

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ**  
**Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии  
**«Исследование динамики контуров вегетативной регуляции**  
**кровообращения в задачах с индукцией ментальной усталости»**

---

наименование темы выпускной квалификационной работы

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студентки 2 курса 2281 группы  
направления 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии»  
профиль подготовки «Аппаратные и программные средства биомедицины»  
институт физики  
Квасневская Полина Владимировна

Научный руководитель:  
доцент кафедры  
динамического  
моделирования и  
биомедицинской инженерии  
к.ф.-м.н., доцент



05.06.2026

подпись, дата

Е. И. Боровкова

Зав. кафедрой динамического  
моделирования и  
биомедицинской инженерии,  
д.ф.-м.н., профессор



подпись, дата

05.06.2026

А.С. Караваяев

Саратов 2026

**Введение.** Актуальность темы. Ментальная усталость – психобиологическое состояние, формирующееся вследствие длительной когнитивной деятельности и сопровождающееся снижением работоспособности, замедлением реакций и ростом числа ошибок. Его своевременная диагностика критически важна в профессиональных сферах с непрерывной высокой нагрузкой: управление транспортными средствами, авиационная диспетчеризация, медицинская практика, эксплуатация сложных технических систем. Вариабельность сердечного ритма (ВСР) и показатели кардиореспираторного взаимодействия реагируют на изменения когнитивной нагрузки раньше поведенческих нарушений и потому представляют интерес как объективные маркеры функционального состояния. Вместе с тем исследований, рассматривающих переходы между состояниями эффективности и усталости в сопоставлении с вегетативными профилями в разрезе индивидуальных стратегий поддержания производительности, в доступной литературе крайне мало.

Цель работы: исследование динамики показателей вегетативной регуляции кровообращения при переходах между состояниями когнитивной эффективности и ментальной усталости в условиях длительной когнитивной нагрузки, а также оценка возможности использования данных показателей для классификации функциональных состояний.

Задачи работы: (1) проведение экспериментального протокола индукции ментальной усталости с применением задач SST и WMT с одновременной регистрацией биосигналов; (2) оценка влияния нагрузки на субъективные и поведенческие показатели; (3) выявление дискретных состояний и индивидуальных стратегий поддержания когнитивной эффективности; (4) анализ структуры переходов между состояниями; (5) анализ изменений показателей ВСР и кардиореспираторного взаимодействия при переходах в зависимости от типа задачи и стратегии; (6) формулировка вывода о связи стратегий с кардиореспираторными профилями переходов.

Материалы исследования. В исследовании приняли участие 47

практически здоровых добровольцев (21 мужчина, 26 женщин, возраст 19–22 года). Протокол SST выполнили 40 участников, WMT – 33, 26 из них участвовали в обоих протоколах. Регистрация биосигналов (ЭЭГ, ЭКГ, пневмограмма) осуществлялась с помощью комплекса «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (250 Гц). Исследование одобрено этическим комитетом СГМУ им. В.И. Разумовского.

**Структура работы.** ВКР состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка использованных источников (35 наименований). Общий объём – 52 страницы, включая 5 таблиц и 5 рисунков. Раздел 1 посвящён обзору литературы по ментальной усталости и методам её оценки. Раздел 2 описывает экспериментальный протокол и участников. Раздел 3 содержит описание методов анализа биосигналов. Раздел 4 представляет результаты исследования.

**Научная новизна.** Впервые применён метод совместного анализа поведенческих, нейрофизиологических и вегетативных маркеров на уровне отдельных переходов между состояниями эффективности и усталости. Показано, что кардиореспираторные «отпечатки» переходов специфичны для конкретных комбинаций типа когнитивной задачи и индивидуальной стратегии поддержания производительности.

**Практическая значимость.** Выявленные вегетативные профили переходов могут служить биомаркерами для построения систем мониторинга функционального состояния в режиме реального времени. Результаты обосновывают необходимость персонализированного подхода к оценке ментальной усталости.

**Основное содержание работы.** Раздел 1. Ментальная усталость. В разделе представлен обзор современных представлений о ментальной усталости как многоуровневом психобиологическом феномене. Рассмотрены нейрофизиологические механизмы её возникновения – нарушения дофаминергической и аденозин-опосредованной регуляции префронтальной

коры. Описаны три класса объективных маркеров: поведенческие (снижение точности и рост времени реакции, компромисс «скорость–точность»), нейрофизиологические (рост тета- и альфа-мощности ЭЭГ, снижение бета-активности, индекс  $IF = (\theta + \alpha) / \beta$ ) и вегетативные (снижение HF-мощности ВСР, рост LF/HF, изменения кардиореспираторного взаимодействия). Обоснована необходимость анализа переходов между состояниями эффективности и усталости в разрезе индивидуальных стратегий поддержания производительности как ключевого незаполненного пробела в существующей литературе.

