

**ОБНАРУЖЕНИЕ МЕНТАЛЬНОГО АРИФМЕТИЧЕСКОГО
СТРЕССА С ПОМОЩЬЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ
СЕРДЕЧНОГО РИТМА**

**DETECTION OF MENTAL ARITHMETIC STRESS USING HEART
RATE VARIABILITY INDICES**

ИНДЕЙКИНА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА,

кандидат биологических наук, доцент,

Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева.

САПЕРОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА,

кандидат биологических наук, доцент,

Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева.

СУШКОВ ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ,

Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева.

INDEYKINA OLGA SERGEYEVNA,

candidate of Biological Sciences, Associate Professor,

Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University.

SAPEROVA ELENA VLADIMIROVNA,

candidate of Biological Sciences, Associate Professor,

Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University.

SUSHKOV IGOR ANATOLYEVICH,

Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University.

Ментальный арифметический стресс широко используется в качестве лабораторного стрессора при оценке вегетативной реакции на ментальную нагрузку. Целью данного исследования было тестирование возможности

идентификации ментального стресса с помощью показателей variability сердечного ритма. В исследовании с вычислением в уме участвовали пятьдесят здоровых студентов, запись кардиограммы проводилась дважды – в спокойном состоянии и при ментальной арифметической нагрузке. После предварительной обработки сигнала были вычислены линейные показатели SDNN, LF, HF, LH/HF и нелинейные DFA1, DFA2, REC, DET, LAM. Анализ возможности распознать ментальный арифметический стресс осуществлялся посредством алгоритма вычисления AUC ROC. Статистический анализ показал, что наиболее информативными являются нелинейные показатели DFA1, DFA2, REC, DET, LAM.

Mental arithmetic stress is widely used as a laboratory stressor to assess the autonomic response to mental workload. The aim of this study was to test the ability to identify mental stress using heart rate variability (HRV). Fifty healthy students participated in the mental arithmetic task. ECG recordings were conducted twice: in a calm state and during a mental arithmetic task. After preliminary signal processing, the linear SDNN, LF, HF, LH/HF indices and the nonlinear DFA1, DFA2, REC, DET, and LAM indices were calculated. The ability to recognize mental arithmetic stress was analyzed using the AUC ROC algorithm. Statistical analysis revealed that the nonlinear DFA1, DFA2, REC, DET, and LAM indices were the most informative.

Ключевые слова: ментальный стресс, variability сердечного ритма, классификатор.

Key words: mental stress, heart rate variability, classifier.

Введение.

Поскольку число людей с проблемами со здоровьем, возникающих вследствие стресса, увеличивается от года к году с каждым годом, ментальный стресс становится одной из основных проблем здоровья человека в

современном обществе. Ментальный стресс не только нарушает нормальное психическое и функциональное состояние, но и может вызвать различные заболевания, такие как диабет, сердечно-сосудистые и респираторные заболевания, депрессия и рак [14, с. 1057.]. Ментальный стресс может быть как хроническим, так и острым. Когда человек подвергается острому стрессогенному воздействию, организм человека запускает реакцию «бей или беги» – эволюционно сформировавшийся механизм выживания, запускаемый внешними стимулами и направленный на поддержание гомеостаза. Эта реакция активирует симпатическую нервную систему вегетативной нервной системы (ВНС) организма, а также вызывает изменения в организме посредством активации эндокринной системы [12, с. 353]. Если острый стрессор непрерывно воздействует на организм, он может трансформировать острый стресс в хронический, при котором нарушается баланс ВНС. Поэтому для сохранения нормального здоровья, функционирования и самочувствия необходимо количественно измерять и контролировать острый ментальный стресс.

Новые методы измерения стресса востребованы в различных областях психофизиологии, физиологии и медицины. Во-первых, довольно часто используются методы анкетирования [4, с. 348.], но такие методы можно считать субъективными шкалами стресса. Другой метод измерения стресса подразумевает использование биологических маркеров, таких как альфа-амилаза и кортизол в слюне [3, с. 550]. Хотя использование биологических маркеров можно отнести к объективным методам измерения стресса, у них есть существенные недостатки, заключающиеся в невозможности непрерывного мониторинга стресса и неудобстве измерения (отбор и анализ проб, временной лаг). Измерение стресса с использованием физиологических сигналов может компенсировать недостатки других методов, и оно интенсивно изучалось в последние годы с целью выявления физиологических реакций на воздействие ментального стрессора. Исследования возможности измерения стресса в основном проводятся с использованием таких физиологических сигналов, как ЭКГ [11, с. 73.], КГР [5, с. 789] и ЭЭГ [5, с. 790.], а в некоторых исследованиях

применялось комбинированное использование нескольких физиологических сигналов [1, с. 104377.].

