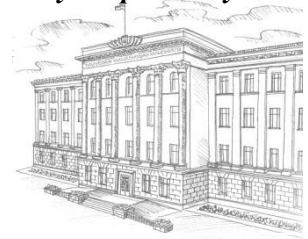




Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки

## Розділ IV. Фізіологія людини і тварин



Серія: Біологічні науки, 2018, 8 (381)

УДК 612.82/83

doi.org/10.29038/2617-4723-2018-381-68-76

### Особливості міжрегіональної мозкової взаємодії в зоровій оперативній пам'яті в бійців із черепно-мозковими травмами

Олександр Книр<sup>1</sup>, Наталя Філімонова<sup>1</sup>, Микола Макарчук<sup>1</sup>, Ігор Зима<sup>1</sup>,  
Валентин Кальниш<sup>2</sup>, Аліса Чебуркова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України

Адреса для листування: filimonova@univ.kiev.ua

Отримано: 22.08.18; прийнято до друку: 06.11.18; опубліковано: 26.12.18

**Резюме.** Оскільки вербальна пам'ять є більш збереженою при ураженнях головного мозку, ніж візуальна оперативна пам'ять (ВОП), то мета нашої роботи – визначити особливості міжрегіональної взаємодії в головному мозку військовослужбовців ЗСУ, які отримали черепно-мозкові травми (ЧМТ) під час бойових дій на сході України, у подальшому – бійців із ЧМТ, під час тестування візуальної оперативної пам'яті. В обстеженні взяли участь 16 студентів КНУ імені Тараса Шевченка (контрольна група) та 16 бійців із ЧМТ – пацієнтів Інституту медицини праці ім. Ю. І. Кундієва НАМН України. Виявлено, що у тестуванні ВОП час реакції в групі бійців із ЧМТ був значуще більшим, ніж у контрольній групі, хоча значущих відмінностей між відносною кількістю помилок не знайдено. У групі бійців із ЧМТ виявлено міжпівкульний взаємозв'язок у соматосенсорній корі, у той час як у контрольній – виявлено складну фронто-парієтальну систему міжпівкульних взаємозв'язків. При запам'ятовуванні візуальних стимулів у бійців із ЧМТ, замість вищого контролю за процесами кодування, утримання та відновлення інформації з фронтальної кори, контроль за процесами візуальної оперативної пам'яті, можливо, беруть на себе вищі асоціативні зони парієтальної кори, які більшою мірою спираються на пошук і використання як нових, так і знайомих стимулів за їхніми ознаками.

**Ключові слова:** візуальна оперативна пам'ять, ЕЕГ, когерентний аналіз, LORETA, черепно-мозкова травма, соматосенсорна кора.

### Features of Interhemispheric Brain Interaction in Visual Working Memory of Military Man With Traumatic Brain Injury

Aleksandr Knir<sup>1</sup>, Natalia Filimonova<sup>1</sup>, Mukola Makarchuk<sup>1</sup>, Ihor Zyma<sup>1</sup>, Valentyn Kalnysh<sup>2</sup>, Alisa Cheburkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ESC «Institute of Biology and medicine», Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Yu. I. Kundiyeva Institute for occupation health NAMS of Ukraine, Kyiv

Correspondence: filimonova@univ.kiev.ua

**Abstract.** Since verbal working memory is more safe with traumatic brain injuries (TBI) than visual working memory (VWM), the purpose of the study was to determine the features of interregional interaction in the brain

of military men with TBI who took part in the operations in the east of Ukraine, after that – military men with TBI. This study conducted on 16 male volunteers, right-handers, at the age of 18–21 years, who have no problems with their health – students of Taras Shevchenko National University of Kyiv (control group) and 16 male volunteers, right-handers, aged 27–43 – the patients of the Yu. I. Kundiyeva Institute for occupation health NAMS of Ukraine, Kyiv. During testing of VWM it was found that the reaction time in a military men group of with TBI was significantly higher than in the control group, although no significant differences were found between the relative numbers of errors. During VWM testing in the group of military men with TBI an interhemisphere relationship was detected in the somatosensory cortex, while in the control group a complicated fronto-parietal system of interhemisphere interactions was discovered. In the group of military men with TBI higher activity was detected not in the front-parietal system of top-down control of VWM, but in parietal and occipital zones. It should be noted that in the parietal-occipital network of VMW the bottom-up control processes more involved. It can be assumed that in the group of military men with TBI in the processes of visual memory the absence of complicated fronto-parietal system was compensated by more effective inclusion of cortical brain regions. This part of the brain is associated with the verbal processes of semantic analysis of visual information, which came mainly from its dorsal path. Instead of a higher level of control over coding, retention, and recovery of information from the frontal cortex as in control group, control of the processes of VWM may take the higher associative parietal cortex areas that are more based on the search for both new and already familiar stimulus by their features.

