



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 19–29
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 19–29
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>, EDN: UFAMDM

Научная статья
УДК 530.182:537.86

Аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения КОГНИТИВНЫХ ЗАДАЧ

А. В. Курбако^{1,2,3}✉, А. Н. Храмов^{1,3}, Е. И. Боровкова^{1,3}, Е. С. Дубинкина^{1,3},
Ю. М. Ишбулатов^{1,3}, В. И. Пономаренко^{2,3}, А. С. Караваев^{1,2,3}, М. Д. Прохоров^{2,3}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

³Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Россия, 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14

Курбако Александр Васильевич, ¹ ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, ² младший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, kurbako.sasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3479-4609>, AuthorID: 1055278

Храмов Алексей Николаевич, ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, anhramkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0730-6024>, AuthorID: 1055072

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

Дубинкина Елизавета Сергеевна, лаборант кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, kometa.ed@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4636-3937>, AuthorID: 1204137

Ишбулатов Юрий Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, ishbulatov95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, AuthorID: 829775

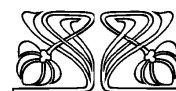
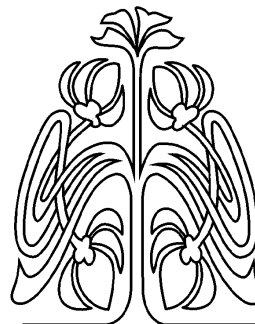
Пonomаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹ профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии; ² ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, ponomarenkovi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, AuthorID: 39986

Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, ¹ заведующий кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии; ² старший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, karavaevas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4678-3648>, AuthorID: 128455

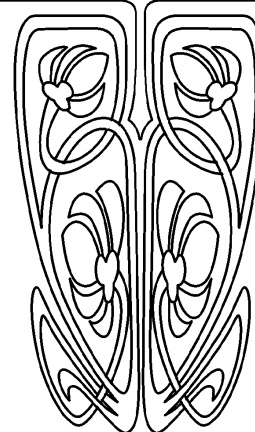
Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, ² заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике, mdprokhorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, AuthorID: 39985

Аннотация. Разработан аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения когнитивных задач по сигналам электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Проведено сопоставление диагностической способности разработанного комплекса с сертифицированным серийным прибором. Установлены отведения ЭЭГ, позволяющие диагностировать изменение психофизиологического состояния человека на основе анализа изменения спектральной плотности мощности сверхмедленных колебаний

© Курбако А. В., Храмов А. Н., Боровкова Е. И., Дубинкина Е. С.,
Ишбулатов Ю. М., Пономаренко В. И., Караваев А. С.,
Прохоров М. Д., 2024



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





(с частотой менее 0.4 Гц) потенциала одноканальной ЭЭГ. Показано, что созданный аппаратно-программный комплекс позволяет диагностировать изменение психофизиологического состояния человека после выполнения им стандартных тестов с дозированной ментальной нагрузкой.

Ключевые слова: психофизиологическое состояние, электроэнцефалограмма, спектральная мощность, аппаратно-программный комплекс

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российской федеральной программы академического лидерства «Приоритет 2030» в Балтийском федеральном университете имени Иммануила Канта.

Для цитирования: Курбако А. В., Храмов А. Н., Боровкова Е. И., Дубинкина Е. С., Ишбулатов Ю. М., Пономаренко В. И., Карavaев А. С., Прохоров М. Д. Аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения когнитивных задач // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 19–29. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>, EDN: UFAMDM

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

Article

Hardware-software complex for diagnostics of a human psychophysiological state during the solving of cognitive tasks

A. V. Kurbako^{1,2,3}✉, A. N. Hramkov^{1,3}, E. I. Borovkova^{1,3}, E. S. Dubinkina^{1,3}, Y. M. Ishbulatov^{1,3}, V. I. Ponomarenko^{2,3}, A. S. Karavaev^{1,2,3}, M. D. Prokhorov^{2,3}

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Saratov Branch of the Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

³Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo St., Kaliningrad 236041, Russia

Aleksandr V. Kurbako, kurbako.sasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3479-4609>, AuthorID: 1055278

Aleksey N. Hramkov, anhramkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0730-6024>, AuthorID: 1055072

Ekaterina I. Borovkova, rubanei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1429-3599>, AuthorID: 682183

Elizaveta S. Dubinkina, kometa.ed@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4636-3937>, AuthorID: 1204137

Yurii M. Ishbulatov, ishbulatov95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, AuthorID: 829775

Vladimir I. Ponomarenko, ponomarenkovi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, AuthorID: 39986

Anatoly S. Karavaev, karavaevas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4678-3648>, AuthorID: 128455

Mikhail D. Prokhorov, mdprokhorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, AuthorID: 39985

Abstract. Background and Objectives: Psychological state of a person can change under conditions of cognitive load. Excessive cognitive load can lead to distress, which reduces performance. Diagnosis of changes in the psychophysical state in the process of performing cognitive tasks is important for human health and increasing the efficiency of his work. Therefore, the purpose of the study is to develop a hardware and software complex for diagnosing the psychophysiological state of a person in the process of solving cognitive problems. **Materials and Methods:** Electroencephalogram signals were recorded using a developed device and a certified standard recorder during a biological experiment. A comparison was made of the diagnostic capabilities of the developed hardware-software complex and a serial device. **Results:** A hardware-software complex has been developed for diagnosing the psychophysiological state of a person in the process of solving cognitive problems using an electroencephalogram signal. The developed system has shown sensitivity and specificity values close to those of the serial recorder. Using the developed complex, the electroencephalogram channels suitable for diagnosing the psychophysical state have been selected. **Conclusion:** The developed hardware-software complex can be used to diagnose the psychophysiological state of a person in the process of performing cognitive tasks.

Keywords: psychophysical state, electroencephalogram, spectral power, hardware-software complex

Acknowledgements: This research was supported from the Russian Federal Academic Leadership Program “Priority 2030” at the Immanuel Kant Baltic Federal University.