Раздел 2. Данные эксперимента. Описан пятиэтапный протокол каждого сеанса: предтестовая диагностика (Pre-Test) → фоновая запись (BL, 15 мин) → индукция ментальной усталости (MFI, 4–16 блоков по 15 мин) → послетестовая запись (Post, 15 мин) → повторная диагностика (Post-Test). Психодиагностический комплекс включал четыре методики: опросник SMFQ (А.Б. Леонова), тест САН (В.А. Доскин и др.), визуально-аналоговую шкалу усталости VAS (1–10) и методику «Количественные отношения» С.А. Касьянова. Критерием завершения MFI служила оценка  $VAS \geq 9$  баллов на протяжении двух последовательных блоков.

Задача WMT [1] (33 участника) испытуемый удерживал в памяти два целевых символа и две целевые позиции на экране; ответ требовался при их одновременном совпадении (вероятность цели 1:4, частота предъявления 1 Гц). Задача SST [2] (40 участников) – адаптация PASAT для зрительного предъявления: последовательное вычитание семёрки из трёхзначного числа без обратной связи о правильности ответа (self-paced). Регистрация биосигналов включала ЭЭГ (19 каналов по схеме 10–20), ЭКГ (одно отведение) и пневмограмму (механотензометрический датчик на поясе на уровне грудной клетки), все с частотой дискретизации 250 Гц.

Раздел 3. Методы исследования данных. Из ЭКГ извлекался ряд RR-интервалов (детектирование R-пиков: NeuroKit2; фильтрация: ЧСС 45–160 уд/мин; ресемплирование: 20 Гц). Рассчитывались: (1) временные показатели

BCP – HR, дисперсия D и индекс напряжения SI по Баевскому; (2) спектральные показатели – LF (0,04–0,15 Гц), HF (0,15–0,40 Гц), LF/HF (БПФ с окном Ханна); (3) показатели кардиореспираторного взаимодействия – RSA (амплитуда синусоиды методом МНК на плоскости «фаза дыхания –  $\Delta HR$ »), S% и SPC (фазовая синхронизация через преобразование Гильберта) и CRSP (кластеризация R-пиков по фазе дыхания, нормированная энтропия Шеннона). ЭЭГ-индекс ментальной усталости: IF [3]. Поведенческий индекс когнитивной эффективности: IES [4] после z-стандартизации времени реакции и точности. Все вегетативные показатели нормировались к фоновому уровню BL. Для каждого блока MFI вычислялись бинарные индикаторы: sign (выше/ниже BL) и trend (рост/снижение относительно предыдущего блока), образующие четыре дискретных категории состояния каждого показателя.

Раздел 4. Результаты. На основании совместной динамики IES и IF каждый блок MFI относился к одному из четырёх состояний: 00 (низкая эффективность, нет усталости), 01 (низкая эффективность, усталость), 10 (высокая эффективность, нет усталости) и 11 (высокая эффективность, усталость). Анализ индивидуальных траекторий позволил выделить три стратегии поддержания когнитивной эффективности.

Стратегия 1 – «длительное плато» (SST: 50%; WMT: 21%): устойчивое удержание состояний 10/11 на протяжении большей части сессии. Стратегия 2 – «эпизодическая эффективность» (SST: 20%; WMT: 36%): несколько циклов подъёма и снижения продуктивности. Стратегия 3 – «один короткий эпизод» (SST: 30%; WMT: 42%): единственный компактный период высокой эффективности с последующим закреплением в 00/01. У 34% участников, выполнявших обе задачи, стратегия совпадала, что указывает на умеренную задачу-независимую стабильность индивидуальных стратегий.

Анализ матриц переходов выявил ключевое задаче-специфическое различие: стратегия 1 в WMT реализовывалась на фоне значительно более высокой доли усталых состояний (74% против 41% в SST), включая 57%

самопереходов усталости. Тепловая карта матриц перехода представлена на рисунке 1. Таким образом, длительное плато в WMT поддерживалось при хронически накапливающемся утомлении, тогда как в SST – в более «экономном» вегетативном режиме. Стратегия 3 демонстрировала наиболее неблагоприятный паттерн: высокую долю переходов в усталые состояния (64% в SST, 39% в WMT) без последующего восстановления производительности.

