

УДК 612.82/83

DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.64.24-30>

Ольга ПОДКОВКА¹, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3606-5098
e-mail: ol.podkovka@gmail.com

Микола МАКАРЧУК¹, д-р біол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0982-3463
e-mail: makarchuk_mykola@knu.ua

Наталія ФІЛІМОНОВА¹, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-5133-3003
e-mail: filimonova@knu.ua

Катерина КРАВЧЕНКО¹, канд. психол. наук
ORCID ID: 0000-0002-8140-1759
e-mail: katerina.kravchenko@knu.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

НЕЙРОПСИХОФІЗІОЛОГІЧНІ МАРКЕРИ ПСИХІЧНОГО СТАНУ КОМБАТАНТІВ ПІД ЧАС ТЕСТУВАННЯ РЕАКЦІЇ ВИБОРУ

Вступ. Дослідження нейропсихофізіологічних маркерів комбатантів, які відображають вплив стресових умов, прийняття рішень у критичних ситуаціях та адаптаційні механізми, що впливають на когнітивні функції, є однією з найважливіших наукових задач сьогодення. Метою статті є дослідження реакції вибору (РВ) і пов'язаних з нею показників задля розробки ефективних методів діагностики та реабілітації комбатантів.

Методи. У дослідженні як обстежувані взяли участь 37 комбатантів (25–50 років, серед яких 4 жінки) та 47 здорових волонтерів (19–39 років). Усі обстежувані проходили тест на визначення основних параметрів РВ згідно з оригінальною авторською комп'ютеризованою методикою. Одночасно у обстежуваних проводили запис електроенцефалограми (ЕЕГ) з подальшим когерентним аналізом, для якого було відібрано 22 учасники з групи комбатантів (25–50 років, серед яких 2 жінки) та 5 учасників з групи волонтерів, призовників військомату (19–26 років).

Результати. Швидкість центрального перемикання, визначена на основі РВ, була значно вищою в контрольній групі ($p = 0.011$), що може свідчити про повільнішу передачу інформації з лівої півкулі в праву і навпаки, в групі бійців, тобто про ускладнену міжпівкульну взаємодію. Швидкість РВ не мала значущих відмінностей між групами. Когерентний аналіз ЕЕГ виявив підвищену активність правої півкулі у бійців та білатеральну активність з переважанням лівопівкульної префронтальної та фронтально-скроневої когерентностей у контрольній групі. Це може бути пов'язано з обробкою емоційно-значущих, нових і потенційно небезпечних стимулів у бійців та аналітичної, вербально-мовленнєвої стратегії, нижчого когнітивного навантаження й адаптації до стабільного середовища в контрольній групі. Локальні нейромережі у фронто-центральної та потилично-тім'яних ділянках правої півкулі (F4-Cz-C4, O2-T6) були притаманні лише бійцям, переважно у тета- та альфа-діапазонах, що може бути нейрофізіологічним маркером адаптації до бойового стресу.

Висновки. У бійців ефективність виконання завдання забезпечувалась за рахунок сформованої глобальної дельта-мережі шляхом пригнічення сенсорних входів, що перешкоджають внутрішній концентрації, модулюючи активності тих мереж, які повинні бути неактивними для виконання завдання, у той час як в контрольній групі когнітивний контроль здійснювався завдяки лівопівкульним фронтальним та центрально-скронеvim нейромережам у тета-, альфа- та бета-діапазонах.

Ключові слова: реакція вибору, електроенцефалограма, когерентність, комбатанти.

Вступ

Дослідження нейропсихофізіологічних маркерів психічного стану осіб, залучених до бойових дій, зокрема комбатантів, набуває все більшої актуальності у зв'язку з необхідністю розробки ефективних методів діагностики та реабілітації психотравматичних станів. Одним із інформативних підходів до вивчення функціонального стану нервової системи є аналіз параметрів реакції вибору як індикатора когнітивного навантаження, ступеня адаптації та психоемоційного стану (Balkin et al., 2011). Особливої уваги заслуговує кореляція між показниками біоелектричних маркерів мозкової активності (зокрема, когерентності електроенцефалограми (ЕЕГ)) та поведінковими характеристиками при виконанні завдань на реакцію вибору (РВ). Цей показник в контексті психофізіологічного тестування виступає інструментом для оцінювання оперативної уваги, швидкості обробки інформації, моторної координації та здатності до прийняття рішень в умовах підвищеного стресу (Носкеу, 1997). РВ характеризує час, необхідний для центрального перемикання. Цей показник є критичним у процесах прийняття рішень,

оскільки порушення інформаційної обробки під час реалізації реакції вибору може спричинити неадекватний баланс між швидкістю та точністю, упередження у висновках або спотворення сприйняття. На відміну від простої сенсорної реакції (ПСР), яка передбачає лише час сприйняття та моторної відповіді, реакція вибору також враховує час ідентифікації стимулу та прийняття рішення, що робить її швидкість важливим параметром для оцінювання когнітивної ефективності.

Мета. Дослідити швидкість РВ та пов'язані з нею параметри у комбатантів, а також особливості формування нейромереж головного мозку під час здійснення РВ, що в подальшому ляже в основу розробки ефективних методів діагностики та реабілітації комбатантів.

Огляд літератури. У комбатантів, які мають досвід перебування в зоні бойових дій, можуть спостерігатися зміни в латентних періодах реакцій, коливаннях ЕЕГ, а також варіації серцевого ритму, що корелюють з рівнем тривожності, симптомами ПТСР та рівнем когнітивної втоми (Morgan et al., 2006). Наприклад, у здорових осіб під час виконання завдань на визначення РВ зазвичай фіксується зростання когерентності в бета-діапазоні

(14–35 Гц) між лобними та центральними зонами, що асоціюється з інтеграцією моторного планування та когнітивного контролю (Sauseng et al., 2005). Також спостерігається підвищення когерентності в тета-діапазоні (4–8 Гц), зокрема між фронтальними і тим'яними зонами, що свідчить про активацію виконавчих функцій та утримання уваги (Cavanagh, & Frank, 2014). Крім того, було показано, що рівень складності завдання на пряму корелює з тета-когерентністю між медіальною префронтальною корою (mPFC) та передньою поясною корою (ACC), що асоціюється з інтеграцією моторного планування, когнітивного контролю завдання, коригування помилок і передбачає індивідуальні відмінності у часі реакції (Kong et al., 2021). У комбатантів зі слідами психоемоційного перенавантаження або ПТСР ці патерни можуть порушуватися: дослідження показують зниження фронтальної когерентності в альфа- та бета-діапазонах, що пов'язано з порушенням регуляції уваги, контролю імпульсів та зниженням інтеграції когнітивних процесів (Imperatori et al., 2014). Такі зміни можуть бути біомаркером дезорганізації функціональної нейронної мережі, пов'язаної зі стресом та травматичним досвідом.