For citation: Kurbako A. V., Hramkov A. N., Borovkova E. I., Dubinkina E. S., Ishbulatov Y. 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>, EDN: UFAMDM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Психофизиологическое состояние человека может изменяться в условиях когнитивной нагрузки [1, 2]. При умеренной когнитивной нагрузке развивается состояние эустресса, повышающее физическую и ментальную работоспособность и сопровождающееся безопасными для человека функциональными физиологическими

изменениями [3]. Однако повышенная интенсивность и чрезмерная длительность нагрузки могут привести к развитию дистресса – опасного для здоровья синдрома, снижающего работоспособность [3]. Поэтому диагностика изменения психофизиологического состояния в процессе выполнения когнитивных задач имеет важное значение для здоровья человека и повышения эффективности его труда.



Известно, что изменение психофизиологического состояния и развитие стресса сопровождаются комплексом физиологических реакций – сложными нелинейными изменениями: гормонального фона, частоты сердечных сокращений, артериального давления, биопотенциалов человеческого тела, проводимости кожи, характера движения зрачков и др. [4–8].

Известны десятки методов диагностики стресса, основанные на анализе биологических сигналов: электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [9], электромиограммы [10], электрокардиограммы [11], артериального давления [12], электродерматограммы [13] и других сигналов. Однако известные инструментальные методы диагностики либо противоречивы, либо требуют использования стационарного дорогостоящего оборудования и особых условий проведения исследования (например, анализа уровня гормонов) [4–8]. Таким образом, разработка аппаратно-программного комплекса для диагностики изменения психофизиологического состояния человека в повседневных бытовых условиях жизнедеятельности остается важной и актуальной нерешенной научной задачей.

Поэтому целью данной работы является разработка методики анализа сигналов ЭЭГ и реализация её в виде аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего количественную диагностику изменения психофизиологического состояния человека в процессе решения им когнитивных задач.

Методы

В работе [14] была показана возможность диагностики психофизиологического состояния человека по изменению спектральной мощности сверхмедленных колебаний потенциала (СМКП) ЭЭГ в частотных диапазонах δ_1 (от 0.05 до 0.15 Гц) и δ_2 (от 0.15 до 0.5 Гц). Было показано, что в обоих диапазонах суммарная спектральная мощность колебаний в ЭЭГ в состоянии стресса, вызванном дозированной когнитивной нагрузкой, была значимо ниже, чем в состоянии покоя. Влияние стресса на изменение свойств динамики сверхмедленных колебаний потенциала ЭЭГ обусловлено, с одной стороны, его известным влиянием на процессы вегетативной регуляции организма [14–16], а с другой стороны, связано с проекцией активности центров вегетативной регуляции головного мозга на СМКП ЭЭГ [17–22].

В данной работе предлагается методика диагностики психофизиологического состояния человека, основанная на контроле интегральной спектральной плотности мощности СМКП одноканальной ЭЭГ в частотном диапазоне 0.05–0.4 Гц. Зарегистрированный сигнал ЭЭГ фильтровался с помощью цифрового полосового фильтра Баттерверта 4-го порядка с вышеуказанной полосой пропускания. Оценивалась суммарная спектральная мощность фильтрованного сигнала в окне шириной 360 с, равном длительности одного этапа эксперимента. В соответствии с работой [14] методика диагностировала когнитивный стресс, если величина интегральной спектральной плотности мощности, оцененная в окне, была меньше чем интегральная спектральная плотность мощности, оцененная в предыдущем окне, соответствующем состоянию покоя.

Экспериментальные данные

Проверка работоспособности предложенного метода осуществлялась в ходе анализа экспериментальных данных. Дизайн эксперимента включал несколько этапов (рис. 1): 10-минутная стабилизация, во время которой запись не осуществлялась; 6 мин – фоновая запись (R0); 6 мин – когнитивная нагрузка (S0); 6 мин – отдых (R1); 6 мин – когнитивная нагрузка (S1); 6 мин – этап восстановления (R2) [23]. Длительность эксперимента составляла, таким образом, 40 мин, длительность записей – 30 мин. Для вызова стресса использовались хорошо зарекомендовавшие себя методы: цветовой тест Струпа (S0) [24] и ментальный арифметический тест (S1) [25].

В ходе теста Струпа (этап S0) доброволец произносил про себя цвет, в который было окрашено слово, обозначающее другой цвет. Визуальные стимулы сменялись с периодом одна секунда. В ходе ментального арифметического теста (этап S1) добровольцу предъявлялось трехзначное число. Ставилась задача сложения в уме цифр этого числа. Если в результате сложения получалось двузначное число, то требовалось сложить его цифры и определить четность полученного однозначного числа. Стимулы предъявлялись каждые 5 с.

В ходе исследований регистрировались сигналы ЭЭГ с 8 униполярных отведений: F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, установленных в соответствии с монтажной схемой 8–3. Регистрация

