



УДК 004.042
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-26-39>

Оригинальная статья
Original Paper

Оценка состояния умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения

А. В. Сидоренко[✉], Н. А. Солодухо

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь
[✉]E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Аннотация

Цели. Решается задача определения состояния умственной усталости оператора при передаче и обработке информации в условиях электромагнитных шумовых излучений. Актуальность задачи связана с необходимостью обработки и передачи информации конфиденциального характера оператором, находящимся в ограниченном пространстве мобильной технической системы.

Методы. Используются методы теории спектрального анализа экспериментально полученных данных.

Результаты. Результаты представленных экспериментальных исследований получены на основе обработки и анализа электроэнцефалограмм, зарегистрированных в стандартных отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. Проанализированы спектральные плотности мощностей дельта-, альфа-, бета-, гамма-ритмов указанных отведений электроэнцефалограмм оператора при воздействии электромагнитных шумовых излучений.

Заключение. Наличие умственной усталости оператора в условиях электромагнитных излучений основывается на сравнительном анализе полученных результатов и описанных в научной литературе данных, связанных с возникновением хронической умственной усталости; усталости, вызванной выполнением симуляционных заданий военными, и усталости, вызванной выполнением теста RVP.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, генератор шума, электроэнцефалограмма, умственная усталость, спектральная плотность мощности

Для цитирования. Сидоренко, А. В. Оценка состояния умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения / А. В. Сидоренко, Н. А. Солодухо // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 26–39. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-26-39>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 01.10.2021
Подписана в печать | Accepted 11.11.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Assessment of the mental fatigue state of an operator influenced by electromagnetic noise radiation

Alevtina V. Sidorenko[✉], Mikita A. Saladukha

Belarusian State University,
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220030, Belarus
[✉]E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Abstract

Objectives. The problem of determining the mental fatigue of the operator, which is processing the confidential information under the influence of electromagnetic noise radiation, is solved. The relevance of the problem is associated with the need to process the confidential information by the operator located in the limited space of a mobile technical system.

Methods. The methods of spectral analysis theory of the results, received in the process of experimental studies the electroencephalograms, are used.

Results. The results of experimental studies were obtained based on the processing and analysis of electroencephalograms recorded in standard leads Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. The following quantitative parameters have been analyzed: power spectral density of delta-, theta-, alpha-, beta-, gamma-rhythms under the influence of electromagnetic noise radiation.

Conclusion. The presence of mental fatigue of the operator is based on a comparative analysis of the obtained results and the data described in the scientific literature related to the occurrence of chronic mental fatigue; the fatigue caused by the military performing simulation tasks; mental fatigue caused by performing an RVP test.

Keywords: electromagnetic radiation, noise generator, electroencephalogram, mental fatigue, power spectral density

For citation. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. *Assessment of the mental fatigue state of an operator in-fluenced by electromagnetic noise radiation*. *Informatika [Informatics]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 26–39 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-26-39>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Умственная усталость – это временная неспособность человека выполнять когнитивные действия. На фоне умственной усталости могут возникать трудности с концентрацией внимания и решением поставленной задачи.

В современном мире человек часто сталкивается с воздействием неионизирующих электромагнитных излучений, генерируемых научным, лабораторным, промышленным или бытовым оборудованием. Интерпретация влияния электромагнитного излучения на центральную нервную систему человека в научной литературе [1, 2] неоднозначна. Предположительно, одним из состояний центральной нервной системы, вызываемых воздействием электромагнитного излучения, и является умственная усталость.

Известно, что для защиты информации от несанкционированного доступа по каналам электромагнитных излучений и наводок можно применять пассивные и активные методы. При использовании в качестве активных методов защиты информации генераторов электромагнитного шума важно оценить влияние электромагнитного шумового излучения на оператора мобильных систем, находящегося в ограниченном пространстве.

Исследование воздействия электромагнитного шумового излучения на центральную нервную систему проводилось в работах [3–5]. При наличии электромагнитного шумового излучения наблюдается активизация процессов в мозге [5], увеличивается когнитивная нагрузка, возникают скрытая тревога [3] и стресс [4]. Подробное исследование воздействия такого излучения на состояние умственной усталости оператора ранее не проводилось.

Целью настоящей работы является определение наличия умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения на основе полученных при обработке количественных параметров электроэнцефалограмм, которые отражают деятельность его центральной нервной системы.

В процессе проведения исследований с помощью приборной регистрации были рассчитаны спектральные плотности мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-, гамма-ритмов электроэнцефалограмм в передней, височной, теменной, центральной, затылочной и центрально-теменной областях головы, а также по всей поверхности головы. При оценке спектральной плотности мощности в отдельных областях головы использовалось усреднение спектральных плотностей мощности электроэнцефалограмм соответствующих отведений.

Методика проведения исследований. Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по международной системе 10–20 с использованием электроэнцефалографа «Нейрокартограф» фирмы МБН, погрешность измерения составила 5 %. Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной авторами информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [6]. Объектом исследований являлись электроэнцефалограммы отведений Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6 в следующих областях: по всей поверхности головы (все вышеуказанные отведения), в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8 и отведения F3 и F4), височной области (отведения T3, T4, T5, T6), в затылочной области (отведения O1, O2), центрально-теменной области (отведения C3, C4, P3, P4), центральной области (отведения C3 и C4) [7, 8]. Электроэнцефалограммы обрабатывались в режимах фона и наличия генератора электромагнитного шумового излучения. В режиме фона использовались электроэнцефалограммы оператора без излучения. Спектральная плотность мощности ритмов головного мозга рассчитывалась с помощью быстрого преобразования Фурье. Анализируемые диапазоны включали альфа-ритм (8–12 Гц), бета-ритм (12–20 Гц), тета-ритм (4–8 Гц), дельта-ритм (0–4 Гц) и гамма-ритм (20–40 Гц). При оценке спектральной плотности мощности в какой-либо области головы применялось усреднение спектральных плотностей мощности электроэнцефалограмм отведений, связанных с этой областью. В качестве генератора электромагнитного шума был использован генератор на транзисторах мощностью 30 мВт с частотным диапазоном в области 5 ГГц.

Результаты исследований и их обсуждение. Рассмотрим вариации спектральной плотности мощности альфа-, бета-, тета-, дельта-, гамма-ритмов электроэнцефалограмм во всех анализируемых отведениях.