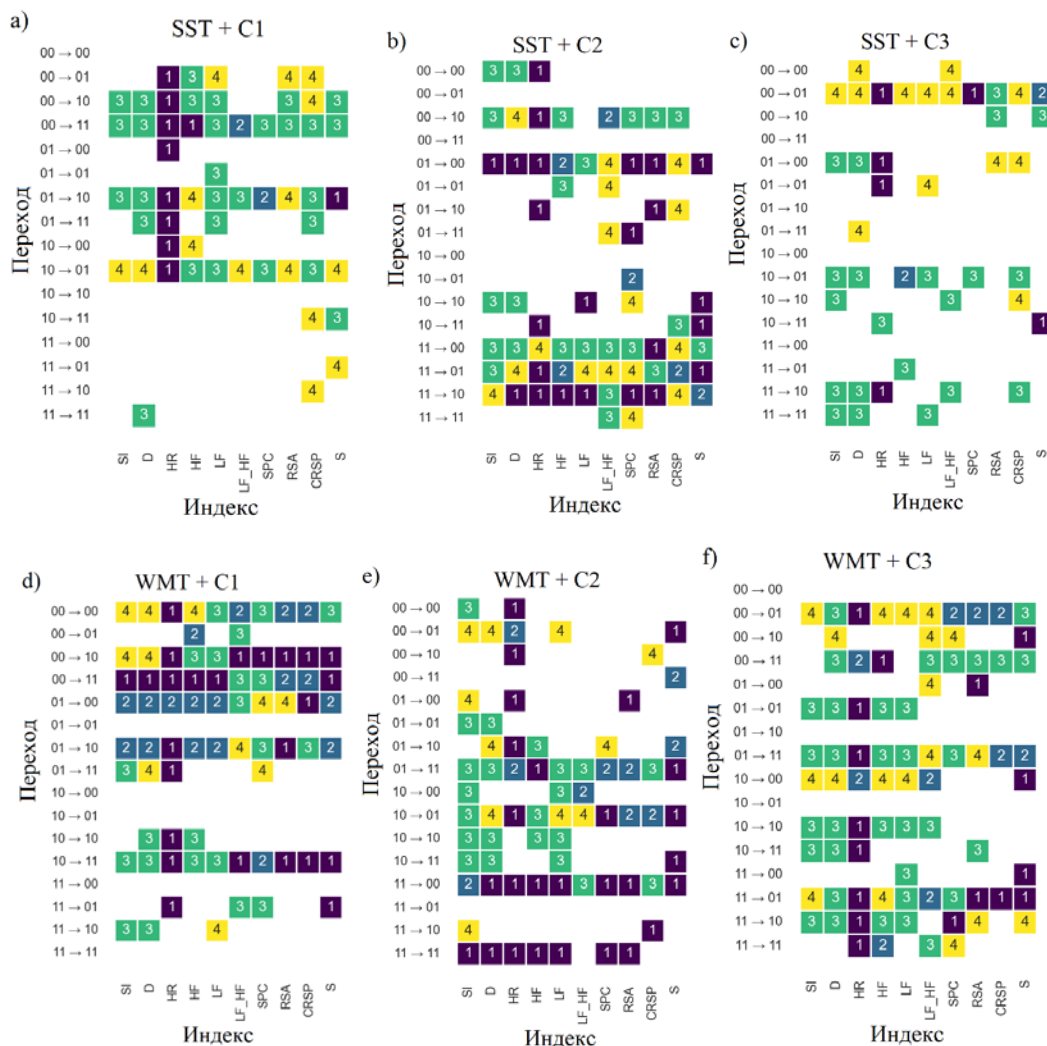


Рисунок 1 – Тепловые карты категорий показателей вегетативной регуляции при переходах между состояниями когнитивной эффективности и ментальной усталости для задач SST (а–с) и WMT (d–f) в разрезе стратегий поддержания когнитивной эффективности: C1 – длительное плато (a, d), C2 – эпизодическая эффективность (b, e), C3 – один короткий эпизод (c, f). Пустые ячейки – отсутствие значимых данных

На агрегированном уровне (без разделения по задачам и стратегиям) универсальной схемы вегетативных изменений для всех типов переходов обнаружено не было: устойчивые профили ( $p \geq 0,70$ ) выявлялись лишь для единичных комбинаций «переход–показатель». При отдельном анализе картина стала значительно более определённой. В SST наиболее насыщенные профили формировались при входах в высокоэффективные состояния (переходы  $\times \rightarrow 10$  и  $\times \rightarrow 11$ ); в WMT – при выходах из состояний 10/11 и переходах в усталые состояния. Эта задаче-специфическая асимметрия устойчиво воспроизводилась для всех трёх стратегий.