Отже, аналіз когерентності ЕЕГ при здійсненні реакції вибору дозволяє не лише оцінити загальну ефективність когнітивної діяльності, але й виявити специфічні дисфункції, зумовлені бойовим стресом, що відкриває перспективи для створення нейрофідбек-програм з відновлення міжрегіональної функціональної інтеграції.

Методи

У дослідженні як обстежувані загалом взяли участь 84 особи: 37 комбатантів (25–50 років, серед яких 4 жінки) та 47 здорових волонтерів (19–39 років), що ввійшли до контрольної групи. Для дослідження нейромереж головного мозку було відібрано 27 учасників: 22 комбатанти (25–50 років, серед яких 2 жінки) та 5 здорових волонтерів, призовників військомату (19–26 років).

Визначення РВ у комбатантів відбувалося таким чином: на екрані у випадковому порядку демонструвалися два типи стимулів – квадрат і трикутник (усього 300 стимулів). Учасник мав реагувати на ці стимули відповідно правою або лівою рукою. Інтервал між появою стимулів становив 500–600 мс, щоб наступний сигнал був очікуваним, але не прогнозованим. Час моторної відповіді реєструвався тільки для правильно ідентифікованих стимулів, оскільки помилка призводила до затримки появи наступного зображення. Фіксувалися час сенсомоторної відповіді реакції вибору правою (РВП) і лівою (РВЛ) рукою, а середній час реакції (РВ) розраховувався за формулою

$$РВ = (РВП + РВЛ) / 2.$$

Показник функціональної асиметрії визначався як РВЛ – РВП.

На основі РВ та показників простої сенсомоторної реакції (ПСМР), визначених у минулому дослідженні, ми також порахували значення центрального перемикавання за формулою: РВ – ПСМР (Макарчук, & Філімонова, 2003). Статистичний аналіз даних проводили за допомогою пакета STATISTICA 6.0 (StatSoft, USA, 2008). Нормальність розподілів змінних перевірялась тестом Шапіро–Вілка, при цьому більшість параметрів мали розподіл, відмінний від нормального ($p \leq 0,05$). Порівняльний аналіз проводили за критерієм Манна–Вітні. Для опису вибіркового розподілу вказували медіану (Me) і нижній (25 %) та верхній (75 %) квартилі: Me [25 %; 75 %].

Для реєстрації та аналізу ЕЕГ був використаний комплекс Нейрон-Спектр-4/VP ("NeuroSoft"). Запис

проводився у звукоізолюваній кімнаті, монополярно, із частотою квантування 500 Гц, референтні електроди були розташовані на мочках вух. У дослідженні були використані мостикові посріблені електроди, які накладали відповідно до міжнародної системи 10–20, формуючи 19 відведень: Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, Fz, C3, C4, Cz, T3, T4, T5, T6, P3, P4, Pz, O1, O2. За допомогою програми Нейрон-Спектр у кожному відведенні для діапазонів частот ЕЕГ: дельта (0,5–3,9 Гц), тета (4,0–7,9 Гц), альфа (8,0–13,9 Гц), бета1 (14,0–19,9 Гц) і бета2 (20,0–35,0 Гц), були розраховані когерентності для кожної пари електродів.

Дистантну синхронізацію зон мозку при виконанні тестових завдань визначали за допомогою когерентного аналізу. Середні значення функції когерентності залежить від наявності шуму в сигналах. Наприклад, якщо він становить більше як 30–40 %, стає проблематичним виділення сигналу на фоні шуму і, як наслідок, твердження про високу синхронізацію в різних відведеннях. Крім того, для кожної гармоніки на межі двох сусідніх епох, що аналізуються, внаслідок ефекту витікання спектра виникають додаткові бічні піки, які можуть становити більше 40 % амплітуди центрального піку. Ефект впливає на значення фазової когерентності, а отже, і на значення когерентності. Тим самим коефіцієнт когерентності дає завищену оцінку щодо ступеня синхронізації процесів, тому достовірною когерентність можна вважати тільки тоді, якщо вона становить $\geq 0,7$ (Філімонова, 2000). Саме тому достовірна синхронізація визначалася тільки для тих пар відведень, для яких медіана відповідала значенням $\geq 0,7$.

Результати

Проведений порівняльний аналіз за критерієм Манна–Вітні отриманих даних виявив значущі міжгрупові відмінності для таких психофізіологічних показників, як центральне перемикавання та функціональна асиметрія мозку ($p = 0,011$ та $p = 0,045$, відповідно) (рис. 1). Швидкість центрального перемикавання виявилась вищою в контрольній групі (Me = 148 мс) порівняно з групою бійців (Me = 172,5 мс), що може свідчити про повільнішу передачу інформації з лівої півкулі в праву і навпаки, в групі бійців, тобто про ускладнену міжпівкульну взаємодію. Медіана функціональної асиметрії у бійців становила –11,5, а в контрольній групі 1. Оскільки цей параметр визначається як різниця між швидкістю реакції вибору лівою та правою рукою, то можемо зробити висновок, що у бійців здійснення реакції лівою рукою було швидшим, ніж правою, що може вказувати на домінування у комбатантів при здійсненні РВ правої півкулі.

Для РВ значущих відмінностей за критерієм Манна–Вітні виявлено не було ($p = 0,925$). Цей показник був дещо кращим у контрольній групі (Me = 413 мс) порівняно з бійцями (Me = 416,5) (рис. 1). Але оскільки функціональна асиметрія, яка має значущі відмінності між групами вказує на різницю швидкості реакції вибору між лівою та правою рукою, то опосередковано РВ також відрізняється, що чітко простежується у характері формування нейромереж під час її здійснення (рис. 2).

