

DOI: <https://doi.org/10.32652/spmed.2024.1.3-8>

## Моніторинг та прогнозування функціонального стану центральної нервової системи операторів безпілотних літальних апаратів

УДК 612.8:616–073.7–057.36

**О. І. Корбуш<sup>1</sup>, Я. В. Субін<sup>2</sup>, С. В. Федорчук<sup>1</sup>,  
О. А. Шинкарук<sup>1</sup>, О. М. Лисенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

**Резюме.** З початком повномасштабного вторгнення критично важливою є необхідність підготувати операторів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у якомога коротший термін. Для цього потрібно розуміти їхні індивідуальні функціональні особливості організації центральної нервової системи (ЦНС). У роботі представлено результати електроенцефалографічного (ЕЕГ) моніторингу психофізіологічних характеристик функціонування ЦНС операторів БПЛА. *Мета.* Оцінка динаміки показників електричної активності мозку операторів БПЛА під час виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів. *Методи.* Аналіз науково-методичної літератури, тестування. *Результати.* Продемонстровано варіацію рівнів навантаження мозку в респондентів під час виконання тестів. Високі показники спостерігалися під час виконання коректурної проби та тестів на реакцію вибору, що вказує на інтенсивну когнітивну діяльність. Індивідуальні реакції операторів на складність завдань вказують на необхідність застосування індивідуального підходу до оптимізації робочого процесу. Зазначено, що деякі тести спершу викликали підвищення рівня навантаження мозку, а потім – зниження, що може вказувати на адаптацію до нових вимог. Дані результати можуть мати практичне значення для розробки програм тренування операторів БПЛА з метою підвищення продуктивності й ефективності роботи в складних умовах реального часу.

**Ключові слова:** індекс навантаження мозку, ЕЕГ, оператори БПЛА.

### Monitoring and prediction of the functional state of the central nervous system in unmanned aerial vehicle operators

**O. I. Korbush<sup>1</sup>, Ya. V. Subin<sup>2</sup>, S. V. Fedorchuk<sup>1</sup>, O. A. Shynkaruk<sup>1</sup>, O. M. Lysenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>National University of Ukraine on Physical Education and Sport, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** With the onset of a full-scale invasion, it is critically important to shorten the time of training of unmanned aerial vehicle (UAV) operators. For this purpose, it is necessary to understand their individual functional features of the central nervous system (CNS) organization. The paper presents the results of electroencephalographic (EEG) monitoring of the psychophysiological characteristics of the CNS functioning in UAV operators. *Objective.* To evaluate the dynamics of the electrical of the brain of UAV operators during the Bourdon test

and psychophysiological tests. *Methods.* Analysis of scientific and methodical literature, testing. *Results.* The variation of brain load levels during the tests was demonstrated in respondents. High values of parameters were observed during the performance of the Bourdon and choice reaction time tests, which indicates intensive cognitive activity. The individual responses of operators to the complexity of tasks indicate the need for an individual approach to optimizing the workflow. It was found that some tests first caused an increase in brain load and then a decrease, which may indicate adaptation to new requirements. These results can be of practical importance for the development of training programs for UAV operators to increase productivity and efficiency in complex real-time conditions.

**Keywords:** brain load index, EEG, UAV operators.

**Постановка проблеми.** Підтримання оптимального функціонального стану центральної нервової системи (ЦНС) в операторів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) через моніторинг та прогнозування на основі показників електроенцефалографії (ЕЕГ) є критичною складовою для забезпечення ефективної підготовки до виконання місій, що особливо актуально в умовах повномасштабного вторгнення в Україну. ЕЕГ є інструментом з високою тимчасовою роздільною здатністю для спостереження за активністю ЦНС у реальному часі, надаючи інформацію про когнітивні стани, рівні робочого навантаження та розумову втому [8].

