

Нейропсихофізіологічна оцінка візуальної оперативної пам'яті у операторів радіолокаційної станції

О.І. Подковка, М.Ю. Макаруч, Н.Б. Філімонова, І.В. Пампуха, Є. В. Варжанська

ННЦ «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка; e-mail: ol.podkovka@gmail.com

Оператори часто стикаються із високим навантаженням на оперативну пам'ять, оскільки будь-яка корисна інформація має бути завжди доступною та наданою оператору. Таким чином, ми припустили, що вони могли розвинути адаптації в механізмах реалізації оперативної пам'яті, які допомагають їм бути більш ефективними в умовах інформаційного перевантаження. Метою роботи було дослідження нейропсихофізіологічних особливостей функціонування візуальної оперативної пам'яті у операторів радіолокаційної станції (РЛС) та представників інших військових спеціальностей (контроль). Для цього одночасно з проходженням оригінальних комп'ютерних тестів оцінки функціонування візуальної оперативної пам'яті двох рівнів складності у всіх обстежуваних реєстрували електроенцефалограму (ЕЕГ) з подальшою обробкою її методами когерентного аналізу та комп'ютерної програми LORETA. Також записували електрокардіограму, на основі якої розраховували індекс напруження регуляторних систем методами варіаційної пульсометрії. Було виявлено, що швидкість реакції в обох тестах з різними рівнями складності, а також кількість помилок при їхньому здійсненні не відрізнялися вірогідно у операторів РЛС та обстежуваних контрольної групи. Водночас у осіб контрольної групи була достовірно вищою кількість когерентних зв'язків в θ -діапазоні між фронтальними ділянками в обох тестах, що може свідчити про вищий рівень ментального напруження та емоційного залучення при проходженні такого тестування у військових, які не є операторами РЛС. Доказом цього слугує і те, що у них при підвищенні складності тестового завдання закономірно зростає і індекс напруження регуляторних систем. Аналіз ЕЕГ методом LORETA виявив, що у операторів РЛС ступінь залучення фронто-парієтальної, цингуло-оперкулярної мережі, клину та передклину був на високому рівні з самого початку тестувань, незалежно від їх складності, тоді як у обстежуваних контрольної групи активність цих ділянок закономірно зростала зі збільшенням складності завдання. Таким чином у операторів РЛС розвиваються адаптаційні зміни функціонування механізмів оперативної пам'яті, які роблять їх здатними до запам'ятовування та маніпулювання великими обсягами інформації в оперативній пам'яті в будь-який момент часу без надмірних зусиль.

Ключові слова: оперативна пам'ять; когерентність; нейронні мережі; електроенцефалограма; вегетативна регуляція; обробка інформації; профвідбір; варіаційна пульсометрія; LORETA.

ВСТУП

Число стимулів, які слід обробити, є критично важливим фактором ефективності прийняття рішень людиною. Якщо вони надаються послідовно, їх збільшення в одному часовому проміжку посилює вплив тривалості проміжку часу на ефективність виконання завдання. Зазвичай відповідно до добре встановленої залежності швидкість-точність це призводить до збільшення кількості помилок [1].

© Інститут фізіології ім. О.О. Богомольця НАН України, 2023

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2023

Якщо ж декілька релевантних стимулів надуються одночасно, зростання їхньої кількості спричиняє розподіл уваги і збільшує час реакції (reaction time, RT), а також імовірність допущення помилок. Це пояснюється тим, що за однакових умов обробка одного релевантного стимулу ускладнює (порушує) обробку інших значимих стимулів, оскільки людські можливості обробляти інформацію обмежені [2], тому факт розподілу уваги між декіль-

кома стимулами часто може призводити до загального зниження ефективності реакцій і проявляється у зростанні часу реакції та/або збільшенні частоти помилок. Таким чином, у сенсомоторній діяльності, якщо результативність (ефективність) має вирішальне значення, слід уникати, коли це можливо, умов, за яких відбувається розподіл уваги.

Основні властивості нервової системи разом із властивостями психофізіологічних функцій – одні із важливих факторів формування індивідуальних характеристик трудової діяльності [3]. Будь-який вид напруженої роботи вимагає високої швидкості нервових процесів, що відображаються в швидкості реакцій, мисленні тощо. У свою чергу оптимізація вищезгаданих функцій забезпечується посиленням метаболізму кіркових нейронів, що реалізується через зростання швидкості активних ангіотонічних змін (змін тону судин), які розвиваються у межах відповідних нейронних модулів [4].

Для вивчення рівня активності механізмів вегетативної регуляції серцево-судинної системи паралельно з проходженням тестів на визначення обсягу оперативної пам'яті ми оцінювали індекс напруження (ІН) механізмів регуляції системи кровообігу. ІН, як похідний показник ритму серця, враховує співвідношення між його основними параметрами і відображає ступінь централізації процесів його регулювання [5]. При збільшенні симпатичного тону, мода R-R-інтервалів зазвичай зменшується, що призводить до збільшення ІН. Посилення ж парасимпатичного тону, навпаки, викликає збільшення моди і зменшення цього показника [5]. Будь-яка стійка адаптація до умов навчання та професійної діяльності має для організму свою «вартість», яка може виявлятися у прямому виснаженні функціональних систем, на котрі у процесі адаптації припадає найбільше навантаження. Тому при профвідборі важливо враховувати не тільки якість виконання завдання, але і кількість зусиль, тобто «вартість», яку організм «платить» за здійснення такого за-

вдання. Отже, можна стверджувати, що ефективність професійної діяльності є співвідношенням корисного результату та витрачених адаптивних ресурсів на його досягнення.