При проходженні тесту РВ у бійців були наявні такі когерентні зв'язки у правій півкулі, яких не було в контролі: Cz-F4 (в альфа- і тета-діапазонах), F4-C4 (у бета1-, альфа-, тета- та дельта-діапазонах), Cz-P4 (у бета2- і дельта-діапазонах), O2-T6 (в альфа, тета-, дельта-діапазонах). На відміну від контрольної групи, у лівій півкулі у бійців були відсутні зв'язки Fp1-F7 (в альфа- і тета-діапазонах), F7-F3 (у бета2-, бета1-, альфа- та тета-діапазонах), C3-T3 (у бета2-, альфа-, тета-діапазонах), T3-P3 (в альфа-діапазоні), T5-P3 (в альфа- і тета-діапазонах), C3-Pz (в бета2-діапазоні) (рис. 2).

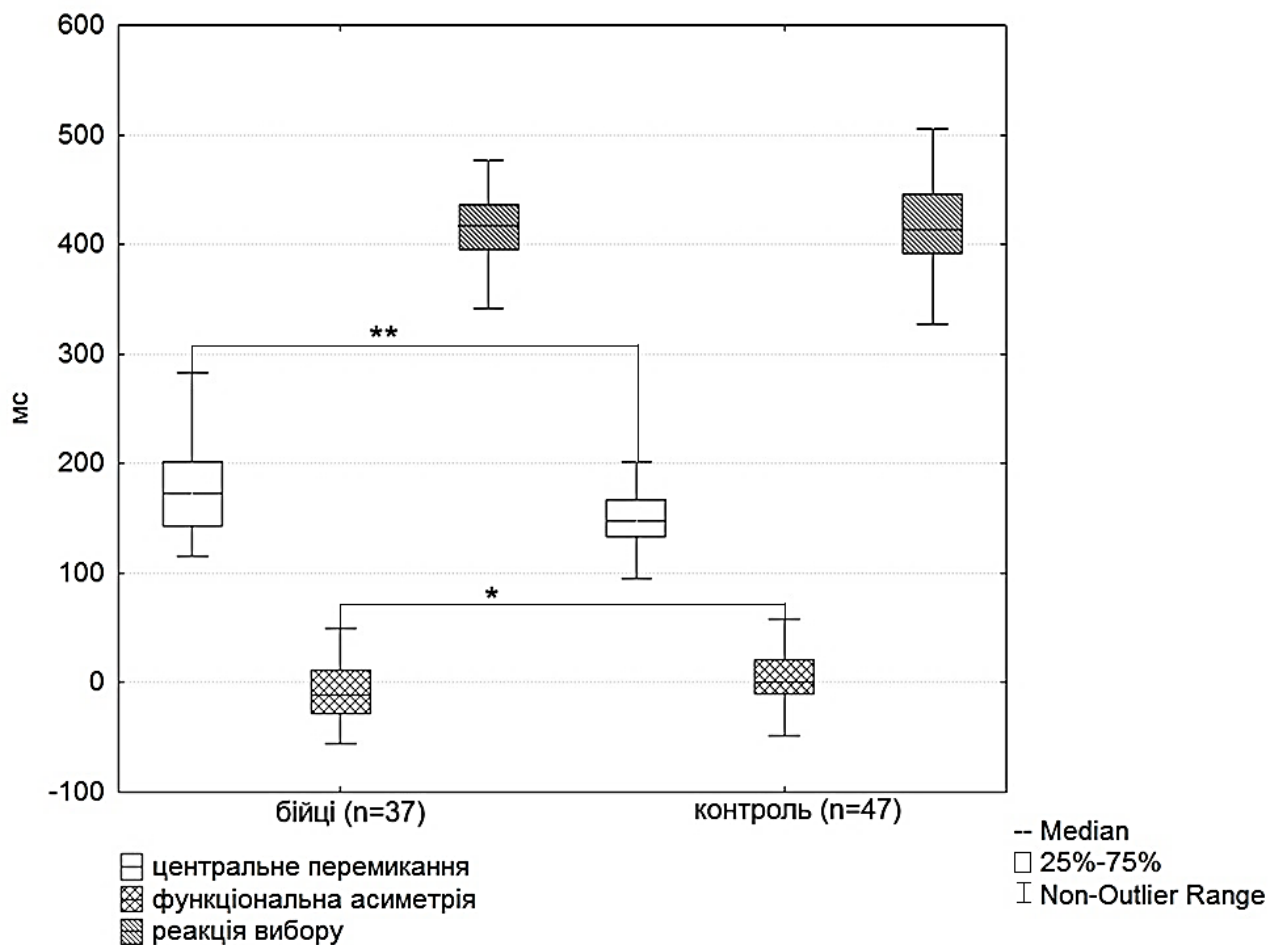


Рис. 1. Показники центрального перемикання, функціональної асиметрії та реакції вибору у бійців та в контрольній групі