Спектральная плотность мощности альфа-ритма относительно фоновое значение при наличии излучения генератора шума изменялась следующим образом (рис. 1): в отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности альфа-ритма более чем в 3,5 раза, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности альфа-ритма увеличилась на 21 %, в отведении F3 значение спектральной плотности мощности альфа-ритма повысилось в 3,1 раза, в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности альфа-ритма составил 3,4 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении C3 наблюдалось возрастание значения спектральной плотности мощности альфа-ритма в 3,3 раза, в отведении C4 спектральная плотность мощности альфа-ритма выросла на 18 %, в отведении P3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности альфа-ритма почти в 3,4 раза, в отведении P4 спектральная плотность мощности альфа-ритма снизилась на 23,2 %, в отведении O1 наблюдался рост значения спектральной плотности мощности альфа-ритма в 3,6 раза, в отведении O2 спектральная плотность мощности альфа-ритма уменьшилась на 42,3 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности альфа-ритма возросло в 7,1 раза, в отведении F8 спектральная плотность мощности альфа-ритма увеличилась на 0,3 % (изменения оказались меньше погрешности метода), в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности альфа-ритма в 7,1 раза, в отведении T4 прирост спектральной плотности мощности альфа-ритма составил 43,8 %, в отведении T5 значение спектральной плотности мощности альфа-ритма увеличилось почти в 7,9 раза, в отведении T6 спектральная плотность мощности альфа-ритма выросла на 15,7 %.

Таким образом, при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности альфа-ритма возрастает относительно фона во всех отведениях, кроме P4 и O2, в которых она падает. В отведениях F4 и F8 изменения не превысили погрешность.

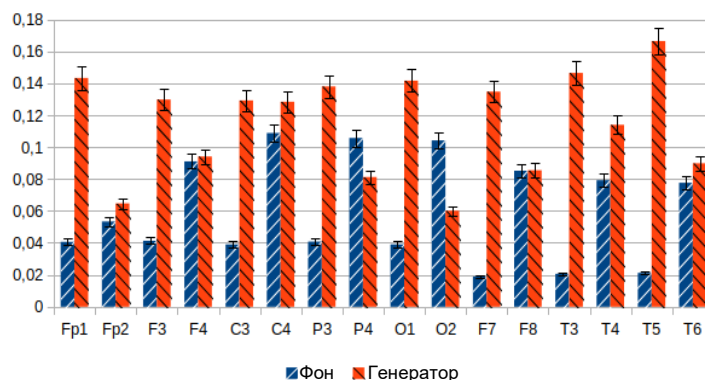


Рис. 1. Диаграммы спектральной плотности мощности альфа-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 1. Diagrams of alpha-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Изменения спектральной плотности мощности бета-ритма относительно фонового значения при наличии излучения генератора шума сводились к следующему (рис. 2): в отведении Fp1 наблюдалось увеличение значения спектральной плотности мощности бета-ритма более чем в пять раз, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности бета-ритма увеличилась на 56,1 %, в отведении F3 значение спектральной плотности мощности бета-ритма повысилось в 4,6 раза, в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности бета-ритма составил 37,3 %, в отведении C3 наблюдалось возрастание значения спектральной плотности мощности бета-ритма в 4,5 раза, в отведении C4 спектральная плотность мощности бета-ритма выросла на 49,7 %, в отведении P3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности бета-ритма в 3,5 раза, в отведении P4 спектральная плотность мощности бета-ритма снизилась на 16,7 %, в отведении O1 наблюдался рост значения спектральной плотности мощности бета-ритма почти в 2,2 раза, в отведении O2 спектральная плотность мощности бета-ритма уменьшилась на 55 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности бета-ритма возросло в 8,8 раза, в отведении F8 спектральная плотность мощности бета-ритма увеличилась на 15,9 %, в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности бета-ритма почти в 7,5 раза, в отведении T4 прирост спектральной плотности мощности бета-ритма составил 41 %, в отведении T5 значение спектральной плотности мощности бета-ритма повысилось в четыре раза, в отведении T6 наблюдалось падение спектральной плотности мощности бета-ритма на 7,2 %.

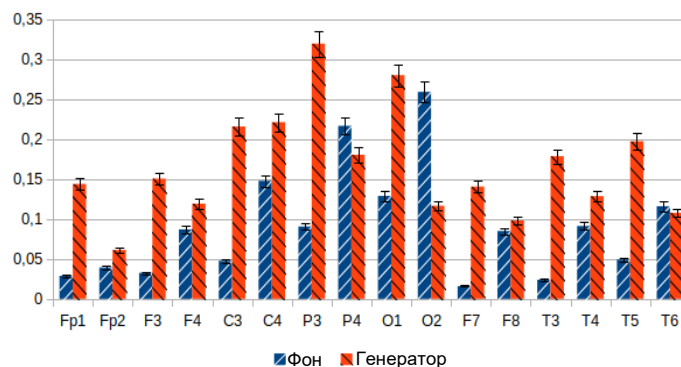


Рис. 2. Диаграммы спектральной плотности мощности бета-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 2. Diagrams of beta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Итак, при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности бета-ритма возрастает относительно фона во всех отведениях, кроме P4, O2 и T6, в которых она падает.

Спектральная плотность мощности тета-ритма относительно фонового значения при наличии излучения генератора шума изменялась следующим образом (рис. 3): в отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности тета-ритма более чем в 2,2 раза, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности тета-ритма увеличилась на 20,8 %, в отведении F3 значение спектральной плотности мощности тета-ритма повысилось почти в 2,2 раза, в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности тета-ритма составил 2,5 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении C3 наблюдалось возрастание значения спектральной плотности мощности тета-ритма почти в 2,2 раза, в отведении C4 снижение спектральной плотности мощности тета-ритма составило 18,2 %, в отведении P3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности тета-ритма на 77,2 %, в отведении P4 спектральная плотность мощности тета-ритма снизилась на 4,2 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении O1 наблюдался рост значения спектральной плотности мощности тета-ритма почти в 2,1 раза, в отведении O2 спектральная плотность мощности тета-ритма уменьшилась на 8,8 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности тета-ритма возросло почти в 3,1 раза, в отведении F8 наблюдалось снижение спектральной плотности мощности тета-ритма на 14,2 %, в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности тета-ритма в 2,5 раза, в отведении T4 было выявлено снижение спектральной плотности мощности тета-ритма на 10,5 %, в отведении T5 значение спектральной плотности мощности тета-ритма повысилось почти в 2,7 раза, в отведении T6 спектральная плотность мощности тета-ритма снизилась на 1,4 %.