Операторам часто надають кілька стимулів, що відповідають інформації, яка може бути корисною, навіть якщо більшу частину часу вони не є актуальними (оскільки будь-яка корисна інформація повинна завжди бути доступною та наданою оператору). Як наслідок, якщо стимули не потрібні в певний момент, вони будуть діяти як відволікаючі фактори, особливо для не експертів під час вивчення завдання. Наприклад, така ситуація може скластися у разі використання деяких проєкційних дисплеїв. Ми припускаємо, що внаслідок дії інформаційного перенавантаження оператори мають певні адаптаційні зміни фізіологічної відповіді організму при виконанні таких завдань.

Важливо краще зрозуміти різні стратегії обробки інформації в умовах зростаючого навантаження та посприяти створенню рекомендацій на основі психофізіологічного портрету людини, які в майбутньому використовуватимуть для ефективного профвідбору. Крім того, розуміння загальних принципів обробки інформації з урахуванням вроджених і набутих нейрофізіологічних і нейропсихологічних особливостей людини можуть бути використані для обрання оптимальних стратегій її навчання.

Метою нашої роботи було дослідити рівень напруження регуляторних систем організму, особливості формування нейромереж головного мозку, а також встановити зони його максимальної активації при виконанні завдань двох рівнів складності при визначенні ефективності та обсягу оперативної пам'яті у операторів радіолокаційної станції (РЛС).

МЕТОДИКА

Обстежено 26 праворуких волонтерів без скарг на здоров'я (22 чоловіки та 4 жінки),

яких розподілили на дві групи. До першої групи (контроль) ввійшло 17 осіб (16 чоловіків, 1 жінка) віком 19–39 років – представників різних військових професій (механіки, водії, службовці зенітно-ракетних військ, зв'язківці, планшетисти, льотчики та призовники військкомату); до другої (експеримент) – 9 осіб (6 чоловіків, 3 жінки, віком 20–40 років – оператори РЛС високого професійного рівня. Всі обстежені отримали детальну інформацію щодо процедур дослідження, обов'язковою умовою участі в яких була їхня добровільна письмова згода. Дослідження виконано відповідно до вимог дотримання етичних норм і принципів Гельсінської декларації.

Рівень розвитку оперативної пам'яті тестували за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми [6], а саме, тестів «Геометричні фігури з однією ознакою» (ГМ1) та «Геометричні фігури з двома ознаками» (ГМ2). Обстеженим для запам'ятовування пред'являли геометричні фігури, кількість яких послідовно зростала від 2 до 7. Кожну множину фігур у тестах повторювали по 10 разів з випадковою комбінацією різних фігур, час експозиції становив 1,5 с, після чого фігури згасали, а через 1 с з'являлася фігура, стосовно якої слід було відповісти, чи була вона в попередній множині, для чого треба було правою рукою натиснути клавішу “/”, чи її там не було і натиснути лівою рукою клавішу “z”. У першому тесті ГМ1 оцінювали оперативну пам'ять на прості геометричні фігури з однією ознакою (круг, еліпс, квадрат, ромб та інші), у другому тесті ГМ2 оцінювали оперативну пам'ять на геометричні фігури з двома ознаками: (круг, еліпс, квадрат та прямокутник) і зафарбування вертикальної або горизонтальної половини фігури. Цей тест моделював стан інформаційного перенавантаження, оскільки у попередніх дослідженнях було виявлено, що рівень складності цього завдання є надмірним для більшості обстежених – у них вже при пред'явленні 4 стимулів різко зро-

стала кількість помилок, а латентні періоди реакції істотно зменшувалися, що свідчило про хаотичність, випадковість відповіді [7]. У тестах реєстрували час реакції з точністю до 10 мс, після чого обчислювали середній час реакції на певну кількість стимулів та визначали кількість помилок.

Для реєстрації електроенцефалограми (ЕЕГ) та її аналізу використовували комплекс Нейрон-Спектр-4/VP («NeuroSoft»). Запис проводили у звукоізольованій кімнаті, монополярно, з частотою квантування 500 Гц, референтні електроди були розташовані на мочках вух. У дослідженні були використані мостикові посріблені електроди, які наклали 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: δ (0,5–3,9 Гц), θ (4,0–7,9 Гц), α (8,0–13,9 Гц), β_1 (14,0–19,9 Гц) і β_2 (20,0–35,0 Гц), розраховали когерентності для кожної пари електродів.

Для отримання координат диполів активності головного мозку обстежених при виконанні тестового завдання для всіх частотних діапазонів ми використали комп'ютерну програму електромагнітної томографії низької роздільної здатності LORETA (Low Resolution brain Electric Tomography software) – валідований метод для локалізації електричної активності в мозку на основі мультіканального поверхневого запису ЕЕГ [8]. Реєстрацію та аналіз ЕКГ робили на комплексі «Полі-Спектр» («NeuroSoft»).