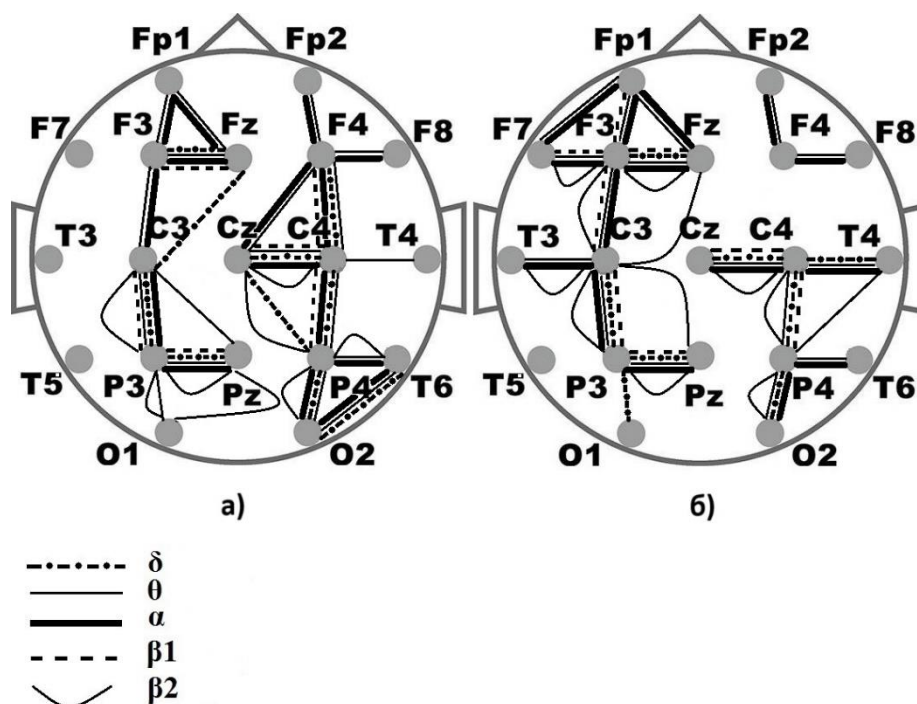


Рис. 2. Когерентний аналіз основних ритмів ЕЕГ при здійсненні реакції вибору: а) у бійців; б) у контрольній групі

Дискусія і висновки

У комбатантів при здійсненні РВ було виявлено домінування правої півкулі. Відомо, що підвищена активність правої півкулі асоційована зі станами депресії (Li, Xu, & Lu, 2018), а також із підвищеним виконавчим контролем уваги (Spagna et al., 2020) та емоційним регулюванням (Hartikainen, 2021). Правопівкульна активація також асоціюється з обробкою візуально-просторової інформації (Fiser et al., 2010) та прийняттям рішень в умовах невизначеності, що є критичним для комбатантів під час бойових дій (Timashkov et al., 2025).

Отже, домінування активації правої півкулі в комбатантів може бути результатом нейропсихологічної адаптації до бойових умов, що передбачає посилену обробку загроз, регуляцію емоцій та підвищену увагу. Ці зміни можуть відображати як наслідки інтенсивного тренування, так і нейропластичні процеси, спрямовані на оптимізацію функціонування в екстремальних умовах.

Аналіз дельта-когерентності (1–4 Гц) виявив відмінності між комбатантами та контрольною групою під час виконання завдань на РВ. У бійців спостерігалось посилення когерентних зв'язків у фронтально-центральної ділянках обох півкуль (Fz–C3, F4–C4), центрально-тім'яній зоні (Cz–P4) та потилично-скроневій зоні правої півкулі (O2–T6). Такий патерн активності може бути пов'язаний із функціональною кортикальною деаферентацією або пригніченням сенсорних входів, що перешкоджають внутрішній концентрації (Harmony, 2013). Ці гальмівні коливання модулюють активність тих мереж, які мають бути неактивними для виконання завдання (Harmony, 2013). Фронтально-центральна дельта-активність, зокрема, пов'язується з механізмами уваги, виконавчого контролю та адаптації до вимог завдання (Harmony, 2013). Центрально-тім'яні та потилично-скроневі зв'язки, натомість, відображають сенсомоторну інтеграцію та обробку просторової інформації (Başar et al., 2001). Контрольна група відрізнялася когерентністю в потилично-тім'яній ділянці лівої півкулі (O1–P3) та центрально-скроневій зоні правої півкулі (C4–T4), що свідчить про переважно сенсорну обробку візуальних стимулів. Такий тип функціональної організації частіше асоціюється з умовами зниженого стресу, коли завдання не викликає необхідності в мобілізації виконавчих систем (Harmony et al., 2009).

Відмінною рисою для групи бійців у тета-діапазоні (4–8 Гц) були когерентності у фронтально-центральної ділянках правої півкулі (F4–C4, F4–Cz), у потилично-скроневій зоні (O2–T6) та між центрально-потилічними відведеннями (C3–Pz, P3–O1). Таке просторове розташування когерентних зв'язків у правій півкулі свідчить про посилену участь структур, відповідальних за виконавчий контроль, емоційну регуляцію та візуальну орієнтацію. Правостороння фронтально-центральна когерентність корелює з мобілізацією когнітивного контролю в умовах загрози або невизначеності (Cavanagh, & Frank 2014). Посилення фронтально-центральної тета-синхронізації асоційоване з адаптацією до вимог завдання та використанням когнітивного контролю в умовах підвищеного навантаження (Nigbur et al., 2012).

Наявність синхронізації в зоні O2–T6 вказує на інтеграцію емоційно-візуальної інформації, наприклад, під час оцінювання загрозливих візуальних сигналів, що типово для умов, пов'язаних із бойовим досвідом (Morey et al., 2010) та може бути маркером нейропсихологічної адаптації до швидкого виявлення потенційної небезпеки. Когерентні зв'язки між ділянками C3–Pz,

P3–O1 пов'язані із сенсорною інтеграцією та перетворенням візуально-просторової інформації, важливої для побудови моторних відповідей.

Навпаки, у контрольній групі більш вираженими були когерентні зв'язки в лівій префронтально-фронтальній ділянці (Fp1–F7, F7–F3), а також у лівій центрально-скроневій (C3–T3) та правій потилично-скроневій (P4–T4) зонах. Така картина свідчить про вербально-аналітичну обробку завдання, притаманну спокійним умовам, і перевагу "внутрішнього мовлення" та планування (Sadaghiani et al., 2012), відображає роздуми перед вибором, характерні для нестресового контексту. Центрально-скроневі когерентності свідчать про залучення моторного контролю та аудіо-сенсорної інтеграції, активація зв'язків P4–T4 під час завдань на реакцію вибору відображає залучення візуально-сенсорних та когнітивних процесів, пов'язаних із розпізнаванням об'єктів, увагою та короткочасною пам'яттю (Kublanek, & Snyder, 2020).

Таким чином, характер розподілу когерентностей у тета-діапазоні у бійців можна розглядати як нейрофізіологічний маркер адаптації до бойового стресу, що відображає підвищену готовність до обробки загрозливих стимулів та швидкого прийняття рішень.