Розумове навантаження виникає внаслідок взаємодії вимог оперативного завдання, особливостей оточуючого середовища та індивідуальних навичок, поведінки та сприйняття виконавця. Робота в умовах високого розумового навантаження може суттєво вплинути на здатність оператора приймати оптимальні рішення, формувати судження та здійснювати рухові дії під час управління БПЛА. Однак вплив ментальної схеми, яка відображає рівень кваліфікації оператора, на розумове навантаження залишається предметом подальших досліджень та не є повністю зрозумілим на сьогодні [10].

Машинне навчання, поєднане з даними ЕЕГ, використовувалося для розпізнавання когнітивних станів у пілотів літаків, що акцентує важливість фізіологічних маркерів для оптимізації інтерфейсу людина—машина та забезпечення авіаційної безпеки [12]. Оцінювання розумового навантаження на основі фізіологічних особливостей також досліджувалося для програм спільної роботи оператора і літального апарата, що демонструє потенціал психічного стану та рівнів навантаження у сценаріях у реальному часі [11].

Інтеграція систем моніторингу на основі ЕЕГ в операції БПЛА має значний потенціал для зменшення ризиків, пов'язаних із когнітивним перевантаженням і втому, покращення ситуаційної обізнаності та оптимізації розподілу завдань. Використання передових технік обробки сигналів, алгоритмів машинного навчання та портативних

пристроїв ЕЕГ дозволить дослідникам підвищити продуктивність та ефективність операторів у сфері взаємодії людини та техніки.

Це дослідження спрямоване на вдосконалення результативності та швидкості навчання операторів БПЛА. Шляхом аналізу даних ЕЕГ в процесі навчання можна ідентифікувати індивідуальні особливості реакції операторів на стресові ситуації та їхню здатність до когнітивного перевантаження. На основі отриманих даних розробляються індивідуальні програми навчання, які сприяють збільшенню стійкості до стресу та підвищенню ефективності управління БПЛА в умовах високого навантаження. Такий підхід до тренування операторів прискорює їхню адаптацію до роботи в умовах стресу та сприяє досягненню кращих результатів у мінімально можливій строки. Роботу виконано у Науково-дослідному інституті Національного університету фізичного виховання і спорту України.

**Мета дослідження** — оцінювання показників електричної активності мозку операторів БПЛА під час виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів.

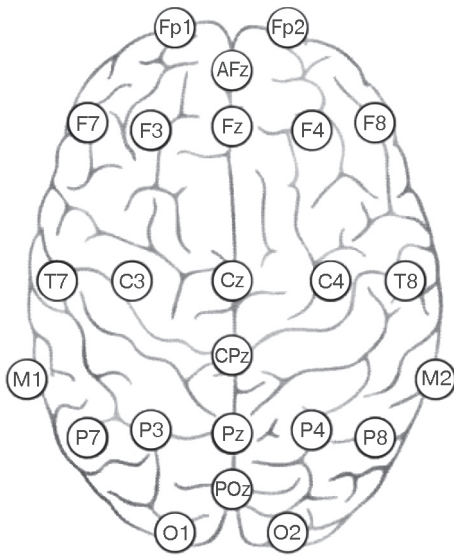
**Методи дослідження:** аналіз науково-методичної літератури, методики тестування.

**Результати дослідження та їх обговорення.** У дослідженні взяли участь шість чоловіків-операторів БПЛА (М = 23,35 років), які пройшли обстеження за однаковим дизайном експерименту.

Для визначення особливостей властивостей уваги використовували коректурну пробу (за методикою «Кільця Ландольта») респондентів у реалізації програмно-апаратного комплексу психологічної та психофізіологічної діагностики «БОС-тест-Професійний» [1, 4].

Для визначення стану психофізіологічних функцій та індивідуальних особливостей сенсомоторного реагування різного ступеня складності респондентів використовували діагностичний комплекс «Діагност-1» [2, 3].