Для разработки и тестирования алгоритма выявления и исследования ментального стресса используется широкий спектр различных лабораторных методов индукции стресса: Тест на социальный стресс Трира (TSST) , задачи на устный счет, публичные выступления, тест на стресс Монреаля и просмотр фильмов ужасов. Согласно обзору острых стрессоров [2, с. 355.], одним из наиболее эффективных методов индукции стресса среди различных острых психических стрессоров является ментальный арифметический счет в уме, который представляет собой неинвазивную процедуру для измерения физиологической реакции организма на ментальный стресс умеренной интенсивности [8, с. 3], который в наибольшей степени характерен для учащихся.

В исследованиях по оценке ментального стресса чаще всего используется вариабельность сердечного ритма (BCP) – меры BCP представляют собой маркеры активности ВНС. В значительной части исследований по оценке ментального стресса анализируются сигналы BCP, регистрируемые с 5-минутными интервалами, что определяется как краткосрочный анализ BCP. Такой подход позволяет получить валидную оценку всех основных показателей BCP – как линейных (временной и частотной области), так и нелинейных (энтропии, корреляционной размерности, фрактальных и хаотических) (Task force HRV).

Целью данного исследования было изучение возможности диагностики ментального арифметического стресса с использованием линейных и нелинейных показателей BCP.

Материалы и методы.

В исследовании приняли участие 50 здоровых некурящих студенток (средний возраст $21,1 \pm 1,9$ года). Всем участницам было рекомендовано воздержаться от интенсивной физической активности, употребления алкоголя и кофеина в течение 12 часов до начала эксперимента.

Исследование было одобрено локальным этическим комитетом, и от каждой участницы было получено информированное согласие.

Участники выполняли стандартное задание по ментальной арифметике в течение 5 минут, последовательно вычитая 7 из трёхзначного числа. ЭКГ-сигнал регистрировали с помощью стандартной установки во втором отведении (Poly-Spectrum-8/E, Neurosoft Inc, частота дискретизации 2000 Гц, полосовой фильтр 0,05–0,75 Гц, дрейфовый фильтр 0,5, режекторный фильтр 50 Гц) в течение 5 минут дважды – до умственной нагрузки и во время МА в положении лёжа на спине. Обнаружение пика R и предварительная обработка RR (коррекция артефактов и устранение трендов) в ЭКГ проводились с использованием программного обеспечения Kubios HRV Premium [13, с. 12]. Расчёт показателей ВСР проводился с использованием программы Kubios HRV Premium. Для получения наиболее точных значений нелинейных показателей рекуррентности с помощью метода Сао и функции взаимной информации были определены параметры фазового пространства [7, с. 7].

С учетом имеющихся на момент написания данной статьи литературных данных, мы определили список показателей ВСР, потенциально наиболее чувствительных к ментальному арифметическому стрессу: общая вариабельность сердечного ритма SDNN (стандартное отклонение нормальных интервалов RR (NN), мс), LF (спектральная мощность низкочастотной составляющей ВСР, мс²), индикатор респираторной синусовой аритмии HF (спектральная мощность высокочастотной составляющей ВСР, мс²), отношение LF/HF (индикатор вегетативного баланса), DFA (анализ флуктуаций с исключением тренда) – коэффициенты α_1 и α_2 , отражающие корреляционные свойства интервалов RR при кратковременных (α_1) и долговременных (α_2) флуктуациях, рекуррентный анализ (REC – доля временных паттернов фазового пространства RR (отношение нулей и единиц в фазовом пространстве, DET – коэффициент детерминизма – доля рекуррентных точек, на диагональных линиях; LAM – доля рекуррентных точек, которые формируют вертикальные линии).

Для определения информативности показателей ВСП при диагностике и дискриминации ментального арифметического стресса нами использовался алгоритм DeLong в модификации Sun и Xu [10, с. 1390]. Определялись: истинно положительный результат (TP) – классификационная модель предсказала положительный результат, и событие действительно произошло, ложноположительный результат (FP) – модель классификации предсказывала положительный результат, но событие не произошло, истинно отрицательный результат (TN) – классификационная модель предсказала отрицательный результат, и событие не произошло; ложноотрицательный результат (FN) – классификационная модель предсказала отрицательный результат, но событие в действительности произошло. На основе этих данных был рассчитан показатель чувствительности TPR (формула 1):

$$TPR = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1),$$

специфичности (избирательности) (формула 2):

$$TNR = \frac{TN}{TN + FP} \quad (2),$$

и точности (формула 3):

$$Accuracy(ACC) = \frac{TN + TP}{TP + FN + FP + TN} \quad (3).$$

Анализ проводился с помощью программы Statistics Kingdom [9, с. 415].