Локальна нейромережа Cz-F4-C4, яка була виявлена у бійців та відсутня в контрольній групі, особливо у тета-діапазоні, може свідчити про підвищене навантаження на виконавчі функції, такі як контроль уваги та моніторинг дій (Nigbur et al., 2012). Зокрема, у роботі R. Nigbur зі співавторами було показано, що тета-потужність у медіальній фронтальній корі (МФК) була чутливою як до перцептивного, так і до реактивного конфліктів. Однак міжрегіональна тета-фазова синхронізація вказувала на селективне посилення, специфічне для конфліктів реакцій між МФК та лівою лобовою корою, а також між МФК та моторною корою, контралатеральною до руки, що відповідала. Ці результати свідчать про те, що тета-активність МФК залучена як до обробки конфліктів відповіді в цілому, так і специфічно залучена в нейромережі, що контролюють конфлікти відповіді (Nigbur et al., 2012). Взаємодіючи із зоровою, моторною та латеральною префронтальною корою, МФК допомагає підтримувати адаптації та цілеспрямовану поведінку.

Отже, можемо припустити, що нейромережа Fp1-F7-F3 у тета- та альфа-діапазонах, яка була виявлена в контролі та відсутня у бійців, забезпечувала вищу швидкість РВ правою рукою, ефективніше прийняття рішень та концентрацію на завданні, що дало можливість зняти навантаження із фронтально-центральної та потилично-тім'яних ділянок правої півкулі, які були активні у бійців. Таким чином, контрольна група здійснювала РВ з тією ж ефективністю, але із меншим рівнем когнітивно-емоційного навантаження.

Відмінними маркерами бійців у альфа-діапазоні (8–14 Гц) були зв'язки між фронтально-центральної ділянками (F4–Cz, F4–C4), центрально-тім'яною (C4–P4) та потилично-скроневою ділянками (O2–T6) правої півкулі, у той час як контроль відрізнявся зв'язками у префронтально-фронтальних ділянках лівої півкулі (Fp1–F7, F7–F3), а також центрально-скроневих зонах обох півкуль (C3–T3, C4–T4). Дослідження показують, що альфа-осциляції у фронтальних та парієтальних ділянках пов'язані з когнітивним контролем та увагою (Sauseng et al., 2005). Локальна нейромережа P4-O2-T6 у альфа-діапазоні, яка була виявлена у бійців та відсутня в контрольній групі, може вказувати на

інтенсифікацію обробки сенсорної інформації. Вчений W. Klimesch зазначив, що альфа-ритми в тім'яно-потиличних ділянках відображають обробку релевантної інформації та пригнічення неважливих стимулів (Klimesch, 2012). У контрольній групі альфа-когерентність була більш виражена між центральними та скроневими зонами обох півкуль та фронтальними і префронтальними зонами лівої півкулі, що може свідчити про підтримку уваги при мінімальних стресових навантаженнях (Klimesch, 1999). Когерентність С3-Т3, що була виявлена в контрольній групі у тета- та альфа-діапазонах, може також свідчити про зв'язок сенсомоторних реакцій із мовленнєвими функціями (зона Верніке) (Insights Clinical Consulting, 2025). Крім того, відведення Т3 охоплює частину поясної звивини, активація якої могла сприяти ефективнішому виявленню конфліктних і помилкових процесів у контрольній групі (Dirckx, 1995).

Відмінною рисою бійців у бета1-діапазоні були когерентні зв'язки у фронтально-центральної зоні правої півкулі (F4-C4), а контрольної групи – зв'язки у фронтальної (F7-F3), префронтально-фронтальної (Fp1-F3), фронтально-центральної (F3-C3) лівої півкулі. Щодо бета2-діапазону відмінністю бійців була когерентна активність у лівих потилично-тім'яних ділянках (P3-O1, Pz-O1) та правій тім'яно-скроневій ділянці (P4-T6), а у контролі – у фронтально-центральної (F7-F3, F3-Fz, F3-C3) та центрально-скроневій (T3-C3) ділянках лівої півкулі, а також зв'язок у центрально-тім'яній зоні (C3-Pz).

Когерентність у бета-діапазоні (14–35 Гц) є важливим механізмом функціональної взаємодії між різними ділянками мозку, який забезпечує інтеграцію сенсорної, моторної та когнітивної інформації (Engel, & Fries, 2010). Однак функціональне значення цих зв'язків суттєво варіює залежно від їхньої топографії. Існують дані, що бета-активність у тім'яній корі, імовірно, відображає прямі зорово-моторні трансформації, необхідні для виконання завдання (Wagner et al., 2014). Підвищена активність у премоторній корі може свідчити про моторне планування, що бере участь в адаптації рухів відповідно до візуального входного сигналу (Wagner et al., 2014). Когерентність у бета-діапазоні в тім'яних ділянках кори підтримують координацію між зоровими, соматосенсорними та моторними зонами, забезпечуючи точність дій та адаптацію до змін у зовнішньому середовищі (контроль уваги "знизу-вгору") (Basharpoor, Heidari, & Molavi, 2019). Когерентність у бета-діапазоні у фронтальних ділянках, особливо лівої півкулі, асоційована з виконавчими функціями та когнітивним контролем (Basharpoor, Heidari, & Molavi, 2019). Вони особливо активуються в завданнях, які вимагають пригнічення імпульсивних реакцій, підтримки уваги та вибору відповідної дії. Дослідження M. Kukleta зі співавторами (Kukleta et al., 2010) показало, що когерентність у бета-діапазоні між фронтальними та скроневими ділянками, зокрема передньою поясною корою є характерною ознакою когнітивного контролю та інтеграції інформації.

Таким чином, у той час як фронтально-центрально-скроневі зв'язки модулюють такі процеси, як когнітивний контроль та інтеграція інформації, центрально-тім'яно-потиличні забезпечують сенсомоторну узгодженість та моторну ефективність, що особливо важливо у завданнях, які вимагають точної реакції на зовнішні стимули. На основі цих даних можемо припустити, що у контрольній групі рівень когнітивного контролю та регуляції поведінки, внутрішнього стану та імпульсивних

реакцій був вищий, ніж у бійців, у яких акцент був зміщений на точність дій та адаптацію до змін у зовнішньому середовищі.