Статистичний аналіз здійснювали за допомогою пакету програм Statistica 8.0 («StatSoft», США). Критичним рівнем значущості при тестуванні статистичних гіпотез вважали 0,05. Для оцінки відмінностей між двома незалежними вибірками використовувався U-критерій Манна-Уїтні. Дистантну синхронізацію зон мозку при виконанні тестових завдань визначали за допомогою когерентного аналізу. Середнє значення функції

когерентності залежить від наявності шуму в сигналах. Так, якщо він становить більше як 30–40%, стає проблемним 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 «витоку» спектра виникають додаткові бічні піки, які можуть становити понад 40% амплітуди центрального піку. Це впливає на фазову когерентність, а отже, і на її значення. Тим самим коефіцієнт когерентності дає завищену оцінку щодо ступеня синхронізації процесів, через що при проходженні тестових завдань достовірна синхронізація визначалася тільки для тих пар відведень, для яких медіана була $\geq 0,7$ [9].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз отриманих результатів показав, що швидкість реакції в обох тестах, а також кількість помилок при їх здійсненні не мала вірогідних відмінностей у операторів РЛС щодо контролю. Для оцінки центральної тенденції використовували медіану (Me), а розкиду – міжквартильний розмах [25%; 75%]. Швидкість реакції у ГМ1 у операторів РЛС була 1037 [869; 1182] мс (за критерієм Манна-Уїтні $P = 0,125$), а відносна кількість допущених помилок – 0,267 [0,250; 0,283] ($P = 0,317$). При проходженні тесту ГМ2 швидкість реакції у операторів РЛС становила 900 [832; 1280] мс ($P = 0,293$), а відносна кількість помилок – 0,333 [0,300; 0,367] ($P = 0,725$).

Отримані результати вказують на відсутність перебудови реакції серцево-судинної системи в операторів РЛС порівняно з контрольною групою при підвищенні рівня складності завдання (див. рис. 1). На основі аналізу ЕКГ методами варіаційної пульсометрії були розраховані показники активації симпатичного та парасимпатичного відділів автономної нервової системи, а також ІН регуляторних систем, який відображає ступінь

централізації керування серцевим ритмом [10]. При невеликому фізичному або емоційному навантаженні він зростає в 1,5–2 рази, а при значних навантаженнях – навіть у 5–10 разів [10].

Когерентний аналіз ЕЕГ виявив, що нейронні механізми, які забезпечували здійснення тестів ГМ1 та ГМ2, істотно відрізнялися для операторів РЛС та групи контролю. Під час тестів на всіх рівнях складності для контрольної групи були характерні зв'язки між фронтальними та префронтальними ділянками в θ -діапазоні (F3-Fp1; F4-Fp2) на відміну від операторів РЛС (окрім ГМ2.7, де зв'язок F4-Fp2 був відсутній у контрольній

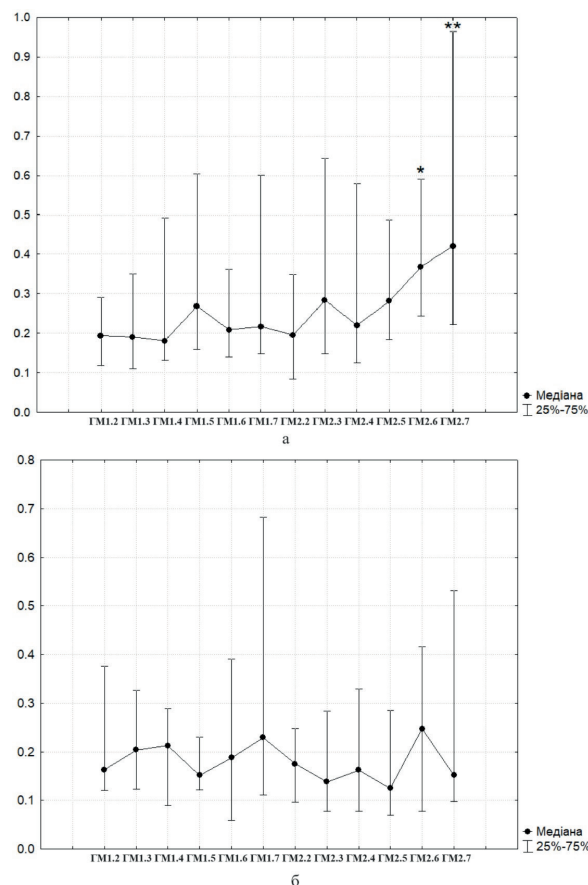


Рис. 1. Індекс напруження під час проходження тестів «Геометричні фігури з однією ознакою» (ГМ1) та «Геометричні фігури з двома ознаками» (ГМ2) відповідно для 2, 3, 4, 5, 6 та 7 стимулів; а – контрольна група, б – група операторів радіолокаційної станції

групі та наявний у операторів РЛС; рис. 2; 3). Кортикальні θ -ритми, ймовірно, генеруються в гіпокамально-кортикальних петлях зворотного зв'язку [11]. Порівняно з базовим рівнем потужність в θ -діапазоні збільшується під час кодування, підтримання та реалізації оперативної пам'яті [11]. Вона модулюється пропорційно кількості елементів, які слід запам'ятати, тобто обсягу оперативної пам'яті [11]. Інші дослідження наголошують на тому, що θ -діапазон пов'язаний із сфокусованою увагою [12]. Збільшення θ -активності корелює зі складністю завдання та емоційним фактором [13], тому можна припустити, що для операторів РЛС виконання обох тестів потребувало менших зусиль, ментального напруження та емоційного залучення порівняно з контрольною групою, що збігається з динамікою ІН регуляторних систем.