Результаты исследования.

Площадь AUC ROC для большинства линейных показателей ВСП достоверно отличалась от 0,5 (критическое значение, которое указывает на то, что точность предсказания исхода моделью не отличается существенно от случайном принятого решения) (рис. 1).

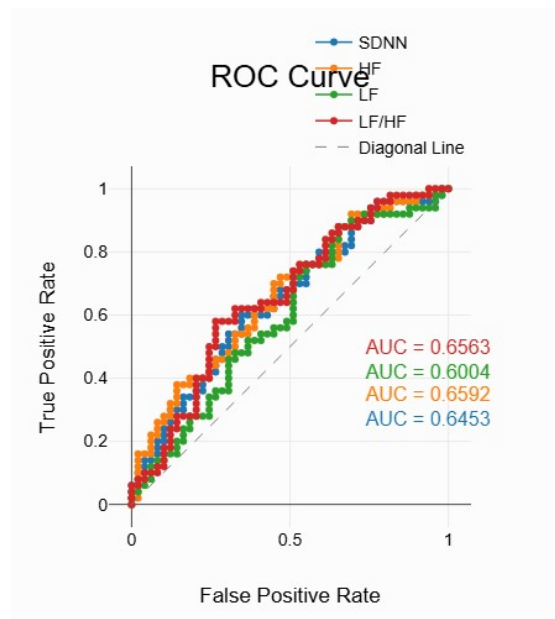


Рис. 1. Кривые ROC отображающая дискриминационную способность линейных показателей ВСП для прогнозирования состояния арифметического ментального стресса

Графики AUC ROC на рисунке 1 показывают, что все значения площади под кривой AUC ROC находятся в диапазоне между 0,6–0,7 что предполагает сравнительно небольшое диагностическое значение этих показателей (близкое к случайному выбору).

Использование для прогноза нелинейных показателей ВСП дает несколько лучший результат (рис. 2).

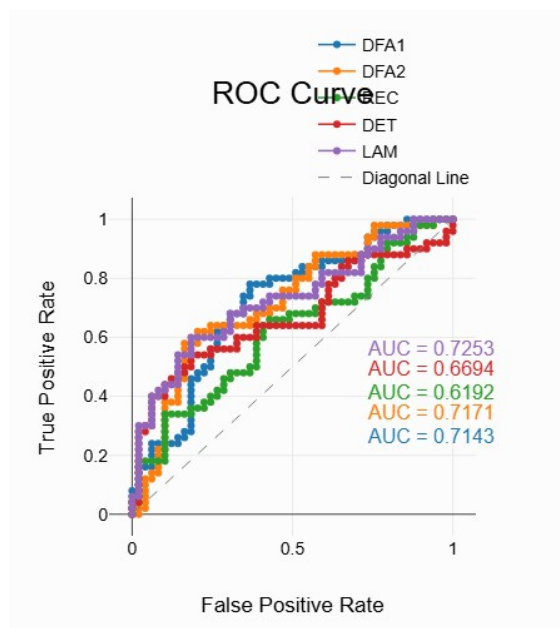


Рис. 2. Кривые ROC отображающая дискриминационную способность нелинейных показателей ВСП для прогнозирования состояния арифметического ментального стресса

Данные рисунка 2 показывают, что значение площади под кривой ROC (AUC ROC) по крайней мере для трех показателей (DFA $\alpha 1$, DFA $\alpha 2$) находится в диапазоне от 0,7 до 0,8, что оценивается как приемлемый уровень AUC [6, с. 1315].