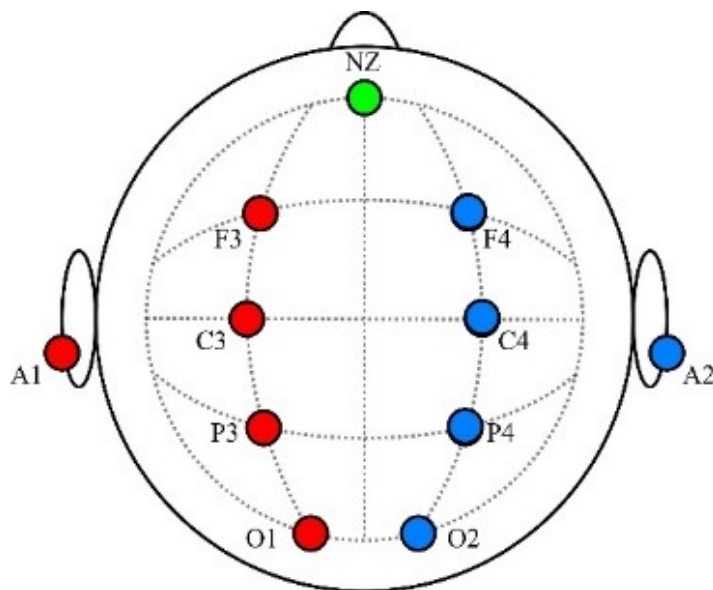
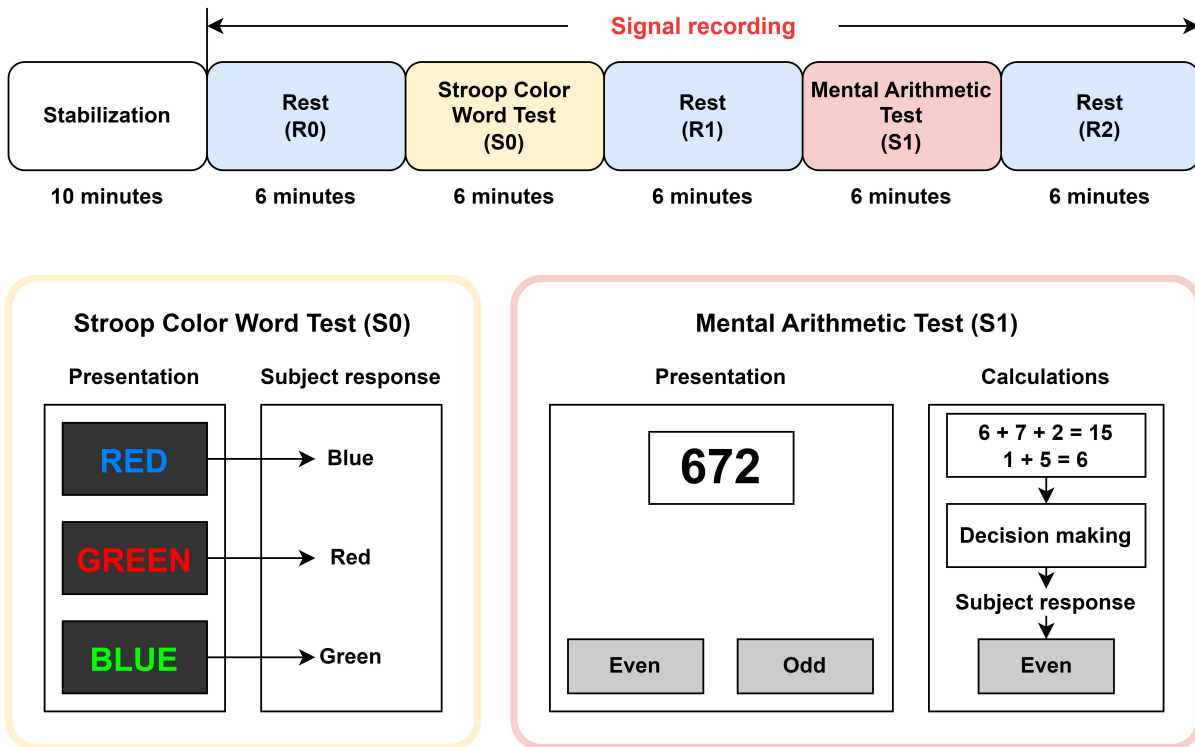


Рис. 1. Дизайн экспериментального исследования. R0, R1, R2 – участки без когнитивного стресса, S0, S1 – участки когнитивного стресса (цвет онлайн)

Fig. 1. Experimental study design. R0, R1, R2 – areas without cognitive stress, S0, S1 – areas of cognitive stress (color online)

сигналов ЭЭГ осуществлялась одновременно серийным сертифицированным устройством «Медиком Энцефалан-ЭЭГР-19/26» [26] и устройством, разработанным авторами статьи. Электроды соответствующих отведений двух устройств размещались на скальпе в непосредственной близости друг к другу. Были зарегистрированы экспериментальные сигналы 6 здоровых добро-

вольцев – мужчин в возрасте 25.0 ± 3.2 года (среднее \pm стандартное отклонение). Для регистрации обоими устройствами использовались идентичные наборы сертифицированных электродов Медиком.

Все добровольцы были проинформированы о цели и дизайне исследования перед его началом.



Аппаратный блок

В ходе работы был разработан и изготовлен аппаратный модуль, используемый для регистрации и предварительной обработки экспериментальных данных. Схема электрическая принципиальная разработанного устройства представлена на рис. 2.

Основными элементами схемы являются frontend-микросхема U6, включающая схему мультиплексирования входов, входные усилители с программируемым усилением,

восемь аналого-цифровых преобразователей, программируемые цифровые фильтры и вспомогательные аналоговые и конфигурируемые цифровые элементы. Конфигурацию U6, управление этой микросхемой, получение от нее данных по протоколу Serial Peripheral Interface осуществляет микроконтроллер U1, тактируемый кварцевым резонатором X1 частотой 8 МГц.

Питание цифровых элементов устройства (VCCU1, DVDDU6) осуществляется настраиваемым линейным стабилизатором U3, обеспечива-