**Key words:** visual working memory, EEG, coherent analysis, LORETA, traumatic brain injury, somatosensory cortex.

## Вступ

Оперативна пам'ять уважається однією з найважливіших когнітивних властивостей, що дає змогу кодувати й зберігати інформацію протягом коротких періодів часу, що робить її доступною для маніпуляцій та активного керування поведінкою. Концепція оперативної пам'яті передбачає, що система обмеженої ємності, яка тимчасово зберігає й обмежує інформацію, підтримує процеси мислення в людини, забезпечуючи інтерфейс між сприйняттям, довготривалою пам'яттю та поведінкою [1]. Ключовою мотивацією для дослідження об'єму оперативної пам'яті є те, що він предиктор інтелекту [2] і взаємопов'язаний із рухливим інтелектом [3], який передбачає здатність думати, створювати нові абстракції й стратегії розв'язання проблем та який уважається незалежним від навчання, досвіду й освіти. Процеси обробки та утримання інформаційних компонентів в оперативній пам'яті мають безпосереднє відношення й до загального інтелекту [4]. Обсяг же короткочасної пам'яті також корелює зі здатністю пригнічувати небажані, нав'язливі думки та спогади [5]. На жаль, саме пам'ять вступає однією з функцій, порушення якої найчастіше трапляються після черепно-мозкових травм (ЧМТ) [6]. Вплив такого порушення виявляється довгостроковим, виснажливим та таким, що важко піддається реабілітації та має наслідки для широкого спектра когнітивних функцій [7]. У цій роботі показано, що вербальна пам'ять є більш збереженою при ураженнях головного мозку, ніж візуальна оперативна пам'ять. Питання, чому саме цей

вид оперативної пам'яті є найбільш уразливим при ЧМТ, потребує подальшого дослідження.

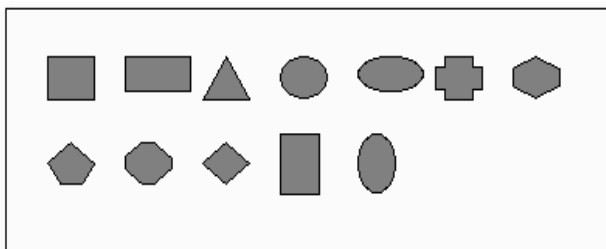
**Мета дослідження** – визначити особливості міжрегіональної взаємодії під час тестування візуальної оперативної пам'яті в головному мозку військовослужбовців ЗСУ, які отримали ЧМТ під час бойових дій на сході України, у подальшому – бійців із ЧМТ.

## Матеріали й методи дослідження

В обстеженні взяли участь 16 добровольців-чоловіків, правшів віком 18–21 рік без скарг на здоров'я, студентів КНУ імені Тараса Шевченка (контрольна група) та 16 добровольців-чоловіків, правшів віком 27–43 роки, бійців із ЧМТ, пацієнтів Інституту медицини праці ім. Ю. І. Кундієва НАМН України. Усіх обстежуваних поінформовано стосовно схеми проведення обстежень. Вони 'дали письмову згоду відповідно до Гельсинської етичної декларації. В усіх обстежуваних реєстрували електроенцефалограму (ЕЕГ) до початку обстеження (по 3 хв фоновий запис із закритими та відкритими очима) і під час проходження комп'ютерного тесту визначення ефективності візуальної оперативної пам'яті (ВОП). Обстежуваному для запам'ятовування пред'являлася деяка множина геометричних фігур (круг, еліпс, квадрат, ромб, та ін. (рис.1), кількість яких у цій множині послідовно зростала від 2 до 7. Певна кількість фігур у тесті повторювалася по 10 разів із випадковою комбінацією. Час експозиції кожної множини фігур становив 1,5 с, після чого вони згасали, а

через 1 с з'являлася тестова фігура, стосовно якої потрібно було відповісти, чи була вказана фігура в попередній множині, для чого треба було правою рукою натиснути клавішу, чи її там не було, для чого натискати лівою рукою клавішу. Визначали середній час реакції та відносну кількість помилок.