Результаты статистического анализа результатов классификации «стресс/покой» приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эффективность классификации на основе отдельных параметров variability сердечного ритма

	AUC	P	SEN	SPE	ACC
SDNN (мс)	0.65	0.07887	0.6	0.64	0.62
LF (мс²)	0.6	0.1085	0.88	0.34	0.61
HF (мс²)	0.66	0.01	0.38	0.86	0.62
LF/HF	0.66	0.005	0.58	0.74	0.66
DFA $\alpha 1$	0.71	0.0000413	0.78	0.62	0.7

DFA $\alpha 2$	0.72	0.00005929	0.62	0.78	0.7
REC	0.62	0.04236	0.34	0.9	0.62
DET	0.67	0.002952	0.54	0.8	0.67
LAM	0.73	0.0000178	0.6	0.8	0.7

Анализ таблицы 1 показал, что возможность идентификации ментального стресса с использованием линейных показателей сердечного ритма с точностью, отличной от случайного выбора, минимальна. Гипотеза о том, что площадь AUC ROC равна 0,5 (выбор, согласно модели, не отличается от случайного выбора), была отвергнута только в отношении показателя HF, отражающего респираторную синусовую аритмию и являющегося индикатором активности парасимпатического отдела ВНС. Поскольку баланс LF/FH тесно связан с HF как вычислительно, так и сущностно, то не удивительно, что нулевая гипотеза была отвергнута и в отношении данного показателя. Но довольно низкое значение AUC (в диапазоне слабых результатов 0,6–0,7) делает изолированное применение данных критериев для выявления ментального арифметического стресса малоперспективным.

Диагностика ментального стресса была намного более точной при использовании критериев DFA и LAM рекуррентного анализа. Здесь необходимо отметить, что эти критерии отражают разные свойства сигнала и могут рассматриваться как независимые.

Заключение.

Полученные нами данные подтверждают тот факт, что ментальный арифметический стресс вызывает существенные перестройки в функционировании системы регуляции сердечным ритмом, которые в наибольшей степени проявляются при применении для анализа ритма сердца критериев, отражающих нелинейное поведение системы регуляции ритма сердца. В то же время не один из использованных нами параметров не может рассматриваться в качестве изолированного критерия для выявления состояния ментального арифметического стресса. В связи с этим необходимо провести

более углубленный анализ нелинейной динамики и применить для классификации критерии, отражающие хаотическое поведение водителя ритма синусового узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arsalan A., Majid M. Human stress classification during public speaking using physiological signals // Computers in biology and medicine. 2021. Т. 133. Р. 104377.
2. Dickerson S.S., Kemeny M.E. Acute stressors and cortisol responses: a theoretical integration and synthesis of laboratory research // Psychological bulletin. 2004. Т. 130. – №. 3. – Р. 355.
3. García E. et al. Psychological and physiological profiles in oncology caregivers: a multivariable cross-sectional study // Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence. 2017. Т. 5. №. 4. Р. 547-557.
4. Goyal A. et al. Automation of stress recognition using subjective or objective measures // Psychological Studies. 2016. Т. 61. №. 4. Р. 348-364.
5. Greco A. et al. Acute stress state classification based on electrodermal activity modeling // IEEE Transactions on Affective Computing. 2021. Т. 14. №. 1. Р. 788-799.
6. Mandrekar J.N. Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment // Journal of thoracic oncology. 2010. Т. 5. №. 9. Р. 1315-1316.
7. Marwan N., Kraemer K.H. Trends in recurrence analysis of dynamical systems // The European Physical Journal Special Topics. 2023. Т. 232. №. 1. Р. 5-27.
8. Mathias C.J. et al. Autonomic nervous system: Clinical testing // Reference module in neuroscience and biobehavioral psychology. Elsevier Inc, 2017. Р. 1-30.
9. Polnok S. et al. Statistics Kingdom: A very helpful basic statistical analysis tool for health students // Health Notions. 2022. Т. 6. №. 9. Р. 413-420.

10. Sun X., Xu W. Fast implementation of DeLong's algorithm for comparing the areas under correlated receiver operating characteristic curves // IEEE Signal Processing Letters. 2014. T. 21. №. 11. P. 1389-1393.
11. Szakonyi B. et al. Efficient methods for acute stress detection using heart rate variability data from Ambient Assisted Living sensors // Biomedical engineering online. 2021. T. 20. №. 1. P. 73.
12. Takahashi T. et al. Anxiety, reactivity, and social stress-induced cortisol elevation in humans // Neuroendocrinology Letters. 2005. T. 26. №. 4. P. 351-354.
13. Tarvainen M.P. et al. Kubios HRV – heart rate variability analysis software // Computer methods and programs in biomedicine. 2014 T. 113. №. 1. P. 210-220.
14. Yaribeygi H. et al. The impact of stress on body function: A review // EXCLI journal. 2017. T. 16. P. 1057.

© Индейкина О.С., Саперова Е.В., Сушков И.А., 2025.