БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 295–304
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 295–304
https://fizika.sgu.ru https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-295-304, EDN: NCIVHT

Научная статья
УДК 530.182:537.86

Сравнительный анализ чувствительности физиологических маркеров когнитивной нагрузки

Е. С. Дубинкина[1], **А. С. Караваев**[1,2✉], **С. В. Фролова**[1], **Е. А. Лазунина**[1], **Е. М. Зинченко**[1], **С. Е. Бурмистров**[1], **Б. П. Безручко**[1,2], **Е. И. Боровкова**[1]

[1]Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83
[2] Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

Дубинкина Елизавета Сергеевна, лаборант межфакультетского технологического фаблаба «Цифровые интегративные биоинженерные системы», kometa.ed@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4636-3937, AuthorID: 1204137
Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, [1]заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии, [2]ведущий научный сотрудник, karavaevas@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4678-3648, AuthorID: 128455
Фролова Светлана Владимировна, доктор психологических наук, заведующий кафедрой общей и консультативной психологии, frolovasv71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7830-7123, AuthorID: 463172
Лазунина Екатерина Алексеевна, старший преподаватель кафедры общей и консультативной психологии, ekaterinalazunina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4600-9233, AuthorID: 724738
Зинченко Екатерина Михайловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры общей и консультативной психологии, odonata1108@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7926-1681, AuthorID: 787145
Бурмистров Сергей Евгеньевич, лаборант кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, tankist.burmistrov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-9443-9391
Безручко Борис Петрович, доктор физико-математических наук, [1]профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, [2]вдущий научный сотрудник, bezruchkobp@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6691-8653, AuthorID: 484
Боровкова Екатерина Игоревна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, rubanei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1429-3599, AuthorID: 682183

Аннотация. Физиологические индексы широко используются для неинвазивной оценки когнитивной нагрузки, однако чувствительность различных индексов остается недостаточно изученной. В данной работе проведено сопоставление чувствительности к изменению когнитивной нагрузки 10 физиологических индексов, доступных для регистрации носимыми устройствами. У 70 здоровых мужчин регистрировали электрокардиограмму, фотоплетизмограмму, дыхание, электромиограмму, кожно-гальваническую реакцию и температуру конечностей в покое и при выполнении ментального арифметического теста. Из электрокардиограммы рассчитывали 4 показателя вариабельности ритма сердца; из фотоплетизмограммы – перфузионный индекс, частоту пульса; из спектра сигнала дыхания – частоту дыхания. Наиболее чувствительными индексами оказались высокочастотный компонент вариабельности ритма сердца, стандартное отклонение RR-интервалов, стресс-индекс и перфузионный индекс, причем последний впервые применен для диагностики когнитивной нагрузки. Сравнение экспериментального распределения числа одновременно проявившихся признаков с биномиальной моделью выявило значимые различия, что свидетельствует о системном,



НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

© Дубинкина Е. С., Караваев А. С., Фролова С. В., Лазунина Е. А., Зинченко Е. М., Бурмистров С. Е., Безручко Б. П., Боровкова Е. И., 2026

а не независимом характере физиологического ответа. Четыре наиболее чувствительных индекса могут быть рассчитаны по единственному сигналу фотоплетизмограммы, что обосновывает создание компактных носимых устройств для мониторинга когнитивной нагрузки в бытовых условиях.

Ключевые слова: когнитивная нагрузка, физиологические индексы, вариабельность ритма сердца, перфузионный индекс

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00181, https://rscf.ru/project/25-12-00181/).

Для цитирования: *Дубинкина Е. С., Караваев А. С., Фролова С. В., Лазунина Е. А., Зинченко Е. М., Бурмистров С. Е., Безручко Б. П., Боровкова Е. И.* Сравнительный анализ чувствительности физиологических маркеров когнитивной нагрузки // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 295–304. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-295-304, EDN: NCIVHT

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Comparative analysis of the sensitivity of physiological markers of cognitive load

E. S. Dubinkina[1], **A. S. Karavaev**[1,2]✉, **S. V. Frolova**[1], **E. A. Lazunina**[1], **E. M. Zinchenko**[1], **S. E. Burmistrov**[1], **B. P. Bezruchko**[1], **E. I. Borovkova**[1]

[1]Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia
[2] Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

Elizaveta S. Dubinkina, kometa.ed@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4636-3937, AuthorID: 1204137
Anatoly S. Karavaev, karavaevas@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4678-3648, AuthorID: 128455
Svetlana V. Frolova, frolovasv71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7830-7123, AuthorID: 463172
Ekaterina A. Lazunina, ekaterinalazunina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4600-9233, AuthorID: 724738
Ekaterina M. Zinchenko, odonata1108@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7926-1681, AuthorID: 787145
Sergey E. Burmistrov, tankist.burmistrov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-9443-9391
Boris P. Bezruchko, bezruchkobp@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6691-8653, AuthorID: 484
Ekaterina I. Borovkova, rubanei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1429-3599, AuthorID: 682183

Abstract. ***Background and Objectives*:** Physiological indices are widely used for non-invasive assessment of cognitive load, but the sensitivity of various indices remains poorly understood. This study compares the sensitivity of a set of physiological indices available for recording by wearable devices to changes in cognitive load. ***Materials and Methods*:** Seventy healthy men were examined for electrocardiogram, photoplethysmogram, respiration, electromyogram, galvanic skin response, and extremity temperature at rest and during a mental arithmetic test. Four heart rate variability indices were calculated from the electrocardiogram; perfusion index and pulse rate were calculated from the photoplethysmogram; and respiratory rate was calculated from the respiratory signal spectrum. ***Results*:** The most sensitive indices were the high-frequency component of heart rate variability, the standard deviation of RR intervals, the stress index, and the perfusion index, the latter of which was used for the first time to diagnose cognitive load. A comparison of the experimental distribution of the number of simultaneously occurring indicators with a binomial model has revealed significant differences, indicating a systemic rather than independent nature of the physiological response. ***Conclusion*:** The four most sensitive indices can be calculated from a single photoplethysmogram signal, which justifies the development of compact wearable devices for monitoring cognitive load in everyday settings.
Keywords: cognitive load, physiological indices, heart rate variability, perfusion index

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-12-00181, https://rscf.ru/project/25-12-00181/).