Когерентний аналіз ЕЕГ підтвердив припущення про домінування правої півкулі у бійців, зроблене на основі значення показника функціональної асиметрії (рис. 1 та 2). Правопівкульна перевага може відображати підвищену орієнтацію на емоційно забарвлені або неочікувані стимули, що характерно для комбатантів (Sullivan, & Gratton, 1998). Порівняно з бійцями контрольна група демонструє більш рівномірний розподіл когерентності, що вказує на відсутність емоційного перенавантаження та адаптацію до спокійного когнітивного режиму (Nunez, & Srinivasan, 2006). Така білатеральна активація півкуль співвідноситься з даними психіфізіологічних тестів щодо кращих показників центрального перемикачання та міжпівкульного обміну у представників контрольної групи.

Отже, на основі когерентного аналізу ЕЕГ можемо припустити, що учасники групи бійців переживали підвищене когнітивне навантаження та емоційну настороженість, у той час як учасники контрольної групи демонстрували більш стабільну роботу без перенапруження. Також у бійців спостерігалось розширене, функціонально спрямоване залучення нейронних мереж, відповідальних за когнітивну мобілізацію, сенсорну інтеграцію та готовність до дій, у той час як контрольна група реалізувала раціональнішу й менш напружену стратегію, орієнтовану на аналітичне мислення та мовленнєве опрацювання завдання.

З огляду на розглянуті особливості формування нейромереж, можемо припустити, що у бійців ефективність виконання завдання забезпечувалась більшою мірою за рахунок сформованої глобальної дельта-мережі шляхом пригнічення сенсорних входів, що перешкоджають внутрішній концентрації, модулюючи активності тих мереж, які повинні бути неактивними для виконання завдання та активації правопівкульних нейромереж. У той час як у контрольній групі когнітивний контроль здійснювався здебільшого завдяки лівопівкульним фронтальним та центрально-скроневим нейромережам у тета-, альфа- та бета-діапазонах.

Таким чином, встановлено, що комбатанти мають нижчі показники швидкості центрального перемикачання, що є маркером ускладненої міжпівкульної передачі інформації та швидшу реакцію вибору (РВ) лівою рукою, що вказує на домінування правої півкулі й може бути пов'язано з підвищеною орієнтацією на емоційно-забарвлені або неочікувані стимули та бути однією із ознак депресії, до якої могло призвести емоційне вигорання та бойовий стрес комбатантів. Когерентний аналіз ЕЕГ підтвердив домінування активації правої півкулі у бійців, що свідчить про посилену обробку й увагу у них до емоційно-значущих, нових і потенційно небезпечних стимулів. У обстежуваних контрольної групи реєструвалася білатеральна когерентність з переважанням лівопівкульної префронтальної та фронтально-скроневої активності, що свідчить про аналітичну, вербально-мовленнєву стратегію, нижче когнітивне навантаження та адаптацію до стабільного середовища. Виявлені в дослідженні локальні нейромережі у фронтально-центральної та потилично-тім'яних ділянках правої півкулі (F4-Cz-C4, O2-T6), здебільшого у тета- та альфа-діапазонах, притаманні лише бійцям, можуть вказувати на нейрофізіологічну адаптацію до стресу та бойових умов, зокрема на внутрішню компенсацію при переробці складних

стимулів. У контрольній групі обстежуваних локальні нейромережі фронтальних та центрально-скроневій ділянках лівої півкулі (Fp1-F3-F7, C3-T3) у тета-, альфа- та бета-діапазонах, які були відсутні у бійців, можуть свідчити про вербально-аналітичну обробку завдання, притаманну спокійним умовам і перевагу "внутрішнього мовлення" та планування.

Внесок авторів: Ольга Подковка – написання (оригінальна чернетка), емпіричне дослідження та формальний аналіз даних; Микола Макарчук – концептуалізація, написання (перегляд та редагування); Наталія Філімонова – концептуалізація, методологія, програмне забезпечення; Катерина Кравченко – організація дослідження, адміністрування проєкту.

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Макарчук, М. Ю., & Філімонова, Н. Б. (2003). Пропорція золотого перетину в здійсненні сенсорної реакції та реакції вибору як психофізіологічна характеристика здатності до обробки інформації в ЦНС людини. *Фізика живого*, 11(2), 5–13.
- Філімонова, Н. Б. (2000). Комп'ютерна експрес-методика для визначення психофізіологічного стану людини. *Матеріали II Міжнародної науково-методичної конференції "Культура здоров'я як предмет освіти"* (с. 204–209). Херсонський державний педагогічний університет.
- Balkin, T. J., Rupp, T. L., Picchioni, D., & Wesensten, N. J. (2011). Sleep loss and sleepiness: Current issues. *Chest*, 139(3), 654–665. <https://doi.org/10.1378/chest.10-0291>
- Basharpour, S., Heidari, F., & Molavi, P. (2019). EEG coherence in theta, alpha, and beta bands in frontal regions and executive functions. *Applied Neuropsychology: Adult*, 28(3), 310–317. <https://doi.org/10.1080/23279095.2019.1632860>
- Başar, E., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S., & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, 39(2–3), 241–248. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00145-8)
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Dirckx, J. H. (1995). Dorland's illustrated medical dictionary. *JAMA*, 273(10), 821–822. <https://doi.org/10.1001/jama.1995.03520340077042>
- Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations – Signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.03.009>
- Fiser, J., Berkes, P., Orbán, G., & Lengyel, M. (2010). Statistically optimal perception and learning: From behavior to neural representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 119–130. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3003769/>
- Harmony, T. (2013). The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7, Article 83. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083>
- Harmony, T., Fernández, T., Silva, J., Bernal, J., Díaz-Comas, L., Reyes, A., Marosi, E., Yáñez, G., & Rodríguez, M. (2009). EEG delta activity: An indicator of attention to internal processing during mental tasks. *International Journal of Psychophysiology*, 74(1), 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.06.001>
- Hartikainen, K. M. (2021). Emotion–attention interaction in the right hemisphere. *Brain Sciences*, 11(8), 1006. <https://doi.org/10.3390/brainsci11081006>
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1–3), 73–93. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05223-4)
- Imperatori, C., Farina, B., Adenzato, M., Valenti, E. M., Della Marca, G., & Brunetti, R. (2014). Changes in EEG functional connectivity and neuropsychological functioning in combat-related PTSD: A pilot study. *Journal of Affective Disorders*, 169, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2014.07.022>
- Insights Clinical Consulting. (2025, May 7). *Brodman Areas: An intro guide to the function of 10/20 sites*. <https://www.insightscc.com/blog/brodman-areas-an-intro-guide-to-the-function-of-1020-sites>
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2–3), 169–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606–617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Kong, F., Zhang, Y., Wang, X., & Zhao, J. (2021). Frontal theta coherence between mPFC and ACC is associated with cognitive control during decision making. *Neuropsychologia*, 161, 108017. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108017>