Під час проведення комплексних досліджень за участю респондентів дотримувалися принципів біоетики, а саме розробленої в НДІ НУФВСУ «Програми комплексного біологічного



**Рисунок 1** – Схема розміщення електродів (SMARTING)

дослідження особливостей функціональних можливостей спортсменів», а також законодавства України про охорону здоров'я та Гельсінкської декларації 2000 р., директиви Європейського товариства 86/609 щодо участі людей в медико-біологічних дослідженнях [6]. Перед початком тестування отримано письмову інформовану згоду кожного учасника відповідно до Гельсінкської декларації Всесвітньої медичної асоціації (WMA) (Гельсінкі, Фінляндія, червень 1964 р.). Обстежувані були проінструктовані про мету та завдання дослідження.

Зміну електричної активності мозку під час обстеження реєстрували, застосовуючи мобільну електроенцефалографічну систему SMARTING (mBrainTrain, Сербія). До складу комплексу входили: Smarting підсилювач, Smarting стример – прилад потокового запису, EASYCAP RBE 24 – шапочка для реєстрації ЕЕГ у режимі реального часу з 24 вмонтованими відведеннями, які відповідають міжнародній системі 10–20 %. Імпеданс під час запису ЕЕГ не перевищував 10 кОм [5].

Реєстрацію ЕЕГ проводили монополярно в симетричних відведеннях (рис. 1): передньофронтальних (Fp1, Fp2, AFz), середньофронтальних (F3, F4), центрально-фронтальному (Fz), латерально-фронтальних (F7, F8), центральних (C3, C4), вертексних центральному (Cz), середньо-центральнотім'яному (CPz), скроневих (T7, T8), тім'яних (P3, P4), задньотім'яних (P7, P8), середньотім'яному (Pz), потиличних (O1, O2) і середньотім'яно-потиличному (POz). Відведення Fpz використовували для заземлення як усереднений референтний електрод – фронтально-вертексний електрод FCz. Запис ЕЕГ відбувався в частотному діапазоні 1–100 Гц з частотою

дискретизації 500 Гц. Оцінювали спектральну потужність окремих піддіапазонів ЕЕГ від 4 до 45 Гц: тета – (4–7,49 Гц), альфа – (7,5–12,9 Гц), бета – (13–34,9 Гц), гамма – (35–45 Гц). Для аналізу було відібрано безартефактні записи ЕЕГ обстежених респондентів.

Обробка отриманих даних – препроцесинг. Для попередньої обробки даних, виділення частотних діапазонів використовували програмне середовище MATLAB 2022B (The MathWorks) та програмний пакет EEGLAB2023.0 (SCCN) [7]. Обробку даних виконували за протоколом Маконо [12].

На основі даних спектральної потужності було розраховано індекс навантаження мозку, який визначають як відношення спектральної потужності тета-діапазону у фронтально-центральному відведенні (Fz) до спектральної потужності альфа-ритму в тім'яному центральному відведенні (Pz):  $BLI = \theta(Fz)/\alpha(Pz)$ . Зміни індексу вказують на рівень стресу та когнітивного контролю [9].

У результаті проведеного дослідження спостерігалось варіювання рівнів навантаження мозку у респондентів під час виконання різних тестів. Найвищий рівень навантаження мозку було виявлено під час тесту коректурної проби, що може вказувати на інтенсивну когнітивну діяльність у зв'язку з виконанням завдань тесту.

У контексті проведення психофізіологічних тестів спостерігалось різноманіття реакцій мозку на різні типи завдань. Наприклад, підвищення рівня навантаження мозку в тестах на реакцію вибору (ЗРВ1-3, ЗРВ2-3) свідчить про складність виконання завдань у зв'язку зі збільшенням кількості правил та зростанням складності задач. З іншого боку, тести на зворотний зв'язок (ЗЗ-5) та нав'язаний ритм (ФРНП/СНП) також викликали високі показники навантаження, що може вказувати на втому під час виконання тривалих завдань.

Детальніше розглянемо результати окремих респондентів.