For citation: Dubinkina E. S., Karavaev A. S., Frolova S. V., Lazunina E. A., Zinchenko E. M., Burmistrov S. E., Bezruchko B. P., Borovkova E. I. Comparative analysis of the sensitivity of physiological markers of cognitive load. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 295–304 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-295-304, EDN: NCIVHT

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Современный мир предъявляет высокие требования к когнитивным функциям человека. В профессиональной деятельности операторов сложных систем (авиадиспетчеров, машинистов, технологов и др.), а также работников интеллектуального труда (программистов, ученых, учителей, врачей и др.) характерна необходимость длительного поддержания высокого уровня ментальной нагрузки [1–4]. Умеренная когнитивная нагрузка является необходимым условием для поддержания пластичности нейронных сетей, в частности фронтопариетальной системы, отвечающей за рабочую память и исполнительный контроль [5, 6]. Однако, согласно классической теории когнитивной нагрузки, превышение индивидуальных адаптационных возможностей приводит к негативным последствиям: сниже-

нию эффективности деятельности, росту числа ошибок, развитию профессионального выгорания, дистресса, соматоформных расстройств, расстройствам сна и другим негативным изменениям [3, 7–10]. Это обусловливает высокую потребность в объективных методах оценки когнитивного статуса человека в реальных условиях.

В последние десятилетия благодаря миниатюризации сенсоров и совершенствованию систем регистрации и анализа биосигналов особый интерес исследователей привлекают физиологические маркеры, позволяющие непрерывно и неинвазивно отслеживать состояние человека в процессе его повседневной деятельности [11]. Литература изобилует данными об использовании различных процессов и биосигналов для выявления изменений уровня когнитивной нагрузки: электроэнцефалограмм (ЭЭГ) [12, 13], электроокулограмм (ЭОГ) [14], вариабельности ритма сердца (ВСР) [3], электромиограммы (ЭМГ) [15], кожно-гальванической реакции (КГР) [16], фотоплетизмографии [17, 18] и др. Тем не менее в большинстве работ ограничиваются анализом одного-двух сигналов на небольших экспериментальных выборках, что создает риск неполной или искаженной интерпретации результатов и приводит к противоречивости выводов [19–21]. Например, когнитивная деятельность может вызвать физиологический отклик, но он не будет обнаружен в конкретном показателе в силу его нечувствительности к данному виду нагрузки или из-за индивидуальных особенностей реакции симпатоадреналовой системы индивида.

При выборе методов мониторинга уровня ментальной нагрузки важным становится фактор эргономичности. Например, использование ЭЭГ и ЭОГ, хотя и предоставляет ценную информацию о корковой активности, сопряжено с необходимостью наложения скальповых электродов, требует лабораторных условий, громоздкого дорогостоящего оборудования и участия квалифицированного специалиста, доставляет зачастую дискомфорт испытуемому. Это ограничивает возможность применения данных методов при создании носимых устройств для мониторинга в бытовых условиях.

По этой причине цель данной работы заключается в сравнительном анализе чувствительности комплекса физиологических показателей, регистрация которых может быть реализована с помощью компактных и эргономичных носимых устройств. В фокусе нашего исследования находятся маркеры активности автономной нервной и соматической систем, отражающие метаболическое обеспечение когнитивной деятельности: показатели сердечно-сосудистой системы (частоты сердечных сокращений, вариабельности ритма сердца, перфузионного индекса), дыхательной системы, электродермальной активности (кожно-гальванической реакции), температуры конечностей и тонуса скелетной мускулатуры (электромиограммы). Сопоставление чувствительности перечисленных вегетативных маркеров позволит выявить наиболее информативные и надежные индикаторы для оценки когнитивной нагрузки в естественных условиях жизнедеятельности человека.

Материалы и методы

В эксперимент были включены записи 70 здоровых мужчин в возрасте 22 $\pm$ 4 года (среднее $\pm$ стандартное отклонение) без соматических жалоб на момент исследования. Участникам эксперимента было предложено воздержаться от употребления кофеина, алкоголя и курения за 24 часа до теста с когнитивной нагрузкой. Опыт проводился в тихой слабоосвещенной комнате для снижения влияния сторонних раздражителей. На протяжении эксперимента добровольцы располагались в удобном кресле с опорой на предплечья. Исследуемых просили не совершать движений недоминантной рукой. В качестве когнитивной нагрузки использовался ментальный арифметический тест (МТ), заключавшийся в следующем: на мониторе компьютера, находившемся на расстоянии около 30 см от глаз добровольцев, в течение 6 мин каждые 5 с появлялся «стимул» – трехзначное число. Требовалось сложить цифры данного числа, определить четность получившегося значения и выбрать правильный ответ на экране с помощью мыши (активация одной из двух программных кнопок: «Четное» либо «Нечетное»). Также в протокол исследования был включен шестиминутный стабилизационный этап (R0) перед когнитивной нагрузкой, во время которого добровольцам было необходимо расслабиться.