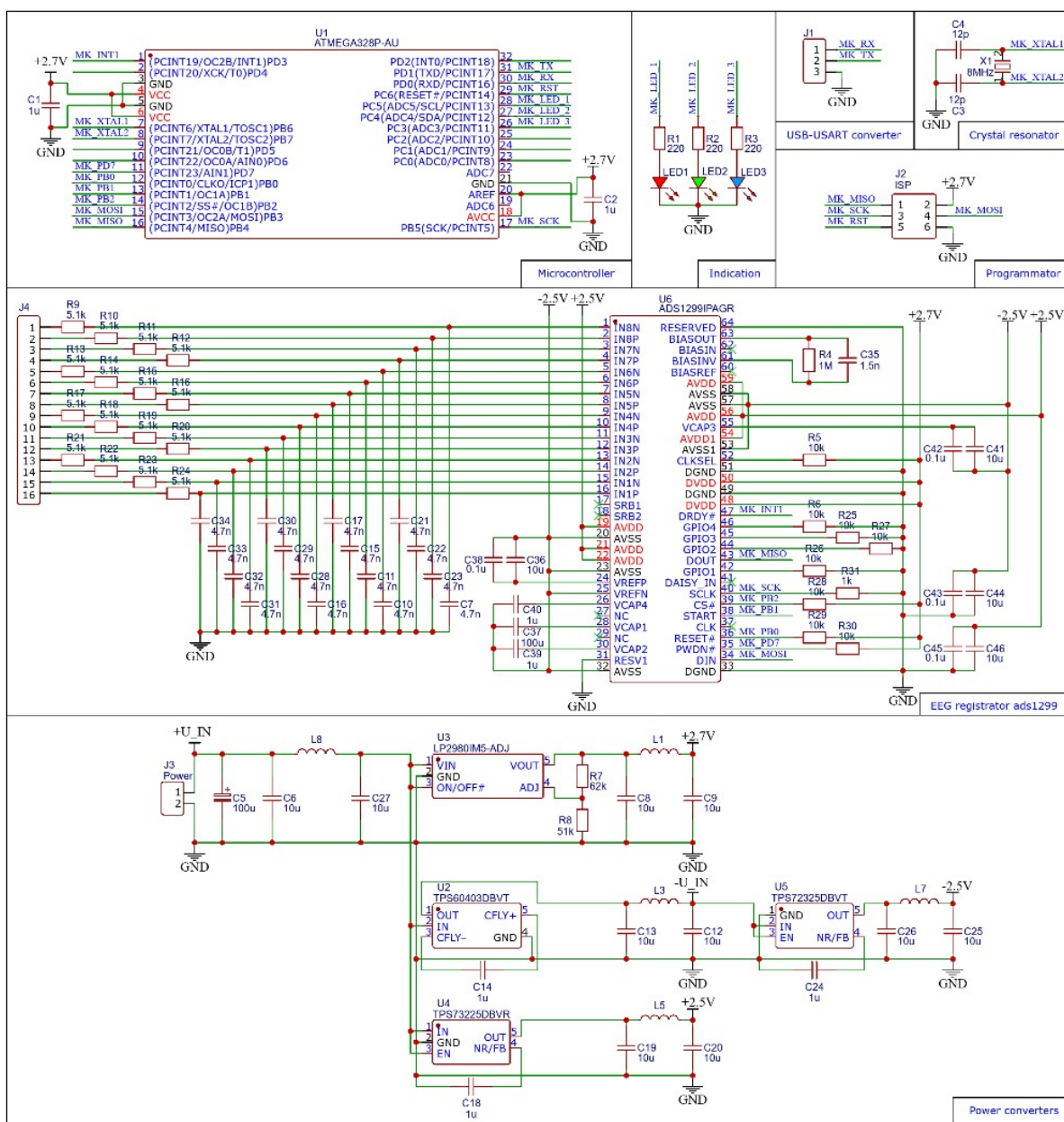


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема разработанного 8-канального цифрового регистратора сигналов ЭЭГ (цвет онлайн)

Fig. 2. Electrical circuit of the developed 8-channel digital EEG signal recorder (color online)



ющим выходное напряжение 2.7 В, что позволяет питать устройство одной ячейкой литий-полимерного аккумулятора (напряжение 3.0–4.2 В).

Питание аналоговых элементов U6 биполярное: от –2.5 до +2.5 В. Положительное аналоговое питание обеспечивается стабилизатором U4, а отрицательное – инвертором напряжения U2 и линейным стабилизатором U5.

Конденсаторы C1, C2 размещены в непосредственной близости к корпусу U1 и обеспечивают фильтрацию линий питания этой микросхемы. Конденсаторы C36–C46 размещены в непосредственной близости к корпусу U6 и обеспечивают фильтрацию линий питания этой микросхемы.

Конденсатор C5 фильтрует вход питания устройства. Элементы C6, C27, L8, C8, C9, L1, C12, C13, L3, C19, C20, L5, C25, C26, L7 формируют П-фильтры, дополнительно очищающие линии аналогового и цифрового питания от шумов и помех.

Цепочка резисторов R7, R8 позволяет задать выходное напряжение настраиваемого линейного стабилизатора U3. Конденсаторы C14, C18 и C24 обеспечивают стабильную работу линейных стабилизаторов U2, U4 и U5 соответственно.

Конденсаторы C3, C4 обеспечивают стабильный запуск кварцевого генератора, тактирующего U1.

Резисторы R5, R6, R25–R31 подтягивают цифровые линии U6 к GND или к напряжению питания.

RC-цепочки на резисторах R9–R24 и конденсаторах C7, C10, C11, C15–C17, C21–C23, C28–C34 обеспечивают низкочастотную фильтрацию входных данных ЭЭГ.

Цепочка R4, C35 задает частотные свойства активного фильтра в схеме цепи активной земли, которая выделяет низкочастотную составляющую суммарной ЭЭГ, связанную с контактными явлениями в контакте кожа–гель–электрод, инвертирует этот низкочастотный тренд и подает сигнал активной земли на тело пациента для более эффективного подавления медленного тренда потенциалов отведений ЭЭГ.

Индикаторы, выполненные на светодиодах LED1–LED3 и резисторах R1–R3 соответственно, отображают информацию о режимах работы устройства. Полученные микроконтроллером U1 данные от микросхемы U6 передаются для последующей обработки и анализа в персональный компьютер через серийный мост USB-UARTFT232RL-REEL.

Разработанное и изготовленное устройство имеет следующие технические характеристики: усиление аналогового тракта $\times 24$, полоса пропускания 0.01–100 Гц, коэффициент ослабления синфазной составляющей наводки 120 дБ, частота дискретизации 250 Гц, разрядность квантования 24 бита, габариты лабораторного образца 100×200×250 мм, масса 200 г (габариты и масса указаны без подключаемых ЭЭГ-электродов, переходника USB-UART и кабеля для связи с персональным компьютером). Питание устройства в экспериментах осуществлялось от порта USB персонального компьютера. Потребление в этом случае не превышало 35 мА.

Устройство обеспечивает регистрацию до 8 униполярных или до 8 биполярных отведений сигналов ЭЭГ (режим коммутируется программно), подавление медленного тренда сигналов с помощью линии активной земли.

Принципиальная схема устройства обеспечивает значительный запас по дальнейшей миниатюризации устройства и снижению его массы.

Результаты анализа данных

Типичный пример временных реализаций и их спектров мощности для сигнала отведения F3 ЭЭГ, зарегистрированного одновременно двумя используемыми устройствами, представлен на рис. 3. Из рис. 3, а, б видно, что реализации имеют близкую форму. Имеющиеся отличия можно объяснить несколькими различными свойствами аналоговых трактов устройств и небольшим смещением электродов двух устройств относительно друг друга.

Спектры мощности (рис. 3, в, г) рассчитывались методом Уэлча по 6-минутной реализации на каждом этапе эксперимента в окнах длительностью 60 с без перекрытия. Для уменьшения влияния эффекта утечки применялось окно Хэмминга. Анализ спектров сигналов, зарегистрированных двумя устройствами, показывает их хорошее качественное соответствие друг другу.