- Kublanek, J., & Snyder, L. H. (2020). Theta oscillations support the control of visual attention during movement preparation in the posterior parietal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 124(4), 1291–1304. <https://doi.org/10.1152/jn.00267.2019>
- Kukleta, M., Bob, P., Brázdil, M., Roman, R., & Rektor, I. (2010). The level of frontal-temporal beta-2 band EEG synchronization distinguishes anterior cingulate cortex from other frontal regions. *Consciousness and Cognition*, 19(4), 879–886. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.04.007>
- Li, M., Xu, H., & Lu, S. (2018). Neural basis of depression related to a dominant right hemisphere: A resting-state fMRI study. *Behavioural Neurology*, 5024520, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/5024520>
- Morey, R. A., Petty, C. M., Cooper, D. A., LaBar, K. S., & McCarthy, G. (2010). Neural systems for executive and emotional processing are modulated by symptoms of PTSD in Iraq war veterans. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 184(2), 133–141. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20433243/>
- Morgan, C. A., Hazlett, G., Wang, S., Richardson, E. G., Schnurr, P., & Southwick, S. M. (2006). Symptoms of dissociation in humans experiencing acute, uncontrollable stress. *American Journal of Psychiatry*, 158(8), 1239–1247. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.8.1239>
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511750943>
- Nigbur, R., Cohen, M. X., Ridderinkhof, K. R., & Stürmer, B. (2012). Theta dynamics reveal domain-specific control over stimulus and response conflict. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(5), 1264–1274. <https://doi.org/10.1162/jocn.2011.00128>
- Sadaghiani, S., Hesselmann, G., Friston, K. J., & Kleinschmidt, A. (2012). The relation of ongoing brain activity, evoked neural responses, and cognition. *Neuron*, 74(3), 493–500. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.03.009>
- Sauseng, P., Klimesch, W., Stadler, W., Schabus, M., Doppelmayr, M., Hanslmayr, S., & Birbaumer, N. (2005). A shift of visual spatial attention is selectively associated with human EEG alpha activity. *European Journal of Neuroscience*, 22(11), 2917–2926. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04482.x>
- Spagna, A., Kim, T. H., Wu, T., & Fan, J. (2020). Right hemisphere superiority for executive control of attention. *Cortex*, 122, 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.12.012>
- Sullivan, D., & Gratton, G. (1998). Relationships between brain activity and performance during a visual discrimination task. *Biological Psychology*, 48(2), 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(98\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(98)00049-1)
- Timashkov, A., Anderson, S., & Zinchenko, O. (2025). Neural correlates of uncertainty processing: Meta-analysis of fMRI studies. *Frontiers in Neuroscience*, 19, 1662272. <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1662272>
- Wagner, J., Solis-Escalante, T., Scherer, R., Neuper, C., & Müller-Putz, G. (2014). It's how you get there: Walking down a virtual alley activates premotor and parietal areas. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 93. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00093>

References

- Balkin, T. J., Rupp, T. L., Picchioni, D., & Wesensten, N. J. (2011). Sleep loss and sleepiness: Current issues. *Chest*, 139(3), 654–665. <https://doi.org/10.1378/chest.10-0291>
- Basharpour, S., Heidari, F., & Molavi, P. (2019). EEG coherence in theta, alpha, and beta bands in frontal regions and executive functions. *Applied Neuropsychology: Adult*, 28(3), 310–317. <https://doi.org/10.1080/23279095.2019.1632860>
- Başar, E., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S., & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, 39(2–3), 241–248. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00145-8)
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Dirckx, J. H. (1995). Dorland's illustrated medical dictionary. *JAMA*, 273(10), 821–822. <https://doi.org/10.1001/jama.1995.03520340077042>
- Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations – Signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.03.009>
- Filimonova, N. B. (2000). Computer express methodology for determining the psychophysiological state of a person. *Proceedings of the II International Scientific and Methodological Conference "Health Culture as a Subject of Education"* (pp. 204–209). Kherson State Pedagogical University [In Ukrainian].
- Fiser, J., Berkes, P., Orbán, G., & Lengyel, M. (2010). Statistically optimal perception and learning: From behavior to neural representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 119–130. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3003769/>
- Harmony, T. (2013). The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7, Article 83. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083>
- Harmony, T., Fernández, T., Silva, J., Bernal, J., Díaz-Comas, L., Reyes, A., Marosi, E., Yáñez, G., & Rodríguez, M. (2009). EEG delta activity: An indicator of attention to internal processing during mental tasks. *International Journal of Psychophysiology*, 74(1), 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.06.001>
- Hartikainen, K. M. (2021). Emotion–attention interaction in the right hemisphere. *Brain Sciences*, 11(8), 1006. <https://doi.org/10.3390/brainsci11081006>
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical

framework. *Biological Psychology*, 45(1–3), 73–93. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05223-4)

Imperatori, C., Farina, B., Adenzato, M., Valenti, E. M., Della Marca, G., & Brunetti, R. (2014). Changes in EEG functional connectivity and neuropsychological functioning in combat-related PTSD: A pilot study. *Journal of Affective Disorders*, 169, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2014.07.022>

Insights Clinical Consulting. (2025, May 7). *Brodman Areas: An intro guide to the function of 10/20 Sites*. <https://www.insightssc.com/blog/brodman-areas-an-intro-guide-to-the-function-of-1020-sites>

Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2–3), 169–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)

Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606–617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>