В течение всей экспериментальной записи каждому добровольцу проводилась одновременная регистрация сигналов электрокардиограммы (ЭКГ) в первом стандартном отведении, сигнала дыхания (РД) с помощью грудного тензометрического датчика, фотоплетизмограммы

(ФПГ) с дистальной фаланги указательного пальца недоминантной руки, частоты пульса (ЧП) с использованием пульсоксиметра, поверхностной электромиографической активности (ЭМГ) с трапециевидных мышц, кожно-гальванической реакции (КГР) с дистальных фаланг 3 и 4 пальцев недоминантной руки, температуры пальцев кисти (Т) с дистальной фаланги мизинца недоминантной руки.

Частота дискретизации составляла 250 Гц для всех регистрируемых сигналов. Для записей использовалось стандартное сертифицированное оборудование – электроэнцефалограф-регистратор «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» модификации «Мини» (Медиком МТД, Россия).

Следуя рекомендациям [22], из сигнала ЭКГ выделялась последовательность RR-интервалов (RRi). Данный неэквидистантный ряд был преобразован в эквидистантный за счёт линейной интерполяции и перевыборки значений через равные промежутки времени [22]. В результате был получен эквидистантный ряд RRi с частотой дискретизации 5 Гц, который и использовался для дальнейшего анализа.

По сигналу RRi был оценен спектр мощности, по которому рассчитывались показатели ВСР: абсолютные значения спектральной мощности в низкочастотном (LF) и в высокочастотном диапазонах (HF), стандартное отклонение интервалов RR (SDNN), стресс-индекс (SI).

С помощью оценки спектра мощности РД вычислялась частота дыхания (ЧД), как частота, соответствующая максимальному пику в спектре.

Рассчитываемое по ФПГ значение перфузионного индекса (ПерфИ) может являться чувствительным показателем функционального состояния человека [23]. В нашей работе этот индекс также использовался. Индекс рассчитывался с помощью программного обеспечения, входящего в комплект поставки используемого медицинского регистратора. Конкретный способ расчета ПерфИ производителем не указан.

После вышеописанной обработки и анализа биосигналов для каждого добровольца было рассчитано среднее значение каждого анализируемого индекса отдельно для этапа R0 и для этапа МТ. Исключение составили сигналы ЭМГ и ЧД, для которых рассчитывались значения дисперсии сигнала на соответствующем этапе эксперимента. Далее был вычислен разностный коэффициент (РК), характеризующий относительное изменение каждого индекса при переходе человека из состояния покоя в состояние когнитивной нагрузки. Данный коэффициент рассчитывался как отношение разности (между средними значениями каждого индекса на этапе МТ и на этапе R0) к среднему значению индекса на этапе R0 (для сигналов ЭМГ и ЧД проводится аналогичный расчет, но с использованием дисперсии).

В соответствии со значениями РК, участники были распределены на две категории по каждому индексу: первую группу составили те добровольцы, у которых при воздействии когнитивной нагрузки наблюдалось статистически значимое изменение выбранного физиологического индекса, согласующееся с данными большинства известных литературных источников; вторую группу составили добровольцы, у которых изменений в данном физиологическом индексе при выполнении заданий обнаружено не было, либо изменения данного индекса не согласовывались с данными литературы. В дальнейшем для краткости будем называть полученные две группы «Typical» и «NotTypical» соответственно. Кластеризация, выполненная с помощью метода *k*-средних, позволила уточнить пороговые значения РК для сопоставляемых индексов.

Результаты

На рис. 1 представлены результаты расчета значений РК для каждого анализируемого индекса, усредненных в отдельности для каждой категории исследуемых, полученной в результате кластеризации. Анализируя рис. 1, *а* для группы Typical, отметим динамику индексов: показатели ПерфИ, Т, SDNN, HF уменьшаются при переходе человека из состояния покоя в состояние когнитивной нагрузки, в то время как показатели ЭМГ, КГР, ЧП, ЧД, LF, SI увеличиваются. Рис. 1, *б* демонстрирует динамику усредненных значений РК для группы NotTypical. У таких добровольцев изменение индексов противоположное, либо отсутствует вовсе. Отметим, что, хотя разделение реакции добровольцев на когнитивную нагрузку в основном соответствует литературным данным, имелись добровольцы, либо не продемонстрировавшие такую реакцию, либо продемонстрировавшие реакцию, противоположную данным литературы. Поэтому пороговые значения РК были уточнены с помощью кластерного анализа.

В табл. 1 представлены пороговые значения РК для каждого индекса, полученные в результате кластеризации и позволяющие разделить всех добровольцев на вышеописанные группы.