На спектрах видна типичная для экспериментальной выборки картина: для обоих устройств мощность осцилляций СМКП ЭЭГ растет от этапа фона R0 к этапам отдыха R1 и далее к R2. Этот эффект наиболее четко выражен для разработанного устройства. Этапы R0 и R1 для серийного устройства имеют близкие мощности.

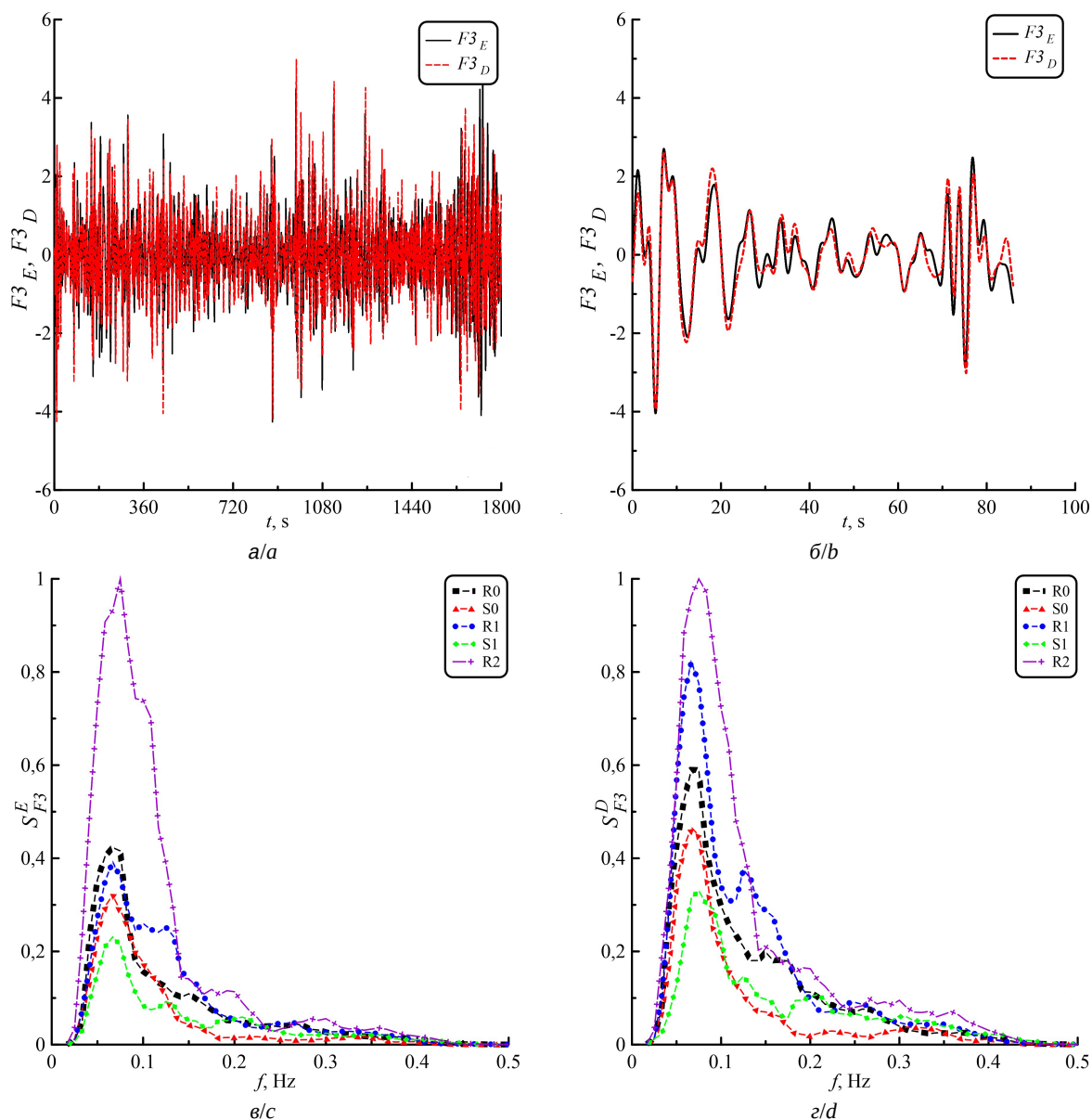


Рис. 3. Пример временных реализаций и спектров мощности сигналов отведения F3 ЭЭГ, зарегистрированных одновременно двумя приборами с добровольца № 2: а – исходные временные реализации, б – увеличенный фрагмент длительностью 100 с ограниченный по полосе 0.05–0.4 Гц (СМКП ЭЭГ). Реализация, зарегистрированная серийным устройством Энцефалан, изображена черным цветом (сплошная линия) и обозначена индексом E , а реализация, полученная с помощью разработанного нами устройства, показана красным цветом (прерывистая линия) и обозначена индексом D . Спектры мощности сигналов на разных этапах эксперимента: в – для серийного устройства Энцефалан, з – для разработанного устройства. Соответствие спектров этапам эксперимента расшифровано в легендах панелей (в и з) (цвет онлайн)

Fig. 3. An example of time realizations and power spectra of F3 EEG signals recorded simultaneously by two devices from volunteer no. 2: a – initial time series, b – an enlarged fragment with a duration of 100 s, limited in band 0.05–0.4 Hz (EEG SMCPC). The implementation recorded by the serial Encephalan device is shown in black (solid line) and designated by the index E , the implementation obtained using the device we developed is shown in red (dashed line) and designated by the index D . Signal power spectra at different stages of the experiment: c – for the serial Encephalan device, d – for the developed device. The correspondence of the spectra to the stages of the experiment is deciphered in the legends of panels (c and d) (color online)

Также видна типичная реакция на когнитивную нагрузку, выражающаяся в снижении мощности осцилляций СМКП ЭЭГ относительно этапов R0, R1, R2, причем, как правило, для

ментального арифметического теста (S1) этот эффект более выражен, чем для теста Струпа (S0). Отличия в спектральной плотности мощности между этапами R0–R2 и этапами с ко-



гнитивной нагрузкой S0, S1 для разработанного устройства более выражены, чем для серийного устройства. Это можно объяснить лучшими характеристиками аналогового тракта нашего устройства.