Для респондента № 1 у тесті коректурна проба спостерігається найвищий рівень навантаження мозку, особливо на третій хвилині. Це може вказувати на швидке навчання або впрацювання, але також може бути ознакою втоми. Інші психофізіологічні тести не викликали подібного високого рівня навантаження, що може свідчити про високий рівень моторної тренуваності (рис. 2).

Для респондента № 2 під час тесту коректурна проба спостерігається найвищий рівень навантаження мозку. Проте, виконання інших психофізіологічних тестів призвело до поступового зростання рівня навантаження, що може свідчити про настання втоми (рис. 3).



**Рисунок 2** – Динаміка індексу навантаження мозку під час тестування респондента № 1



**Рисунок 3** – Динаміка індексу навантаження мозку під час тестування респондента № 2



**Рисунок 4** – Динаміка індексу навантаження мозку під час тестування респондента № 3

У респондента № 3 показник навантаження мозку під час тестування не зазнав значних відхилень. Зміна типу завдання викликала зміни показника. Швидке зниження рівня навантаження мозку під час виконання тривалих завдань, як у тесті в режимі зворотного зв'язку «5 хвилин» (ЗЗ-5), може вказувати на швидке навчання або впрацювання (рис. 4).

У респондента № 4 рівень навантаження мозку залишався стабільним протягом виконання тестів, що свідчить про високий когнітивний

резерв. Збільшення рівня навантаження мозку в тестах на реакцію вибору може вказувати на складність виконання завдань за умов постійної зміни задач та правил (рис. 5).

Для респондента № 5 під час виконання тесту коректурна проба спостерігається високий рівень навантаження мозку. Психофізіологічні тести на реакцію вибору та рухомий об'єкт викликали низькі показники навантаження мозку, тоді як тести на зворотний зв'язок та нав'язаний ритм призвели до високого рівня навантаження.

Це може вказувати на швидку втому в тривалих тестах (рис. 6).

Для респондента № 6 спостерігається високий рівень навантаження мозку під час тесту коректурна проба. Під час інших психофізіологічних тестів спостерігається поступове зростання рівня навантаження, що відображає процес втоми, але це не призводить до зниження продуктивності. Також окремі тести спричиняють сильне підвищення рівня навантаження на початку, а потім швидке зниження, що

може свідчити про швидке моторне навчання (рис. 7).

Отримані результати вказують на значний вплив типу завдання на рівень навантаження мозку. Високі рівні навантаження, відмічені під час виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів, можуть свідчити про інтенсивну когнітивну діяльність та можливу втому у зв'язку з тривалим навантаженням.

Варто зауважити, що деякі тести викликали сильне підвищення рівня навантаження мозку на

**Рисунок 5** – Динаміка індексу навантаження мозку під час тестування респондента № 4



**Рисунок 6** – Динаміка індексу навантаження мозку під час тестування респондента № 5



**Рисунок 7** – Динаміка індексу навантаження мозку під час тестування респондента № 6





початку виконання, а потім наступне зниження. Це може вказувати на швидке моторне навчання та адаптацію до вимог завдань.

Таким чином, результати дослідження свідчать про складність когнітивної роботи операторів БПЛА, особливо під час виконання завдань, що вимагають високого рівня уваги та швидкої реакції. Ці дані можуть бути корисними для розробки програм навчання та тренування, спрямованих на підвищення продуктивності та ефективності роботи операторів БПЛА в умовах високого навантаження.

#### Висновки:

1. Результати демонструють значну варіативність рівня навантаження мозку в респондентів під час виконання різних типів завдань. Це свід-

чить про індивідуальні особливості реакції на різні види когнітивної діяльності.

2. Складність завдань має суттєвий вплив на рівень навантаження мозку. Тести, які вимагають від респондентів постійного переходу між завданнями та правилами, частіше викликали високі показники навантаження.

3. Кожен респондент мав свою унікальну динаміку навантаження мозку відповідно до типу тесту та його складності. Це свідчить про важливість індивідуального підходу під час аналізу реакції на когнітивні завдання.