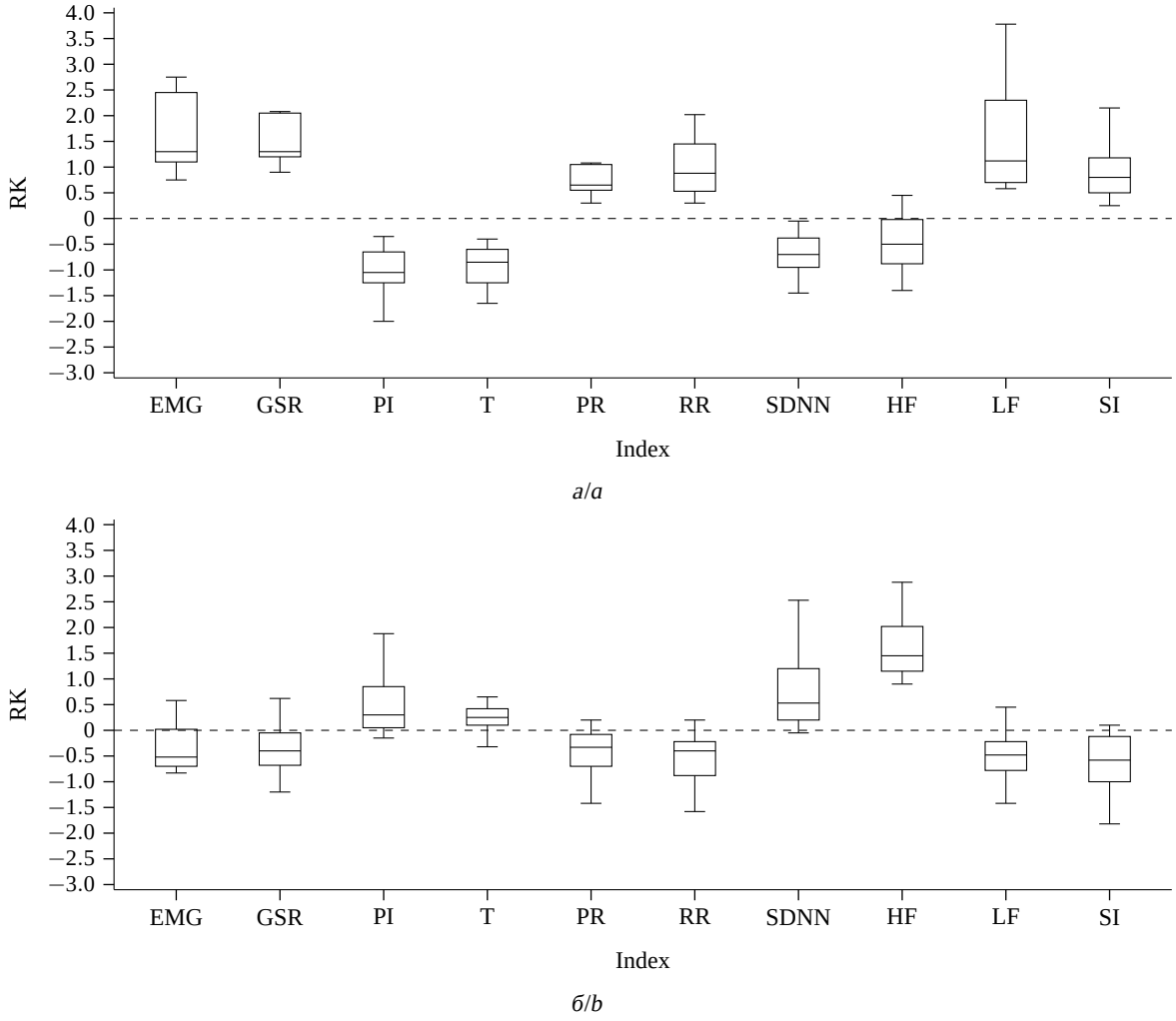


Рис. 1. Результаты расчета усредненных значений РК для каждого анализируемого индекса: для группы Typical (*а*), для группы NotTypical (*б*). Горизонтальные линии внутри прямоугольников обозначают медианы; границы приямоугольников соответствуют 25-му и 75-му процентилям; «усы» соответствуют 1.5 межквартильного размаха (IQR) от границ прямоугольника

Fig. 1. Results of calculating the average values of the RK for each analyzed index: for the Typical group (*a*) and for the NotTypical group (*b*). The horizontal lines inside the boxes indicate the medians; the boundaries of the boxes correspond to the 25th and 75th percentiles; the «whiskers» extend 1.5 interquartile ranges (IQR) from the boundaries of the box

Таблица 1 / Table 1

Пороговые значения РК для анализируемых физиологических индексов

Threshold values of the RK for the analyzed physiological indices

ЭМГ/EMG	КГР/GSR	ПерфИ/PI	Т/T	ЧП/PR	ЧД/RR	SDNN/SDNN	HF/HF	LF/LF	SI/SI
−0.65	−0.71	0.22	0.36	−0.25	−0.29	−0.01	−0.57	−0.5	−0.21

Табл. 2 содержит количественную информацию, характеризующую сформировавшиеся кластеры.

Для каждого индекса было подсчитана доля добровольцев, у которых наблюдалось статистически значимое изменение индекса в ответ на когнитивную нагрузку. Эти результаты представлены в виде гистограмм рис. 2, *а* демонстрирует гистограмму распределения количества индексов по числу человек, у которых они значимо изменялись типичным образом. Можем отметить, что самые многочисленные группы включают испытуемых, у которых значимо изменились от 2 до 5 индексов, причем наиболее часто у добровольцев наблюдались статистиче-

ски значимые изменения двух индексов из всех анализируемых.