Авторами статьи рассчитаны значения чувствительности и специфичности диагностики состояния стресса для данных, полученных с серийного прибора и разработанного регистратора. Истинно положительным результатом считалось

диагностирование перехода из состояния покоя в состояние когнитивного стресса (уменьшение суммарной спектральной мощности в интересующей полосе частот), а истинно отрицательным результатом – переход из когнитивного стресса в состояние покоя (увеличение суммарной спектральной мощности). В таблице приведены результаты тестирования для каждого из 8 каналов ЭЭГ. Оба прибора показали близкие диагностические способности.

Значения чувствительности и специфичности, полученные в ходе эксперимента для двух приборов

Table. Sensitivity and specificity values obtained from experiment for two devices

| Канал/ Channel | Энцефалан-ЭЭГР-19/26/ Encephalan-EEGR-19/26 | | Разработанный регистратор/ Developed recorder | |
|-------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| | Чувствительность/ Sensitivity | Специфичность/ Specificity | Чувствительность/ Sensitivity | Специфичность/ Specificity |
| O1 | 0.33 | 0.50 | 0.66 | 0.66 |
| O2 | 0.83 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| P3 | 0.66 | 0.83 | 1.00 | 1.00 |
| P4 | 1.00 | 1.00 | 0.50 | 0.83 |
| C3 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 1.00 |
| C4 | 0.66 | 1.00 | 0.66 | 0.83 |
| F3 | 0.83 | 1.00 | 0.83 | 1.00 |
| F4 | 1.00 | 1.00 | 0.83 | 0.83 |

Обсуждение

Разработанный аппаратно-программный комплекс может быть использован для диагностики психофизиологического состояния человека в ходе выполнения когнитивных задач. Оценка психофизиологического состояния может быть использована для исследования состояния школьников и студентов в процессе обучения, а также корректировки учебного процесса [27]. Другой сферой применения разработанного аппаратно-программного комплекса может стать отслеживание психофизиологического состояния работника в течение рабочего дня для повышения его работоспособности [28]. Своевременно сделанный перерыв или смена трудовой деятельности могут повысить трудоспособность работника. Однако предложенная методика оценки состояния человека обладает малой специфичностью, поскольку изменение суммарной спектральной мощности колебаний в предложенном диапазоне частот может быть вызвано не только изменением психофизиологического состояния, но и другими причинами, например сменой физической активности. Повысить специфичность методики

можно исключением из анализа эпох физической активности субъекта, например с помощью применения акселерометрического датчика.

Из таблицы можно сделать вывод, что оптимальными отведениями для оценки психофизиологического состояния человека по единственному каналу сигнала ЭЭГ являются отведения F3 и F4, показавшие лучшие результаты чувствительности и специфичности для обоих приборов. Также выбор этих отведений может позволить изготовить удобное для повседневного использования крепление электродов в виде ободка на голову, состоящего из 4 электродов (F3 и F4, а также A1 и A2, располагающихся на височной части головы). Применение предложенной методики к двум каналам позволит повысить специфичность методики.

Предложенная методика может быть реализована в виде программного обеспечения микроконтроллера, входящего в состав разработанного цифрового регистратора, что позволит создать автономный прибор для диагностики психофизиологического состояния человека. Измерение суммарной спектральной мощности сигнала в скользящем окне позволит диагностиро-



вать психофизиологическое состояние человека в реальном времени, однако подбор параметров и оптимизация методики для работы в реальном времени требует проведения дополнительных исследований.

К ограничениям исследования относится тот факт, что манипуляции с установкой электродов и датчиков на добровольца и само нахождение его в условиях лаборатории может влиять на его психофизиологическое состояние. Хотя в работе анализировались относительные значения индексов, учет указанных факторов важен и требует проведения отдельного исследования, в том числе с использованием анкетирования. Кроме того, в работе не рассматриваются половозрастные особенности экспериментальной выборки, которые могут влиять на результаты исследования и влияние информированности добровольцев о целях и дизайне исследования на результат. Анализировалась однородная группа, характеристики которой соответствуют характеристикам экспериментальной выборки, использованной в работе [14], так как некоторые результаты, полученные в указанной работе, используются авторами в данном исследовании. В дальнейшем планируется расширить экспериментальную выборку и изучить влияние половозрастных особенностей групп добровольцев и факт информированности их о целях исследования на результаты.

Заключение

Предложена методика диагностики состояния стресса человека по сигналам ЭЭГ по изменению суммарной спектральной мощности сигнала в диапазоне от 0.05 до 0.4 Гц. Разработан цифровой 8-канальный регистратор сигналов ЭЭГ с полосой пропускания 0.01–100 Гц, настраиваемой архитектурой каналов и настраиваемой частотой дискретизации, способный реализовывать предложенную методику для диагностики стресса. Проведено сравнение диагностических способностей разработанного регистратора и серийного аналога. Разработанный регистратор показал близкую к серийному аналогу диагностическую способность. Разработанная методика реализована в виде программного обеспечения для определения стресса. Продемонстрирована ее работоспособность для диагностики изменения психофизиологического состояния человека даже по единственному каналу ЭЭГ лобного или теменного отведения.