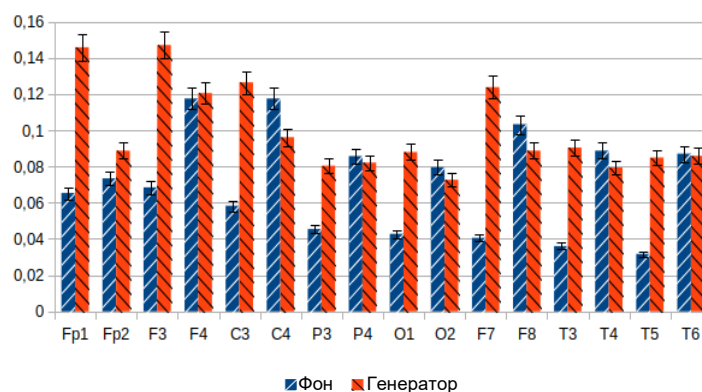


Рис. 3. Диаграммы спектральной плотности мощности тета-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 3. Diagrams of theta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Таким образом, при наличии излучения генератора шума в отведениях левого полушария отмечается возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма, а в отведениях правого полушария – уменьшение. Исключением из этой тенденции являются отведения правого полушария Fp2 и F4, в них наблюдается рост спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии излучения генератора шума.

Спектральная плотность мощности дельта-ритма электроэнцефалограмм оператора относительно фонового значения при наличии излучения генератора шума изменялась следующим образом (рис. 4): в отведении Fp1 снижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 47,1 %, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности дельта-ритма уменьшилась на 8,3 %, в отведении F3 наблюдалось понижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма на 47 %, в отведении F4 спектральная плотность мощности

дельта-ритма снизилась на 10,3 %, в отведении С3 падение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 52,1 %, в отведении С4 спектральная плотность мощности дельта-ритма упала на 19,5 %, в отведении Р3 наблюдалось падение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма на 56,1 %, в отведении Р4 прирост спектральной плотности мощности дельта-ритма составил 9,8 %, в отведении О1 уменьшение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 50 %, в отведении О2 спектральная плотность мощности дельта-ритма увеличилась на 38,5 %, в отведении F7 наблюдалось снижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма на 50,4 %, в отведении F8 снижение спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 2,2 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении Т3 значение спектральной плотности мощности дельта-ритма уменьшилось на 50,5 %, в отведении Т4 наблюдалось снижение спектральной плотности мощности дельта-ритма на 12,4 %, в отведении Т5 значение спектральной плотности мощности дельта-ритма снизилось почти на 50,7 %, в отведении Т6 падение спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 2,7 %.

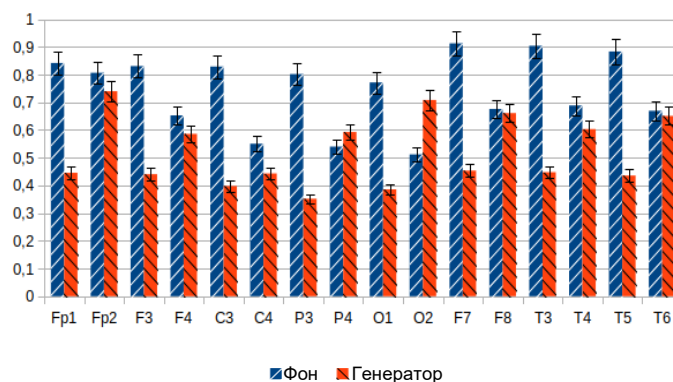


Рис. 4. Диаграммы спектральной плотности мощности дельта-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 4. Diagrams of delta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Таким образом, при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности дельта-ритма падает относительно фона во всех отведениях, кроме Р4, О2, где наблюдается ее рост.

Вариации спектральной плотности мощности гамма-ритма относительно фоновых значений при наличии излучения генератора шума сводились к следующему (рис. 5): в отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности гамма-ритма более чем в 5,1 раза, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности гамма-ритма увеличилась на 66,1 %, в отведении F3 значение повысилось почти в 4,9 раза, в отведении F4 прирост составил 54,9 %, в отведении С3 наблюдалось возрастание значения спектральной мощности гамма-ритма почти в пять раз, в отведении С4 спектральная плотность мощности гамма-ритма выросла на 47,2 %, в отведении Р3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности гамма-ритма почти в 5,2 раза, в отведении Р4 наблюдался прирост на 21,8 %, в отведении О1 произошел рост в 5,9 раза, в отведении О2 спектральная плотность мощности гамма-ритма уменьшилась на 7,2 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности гамма-ритма возросло в 12,6 раза, в отведении F8 спектральная плотность мощности гамма-ритма увеличилась на 31 %, в отведении Т3 наблюдался прирост в 8,8 раза, в отведении Т4 рост составил 43,1 %, в отведении Т5 значение спектральной плотности мощности гамма-ритма повысилось в 7,8 раза, в отведении Т6 спектральная плотность мощности гамма-ритма выросла на 31 %.

Можно сделать вывод, что при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности гамма-ритма возрастает относительно фона во всех исследуемых отведениях, кроме отведения О2, в котором она убывает.

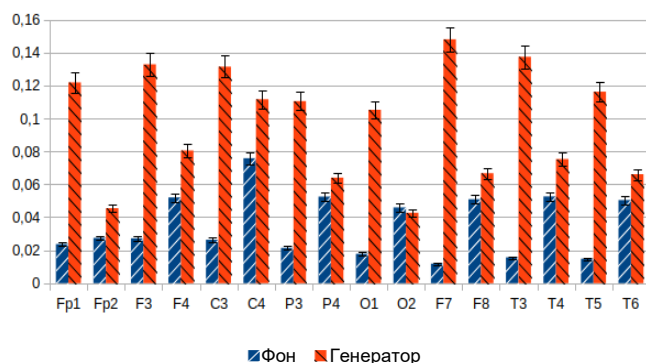


Рис. 5. Диаграммы спектральной плотности мощности гамма-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 5. Diagrams of gamma-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

В работе [9] показано изменение спектра энергии различных ритмов (дельта – 2–4 Гц, тета – 4–8 Гц, альфа1 – 8–10 Гц, альфа2 – 10–13 Гц, бета1 – 13–20 Гц, бета2 – 20–30 Гц) в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T5, T6 при наличии хронической усталости оператора. Спектр энергии ритмов при хронической усталости возрастает для всех анализируемых отведений, кроме бета2-ритма в отведении Fp1. Спектральная плотность мощности данного ритма не изменилась. Отметим, что тенденция изменения спектра энергии совпадает с тенденцией изменения спектра плотности мощности.