Таблица 2 / Table 2

Количественные характеристики полученных кластеров

Quantitative characteristics of the obtained clusters

Показатели / Indicators	Группа Typical / Typical group	Группа NotTypical / NotTypical group
ЭМГ / EMG	1.69 ± 1.12	-0.38 ± 0.42
КГР / GSR	1.81 ± 0.97	-0.39 ± 0.44
ПерфИ / PI	-1.02 ± 0.44	0.58 ± 0.75
Т	-1.14 ± 0.89	0.42 ± 0.67
ЧП / PR	1.00 ± 0.90	-0.50 ± 0.61
ЧД / RR	1.12 ± 0.84	-0.55 ± 0.51
SDNN	-0.76 ± 0.59	0.79 ± 0.69
HF	-0.46 ± 0.52	1.59 ± 0.58
LF	1.46 ± 0.93	-0.46 ± 0.43
SI	1.04 ± 0.72	-0.63 ± 0.50

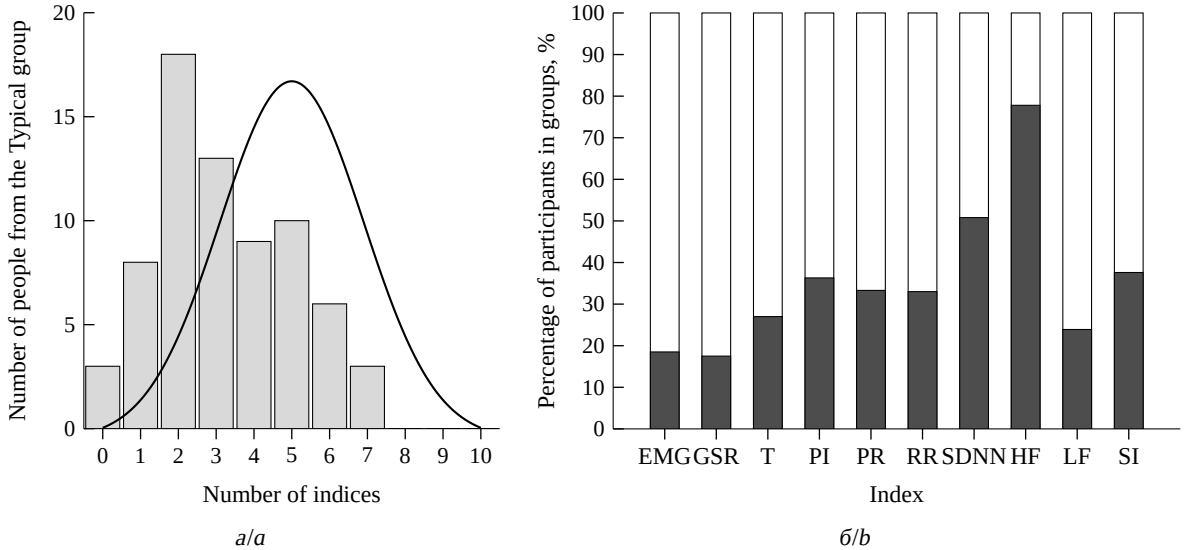
Полученное в эксперименте распределение в форме гистограммы сопоставлялось с дискретной биномиальной моделью в предположении о случайном и равновероятном наблюдении или отсутствии признака у каждого человека из общей совокупности в 70 чел. Сглаживающая кривая на рис. 2, а проходит через 10 точек, полученных масштабированием биномиального распределения.

Видно, что экспериментальное и модельное распределения качественно и количественно различаются, экспериментальное распределение сдвинуто в сторону меньшего числа признаков (мода при $k = 2$ против $k = 5$ в модели). Критерий Хи-квадрат для независимых распределений продемонстрировал статистическую значимость их различий ($p < 0.001$).

На рис. *2, б* изображена гистограмма распределения процентного соотношения людей, у которых индекс изменялся (черный цвет) и не изменялся (белый цвет). Анализируя данный рисунок, можно выделить определенные наиболее часто изменяющиеся индексы: HF, SDNN, ПерфИ, SI. Индексом с наибольшей долей добровольцев из группы Typical является HF, в то время как ЭМГ и КПр характеризуются наименьшей долей таких добровольцев.

Результаты выявления значимой реакции каждого из индексов на нагрузку по всем добровольцам иллюстрируются на рис 3. Представленное распределение подчеркивает значительную индивидуальную изменчивость в реакции добровольцев на когнитивную нагрузку, детализируя информацию, представленную ранее на рис. 2.

Обсуждение результатов



а/*a* *б*/*b*

Рис. 2. Гистограммы распределения оценок: гистограмма распределения количества индексов по количеству человек, у которых они значимо изменялись (группа Typical) (кривая отражает результат расчетов по биномиальной модели) (*а*); гистограмма распределения процентного соотношения людей из группы Typical (черный цвет) и NotTypical (белый цвет) (*б*)

Fig. 2. Histograms of the distribution of scores: Histogram of the distribution of the number of indices by the number of people for whom they changed significantly (Typical group) (the curve reflects the result of calculations using the binomial model) (*a*); histogram of the distribution of the percentage of people from the Typical group (black) and NotTypical (white) (*b*)