Список литературы

1. Ильин Е. П. Теория функциональных систем в физиологии и психологии. М. : Наука, 1978. 383 с.
2. Левитов Н. Д. О психических состояниях человека. М. : Просвещение, 1964. 360 с.
3. Hebb D. O. Drives and the C. N. S. (conceptual nervous system) // *Psychological Review*. 1955. Vol. 62, iss. 4. P. 243–254. <https://doi.org/10.1037/h0041823>
4. Giannakakis G., Grigoriadis D., Giannakaki K., Simantiraki O., Roniotis A., Tsiknakis M. Review on psychological stress detection using biosignals // *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2022. Vol. 13, iss. 1. P. 440–460. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2927337>
5. Kirschbaum C., Hellhammer D. H. Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: recent developments and applications // *Psychoneuroendocrinology*. 1994. Vol. 19, iss. 4. P. 313–333. [https://doi.org/10.1016/0306-4530\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0306-4530(94)90013-2)
6. Hanrahan K., McCarthy A. M., Kleiber C., Lutgendorf S., Tsalikian E. Strategies for salivary cortisol collection and analysis in research with children // *Appl. Nurs. Res.* 2006. Vol. 19, iss. 2. P. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.apnr.2006.02.001>
7. Engert V., Vogel S., Efanov S. I., Duchesne A., Corbo V., Ali N., Pruessner J. C. Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress // *Psychoneuroendocrinology*. 2011. Vol. 36, iss. 9. P. 1294–1302. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.02.018>
8. Puterman E., O'Donovan A., Adler N. E., Tomiyama A. J., Kemeny M., Wolkowitz O. M., Epel E. Physical activity moderates effects of stressor-induced rumination on cortisol reactivity // *Psychosom. Med.* 2011. Vol. 73, iss. 7. P. 604–611. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e318229e1e0>
9. Al-shargie F. M., Tang T. B., Babruddin N., Kiguchi M. Mental stress quantification using EEG signals // *International Conference for Innovation in Biomedical Engineering and Life Sciences*. 2016. Vol. 56. P. 15–19.
10. Schleifer L. M., Spalding T. W., Kerick S. E., Cram J. R., Ley R., Hatfield B. D. Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work // *Psychophysiology*. 2008. Vol. 45, iss. 3. P. 356–365. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00645.x>
11. Dikeçligil G. N., Mujica-Parodi L. R. Ambulatory and challenge-associated heart rate variability measures predict cardiac responses to real-world acute emotional stress // *Biol. Psychiatry*. 2010. Vol. 67, iss. 12. P. 1185–1190. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.02.001>
12. Carroll D., Phillips A. C., Der G., Hunt K., Benzeval M. Blood pressure reactions to acute mental stress and future blood pressure status: Data from the 12-year follow-up of the West of Scotland Study // *Psychosom. Med.* 2011. Vol. 73, iss. 9. P. 737–742. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3182359808>
13. Setz C., Arnrich B., Schumm J., La Marca R., Tröster G., Ehlert U. Discriminating Stress From Cognitive Load



- Using a Wearable EDA Device // Transactions on Information Technology in Biomedicine. 2010. Vol. 14, iss. 2. P. 410–417. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2036164>
14. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Ishbulatov Y. 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 // Appl. Sci. 2023. Vol. 13, iss. 14. Article number 8390. <https://doi.org/10.3390/app13148390>
15. Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Ishbulatov Yu. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Biomarkers of the psychophysiological state during the cognitive tasks estimated from the signals of the brain, cardiovascular and respiratory systems // Eur. Phys. J. 2023. Spec. Top. 232. P. 625–633. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00734-z>
16. Everly G. S., Lating J. M. The Anatomy and Physiology of the Human Stress Response // A Clinical Guide to the Treatment of the Human Stress Response. Springer, 2013. P. 17–51.
17. Aladjalova N. A. Infra-Slow Rhythmic Oscillations of The Steady Potential of the Cerebral Cortex // Nature. 1957. Vol. 179. P. 957–959. <https://doi.org/10.1038/179957a0>
18. Галимов Н. М., Вильданов Э. Р., Хидиятов И. И., Кальметьев А. Х., Султанов А. Ф., Валиуллин Р. Ч. Сверхмедленные физиологические процессы головного мозга человека и животных в экспериментальных клинических исследованиях // Медицинский вестник Башкортостана. 2009. Т. 4, вып. 3. С. 63–69.
19. Lorincz M. L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S. W. ATP-Dependent Infra-Slow (<0.1 Hz) Oscillations in Thalamic Networks // PLoS ONE. 2009. Vol. 4, iss. 2. Article number e4447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004447>
20. Knyazev G. G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2012. Vol. 36, iss. 1. P. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
21. Lambertz M., Langhorst P. Simultaneous changes of rhythmic organization in brainstem neurons, respiration, cardiovascular system and EEG between 0.05 Hz and 0.5 Hz // Journal of the Autonomic Nervous System. 1998. Vol. 68. P. 58–77. [https://doi.org/10.1016/s0165-1838\(97\)00126-4](https://doi.org/10.1016/s0165-1838(97)00126-4)
22. Vandenhouten R., Lambertz M., Langhorst P., Grebe R. Nonstationary Time-Series Analysis Applied to Investigation of Brainstem System Dynamics // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2000. Vol. 47, iss. 6. P. 729–737. <https://doi.org/10.1109/10.844220>
23. Ahn J. W., Ku Y., Kim H. C. A Novel Wearable EEG and ECG Recording System for Stress Assessment // Sensors. 2019. Vol. 19, iss. 9. <https://doi.org/10.3390/s19091991>
24. Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions // Journal of Experimental Psychology. 1935. Vol. 18, iss. 6. P. 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
25. Schneider G. M., Jacobs D. W., Gevirtz R. N., O'Connor D. T. Cardiovascular haemodynamic response to repeated mental stress in normotensive subjects at genetic risk of hypertension: Evidence of enhanced reactivity, blunted adaptation, and delayed recovery // Hum. J. Hypertens. 2003. Vol. 17. P. 829–840. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1001624>
26. Электронцефалограф-регистратор «Энцефалан-ЭЭГР-19 / 26». URL: <http://medicom-mtd.com/html/Products/eegr-main.html> (дата обращения: 11.10.2023).
27. Максимова М. В., Этуев Х. Х. Опыт применения ЭЭГ в образовании: анализ зарубежных исследований // Отечественная и зарубежная педагогика. 2023. Т. 1, № 2 (91). С. 169–185. <https://doi.org/10.24412/2224-0772-2023-91-169-185>
28. Бубнова А. Е. Комплексное использование нейрофизиологических и субъективных критериев развития критического уровня утомления при физиологическом сопровождении операторов МЧС // Журн. мед.-биол. исследований. 2020. Т. 8, № 1. С. 5–13. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2020.8.1.5>