Патерн когерентностей у фронтальних та префронтальних ділянках під час виконання тесту ГМ2 був досить схожий на ГМ1 як у групі операторів РЛС, так і в контрольній. Важливо відмітити, що під час виконання як тесту ГМ1, так і ГМ2 у контрольній групі спостерігалось значно більше когерентних зв'язків у α -діапазоні. Спочатку α -ритм

асоціювався з психічним станом «холостого ходу», але нещодавно було виявлено, що він відіграє функціональну гальмівну роль у фокусуванні уваги та реалізації оперативної пам'яті [11]. Кортикальний α -ритм генерується через таламо-кортикальні та кортико-кортикальні петлі [11]. Також було показано, що він збільшується разом із кількістю елементів, які потрібно запам'ятати в різних сенсорних ділянках, а отже, відображає обсяг оперативної пам'яті [11]. Однак коливання в α -діапазоні можуть головним чином служити для захисту інформативного вмісту оперативної пам'яті від надходження відволікаючої інформації, оскільки α -потужність також зростає, коли кількість відволікаючих факторів збільшується [11]. Крім того, існують дослідження, що вказують на роль α -ритму у забезпеченні точності оперативної пам'яті, тобто α -коливання корелюють і з якістю оперативної пам'яті [11]. Оскільки якість виконання не мала значущих відмінностей між групами, можна припустити, що контрольна група задіявала більшу кількість ресурсів (наприклад, для блокування відволікаючої інформації) для досягнення того самого результату, що і оператори РЛС.

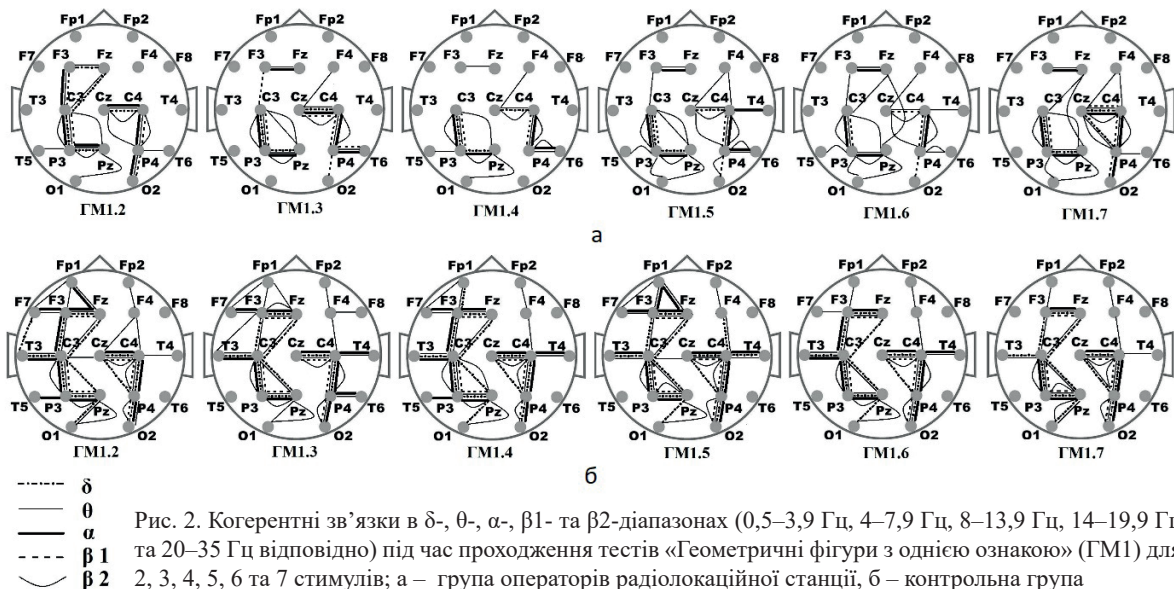


Рис. 2. Когерентні зв'язки в δ -, θ -, α -, β_1 - та β_2 -діапазонах (0,5–3,9 Гц, 4–7,9 Гц, 8–13,9 Гц, 14–19,9 Гц та 20–35 Гц відповідно) під час проходження тестів «Геометричні фігури з однією ознакою» (ГМ1) для 2, 3, 4, 5, 6 та 7 стимулів; а – група операторів радіолокаційної станції, б – контрольна група

Слід відмітити зв'язки в β -діапазоні між відведеннями Fz-Pz, які були лише в операторів РЛС під час проходження тесту ГМ1 для 6 та 7 стимулів. Існують дані, що сила амплітудної модуляції в β -діапазоні у середньо-фронтальних ділянках під час пізньої фази запам'ятовування та реалізації візуальної оперативної пам'яті корелює з її продуктивністю [14]. Крім того є відомості про роль середньо-лобної та середньо-тім'яної ділянок у динаміці обробки гальмівного контролю емоційних стимулів при здійсненні завдання [15]. Інше дослідження виявило, що кореляційні показники у приматів свідчать про збільшення лобно-тім'яної β 2-синхронізації під час розподілу зорово-просторової уваги із залученням механізму зверху-вниз [16].

На відміну від операторів РЛС, статистично вірогідні когерентності між відведеннями P3-O1 у контрольній групі виявлено лише при проходженні тесту ГМ2. Водночас когерентність між відведеннями P4-O2 як для ГМ1, так і для ГМ2 була значно більш виражена в контрольній групі. Оскільки зорова кора лівої півкулі пов'язана з системою виділення ін-

формативних ознак, а правої – зі сприйняттям зразка в цілому [17], можна припустити, що оператори РЛС звертають увагу на конкретні деталі вже з найлегших рівнів завдання, а обстежені контрольної групи підключають систему виділення інформаційних ознак лише при ускладненні завдання.

Аналіз за допомогою методу LORETA (Thrsh: One-Tailed (A>B) для $t(0,05) = 1,158 - 2,270$ для контрольної групи; Thrsh: One-Tailed (A > B) для $t(0,05) = 2,169 - 2,462$ для операторів РЛС), виявив істотну активність в обох групах, починаючи вже з перших рівнів завдання. Оскільки нас цікавили відмінності в активації ділянок, які забезпечують функціонування оперативної пам'яті, ми звернули особливу увагу на такі зони мозку: лобно-тім'яна мережа, зокрема, дорсолатеральна префронтальна кора (ДЛПФК), верхнятім'яна часточка, клин, передклин, нижнятім'яна часточка, веретеноподібна звивина, нижня лобова звивина, а також, цингуло-оперкулярна мережа [18, 19].