Исследованные в процессе анализа электроэнцефалограмм ритмы при наличии электромагнитного шумового излучения совпадают с ритмами, рассматриваемыми при хронической усталости оператора.

В большинстве отведений спектральные плотности мощности альфа-, бета-, тета-, гамма-ритмов возрастают, а спектральная плотность мощности дельта-ритма убывает. Полученные данные позволяют сделать предварительное заключение, что четыре параметра (спектральные плотности мощности альфа-, бета-, тета-, гамма-ритмов) подтверждают наличие усталости у оператора при излучении генератора шума, а изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма опровергают, что оператор испытывает усталость (см. рис. 1–5 и данные работы [9]).

Спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по всей поверхности головы, увеличилась на 40,2 % относительно фона при наличии электромагнитного шумового излучения (рис. 6, а). Это может быть следствием умственной усталости (рис. 6, б), определенной методами многофакторного анализа и линейной алгебры в работе [10].

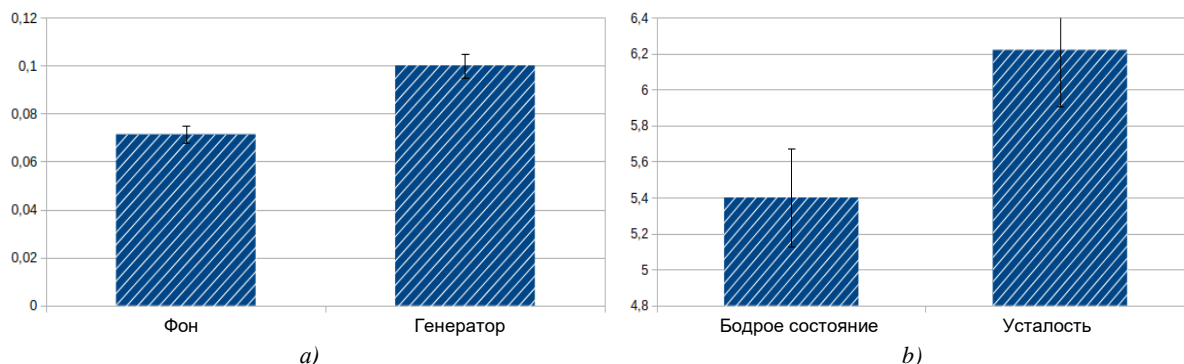


Рис. 6. Диаграммы спектральной плотности мощности тета-ритма электроэнцефалограмм по всей поверхности головы при наличии излучения генератора шума (а) и в состоянии умственной усталости (б) [10]

Fig. 6. Diagrams of theta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in whole head surface in presence of noise generator (a) and mental fatigue (b) [10]

В работе [11] представлены результаты изменений спектральной мощности тета-ритма в отведениях F3, F4, T3, T4, O1, O2 в результате умственной усталости, вызванной симуляцией военного задания. Военное задание заключалось в необходимости водить машину (осуществлять патрулирование) на симуляторе по плохой дороге либо бездорожью с уклоном дороги до 60°, одновременно избегая препятствий в виде мин и камней. Симуляция машины была реализована устройством LMV Lince simulator, установленным на платформу с шестью степенями свободы (URL: <https://www.simfor.net/en/military-vehicle-simulator/>). Система с высокой степенью достоверности симулировала легкое транспортное средство многоцелевого назначения, генерируя аудио- и видеосигналы, а также сигналы движения транспортного средства. Спектральная мощность тета-ритма в состоянии умственной нагрузки с помощью симуляции военного задания менялась относительно мощности до начала его выполнения следующим образом (рис. 7): в отведениях F3, F4, T3, O1 она росла (тенденция совпадает со случаем при наличии излучения генератора шума), в отведении T4 увеличивалась (тенденция противоположна со случаем при наличии излучения генератора шума), в отведении O2 падала (тенденция совпадает со случаем при наличии излучения генератора шума) (см. рис. 3 и 7). Полученные результаты позволяют сделать предварительное заключение о наличии умственной усталости у оператора при действии излучения генератора шума.

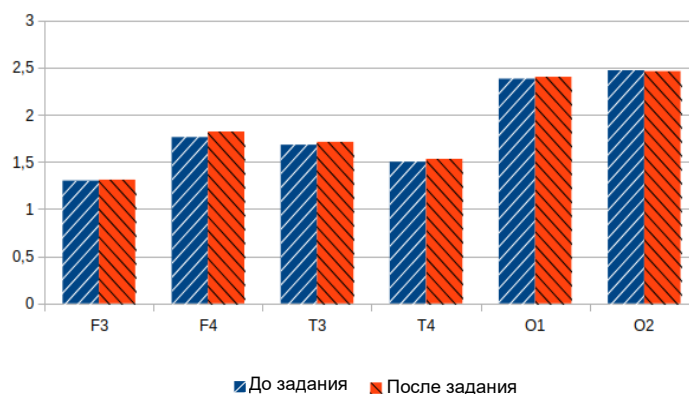


Рис. 7. Диаграммы спектральной мощности тета-ритма электроэнцефалограмм при выполнении симуляции военного задания [11]

Fig. 7. Diagrams of theta-rhythm spectral power of electroencephalograms in the result of combat mission simulation implementation [11]

В работе [12] исследовалось изменение мощности тета-ритма в отведении Fp1 электроэнцефалограмм у людей при умственной усталости, вызванной выполнением теста RVP (rapid visual information processing, быстрая обработка зрительной информации) в течение 10, 20 и 30 мин (рис. 8). Видно, что мощность тета-ритма при умственной усталости росла. При наличии излучения генератора электромагнитного шума спектральная плотность мощности тета-ритма в отведении Fp1 электроэнцефалограммы увеличилась в 2,2 раза относительно фона (см. рис. 3).

Сравнивая результаты, показанные на рис. 3 и 8, можно сделать вывод, что при наличии излучения генератора электромагнитного шума оператор испытывает усталость.