4. Сильне підвищення рівня навантаження на початку виконання завдання із подальшим його зниженням може свідчити про ефективну регуляцію навантаження мозку й адаптацію до нових умов.

#### Література

1. Комплекс для психологического тестирования «БОС-тест». Компания «Сиата» – Медицинская техника и оборудование [Complex for psychological testing “BOS-test”. Siata Company – Medical equipment and accessories]. Режим доступа: <http://www.siata.net.ua/index.php/kompleks-dlya-psihologicheskogo-testirovaniya-bos-test/>

2. Макаренко МВ, Лизогуб ВС. Онтогенез психофізіологічних функцій людини [Ontogeny of human psychophysiological functions]. Черкаси; 2011. 256 с.

3. Макаренко МВ, Лизогуб ВС, Безкопильний ОП. Методичні вказівки до практикуму з диференціальної психофізіології та фізіології вищої нервової діяльності людини [Methodological instructions for the practical course on differential psychophysiology and physiology of higher nervous activity]. Київ; Черкаси; 2014. 102 с.

4. Сысоев ВН. Тест Ландольта. Диагностика работоспособности [The Landolt test. Diagnosis of performance]. Санкт-Петербург; 2007. 32 с.

5. Федорчук СВ, Колосова ОВ, Тукаєв СВ, Лисенко ОМ, Іваскевич ДД, Коломієць БЮ, Халявка ТО. Технологія оцінки ризику травматизму спортсменів за електронейроміографічними і психофізіологічними показниками [Technology for assessing the risk of injury to athletes with electroneuromyographic and psychophysiological indicators]. Науково-методологічні дослідження у фізичній культурі і спорті, фізичній терапії, ерготерапії, туризмі: монографія; Т. 2. 2021. 195 с.

6. Allen JJ, Coan JA, Nazarian M. Issues and assumptions on the road from raw signals to metrics of frontal EEG asymmetry in emotion. *Biological psychology*. 2004;67(1-2):183-218.

7. Delorme A, & Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*. 2004; 134 (1): 9-21.

8. Fernandez Rojas R, Debie E, Fidock J, Barlow M, Kasmarik K, Anavatti S, Garratt M, & Abbass H. Electroencephalographic Workload Indicators During Teleoperation of an Unmanned Aerial Vehicle Shepherding a Swarm of Unmanned Ground Vehicles in Contested Environments. *Frontiers in neuroscience*. 2020; 14:40.

9. Gu H, Yao Q, Chen H, Ding Z, Zhao X, Liu H, Feng Y, Li C, & Li X. The effect of mental schema evolution on mental workload measurement: an EEG study with simulated quadrotor UAV operation. *Journal of neural engineering*. 2022; 19(2): 026058.

10. Giannakakis G, Grigoriadis D, Tsiknakis M. Detection of stress/anxiety state from EEG features during video watching. 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society : International Conference, Milan, 25–29 August 2015. P. 6034–6037.

11. Singh G, Chanel CPC, & Roy RN. Mental workload estimation based on physiological features for pilot-UAV teaming applications. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2021. 15: 692878.

12. Taheri Gorji H, Wilson N, VanBree J, Hoffmann B, Petros T, & Tavakolian K. Using machine learning methods and EEG to discriminate aircraft pilot cognitive workload during flight. *Scientific Reports*. 2023; 13(1): 2507.

13. Swartz Center for Computational Neuroscience. Makoto's preprocessing pipeline. 2021. [онлайн] Доступно на [https://sccn.ucsd.edu/wiki/Makoto's\\_preprocessing\\_pipeline](https://sccn.ucsd.edu/wiki/Makoto's_preprocessing_pipeline) [Доступ: 25 січня 2024]

pravda.oleksandr13@gmail.com  
lanasvet778899@gmail.com  
yaroslav.subin@knu.ua

Надійшла 08. 02.2024