Наибольшую информативность продемонстрировали показатели CRSP, SI и HR, наиболее часто достигавшие порогового значения  $p \geq 0,70$ . Показатели кардиореспираторной синхронизации S% и SPC оказались наиболее чувствительными в переходах, связанных с удержанием высокоэффективных состояний ( $10 \rightarrow 10$  и  $11 \rightarrow 11$ ), что подчёркивает роль фазового кардиореспираторного сопряжения в механизмах поддержания когнитивной продуктивности при нарастающем утомлении. Стратегия 1 в WMT при входах в эффективные состояния сопровождалась согласованными сдвигами почти всех анализируемых показателей, что свидетельствует об интенсивной вегетативной мобилизации как условии удержания плато при хроническом утомлении. Стратегия 3 отличалась картиной нарастающего вегетативного истощения: рост SI и LF/HF на фоне снижения HF и общей вариабельности при закреплении в усталых состояниях.

**Заключение.** В результате выполнения работы решены все поставленные задачи и сформулированы следующие основные выводы.

1. Длительная когнитивная нагрузка в обоих протоколах привела к достоверному ухудшению субъективных показателей (VAS, SMFQ, CAH) и снижению когнитивной продуктивности (рост IES). Тип задачи определял характер динамики: в WMT субъективный отказ наступал при более высоком уровне IF, чем в SST.

2. Выделены четыре дискретных состояния (00, 01, 10, 11) и три стратегии поддержания эффективности – длительное плато (С1), эпизодическая эффективность (С2) и один короткий эпизод (С3). Стратегии отражают принципиально различные адаптивные механизмы реагирования на нарастающее утомление.

3. Структура матриц переходов зависит от типа задачи и стратегии. Стратегия С1 в WMT реализуется на фоне хронически накапливающегося утомления (74% усталых состояний), тогда как в SST – в более умеренных вегетативных условиях. Стратегия С3 демонстрирует наиболее неблагоприятный паттерн без восстановления продуктивности.

4. Универсальной схемы вегетативных изменений для всех переходов не выявлено. Устойчивые многокомпонентные профили специфичны для конкретных комбинаций задачи, стратегии и направления перехода: в SST они концентрируются на входах в высокую эффективность, в WMT – на выходах из неё.

5. Наиболее информативными показателями являются CRSP, SI и HR. Показатели S% и SPC наиболее чувствительны при удержании высокоэффективных состояний (10→10, 11→11), что указывает на роль фазовой кардиореспираторной синхронизации в поддержании длительной когнитивной продуктивности.

6. Результаты обосновывают необходимость персонализированного, стратегия-специфичного подхода к мониторингу ментальной усталости и ограничивают применимость универсальных пороговых значений BCP. Выявленные профили могут служить основой для алгоритмов раннего обнаружения функционального истощения у специалистов с длительной когнитивной нагрузкой – водителей, диспетчеров, хирургов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Boksem M.A.S., Meijman T.F., Lorist M.M. Effects of mental fatigue on attention: an ERP study // Cognitive Brain Research. – 2005. – Vol. 25, № 1. – P. 107–116. DOI: 10.1016/j.cogbrainres.2005.04.01
2. Tombaugh T.N. A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT) // Archives of Clinical Neuropsychology. – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 53–76. DOI: 10.1016/j.acn.2005.07.006
3. Townsend J.T., Ashby F.G. Methods of modeling capacity in simple processing systems // Cognitive Theory / eds. Castellan J.N., Restle F. – New York: Lawrence Erlbaum Associates, 1978. – Vol. 3. – P. 199–239.
4. Jap B.T., Lal S., Fischer P., Bekiaris E. Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue // Expert Systems with Applications. – 2009. – Vol. 36, № 2. – P. 2352–2359. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.12.043

05.06.2026  Квасневская Т.В.