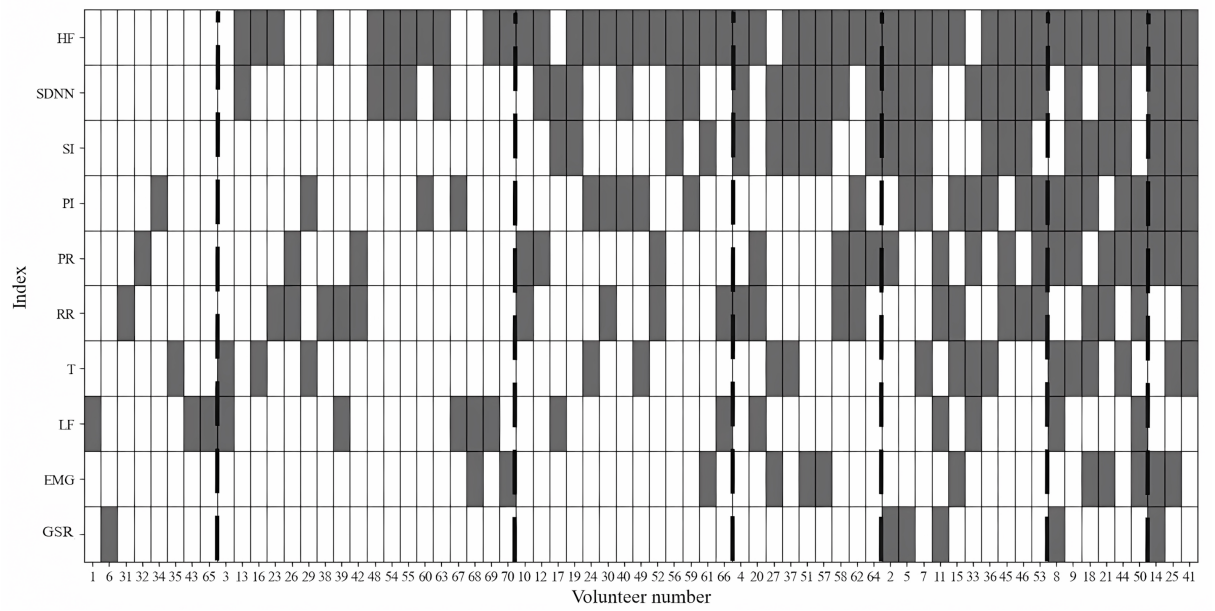


Рис. 3. Информация о выявлении значимой реакции каждого из индексов на нагрузку по всей выборке. Окрашенные ячейки указывают на изменившиеся индексы. Добровольцы упорядочены по количеству изменившихся индексов по возрастанию. Пунктирными вертикальными линиями отделены группы исследуемых в зависимости от количества изменившихся индексов (от 1 до 7)

Fig. 3. Information on the detection of a significant response of each index to exercise across the entire sample. The colored cells indicate changed indices. Volunteers are sorted by the number of changed indices in ascending order. The dashed vertical lines separate study groups based on the number of changed indices (from 1 to 7)

Полученные результаты демонстрируют в ансамбле значимое изменение в ответ на нагрузку всех рассматриваемых индексов, однако их чувствительность оказалась различной. Наиболее чувствительными индексами оказались абсолютное значение спектральной мощности RRi в высокочастотном HF-диапазоне, стандартное отклонение RR-интервалов, стресс-индекс и перфузионный индекс. При этом, показатели электромиограммы и кожно-гальванической реакции, используемые многими исследователями [24–27], в нашей работе изменились у наименьшего числа добровольцев.

Примечательна реакция перфузионного индекса, который, по нашим данным, в данной работе применялся для диагностики когнитивной нагрузки впервые. Чувствительность перфузионного индекса, превысившая чувствительность электромиограммы, кожно-гальванической реакции, температуры конечностей, частоты пульса и частоты дыхания, подчеркивает новизну полученных результатов.

Выбранные нами индексы не коррелируют друг с другом по построению. Поэтому наиболее чувствительные из них в перспективе могут быть скомбинированы в вектор входных значений для методов машинного обучения в виде, например, нейросетевых алгоритмов или предсказательных авторегрессионных моделей. Это, потенциально, позволит дополнительно повысить чувствительность детектирования факта наличия и уровня ментальной нагрузки. Создание подобных алгоритмов неинвазивного непрерывного мониторинга уровня когнитивной нагрузки и их последующая интеграция в носимые приборы, необходимы для осуществления человеком самостоятельной экспресс-диагностики своего психофизиологического состояния, повышения эффективности деятельности работников умственного труда, а также для развития подходов персонализированной медицины.

Более того, индексы, показавшие наибольшую чувствительность при классификации функционального состояния добровольцев, перспективны для создания массовых носимых скрининг-систем, так как потребуют лишь одного канала записи – универиантной фотоплетизмограммы (ФПГ). Выделив из ФПГ последовательность RRi, возможно оценить показатели вариабельности ритма сердца (HF, SDNN, SI), а из исходного сигнала ФПГ – рассчитать значения ПерфИ.

Отметим, что и визуальный анализ рис. 1, и результаты кластеризации индекса PK ука-

зывают на наличие в выборке добровольцев, реакция на ментальную нагрузку у которых противоположна распространенным в литературе выводам. Это можно объяснить значительным влиянием индивидуальных особенностей. Такое разнообразие реакций может не быть замечено на малых выборках, но в нашем случае его удалось выявить, и его необходимо учитывать в системах мониторинга ментальной нагрузки. Кластерный анализ в нашем случае позволил уточнить пороговые значения для диагностики, но, несомненно, исследования в этом направлении требуется развивать и дальше.

Анализируя рис. 2, *а*, отметим характер экспериментального распределения, отличающий его от статистической модели. Это позволяет предположить, что, несмотря на независимость по построению рассматриваемых индексов, они демонстрируют некоторую согласованность деятельности различных физиологических подсистем за счет биофизических механизмов, сопровождающих когнитивную деятельность, в частности сложного влияния процессов высшей нервной деятельности на вегетативную регуляцию кровообращения [28, 29]. В противном случае мы бы ожидали распределение, близкое к модельному (см. рис. 2, *а*).

У 9 добровольцев значимо изменились 6 или 7 индексов. С одной стороны, можно предположить, что чем большее количество физиологических индексов изменилось в ответ на когнитивную нагрузку, тем выше чувствительность рассматриваемых индексов и тем эффективнее можно определять когнитивный статус человека в настоящий момент. Однако это также может свидетельствовать о том, что эти добровольцы помимо искусственно созданной когнитивной нагрузки испытывали чрезмерную нагрузку и стресс во время эксперимента (из-за непривычной процедуры и обстановки, процесса наложения датчиков и электродов и т. д.), или, как упоминалось во введении, это может быть связано со сниженным порогом активации симпато-адреналовой системы у данной группы участников. Для проверки этих гипотез в последующих исследованиях при обнаружении в выборке испытуемых с большим количеством изменившихся индексов, возможно, уместно рассматривать их отдельно.