Загалом, активація верхньоїтім'яної часточки переважала в операторів РЛС у тесті

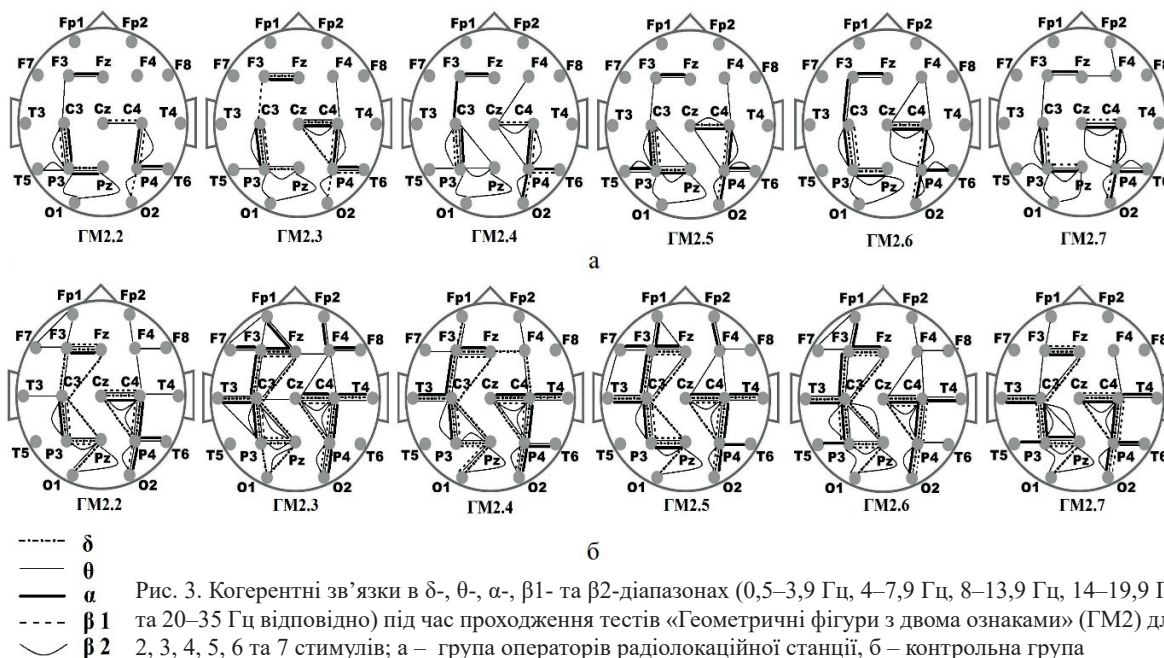


Рис. 3. Когерентні зв'язки в δ -, θ -, α -, β 1- та β 2-діапазонах (0,5–3,9 Гц, 4–7,9 Гц, 8–13,9 Гц, 14–19,9 Гц та 20–35 Гц відповідно) під час проходження тестів «Геометричні фігури з двома ознаками» (ГМ2) для 2, 3, 4, 5, 6 та 7 стимулів; а – група операторів радіолокаційної станції, б – контрольна група

ГМ1, а ДЛПФК (відповідає середній лобовій звивині) – в обох тестах. Верхня тім'яна часточка активувалася у ГМ1 в завданнях 1.3, 1.4, 1.6, 1.7 у операторів РЛС та в ГМ1.3 у контрольній групі; у ГМ2 в завданнях 2.2, 2.4, 2.7 у операторів РЛС, та в завданнях 2.2, 2.4, 2.6 в контрольній групі. ДЛПФК активувалася у ГМ1 в завданнях 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 у операторів РЛС, та в завданнях 1.2, 1.5, 1.7 в контрольній групі; у ГМ2: в завданнях 2.3, 2.6, 2.7 у операторів РЛС, та в завданнях 2.3, 2.5 у контрольній групі.

Отже, можна помітити, що верхня тім'яна часточка і ДЛПФК активувалися в реципрокному режимі як у контрольній групі, так і в операторів РЛС. Справді, в дослідженнях на людях майже завжди повідомляється про одночасну префронтальну та тім'яну активацію в завданнях на оперативну пам'ять. Хоча відмінні та спільні ролі цих ділянок залишаються недостатньо вивченими, було показано, що вибірковість об'єктів, яка спостерігається в дорсолатеральних префронтальних нейронах, може бути пояснена широким, але значним налаштуванням на форму стимулу, яка є вже на рівні задньої тім'яної кори. Також є відомості, що парієтальні нейрони стійко реагують на відволікаючі стимули у рецептивному полі, припиняючи репрезентувати наданий стимул, хоча тварина продовжує зберігати зразок у пам'яті та успішно завершує спробу. Префронтальні нейрони, з іншого боку, кодуєть сигнал, який активно запам'ятовується. Важливо також відзначити, що ДЛПФК відіграє вирішальну роль у швидкості обробки візуальної інформації [20]. Ці дослідження демонструють зв'язок функцій уваги та оперативної пам'яті. Отже, активація ДЛПФК у більшій кількості завдань у операторів РЛС разом із підвищеною активацією верхньої тім'яної ділянки може свідчити про те, що вони звертали увагу на більшу кількість стимулів та мали здатність краще фокусуватися на фігурах, які слід запам'ятати. З іншого боку, оскільки якість виконання не відрізнялася від контрольної групи та не від-

бувалося статистично вірогідного зростання ІН регуляторних систем, можна припустити, що оператори РЛС задіювали свої здібності не повною мірою, ймовірно, через нестачу мотивації у виконанні цього завдання, адже відомо, що при збільшенні ІН зростає ступінь залучення когнітивних процесів, і, як наслідок, ступінь їхнього вегетативного забезпечення [5].

