эксплуатируют стандартную парадигму регистрации и не предполагают попыток улучшения однородности фоновых характеристик физиологического тремора. Кроме того, для анализа изменений физиологического тремора в основном использовали оценки амплитудных характеристик, причем полученных на довольно значительных по продолжительности временных отрезках. Указанные обстоятельства затрудняют сравнительный анализ полученных результатов с данными литературы, оставляя возможность лишь качественных параллелей.

Принимаемое в работе выделение экспозиции фамилии испытуемого как наиболее эмоционально значимого стимула в наборе опирается на распространенную в экспериментальной и прикладной полиграфии практику определения имени или фамилии испытуемого по психофизиологическим параметрам и невозможность полного угашения психофизиологических реакций в ответ на предъявление фамилии или имени.

Статистический анализ изменений мгновенной частоты физиологического тремора выявил значительную латерализацию вызванных психомоторных реакций. Данные, полученные для правой и левой руки, выявили отличия по проявленной эффективности эмоционально значимых стимулов. Ограничения модели не позволяют вполне раскрыть причины данного явления, однако можно предположить, что данная особенность могла быть вызвана различиями в природе использованных стимулов — вербальных (фамилия, последовательность букв) и цифровых (арифметические равенства). О том, что данная дихотомия может проявляться в глубокой латерализации моторных реакций человека, указывалось еще в работах Кинсборна [8].

Полученное в эксперименте снижение достоверности получаемых различий при увеличении числа усредняемых реализаций можно считать характерным признаком вызванных реакций на эмоционально значимые стимулы. Снижение реактивности испытуемого, связанное с привыканием, традиционно считается основным ограничивающим фактором при моделировании в эксперименте изменений эмоционального состояния, например при энцефалографических исследованиях с использованием метода вызванных потенциалов.

ВЫВОДЫ

1. Избранная экспериментальная парадигма позволила выявить достоверные различия динамики мгновенной частоты физиологического тремора, вызванные демонстрацией зрительных стимулов с различной эмоциональной значимостью.

2. Зависимость усредненной динамики мгновенной частоты физиологического тремора от эмоциональной значимости тестирующего стимула оказалась наиболее выраженной при регистрации психомоторных реакций правой руки в ответ на демонстрацию фамилии испытуемого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] *Albert M. V., Kording K. P.* Determining posture from physiological tremor. *Exp. Brain Res.* 215: 247—255. 2011.

- [2] *Álvarez A., Cearreta I., López J. M., Arruti A., Lazkano E., Sierra B., Garay N.* A comparison using different speech parameters in the automatic emotion recognition using feature subset selection based on evolutionary algorithms. *Text, Speech, and Dialog.* 4629: 423—430. 2007.
- [3] *Apartis E.* Clinical neurophysiology of psychogenic movement disorders: How to diagnose psychogenic tremor and myoclonus. *Clin. Neurophysiol.* 44: 417—424. 2014.
- [4] *Ayache S. S., Al-ani T., Lefaucheur J.-P.* Distinction between essential and physiological tremor using Hilbert-Huang transform. *Clin. Neurophysiol.* 44: 203—212. 2014.
- [5] *Duval C., Jones J.* Assessment of the amplitude of oscillations associated with high-frequency components of physiological tremor: impact of loading and signal differentiation. *Exp. Brain Res.* 163: 261—266. 2005.
- [6] *Hallett M.* Classification and treatment of tremor. *JAMA.* 266: 115—117. 1991.
- [7] *Kendall K.* Vocal Tremor. In: *Mechanisms and Emerging Therapies in Tremor Disorders, Contemporary Clinical Neuroscience.* New York. Springer Science. 2013.
- [8] *Kinsbourne M., Cook J.* Generalized and lateralized effects of concurrent verbalization on a unimanual skill. *Quarterly J. Exper. Psychology.* 23: 341—245. 1971.
- [9] *Manly B. F. J.* Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology. London. Chapman & Hall. 2007.
- [10] *Marsden C. D., Owen D. A. L.* Mechanisms underlying emotional variation in parkinsonian tremor. *Neurology.* 17: 711—715. 1967.
- [11] *Beuter A., Edwards R., Titcombe M. S.* Data analysis and mathematical modeling of human tremor. In: *Nonlinear Dynamics in Physiology and Medicine.* Springer. 2003.
- [12] *Pahwa R., Lyons K.* Essential tremor: differential diagnosis and current therapy. *Am. J. Med.* 115(2): 134—42. 2003.
- [13] *Sushkova O. S., Gabova A. V., Karabanov A. V., Kershner I. A., Obukhov K. Yu., Obukhov Yu. V.* Time—frequency analysis of simultaneous measurements of electroencephalograms, electromyograms, and mechanical tremor under Parkinson disease *J. Communications Technology and Electronics.* 60(10): 1109—1116. 2015.

Поступила 16 VI 2016