Для реєстрації й аналізу ЕЕГ використовували комплекс «Нейрон-Спектр-4/ВП» (НейроСофт, Росія). Запис ЕЕГ здійснювали монополярно, референтний електрод розміщено на мочці вуха з кожного боку, частота квантування ЕЕГ дорівнювала 500 Гц. Використано мостикові посріблені електроди, які накладалися за міжнародною системою 10–20 % у 19 стандартних відведеннях. У кожному відведенні для частотних діапазонів ЕЕГ – дельта- (0,5–3,9 Гц), тета- (4,0–7,9 Гц), альфа-1 (8,0–9,4 Гц), альфа-2 (9,5–10,5 Гц), альфа-3 (10,6–12,9 Гц) бета-1 (13,0–19,9 Гц), бета-2 (20,0–35,5 Гц), за допомогою програми «Нейрон-Спектр» обчислювали спектральні потужності й коефіцієнти когерентності. Аналіз дистантної синхронізації зон мозку під час виконання тестових завдань проводили за допомогою когерентного аналізу. Середнє значення функції когерентності залежить від наявності шуму в сигналах. Так, якщо він становить більше ніж 30–40 %, стає проблемним виділення сигналу на фоні шуму та, як наслідок, твердження про високу синхронізацію в різних відведеннях. Крім того, для кожної гармоніки на межі двох сусідніх епох, що аналізуються, простежимо не плавний перехід, а випадкові скачки амплітуди, тому, відповідно, і фази, які відображено в кросфазі двох процесів, і, як наслідок, у значеннях когерентності. Тим самим коефіцієнт когерентності дає завищену оцінку у відношенні ступеня синхронізації процесів, тому значущою когерентність можна вважати лише якщо вона  $\geq 0,7$  [8]. Саме тому в тесті ВОП визначали достовірну синхронізацію тільки для тих пар відведень, для яких медіана  $\geq 0,7$ .



**Рис. 1.** Геометричні фігури, які пред'являлися під час тестування візуальної оперативної пам'яті

Крім того, у програмі нейровізуалізації LORETA визначено координати диполів активності під час виконання тестового завдання для всіх частотних діапазонів.

Статистичний аналіз даних проводили за допомогою пакета STATISTICA 6.0 (StatSoft, USA, 2008). Нормальність розподілів змінних перевіряли за тестом Шапіро-Вілка. При цьому більшість параметрів мали розподіл, відмінний від нормального ( $p \leq 0,05$ ). Порівняльний аналіз проводили за критерієм Мана-Вітні. Для опису вибіркового розподілу вказували медіану (Me) і нижній (25 %) та верхній (75 %) квартилі: Me [25 %; 75 %].

### Результати й обговорення

У результаті проведеного аналізу отриманих даних виявлено, що під час тестування ВОП час реакції в групі бійців із ЧМТ був значуще більшим, ніж у контрольній, хоча особливих відмінностей між відносною кількістю помилок не знайдено (рис. 2). Як показано в [9], при ЧМТ набряк та ураження нейронів призводять до порушень під час обробки сигналів на рівні нейронної мережі, при чому саме час реакції, а не точність свідчать про ступінь пошкодження такої мережі.

Дослідження нейромереж, створених під час тестування ВОП проводили когерентним аналізом в усіх частотних діапазонах. У групі бійців із ЧМТ не виявлено значущих коефіцієнтів когерентності в альфа 1-, альфа 2-, альфа 3-, бета 1- та бета 2- діапазонах. У той час, як у контрольній групі такі рівні когерентності простежено в усіх ЕЕГ-діапазонах. Оскільки в роботі досліджували саме вплив ЧМТ на процеси дистантної синхронізації під час тестування ВОП, порівняльний аналіз буде продемонстровано лише для діапазонів дельта, тета та альфа1.