Загалом, вважається, що лобно-тім'яна мережа відповідає за модуляцію активності сенсорної кори зверху–вниз як під час процесів підготовки уваги, так і під час орієнтування в пам'яті. На відміну від неї, цингуло-оперкулярна мережа має менше значення у когнітивному контролі, можливо, це пов'язано з вихідним стробуванням пам'яті [18].

Було показано, що підвищена активність цингуло-оперкулярної кори спостерігалася під час виконання перцептивних і когнітивних завдань, особливо коли люди робили помилки або були невпевнені у своїх реакціях [21]. Крім того, активність цієї мережі пов'язують з підтриманням та оновленням правил під час виконання завдання. Так звана модель подвійної мережі висуває припущення, згідно з яким фронтально-парієтальна мережа, що швидко адаптується, ініціює та коригує когнітивний контроль під час виконання завдання та цингуло-оперкулярна мережа, що підтримує виконання завдання на більш тривалому часовому проміжку, діють паралельно [22].

У нашому дослідженні цингулярна кора активувалася значно частіше у операторів РЛС при проходженні тесту ГМ1 порівняно з контрольною групою, але у тесті ГМ2 її активність ставала нижчою, ніж у контролі. Статистично вірогідна активність для ГМ1 була в завданнях 1.2-1.5, 1.7 в операторів РЛС та 1.2, 1.7 в контрольній групі; у ГМ2 в завданнях 2.3, 2.6 в операторів РЛС та 2.3, 2.4, 2.7 в контрольній групі.

Отже, можна припустити, що оператори РЛС ставали більш впевнені в своїх відпові-

дах з проходженням тестів та підвищенням складності завдань, швидко пристосовуючись до них, а для обстежуваних контрольної групи був характерний зворотний процес. Вища активності поясної кори в ГМ1 та значно нижча в ГМ2 у операторів РЛС може свідчити про адаптацію до вимог завдання та автоматизацію його виконання разом з постійним коригуванням когнітивного контролю фронто-парієтальною мережею.

Bashivan зі співавт. [19] виявили, що операції «кодування» та «підтримання» оперативної пам'яті корелюють із негативними та позитивними змінами потужності α -діапазону відповідно. Перехідна активність спостерігалася під час кодування інформації в білатеральному клині, передклинні, нижній тім'яній та веретеноподібній звивинах, а також стійка активність у нижній лобовій звивині. У нашому дослідженні активація клину та передклинку відбувалась у ГМ1 у завданнях 1.2 (тільки передклин), 1.3, 1.4, 1.6, 1.7 (тільки передклин) у операторів РЛС та 1.3 у контрольній групі; у ГМ2 в завданнях 2.2-2.4 та 2.7 у операторів РЛС та 2.2, 2.4, 2.6, 2.7 у контрольній групі. Отже, відмінності в активації клину та передклинку були наявні лише при виконанні простішого завдання, де для операторів РЛС його залучення відбувалось частіше порівняно з контролем. Існують дані, що передклин діє як буфер, який пов'язує потужність і з лобову ділянку для гіпотетичного кодування та активної підтримки візуальної інформації [21]. Окрім того, припускається, що є зв'язок між активністю кодування інформації та індивідуальною ємністю оперативної пам'яті, а саме, між кількістю стимулів, які потрібно запам'ятати та α - і β -потужністю в передклинні [21]. Тобто, вірогідно, в операторів РЛС активність кодування інформації була на високому рівні з самого початку виконання завдання, в той час як у контрольній групі зростала при підвищенні складності завдання.

Активація нижньої тім'яної ділянки переважала в операторів РЛС під час виконання

завдань тесту ГМ1, тоді як у ГМ2 здебільшого у контрольній групі: в ГМ1 у завданнях 1.3, 1.6, 1.7. в операторів РЛС та у завданні 1.3 в контрольній групі; у ГМ2 в завданнях 2.4, 2.7 в операторів РЛС та 2.2, 2.4, 2.6, 2.7 в контрольній групі.

Було показано, що при збільшенні складності завдання зростає білатеральна активація нижньої тім'яної ділянки [23]. Цікаво, що у нашому дослідженні ця ділянка з самого початку активніше залучалась у операторів РЛС, а в контрольній групі її участь дійсно зростала при збільшенні рівня складності завдання. Отже, можна припустити, що, на відміну від контролю, у операторів РЛС залучення нижніх тім'яних ділянок відбувається з найнижчих рівнів навантаження робочої пам'яті та не змінюється в процесі ускладнення завдання. Це, можливо, є проявом адаптації до специфіки їхньої діяльності, яке вимагає постійного та повноцінного залучення оперативної пам'яті.

Веретеноподібна звивина активувалася у операторів РЛС при виконанні завдань ГМ1.5, 1.7, 2.3, 2.5, а в контрольній групі – ГМ1.2, 1.4-1.7, 2.5-2.7. Вона залучена до візуальної фіксації, візуальної оперативної пам'яті при опрацюванні завдань, та є частиною вентрального візуального шляху (шлях «що»), який відповідає за процес візуальної ідентифікації об'єкта (розпізнавання). Також у дослідженні візуальної оперативної пам'яті при вивченні китайської мови виявлено коактивацію середньої частини веретеноподібної звивини та передклинку після тренування зорової оперативної пам'яті, що свідчило про її взаємодію з процесами уяви та сприяло узгодженому синтезу перцептів із загальної складної картини, покращуючи вивчення китайських ієрогліфів [24]. Оскільки у нашому дослідженні веретеноподібна звивина активувалась частіше в контрольній групі, можна припустити, що процеси уяви у них були задіяні частіше, ніж у операторів РЛС.