Значения спектральной плотности мощности по всей поверхности головы были получены усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов во всех 16 исследуемых отведениях: в передней области головы – в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8 (режим 1) и в отведениях F3 и F4 (режим 2); в центрально-теменной области головы – в отведениях C3, C4, P3, P4; в височной области головы – в отведениях T3, T4, T5, T6; в затылочной области головы – в отведениях O1 и O2.

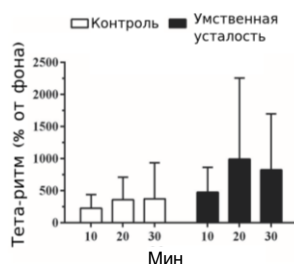


Рис. 8. Изменение мощности тета-ритма в отведении Fp1 при выполнении теста RVP в течение 10, 20 и 30 мин [12]

Fig. 8. Theta-rhythm power change in Fp1 lead during implementation of RVP test during 10, 20 and 30 minutes [12]

На рис. 9, а показано изменение спектральной плотности мощности тета-ритма в разных областях головы: по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2) – при наличии излучения генератора шума. По всей поверхности головы спектральная плотность мощности тета-ритма увеличилась на 40,2 %, в передней области – на 52,5 %, центрально-теменной области – на 25,5 %, височной области – на 39,8 %, затылочной области – на 31,1 %.

В работе [8] исследовалась хроническая усталость у врачей. Рассматривалось изменение относительного значения мощности тета-, альфа-, бета-ритмов у врачей во время отдыха и после рабочего дня. Усталость усиливалась еще больше при выполнении перед исследованием умственной задачи. Спектральная мощность измерялась по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fz, Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения Cz, Pz, C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2). Мощность тета-ритма в состоянии хронической усталости у врачей возрастала во всех рассматриваемых областях (рис. 9, b).

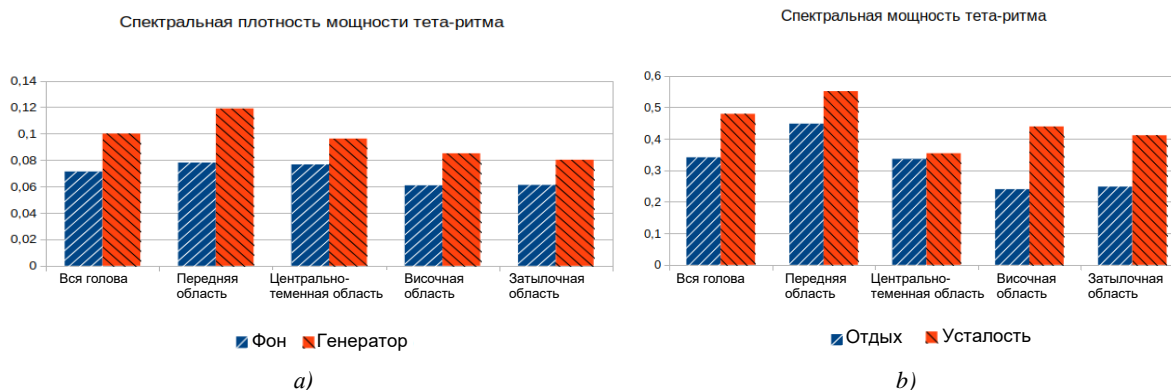


Рис. 9. Изменение спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии излучения генератора электромагнитного шума (а) и при наличии хронической умственной усталости (b) [7]

Fig. 9. Theta-rhythm power spectral density change in presence of radiation of electromagnetic noise generator (a) and in presence of chronic mental fatigue (b) [7]

На рис. 10, а показано изменение спектральной плотности мощности альфа-ритма в разных областях головы: по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2) – при наличии излучения генератора шума.

По всей поверхности головы спектральная плотность мощности альфа-ритма выросла относительно фона на 91,1 %, в передней области – на 97,4 %, центрально-теменной области – на 62 %, височной области – в 2,6 раза, затылочной области – на 40,9 %. При этом мощность альфа-ритма при умственной усталости падала во всех рассматриваемых областях (рис. 10, b).

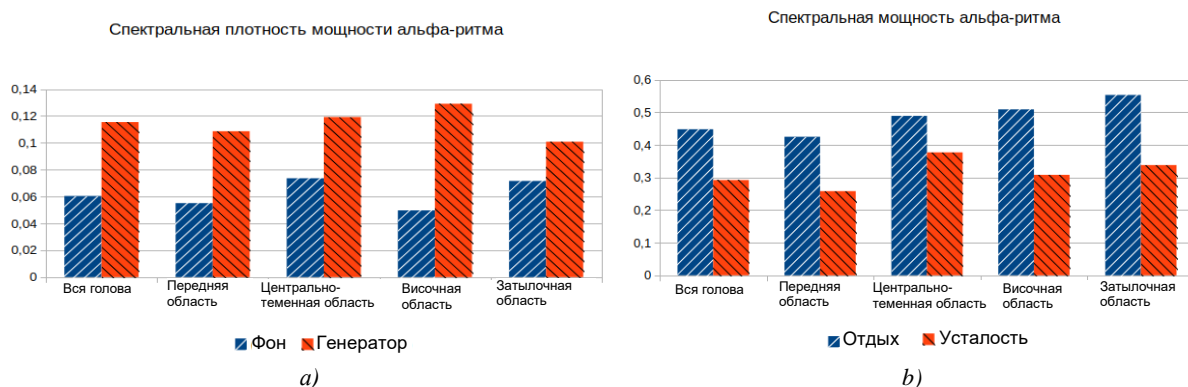


Рис. 10. Изменение спектральной плотности мощности альфа-ритма при наличии излучения генератора электромагнитного шума (a) и при наличии умственной усталости у врачей (b) [7]

Fig. 10. Alpha-rhythm power spectral density change in presence of radiation of electromagnetic noise generator (a) and in presence of mental fatigue of doctors (b) [7]

На рис. 11, a показано изменение спектральной плотности мощности бета-ритма в разных областях головы: по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2) – при наличии излучения генератора шума. Как показал анализ, по всей поверхности головы спектральная плотность мощности бета-ритма относительно фона выросла на 82,4 %, в передней области – в 2,5 раза, центрально-теменной области – на 86,5 %, височной области – в 2,2 раза, затылочной области – на 2,2 % (изменения не превысили погрешность). Мощность бета-ритма при хронической усталости выросла во всех исследуемых областях (рис. 11, b).