Як відомо, активність нейромереж у дельта-діапазоні пов'язана з активною, цілеспрямованою когнітивною увагою. Синхронізація в дельта-діапазоні відображає кіркову великомасштабну інтеграцію й формування відповідних нейромереж. Останні формуються залежно від характеру вхідної сенсорної інформації [1], забезпечуючи відповідну пізнавальну діяльність та систему прийняття рішення в тестовому завданні [11]. Нами виявлено, що в обстежуваних контрольній групі під час тестування ВОП у дельта-діапазоні формувалася фронто-парієтальна система міжпівкульних взаємозв'язків, яка включала і центральну зону, і

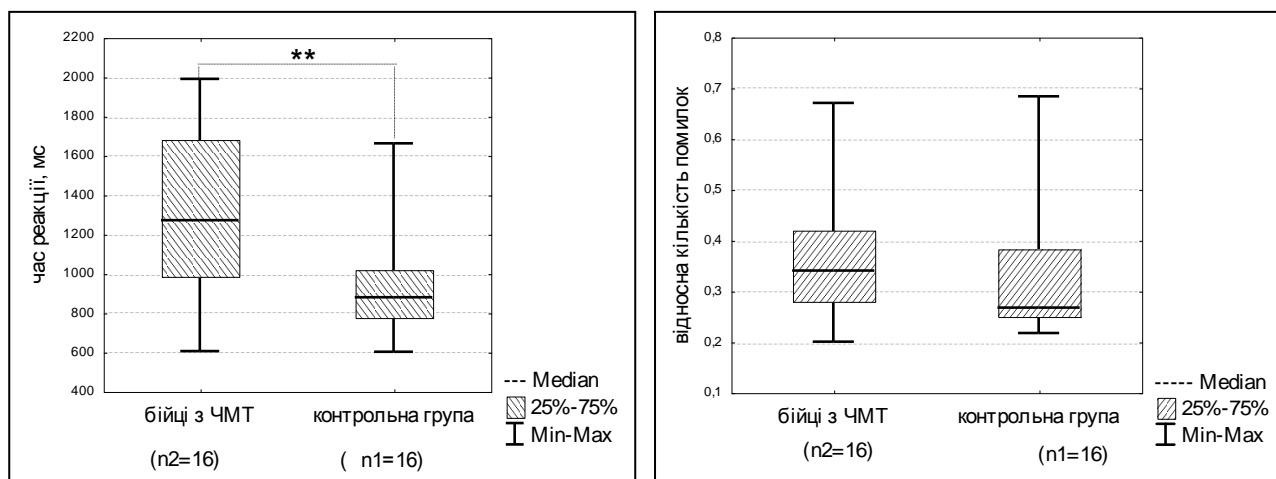


Рис. 2. Ефективність візуальної оперативної пам'яті в контрольній групі та в групі бійців з ЧМТ

праву потиличну (рис. 3). Тобто запам'ятовування візуальних стимулів відбувалось у розподіленій нейромережі, яка поступово перетворювала вхідну інформацію на відповідну поведінкову відповідь [12]. Така система утворювала декілька рівнів кортикальної ієрархії: від сенсорних регіонів правої потиличної зони, у яких прості риси стимулів кодуються й узагальнюються у відповідні уявлення, до регіонів префронтальної та фронтальної зон кори, де ці уявлення трансформуються для керування майбутніми поведінковими діями [13]. Виявлені довгодистантні когерентні зв'язки узгоджуються з уявленнями про модуляцію top-down-контролю префронтальною корою, котра є причинно-наслідковим зв'язком між ранніми процесами уваги й сприйняття інформації та подальшою поведінковою продуктивністю [14]. Зону Interior Frontal Junction (IFJ) пов'язують з увагою до релевантних ознак візуальних об'єктів, у той час як префронтальну зону кори – із подоланням перешкод, що пов'язані з нерелевантною завданням інформацією [14]. Функція Medial Prefrontal Cortex (mPFC) полягає в дослідженні асоціацій між контекстом, місцем, подіями та відповідними адаптивними відповідями, тобто в прийнятті найкращого рішення на основі комплексного узгодженого аналізу різноманітної інформації [15]. Провідна роль префронтальної кори в процесах прийняття рішень, як відомо, реалізується у двох арбітражних системах [16]. Перша – стабільна – забезпечує вибір дії, що ґрунтується на перцептивних сигналах, значеннях винагороди, які пов'язані із зовнішніми обставинами та вбудованими в поведінкові акти. Друга – головна – на основі

ймовірностного оцінювання якості рішення й забезпечує вибір остаточного рішення онлайн між використанням/корекцією раніше вивчених поведінкових актів і дослідженням/створенням нових для забезпечення адаптивної поведінки [16]. Реалізація поведінкового акту забезпечувалась узгодженою активацією соматосенсорної кори (рис. 3) – оптимальне виконання рухів потребує точної обробки сенсорної інформації від навколишнього середовища та внутрішніх джерел. Права Inferior Frontal Gyrus (rIFG) отримує конвергентний вхід як із вентрального, так і дорзального візуальних потоків [17]. Крім того, IFG залучена до визначення важливих сигналів, незалежно від того, чи це генерація моторного відгуку, чи буде в подальшому його гальмування або взагалі буде відсутня відповідь [18]. Мабуть, тому наявність зв'язку фронтальної зони із сенсомоторною корою є більш вираженою під час рухів, що виконуються, у той час як при уявних рухах сенсомоторна кора отримує вхідну інформацію від Posterior Parietal Cortex (PPC) [19].