Нижня лобова звивина була активна лише в обстежуваних контрольної групи при вико-

нанні завдань ГМ1.2, 1.5, 1.7, а також ГМ2.5. Відомо, що нижня лобова звивина, передня поясна кора та тім'яна кора також мають виходи до периферичної серцево-судинної системи, завдяки чому ці ділянки залучені не лише в процеси, пов'язані з пам'яттю та емоційним регулюванням, але і реакції на стрес [25]. Тому ми припускаємо, що відмінності в активації цих структур можуть бути причиною стрибка ІН регуляторних систем у контрольній групі. Також відомо про різке збільшення α -потужності в нижній лобовій звивині при збільшенні навантаження. Це, ймовірно, означає, що вона пригнічується (та/або різко напружується) під час вищих вимог до обробки інформації. Тим не менш інше пояснення може бути пов'язане з виконавчими функціями, що відображають обробку зверху–вниз, таку як ментальне повторення інформації та кортико-кортикальні взаємодії [19]. Це також свідчить про те, що при меншому навантаженні повторення залишається неактивним і задіється лише під час збільшення навантаження на пам'ять через взаємодію нижньої лобової звивини та передкліну. Оскільки в операторів РЛС нижня лобова звивина лишалася не активною, можна припустити, що для них проходження тестів було в цілому більш легким порівняно з контрольною групою.

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити висновок, що у операторів РЛС обробка інформації на обох рівнях складності відбувається на основі її безпосереднього сприйняття, розпізнавання в зорових ділянках та пов'язаних з ними структурах парієтальної кори при підвищеному рівні уваги у префронтальній зоні. Натомість у контрольній групі активність залучення фронто-парієтальної, цингуло-оперкулярної мережі, клину та передкліну зростає зі збільшенням складності завдання, що, ймовірно, є причиною зміни ІН регуляторних систем. При цьому достовірно вища кількість когерентних зв'язків в θ -діапазоні між фронтальними ділянками в контрольній групі в ГМ1 та ГМ2

може свідчити про вищий рівень ментального напруження та емоційного залучення. Незважаючи на відсутність видимих відмінностей у результативності виконання завдання, характер формування нейромереж та динаміка ІН у обстежуваних контрольній групі свідчать про вищу «вартість» його реалізації, а отже, нижчу ефективність порівняно з операторами РЛС, що з часом може призводити до швидкого зношування функціональних систем і професійного вигорання людини. Це доводить необхідність застосування комплексного підходу під час здійснення профвідбору із залученням фізіологічних, психофізіологічних та нейробіологічних методів обстеження.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що швидкість реакції в тестах ГМ1 та ГМ2, а також кількість помилок при їх здійсненні не відрізняються вірогідно у операторів РЛС та в контрольній групі, у якій при цьому достовірно вища кількість когерентних зв'язків в θ -діапазоні між фронтальними ділянками в тестах ГМ1 та ГМ2 може свідчити про вищий рівень ментального напруження та емоційного залучення. Це припущення підтверджується наявністю процесів перебудови реакції серцево-судинної системи в обстежених контрольній групі при підвищенні складності завдання. У контрольній групі ступінь залучення фронто-парієтальної, цингуло-оперкулярної мережі, клину та передкліну зростає поступово зі збільшенням складності завдання, в той час як у операторів РЛС активність цих ділянок була високою, починаючи з найлегших рівнів, що може бути пов'язано з адаптаційними змінами оперативної пам'яті останніх, завдяки яким вони готові до запам'ятовування та маніпулювання великими обсягами інформації в будь-який момент без витрачання надмірних зусиль. Характер формування нейромереж та значення ІН у контрольній групі свідчать про вищу «вартість» виконання завдання, а отже, нижчу ефективність порівняно з операторами РЛС.

Тому для проведення повноцінного проф-відбору ми рекомендуємо використовувати комплексний підхід із залученням фізіологічних, психофізіологічних та нейробіологічних методів тестування.

О.І. Podkovka, М.У. Makarchuk, N.B. Filimonova, I.V. Pampuha, Ye.V. Varzhanska

NEUROBIOLOGICAL AND PSYCHOPHYSIOLOGICAL DIFFERENCES OF VISUAL WORKING MEMORY FUNCTIONING IN RADAR STATION OPERATORS

ESC "Institute of Biology and Medicine" of Taras Shevchenko National University of Kyiv; e-mail: ol.podkovka@gmail.com

Operators are often subjected to a high working memory load as far as any possibly useful information must always be available and presented to the operator. Thus, we assumed that they may have developed adaptations in mechanisms of working memory realization that help them to be more efficient in information overload conditions. Our aim was to define differences in visual working memory functioning in radar station operators (RSO) and other military profession representatives. For this purpose, in parallel with the performance of original computer tests for the visual working memory identification, which had two levels of complexity, we recorded an electroencephalogram with subsequent coherent and LORETA analysis and electrocardiogram with subsequent determining of stress index of the regulatory systems. It was found that reaction time, as well as the number of errors in both tests, didn't differ significantly for the two groups. At the same time, the control group had a significantly higher number of θ -band coherent connections in the frontal lobe in both tests, which could indicate a higher level of mental stress and emotional involvement. This assumption was confirmed by the stress index dynamic in the control group. LORETA analysis showed that in the RSO group, the degree of fronto-parietal, cingulo-opercular networks, cuneus and precuneus involvement was at a high level from the very first tasks, while in the control group, it increased with task complexity, that is the evidence of adaptive changes in the working memory of RSO, due to which they successfully cope with information overload.