Таким образом, обобщая изменения спектральной плотности мощности в разных областях головы при наличии излучения генератора шума и данные работы [7], можно сделать вывод, что умственная усталость у оператора присутствует.

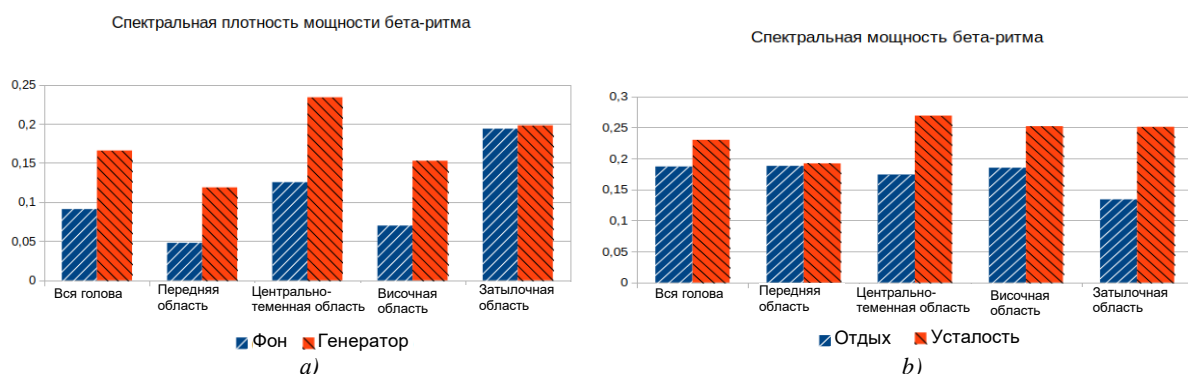


Рис. 11. Изменение спектральной плотности мощности бета-ритма при наличии излучения генератора электромагнитного шума (a) и при наличии умственной усталости у врачей (b) [7]

Fig. 11. Beta-rhythm power spectral density change in presence of radiation of electromagnetic noise generator (a) and in presence of mental fatigue in doctors (b) [7]

При наличии излучения генератора шума наблюдались следующие изменения относительно фона спектральной мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов в передней (отведения F3, F4) и центральной (отведения C3, C4) областях головы: уменьшение спектральной плотности мощности дельта-ритма на 30,8 % в передней области головы и на 39,1 % в центральной области (рис. 12, a), возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма на 43,9 % в передней области и на 26,6 % в центральной области (рис. 12, b), возрастание спектральной плотности мощности бета-ритма в 2,3 раза в передней области и в 2,2 раза в центральной области (рис. 12, c).

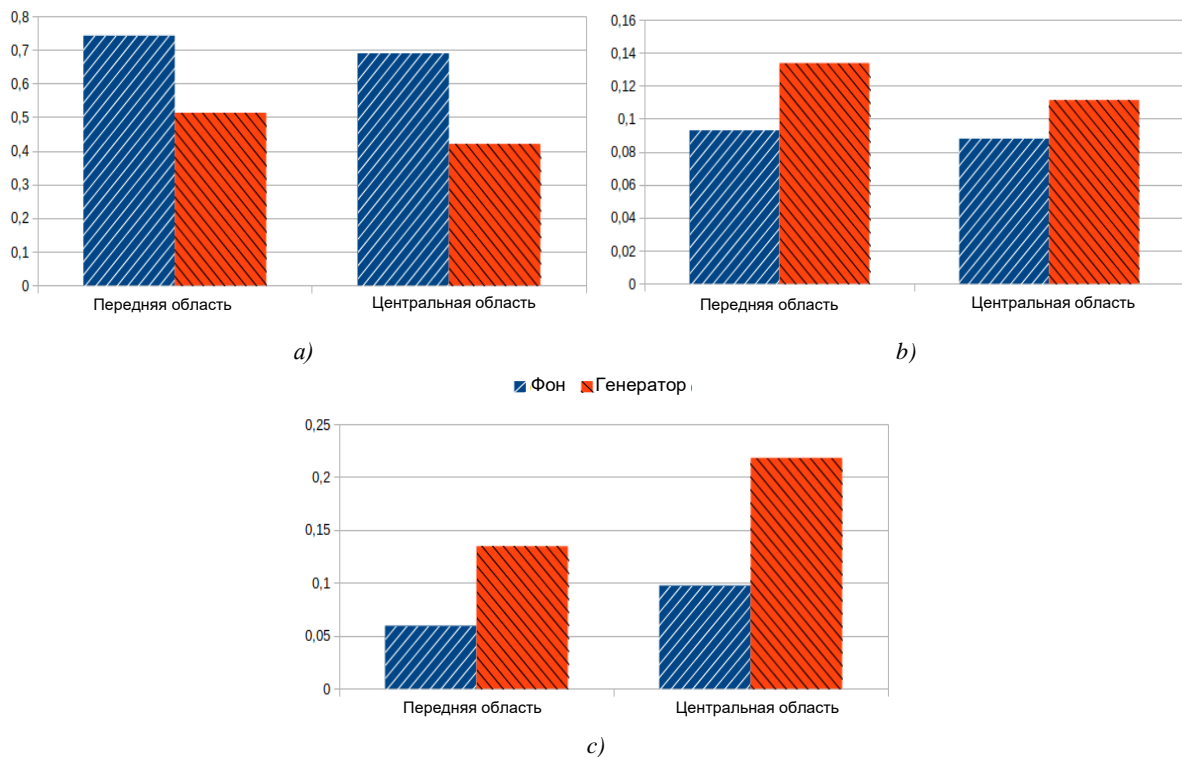


Рис. 12. Изменение спектральной плотности мощности дельта-ритма (a), тета-ритма (b), бета-ритма (c) при наличии излучения генератора электромагнитного шума

Fig. 12. Power spectral density change of delta-rhythm (a), theta-rhythm (b), beta-rhythm (c) in presence of radiation of electromagnetic noise