Kong, F., Zhang, Y., Wang, X., & Zhao, J. (2021). Frontal theta coherence between mPFC and ACC is associated with cognitive control during decision making. *Neuropsychologia*, 161, 108017. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108017>

Kublanek, J., & Snyder, L. H. (2020). Theta oscillations support the control of visual attention during movement preparation in the posterior parietal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 124(4), 1291–1304. <https://doi.org/10.1152/jn.00267.2019>

Kukleta, M., Bob, P., Brázdil, M., Roman, R., & Rektor, I. (2010). The level of frontal-temporal beta-2 band EEG synchronization distinguishes anterior cingulate cortex from other frontal regions. *Consciousness and Cognition*, 19(4), 879–886. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.04.007>

Li, M., Xu, H., & Lu, S. (2018). Neural basis of depression related to a dominant right hemisphere: A resting-state fMRI study. *Behavioural Neurology*, 5024520, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/5024520>

Makarchuk, M. Yu., & Filimonova, N. B. (2003). The golden ratio in the implementation of sensorimotor reactions and choice reactions as a psychophysiological characteristic of the ability to process information in the human CNS. *Physics of Life*, 11(2), 5–13 [In Ukrainian].

Morey, R. A., Petty, C. M., Cooper, D. A., LaBar, K. S., & McCarthy, G. (2010). Neural systems for executive and emotional processing are modulated by symptoms of PTSD in Iraq war veterans. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 184(2), 133–141. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20433243/>

Morgan, C. A., Hazlett, G., Wang, S., Richardson, E. G., Schnurr, P., & Southwick, S. M. (2006). Symptoms of dissociation in humans experiencing acute, uncontrollable stress. *American Journal of Psychiatry*, 158(8), 1239–1247. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.8.1239>

Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511750943>

Nigbur, R., Cohen, M. X., Ridderinkhof, K. R., & Stürmer, B. (2012). Theta dynamics reveal domain-specific control over stimulus and response conflict. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(5), 1264–1274. https://doi.org/10.1162/jocn_a.00128

Sadaghiani, S., Hesselmann, G., Friston, K. J., & Kleinschmidt, A. (2012). The relation of ongoing brain activity, evoked neural responses, and cognition. *Neuron*, 74(3), 493–500. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.03.009>

Sauseng, P., Klimesch, W., Stadler, W., Schabus, M., Doppelmayr, M., Hanslmayr, S., & Birbaumer, N. (2005). A shift of visual spatial attention is selectively associated with human EEG alpha activity. *European Journal of Neuroscience*, 22(11), 2917–2926. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04482.x>

Spagna, A., Kim, T. H., Wu, T., & Fan, J. (2020). Right hemisphere superiority for executive control of attention. *Cortex*, 122, 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.12.012>

Sullivan, D., & Gratton, G. (1998). Relationships between brain activity and performance during a visual discrimination task. *Biological Psychology*, 48(2), 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(98\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(98)00049-1)

Timashkov, A., Anderson, S., & Zinchenko, O. (2025). Neural correlates of uncertainty processing: Meta-analysis of fMRI studies. *Frontiers in Neuroscience*, 19, 1662272. <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1662272>

Wagner, J., Solis-Escalante, T., Scherer, R., Neuper, C., & Müller-Putz, G. (2014). It's how you get there: Walking down a virtual alley activates premotor and parietal areas. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 93. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00093>

Отримано редакцією журналу / Received: 01.11.25

Прорецензовано / Revised: 10.11.25

Схвалено до друку / Accepted: 17.11.25

Olga PODKOVKA¹, Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0002-3606-5098

e-mail: ol.podkovka@gmail.com

Mykola MAKARCHUK¹, DSc (Biol.), Prof

ORCID ID: 0000-0002-0982-3463

e-mail: makarchuk_mykola@knu.ua

Natalia FILIMONOVA¹, PhD, Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0002-5133-3003

e-mail: filimonova@knu.ua

Kateryna KRAVCHENKO¹, PhD (Psychol.)

ORCID ID: 0000-0002-8140-1759

e-mail: katerina.kravchenko@knu.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

NEUROPSYCHOPHYSIOLOGICAL MARKERS OF THE COMBATANTS MENTAL STATE DURING CHOICE REACTION TESTING

Background. The study of neuropsychophysiological markers in combatants that reflect the impact of stress exposure, decision-making under critical conditions, and adaptive mechanisms affecting cognitive functioning is one of the most relevant scientific challenges today. The aim of this article is to examine choice reaction (CR) and associated indicators in order to develop effective diagnostic and rehabilitation methods for combatants.

Methods. The study included 37 combatants (aged 25–50 years, including 4 women) and 47 healthy volunteers (aged 19–39 years). All participants completed a test assessing core CR parameters according to the original author-based computer methods. Simultaneously, electroencephalography (EEG) was recorded, followed by coherence analysis. Also 22 combatants (aged 25–50 years, including 2 women) and 5 volunteers undergoing conscription screening (aged 19–26 years) were selected for this analysis.

Results. Central switching speed, derived from CR performance, was significantly higher in the control group ($p = 0,011$), suggesting slower interhemispheric information transfer (between the left and right hemisphere) among combatants and indicating reduced interhemispheric interaction efficiency. No significant differences in overall CR speed were observed between groups. EEG coherence analysis revealed increased right-hemispheric activity in combatants, whereas the control group exhibited bilateral pattern activities with predominant left prefrontal and frontotemporal coherence. This pattern likely reflects enhanced processing of emotionally significant, novel and potentially threatening stimuli in combatants, contrasted with an analytical, verbal-linguistic strategy, lower cognitive load, and adaptation to a stable environment in controls. Local right-hemispheric neural networks in the frontocentral and occipitoparietal regions of the right hemisphere (F4-Cz-C4, O2-T6) were found exclusively in combatants, predominantly within the theta and alpha bands, suggesting a neurophysiological adaptation marker to combat-related stress.

Conclusions. Combatants achieved task performance efficiency through the engagement of a global delta-network that suppressed interfering sensory input and modulated activity within task-irrelevant networks. In contrast, the control group relied on left-hemispheric frontal and centrottemporal neural networks operating within the theta, alpha, and beta ranges to maintain cognitive control.

Keywords: choice reaction, electroencephalography, coherence, combatants.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.