Перспективным направлением исследования может являться анализ сигналов ФПГ, зарегистрированных со лба, так как актуальные публикации отмечают чувствительность этого сигнала для оценки когнитивной нагрузки [17, 18].

Возможным ограничением данного исследования является то, что мы не рассматривали разные типы когнитивной нагрузки, не изменяли во времени уровень нагрузки, а также исследовали выборку добровольцев с узким диапазоном возрастов. Учет этих ограничений был бы полезным дополнением к последующим исследованиям в данной области.

Заключение

Проведен сравнительный анализ чувствительности комплекса физиологических индексов, доступных для регистрации с помощью эргономичных носимых устройств, в отношении когнитивной нагрузки, индуцированной ментальным арифметическим тестом. Основное внимание уделялось показателям, отражающим активность автономной нервной и соматической систем – вариабельности ритма сердца (ВСР), фотоплетизмографии (перфузионный индекс), электродермальной активности, поверхностной электромиографии, температуре конечностей и частоте дыхания.

Впервые на единой выборке испытуемых ($N = 70$) выполнено прямое сопоставление 10 физиологических индексов. Наиболее чувствительными к изменению функционального состояния оказались показатели ВСР: абсолютная мощность высокочастотного компонента (HF), стандартное отклонение RR-интервалов (SDNN), стресс-индекс (SI), а также перфузионный индекс (ПерфИ), который ранее не применялся для диагностики когнитивной нагрузки. Наименьшую чувствительность продемонстрировали электромиограмма и кожно-гальваническая реакция, что контрастирует с их широкой распространенностью в литературе и требует дальнейшего изучения.

Обнаружена значительная гетерогенность физиологических ответов испытуемых: от полного отсутствия значимых изменений до согласованной реакции по 6–7 индексам. Выделение групп Typical и NotTypical для каждого индекса и анализ их пересечений позволил количественно охарактеризовать эту вариабельность. Полученные пороговые значения предложенного нормированного коэффициента РК могут служить основой для персонализированной калибровки алгоритмов детекции когнитивной нагрузки.

Отметим, что четыре наиболее чувствительных индекса (HF, SDNN, SI, ПерфИ) могут быть

рассчитаны на основе единственного сигнала фотоплетизмограммы. Это открывает перспективу создания миниатюрных носимых устройств (например, в форм-факторе умных часов или пульсоксиметрической клипсы), способных в реальном времени оценивать уровень когнитивной нагрузки без использования громоздких электродных систем и участия специалиста.