Key words: working memory; coherence; neural networks; electroencephalogram; autonomic regulation; information processing; professional selection; variation pulsometry; LORETA.

REFERENCES

1. Bogacz R, Wagenmakers E-J, Forstmann BU, Nieuwenhuis S. The neural basis of the speed-accuracy tradeoff. *Trends Neurosci.* [Internet]. 2010 Jan;33(1):10-6.

2. Franconeri SL, Alvarez GA, Cavanagh P. Flexible cognitive resources: competitive content maps for attention and memory. *Trends Cogn Sci.* 2013 Mar;17(3):134-41.

3. Makarenko MV. Role of individual typological properties of higher nervous activity at professional selection. *Fiziol Zh.* 2001;47(5):3-10.

4. Yukhymenko L, Makarchuk M, Imas Ye, Shcherbashyn Ya, Korobeynikova L, Korobeynikov G, Dutchak M. Link between brain circulation and nervous mobility of athletes and non-athletes during the orthostatic test. *J Phys Educat Sport.* 2020;20(6):3660-70.

5. Kovalenko SO. Heart rate variability. *Methodological Aspects.* Cherkasy: Bohdan Khmelnytsky Natl Univ of Cherkasy. 2016.

6. Filimonova N. The computer's express method for the designation of a psychophysiological status of people. In: the 2nd International Sci-Methods Conference Health Culture as an Object of Education. 2000. Kyiv. Ukraine: p. 204-9.

7. Filimonova NB, Kutsenko TV, Makarchuk MJ. Features of the processing of oral verbal and non-verbal information in the working memory of a person. *Phys Liv.* 2006;14(3):75-86.

8. Pascual-Marqui RD, Michel CM, Lehmann D. Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *Int J Psychophysiol.* 1994;18(1):49-65.

9. Kulaichev AP. The informativeness of coherence analysis in EEG studies. *Neurosci Behav Physiol.* 2011;41(3):321.

10. Sharma N, Shenoy S. Association between heart rate variability and executive function performance: Across-sectional study in adult population. *NeuroRegulation.* 2023;10(2):78-93.

11. Ku Y, Bodner M, Zhou Y-D. Prefrontal cortex and sensory cortices during working memory: quantity and quality. *Neurosci Bull.* 2015 Mar 2;31(2):175-82.

12. Gevins A, Leong H, Smith ME, Le J, Du R. Mapping cognitive brain function with modern high-resolution electroencephalography. *Trends Neurosci.* 1995 Oct;18(10):429-36.

13. Harmony T, Fernández T, Silva J, Bernal J, Díaz-Comas L, Reyes A, et al. EEG delta activity: an indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks. *Int J Psychophysiol.* 1996 Nov 1;24(1):161-71.

14. Liang W-K, Tseng P, Yeh J-R, Huang NE, Juan C-H. Frontoparietal beta amplitude modulation and its interareal cross-frequency coupling in visual working memory. *Neuroscience.* 2021;460:69-87.

15. Nayak S, Tsai AC. Fronto-parietal regions predict transient emotional states in emotion modulated response inhibition via low frequency and beta oscillations. *Symmetry.* 2022 Jun 15;14(6):1244.

16. Stengel C, Vernet M, Amengual JL, Valero-Cabré A. Causal modulation of right hemisphere fronto-parietal phase synchrony with transcranial magnetic stimulation during a conscious visual detection task. *Sci Rep.* 2021 Feb 15;11(1).

17. Kuriki S, Takeuchi F, Hirata Y. Neural processing of words

- in the human extrastriate visual cortex. *Cogn Brain Res.* 1998 Jan;6(3):193-203.
18. Wallis G, Stokes M, Cousijn H, Woolrich M, Nobre AC. Frontoparietal and cingulo-opercular networks play dissociable roles in control of working memory. *J Cogn Neurosci.* 2015 Oct;27(10):2019-34.
 19. Bashivan P, Bidelman GM, Yeasin M. Spectrotemporal dynamics of the EEG during working memory encoding and maintenance predicts individual behavioral capacity. *Eur J Neurosci.* 2014 Oct 7;40(12):3774-84.
 20. Constantinidis C, Wang X-J. A neural circuit basis for spatial working memory. *Neuroscientist.* 2004 Dec;10(6):553-65.
 21. Vaden KI, Kuchinsky SE, Cute SL, Ahlstrom JB, Dubno JR, Eckert MA. The cingulo-opercular network provides word-recognition benefit. *J Neurosci.* 2013 Nov 27;33(48):18979-86.
 22. Madden MB, Stewart BW, White MG, Krimmel SR, Qadir H, Barrett FS, et al. A role for the claustrum in cognitive control. *Trends Cogn Sci.* 2022 Dec;26(12):1133-52.
 23. Klingberg T, O'Sullivan BT, Roland PE. Bilateral activation of fronto-parietal networks by incrementing demand in a working memory task. *Cerebr Cortex.* 1997 Jul 1;7(5):465-71.
 24. Opitz B, Schneiders JA, Krick CM, Mecklinger A. Selective transfer of visual working memory training on Chinese character learning. *Neuropsychologia.* 2014 Jan;53:1-11.
 25. Bremner JD, Campanella C, Khan Z, Shah M, Hammadah M, Wilmot K, et al. Brain correlates of mental stress-induced myocardial ischemia. *Psychosom Med.* 2018;80(6):515-25.

*Матеріал надійшов
до редакції 31.07.2023*