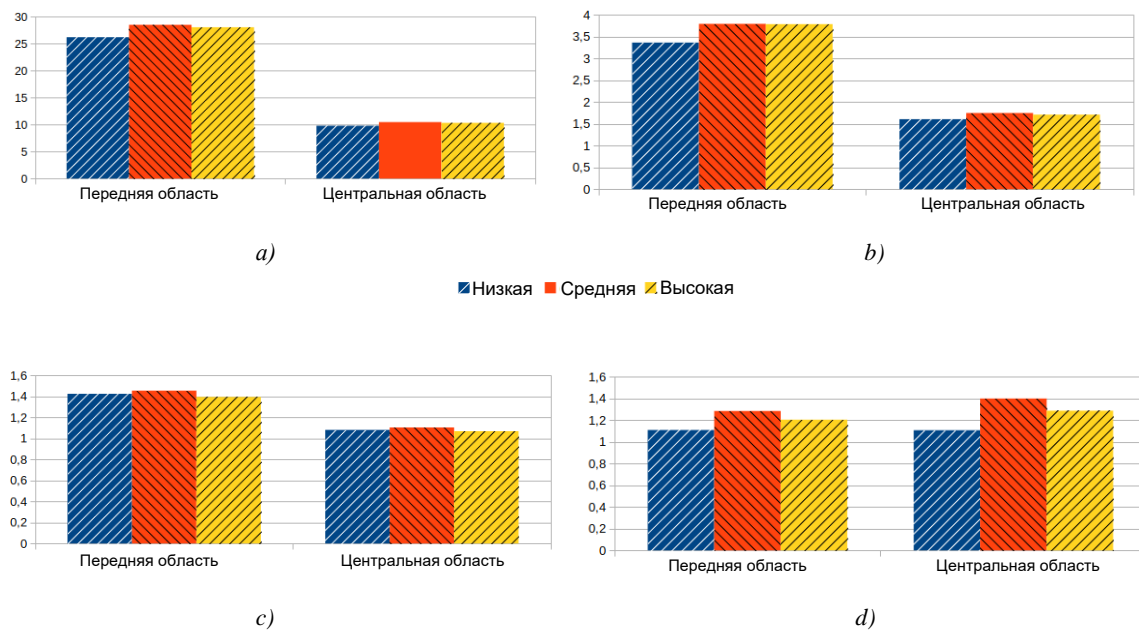


Рис. 13. Спектральная мощность дельта-ритма (a), тета-ритма (b), альфа-ритма (c), бета-ритма (d) в передней и центральной областях головы у пилотов вертолетов в симуляционных миссиях разной сложности [9]

Fig. 13. Spectral power of delta-rhythm (a), theta-rhythm (b), alpha-rhythm (c), beta-rhythm (d) in frontal and central head areas of helicopter pilots in simulation missions with various difficulties [9]

В работе [9] измерялось изменение мощности дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмов в передней (отведения F3 и F4) и центральной (отведения C3 и C4) областях головы у пилотов боевых вертолетов «Тигр» в симуляционных миссиях легкой, средней и большой сложности. Сложность задания определялась трудностью маневров при полете, а также наличием чрезвычайных ситуаций. Полеты низкой сложности не включали чрезвычайных ситуаций. Таким образом, можно отследить степень умственной усталости человека: в полетах низкой сложности она минимальна, а в полетах высокой сложности – максимальна (рис. 13).

При умственной усталости, обусловленной эмуляционными миссиями пилотов боевых вертолетов «Тигр», спектральная мощность дельта-, тета- и бета-ритмов в передней и центральной областях головы выросла [9]. Изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма (см. рис. 12, *a* и 13, *a*) опровергают умственную усталость оператора. Изменения спектральной плотности мощности тета-ритма (см. рис. 12, *b* и 13, *b*) и бета-ритма (см. рис. 12, *c* и 13, *d*) подтверждают умственную усталость оператора при наличии генератора электромагнитного шума. Анализируя рис. 12 и 13, можно сделать вывод, что оператор в условиях электромагнитного шумового излучения испытывает умственную усталость.

Закключение. Для определения наличия или отсутствия умственной усталости у оператора мобильной системы при действии электромагнитного шума проведен комплекс экспериментальных исследований электроэнцефалограмм отведений Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. Количественными параметрами, используемыми для оценки умственной усталости оператора, являлись спектральные плотности мощности тета-, дельта-, альфа-, бета- и гамма-ритмов. Параметры изменения спектральной плотности мощности альфа-, бета-, тета-, гамма-ритмов в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T5, T6 совпадают с параметрами, вызываемыми хронической усталостью [10], а параметры изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма не совпадают (см. рис. 1–5). Сравнивая параметры изменения спектральной плотности мощности тета-ритма в отведениях F3, F4, T3, T4, O1, O2 при наличии генератора электромагнитного шума и при умственной усталости, вызываемой выполнением симуляционного военного задания [12], авторы пришли к выводу, что эти параметры совпадают для пяти отведений и не совпадают для одного (см. рис. 3 и 7). Спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по всей поверхности головы, возросла при наличии излучения генератора шума, что совпадает с динамикой изменений при умственной усталости, определяемой методами многофакторного анализа и линейной алгебры (см. рис. 6, *a* и *b*). Спектральная плотность тета-ритма в отведении Fp1 увеличилась, что также говорит об умственной усталости (см. рис. 3 и 8). При исследовании изменений спектральной плотности мощности в разных областях головы (по всей поверхности, в передней области, центральной теменной области, височной и затылочной) оказалось, что изменения тета- и бета-ритмов подтверждают наличие умственной усталости, а изменение альфа-ритма – опровергает (см. рис. 9–11). При анализе изменений спектральной плотности мощности в передней и центральной областях головы отмечается, что вариации тета- и бета-ритмов подтверждают наличие умственной усталости, а вариации дельта-ритма – опровергают (см. рис. 12 и 13). Таким образом, предварительные экспериментальные исследования показывают, что при действии электромагнитного шумового излучения оператор мобильной системы находится в состоянии умственной усталости. В дальнейшем авторы предполагают продолжить исследование с использованием выборки в десять и более испытуемых.

Вклад авторов. А. В. Сидоренко обозначила задачи, которые необходимо было решить в ходе исследований; предложила методику проведения эксперимента для нахождения параметров электроэнцефалограмм; приняла участие в интерпретации результатов исследований, связанных с определением состояния оператора. Н. А. Солодухо предложил методы для анализа электроэнцефалограмм, полученных в процессе эксперимента при воздействии электромагнитных шумовых излучений; разработал программное обеспечение для эксперимента на языке Java; принял участие в интерпретации результатов исследования.