References

1. И'ин Е. П. Теория функциональных систем в физиологии и психологии [Theory of functional systems in physiology and psychology]. Moscow, Nauka, 1978. 383 p. (in Russian).
2. Levitov N. D. О психических состояниях человека [About human mental states]. Moscow, Prosveshchenie, 1964. 360 p. (in Russian).
3. Hebb D. O. Drives and the C. N. S. (conceptual nervous system). *Psychological Review*, 1955, vol. 62, iss. 4, pp. 243–254. <https://doi.org/10.1037/h0041823>
4. Giannakakis G., Grigoriadis D., Giannakaki K., Simantiraki O., Roniotis A., Tsiknakis M. Review on psychological stress detection using biosignals. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 440–460. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2927337>
5. Kirschbaum C., Hellhammer D. H. Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: Recent developments and applications. *Psychoneuroendocrinology*, 1994, vol. 19, iss. 4, pp. 313–333. [https://doi.org/10.1016/0306-4530\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0306-4530(94)90013-2)
6. Hanrahan K., McCarthy A. M., Kleiber C., Lutgen-dorf S., Tsalikian E. Strategies for salivary cortisol collection and analysis in research with children. *Appl. Nurs. Res.*, 2006, vol. 19, iss. 2, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.apnr.2006.02.001>
7. Engert V., Vogel S., Efanov S. I., Duchesne A., Corbo V., Ali N., Pruessner J. C. Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology*, 2011, vol. 36, iss. 9, pp. 1294–1302. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.02.018>
8. Puterman E., O'Donovan A., Adler N. E., Tomiyama A. J., Kemeny M., Wolkowitz O. M., Epel E. Physical activity moderates effects of stressor-induced rumination on cortisol reactivity. *Psychosom. Med.*, 2011, vol. 73, iss. 7, pp. 604–611. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e318229e1e0>



9. Al-shargie F. M., Tang T. B., Babruddin N., Kiguchi M. Mental stress quantification using EEG signals. *International Conference for Innovation in Biomedical Engineering and Life Sciences*, 2016, vol. 56, pp. 15–19.
10. Schleifer L. M., Spalding T. W., Kerick S. E., Cram J. R., Ley R., Hatfield B. D. Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work. *Psychophysiology*, 2008, vol. 45, iss. 3, pp. 356–365. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00645.x>
11. Dikecligil G. N., Mujica-Parodi L. R. Ambulatory and challenge-associated heart rate variability measures predict cardiac responses to real-world acute emotional stress. *Biol. Psychiatry*, 2010, vol. 67, iss. 12, pp. 1185–1190. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.02.001>
12. Carroll D., Phillips A. C., Der G., Hunt K., Benzeval M. Blood pressure reactions to acute mental stress and future blood pressure status: Data from the 12-year follow-up of the West of Scotland Stud. *Psychosom. Med.*, 2011, vol. 73, iss. 9, pp. 737–742. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3182359808>
13. Setz C., Arnrich B., Schumm J., La Marca R., Tröster G., Ehlert U. Discriminating Stress From Cognitive Load Using a Wearable EDA Device. *Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010, vol. 14, iss. 2, pp. 410–417. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2036164>
14. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Ishbulatov Y. 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. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, iss. 14, article no. 8390. <https://doi.org/10.3390/app13148390>
15. Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Ishbulatov Yu. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Biomarkers of the psychophysiological state during the cognitive tasks estimated from the signals of the brain, cardiovascular and respiratory systems. *Eur. Phys. J.*, 2023, Spec. Top. 232, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00734-z>
16. Everly G. S., Lating J. M. The Anatomy and Physiology of the Human Stress Response. *A Clinical Guide to the Treatment of the Human Stress Response*. Springer, 2013, pp. 17–51.
17. Aladjalova N. A. Infra-Slow Rhythmic Oscillations of The Steady Potential of the Cerebral Cortex. *Nature*, 1957, vol. 179, pp. 957–959. <https://doi.org/10.1038/179957a0>
18. Galimov N. M., Vil'danov E. R., Khidiatov I. I., Kal'met'ev A. Kh., Sultanov A. F., Valiullin R. Ch. Ultra-slow physiological processes of the human and animal brain in experimental clinical studies. *Meditinskii vestnik Bashkortostana* [Medical Bulletin of Bashkortostan], 2009, vol. 4, iss. 3, pp. 63–69 (in Russian).
19. Lorincz M. L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S. W. ATP-Dependent Infra-Slow (<0.1 Hz) Oscillations in Thalamic Networks. *PLoS ONE*, 2009, vol. 4, iss. 2, article no. e4447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004447>
20. Knyazev G. G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2012, vol. 36, iss. 1, pp. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
21. Lambertz M., Langhorst P. Simultaneous changes of rhythmic organization in brainstem neurons, respiration, cardiovascular system and EEG between 0.05 Hz and 0.5 Hz. *Journal of the Autonomic Nervous System*, 1998, vol. 68, pp. 58–77. [https://doi.org/10.1016/s0165-1838\(97\)00126-4](https://doi.org/10.1016/s0165-1838(97)00126-4)
22. Vandenhouten R., Lambertz M., Langhorst P., Grebe R. Nonstationary Time-Series Analysis Applied to Investigation of Brainstem System Dynamics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2000, vol. 47, iss. 6, pp. 729–737. <https://doi.org/10.1109/10.844220>
23. Ahn J. W., Ku Y., Kim H. C. A Novel Wearable EEG and ECG Recording System for Stress Assessment. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 9. <https://doi.org/10.3390/s19091991>
24. Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 1935, vol. 18, iss. 6, pp. 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
25. Schneider G. M., Jacobs D. W., Gevirtz R. N., O'Connor D. T. Cardiovascular haemodynamic response to repeated mental stress in normotensive subjects at genetic risk of hypertension: Evidence of enhanced reactivity, blunted adaptation, and delayed recovery. *Hum. J. Hypertens*, 2003, vol. 17, pp. 829–840. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1001624>
26. *Elektroentsefalograf-registrator "Entsefalan-EEGR-19/26"* (Electroencephalograph-recorder "Encephalan-EEGR-19/26"). Available at: <http://medicom-mtd.com/html/Products/eegr-main.html> (accessed October 11, 2023) (in Russian).
27. Maksimova M. V., Etuev Kh. Kh. Experience of using EEG in education: Analysis of foreign studies. *Otechestvennaia i zarubezhnaia pedagogika* [Domestic and Foreign Pedagogy], 2023, vol. 1, no. 2 (91), pp. 169–185. <https://doi.org/10.24412/2224-0772-2023-91-169-185> (in Russian).
28. Bubnova A. E. Integrated use of neurophysiological and subjective criteria for the development of a critical level of fatigue with physiological support of Emergency Situations Ministry operators. *Zhurn. med.-biol. issledovani* [Journal Med.-Biol. Research], 2020, vol. 8, no. 1, pp. 5–13. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2020.8.1.5> (in Russian).

Поступила в редакцию 19.10.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 20.11.2023
 The article was submitted 19.10.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 20.11.2023