Список литературы / References

1. Martinez-Cedillo A. P., Gavrila N., Mishra A., Geangu E., Foulsham T. Cognitive load affects gaze dynamics during real-world tasks. *Experimental Brain Research*, 2025, vol. 243, iss. 4, art. 82. https://doi.org/10.1007/s00221-025-07037-4
2. Hor T. S. C., Fong L., Wynne K., Verhoeven B. Easing the cognitive load of general practitioners: AI design principles for future-ready healthcare. *Technovation*, 2025, vol. 142, iss. C, art. 103208. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103208
3. Arutyunova K. R., Bakhchina A. V., Konovalov D. I., Margaryan M., Filimonov A. V., Shishalov I. S. Heart rate dynamics for cognitive load estimation in a driving simulation task. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, iss. 1, art. 31656. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79728-x
4. Hui L., Pei Z., Quan S., Ke X., Zhe S. Cognitive workload detection of air traffic controllers based on mRMR and fewer EEG channels. *Brain Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 8, art. 811. https://doi.org/10.3390/brainsci14080811
5. Menon V. Large-scale brain networks and psychopathology: A unifying triple network model. *Trends in Cognitive Sciences*, 2011, vol. 15, iss. 10, pp. 483–506. https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.08.003
6. Scolari M., Seidl-Rathkopf K. N., Kastner S. Functions of the human frontoparietal attention network: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 2015, vol. 1, pp. 32–39. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2014.08.003
7. Chen O., Castro-Alonso J. C., Paas F., Sweller J. Extending cognitive load theory to incorporate working memory resource depletion: Evidence from the spacing effect. *Educational Psychology Review*, 2018, vol. 30, iss. 2, pp. 483–501. https://doi.org/10.1007/s10648-017-9426-2
8. Ayres P., Lee J. Y., Paas F., van Merriënboer J. J. G. The validity of physiological measures to identify differences in intrinsic cognitive load. *Frontiers in Psychology*, 2021, vol. 12, art. 702538. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.702538
9. Conway D., Dick I., Li Z., Wang Y., Chen F. The effect of stress on cognitive load measurement. *Human-Computer Interaction (INTERACT 2013). 14th IFIP TC13 International Conference, Cape Town, South Africa, September 2–6, 2013.* Springer series “Lecture Notes in Computer Science”, vol. 8120. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013, pp. 659– 666. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40498-6_58
10. Karavaev A. S., Borovkova E. I., Runnova A. E., Gridnev V. I., Kiselev A. R., Skazkina V. V., Prokhorov M. D., Hramkov A. N., Penzel T., Ponomarenko V. I., Kuznetsov N. V., Chechurin L. S. Synchronization of processes of autonomic control of blood circulation in humans is different in the awake state and in sleep stages. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, vol. 15, art. 791510. https://doi.org/10.3389/fnins.2021.791510
11. Kurbako A. V., Hramkov A. N., Borovkova E. I., Dubinkina E. S., Ishbulatov Yu. M., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Hardware-software complex for diagnostics of a human psychophysiological state during the solving of cognitive tasks. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 19–29 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29
12. Yedukondalu J., Sunkara K., Radhika V., Kondaveeti S., Anumothu M., Krishna Ya. M. Cognitive load detection through EEG lead wise feature optimization and ensemble classification. *Scientific Reports*, 2025, vol.15, art. 842. https://doi.org/10.1038/s41598-024-84429-6
13. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Ishbulatov Yu. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S. Changes in the power and coupling of infra-slow oscillations in the signals of EEG leads during stress-inducing cognitive tasks. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, iss. 14, art. 8390. https://doi.org/10.3390/app13148390
14. Orti R., Iachini T., D’Agostino E., Ruotolo F., Ruggiero G. Cognitive load in switching between egocentric and allocentric spatial frames of reference: A pupillometry study. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, iss. 1, art. 26451. https://doi.org/10.1038/s41598-025-11122-7
15. Rissén D., Melin B., Sandsjö L., Dohns I., Lundberg U. Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation. *Work & Stress*, 2002, vol. 16, iss. 2, pp. 127–137. https://doi.org/10.1080/02678370210141530
16. Ouyang Y., Liu M., Cheng C., Yang Y., He S., Zheng L. Monitoring inattention in construction workers caused by physical fatigue using electrocardiograph (ECG) and galvanic skin response (GSR) sensors. *Sensors (Basel)*, 2023, vol. 23, iss. 17, art. 7405. https://doi.org/10.3390/s23177405
17. Minakuchi E., Ohnishi E., Ohnishi J., Sakamoto S., Hori M., Motomura M., Hoshino J., Murakami K., Kawaguchi T. Evaluation of mental stress by physiological indices derived from finger plethysmography. *Journal of Physiological Anthropology*, 2013, vol. 32, iss. 1, art. 17. https://doi.org/10.1186/1880-6805-32-17
18. Huynh D. N., Tran T. N., Tran K. T., Le N. K., Le C. D., Mai H. X., Huynh Q. L., Nguyen T. H. Assessment of cognitive load through photoplethysmography and bioimpedance responses during mental arithmetic tasks. *Scientific Reports*, 2026, vol. 16, iss. 1, art. 7367. https://doi.org/10.1038/s41598-026-38782-3
19. Banik S., Kumar H., Ganapathy N., Swaminathan R. Exploring central-peripheral nervous system interaction through multimodal biosignals: A Systematic Review. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 60347–60368. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394036

20. Chikhi S., Matton N., Blanchet S. EEG power spectral measures of cognitive workload: A meta-analysis. *Psychophysiology*, 2022, vol. 59, iss. 6, art. 14009. https://doi.org/10.1111/psyp.14009
21. Shackman A. J. The potentially deleterious impact of muscle activity on gamma band inferences. *Neuropsychopharmacology*, 2010, vol. 35, iss. 3, art. 847. https://doi.org/10.1038/npp.2009.173
22. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*, 1996, vol. 93, iss. 5, pp. 1043–1065. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8598068/
23. Cannesson M., Delannoy B., Morand A., Rosamel P., Attof Ya., Bastien O., Lehot J.-J. Does the pleth variability index indicate the respiratory-induced variation in the plethysmogram and arterial pressure waveforms? *Anesthesia & Analgesia*, 2008, vol. 106, iss. 4, pp. 1189–1194. https://doi.org/10.1213/ANE.0B013E318167AB1F
24. Leyman E. L., Mirka G., Kaber D., Sommerich C. Cervicobrachial muscle response to cognitive load in a dual-task scenario. *Ergonomics*, 2004, vol. 47, iss. 6, pp. 625–645. https://doi.org/10.1080/00140130310001629766
25. Nourbakhsh N., Chen F., Wang Ya., Calvo R. A. Detecting users' cognitive load by galvanic skin response with affective interference. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 1–20. https://doi.org/10.1145/2960413
26. Iwanaga K., Saito S., Shimomura Y., Harada H., Katsuura T. The effect of mental loads on muscle tension, blood pressure and blink rate. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 2000, vol. 19, iss. 3, pp. 135–141. https://doi.org/10.2114/jpa.19.135
27. Roman-Liu D., Grabarek I., Bartuzi P., Choromański W. The influence of mental load on muscle tension. *Ergonomics*, 2013, vol. 56, iss. 7, pp. 1125–1133. https://doi.org/10.1080/00140139.2013.798429
28. Mehler B., Reimer B., Coughlin J. F. Sensitivity of physiological measures for detecting systematic variations in cognitive demand from a working memory task: An on-road study across three age groups. *Human Factors*, 2012, vol. 54, iss. 3, pp. 396–412. https://doi.org/10.1177/0018720812442086
29. Ishbulatov Yu. M., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Simonyan M. A., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Mironov S. A., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Mathematical modeling of the cardiovascular autonomic control in healthy subjects during a passive head-up tilt test. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, iss. 1, art. 16525. https://doi.org/10.1038/s41598-020-71532-7

Поступила в редакцию 13.04.2026; одобрена после рецензирования 26.05.2026;
принята к публикации 17.06.2026; опубликована 30.09.2026

The article was submitted 13.04.2026; approved after reviewing 26.05.2026;
accepted for publication 17.06.2026; published 30.09.2026