Список использованных источников

1. Sage, C. Electromagnetic fields, pulsed radiofrequency radiation, and epigenetics: How wireless technologies may affect childhood development / C. Sage, E. Burgio // *Child Development*. – 2018. – Vol. 89, iss. 1. – P. 129–136. <https://doi.org/10.1111/cdev.12824>
2. Yael, S. Electromagnetic radiation and health: human indicators / S. Yael // *Environmental Indicators*. – Springer, 2014. – P. 1025–1046. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2>
3. Sidorenko, A. V. Assessing the effect of electromagnetic noise radiation on the central nervous system using non-linear parameters of the electroencephalogram / A. V. Sidorenko, M. A. Saladukha // *Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of Twenty-six Anniversary Seminar NPCS'2019, Minsk, 21–24 May 2019*. – Minsk, 2019. – Vol. 25. – P. 231–240.
4. Сидоренко, А. В. Оценка стрессового состояния оператора при воздействии электромагнитного шумового излучения / А. В. Сидоренко, Н. А. Солодухо // *Нейронаука для медицины и психологии : тез. докл. 16 Междунар. междисципл. конгр., Судак, 6–16 окт. 2020*. – Судак, 2020. – С. 418–419.
5. Сидоренко, А. В. Нелинейный анализ электроэнцефалограмм оператора при действии электромагнитного шумового излучения / А. В. Сидоренко, Н. А. Солодухо // *Доклады БГУИР*. – 2017. – № 6. – С. 69–75.
6. Сидоренко, А. В. Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов / А. В. Сидоренко. – Минск : БГУ, 2003. – 187 с.
7. Xavier, G. Exploratory study of brain waves and corresponding brain regions of fatigue on-call doctors using quantitative electroencephalogram / G. Xavier, A. Su Ting, N. Fauzan // *J. of Occupational Health*. – 2020. – Vol. 62, iss. 1. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12121>
8. The effects of flight complexity on gaze entropy: An experimental study with fighter pilots / C. Diaz-Piedra [et al.] // *Applied Ergonomics*. – 2019. – Vol. 77. – P. 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.01.012>
9. Electroencephalogram characteristics in patients with chronic fatigue syndrome / T. Wu [et al.] // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. – 2016. – Vol. 12. – P. 241–249. <https://doi.org/10.2147/NDT.S92911>
10. EEG-based mental fatigue detection by spectral non-negative matrix factorization / L. Li [et al.] // *Materials of 38th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Orlando, 16–20 Aug. 2016*. – Orlando, 2016. – P. 3716–3719. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591535>
11. Diaz-Piedra, C. EEG theta power activity reflects workload among army combat drivers: An experimental study / C. Diaz-Piedra, M. V. Sebastián, L. L. Di Stasi // *Brain Sciences*. – 2020. – Vol. 10, iss. 4. – P. 199–212. <https://doi.org/10.3390/brainsci10040199>
12. Mental fatigue alters cortical activation and psychological responses, impairing performance in a distance-based cycling trial / F. O. Pires [et al.] // *Frontiers in Physiology*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00227>

References

1. Sage C., Burgio E. Electromagnetic fields, pulsed radiofrequency radiation, and epigenetics: How wireless technologies may affect childhood development. *Child Development*, 2018, vol. 89, iss. 1, pp. 129–136. <https://doi.org/10.1111/cdev.12824>
2. Yael S. Electromagnetic radiation and health: human indicators. *Environmental Indicators*, Springer, 2014, pp. 1025–1046. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2>
3. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. Assessing the effect of electromagnetic noise radiation on the central nervous system using non-linear parameters of the electroencephalogram. *Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of Twenty-six Anniversary Seminar NPCS'2019, Minsk, 21–24 May 2019*. Minsk, 2019, vol. 25, pp. 231–240.
4. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. *Evaluation of the stress condition of the operator influenced by electromagnetic noise radiation*. *Nejronauka dlya mediciny i psihologii : tezisy dokladov 16 Mezhdunarodnogo mezhdisciplinarnogo kongressa, Sudak, 6–16 oktyabrya 2020 [Neuroscience for Medicine and Psychology : Abstracts of 16th International Interdisciplinary Congress, Sudak, 6–16 October 2020]*. Sudak, 2020, pp. 418–419 (In Russ.).
5. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. *Nonlinear analysis of operator electroencephalograms subjected by electromagnetic noise radiation*. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2017, no. 6, pp. 69–75 (In Russ.).

6. Sidorenko A. V. Metody informacionnogo analiza bioelektricheskikh signalov. *Bioelectric Signal Information Analysis Methods*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2003, 187 p. (In Russ.).
7. Xavier G., Ting A. Su, Fauzan N. Exploratory study of brain waves and corresponding brain regions of fatigue on-call doctors using quantitative electroencephalogram. *Journal of Occupational Health*, 2020, vol. 62, iss. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12121>
8. Diaz-Piedra C., Rieiro H., Cherino A., Fuentes L. J., ..., Di Stasi L. L. The effects of flight complexity on gaze entropy: An experimental study with fighter pilots. *Applied Ergonomics*, 2019, vol. 77, pp. 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.01.012>
9. Wu T., Qi X., Su Y., Teng J., Xu X. Electroencephalogram characteristics in patients with chronic fatigue syndrome. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2016, vol. 12, pp. 241–249. <https://doi.org/10.2147/NDT.S92911>
10. Li L., Xu G., Xie J., Li M., ..., Luo A. EEG-based mental fatigue detection by spectral non-negative matrix factorization. *Materials of 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Orlando, 16–20 August 2016*. Orlando, 2016, pp. 3716–3719. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591535>
11. Diaz-Piedra C., Sebastián M. V., Di Stasi L. L. EEG theta power activity reflects workload among army combat drivers: An experimental study. *Brain Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 199–212. <https://doi.org/10.3390/brainsci10040199>
12. Pires F. O., Silva-Júnior F. L., Brietzke C., Franco-Alvarenga P. E., ..., Santos T. M. Mental fatigue alters cortical activation and psychological responses, impairing performance in a distance-based cycling trial. *Frontiers in Physiology*, 2018, vol. 9, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00227>

Информация об авторах

Сидоренко Алевтина Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет.
E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Солодухо Никита Александрович, старший преподаватель факультета радиофизики и компьютерных технологий, магистр физико-математических наук, Белорусский государственный университет.
E-mail: malcomus@gmail.com

Information about the authors

Alevtina V. Sidorenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Physics and Aerospace Technology, Faculty of Radiophysics and Computer Technology, Belarusian State University.
E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Mikita A. Saladukha, Senior Lecturer at the Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, M. Sci. (Phys.-Math.), Belarusian State University.
E-mail: malcomus@gmail.com