Також відомо, що для виконання точних рухів потрібні механізми підготовки, виконання й моніторингу. Перші два кодуються руховою системою, а останній – сенсорною системою. Для того, щоб забезпечити адаптивну поведінку, необхідна правильна інтеграція моторної та сенсорної інформації в петлю зворотного зв'язку. Ефективна сенсорно-моторна інтеграція призводить до збалансованих моторних команд і сенсорного зворотного зв'язку. Первинна моторна кора генерує моторний потік й еферентну копію. Моторний вихідний потік запускає наступну команду, а еферентна копія використовується для прогнозування кінестетичної й

соматосенсорної (моделі зворотного зв'язку) послідовності рухів. За даними [20], різниця між реальним й уявним сенсорним ефектом корегується в наступному русі. Отже, PPC є ключовим вузлом у сенсомоторній інтеграції, оскільки саме тут об'єднуються зовнішні та пропріоцептивні сенсорні потоки для планування моторної відповіді [21].

Активність у тета-діапазоні EEG пов'язана з різними функціями формування мережі під задачу кодування/пошуку нової інформації [22], виявлення помилок і корекції сформованої нейромережі [11]. Показано, що фронто-парієтальна когерентність у тета-діапазоні відображає центральні виконавчі функції в структурі оперативної пам'яті [23]. Одночасно з цим активація префронтальної кори в тета-діапазоні вказує на забезпечення довгодистантної комунікації між процесами управління префронтальної кори, наявності відповідної інформації (представлення об'єктів) у тім'яній зоні, що, зі свого боку, забезпечує мнемонічну обробку інформації [24]. ВОП потребує залучення відповідних ділянок мозку в локальні та великомасштабні нейромережі. Причому механізмом координації слугують низькі частоти, які є знаряддям створення широкомасштабної комунікації за рахунок фазової синхронізації високочастотних складових [25].

Активність в альфа-діапазоні EEG, як відомо, збільшується для блокування несуттєвих (незначимих) подій/спогадів (інформації, яка не запам'ятовується), що, зі свого боку сприяє більш ефективному кодуванню релевантної інформації в пам'яті [26]. Уважається, що альфа1-діапазон пов'язаний із формуванням локальних нейромереж для забезпечення процесів уваги й семантичного аналізу [27]. Отже, активність в альфа1-діапазоні в правій задньоскроневої – потиличній зонах можна розглядати як прояв активації локальної нейромережі високоспецифічного фільтра релевантної шеврбальної інформації (сприйняття інформації та виділення істотних ознак стимулів). Фронто-парієтальний зв'язок у правій півкулі й центральнопарієтальний – у лівій, на нашу думку, забезпечують top-down-контроль довгодистантної фазової синхронізації, яка реалізується в тета-діапазоні (рис. 3).

За даними [25], широкомасштабна комунікація в мозку здійснюється завдяки тому, що нижчі частоти захоплюють локальні стимул – залежні процеси у вищих частотах за допомогою фазоамплітудного щеплення. Отже,

така узгодженість нейромереж у тета- та альфа-діапазонах здійснює керування цілеспрямованою поведінкою [25; 28].

Треба зазначити, що чим вищою є частота EEG коливань, тим менша нейромережа, що її генерує [29]. Тобто можна стверджувати, яка в обстежуваних контрольній групі сформовані узгоджені нейромережі різного масштабу, які функціонували спільно в кодуванні зорової інформації, утриманні її в пам'яті та ефективного відновлення.

На відміну від цього, у групі бійців із ЧМТ у дельта- та тета-діапазонах виявлено міжпівкульний взаємозв'язок у сенсомоторній зоні й у скроневозадньоскроневої зоні лівої півкулі (рис. 1). Тобто в лівій півкулі в них сформовано нейромережу, що поєднувала слухову кору та зону Верніке – розуміння мови, а в центральній зоні сформовано нейромережу готовності до дії. Указані нейромережі представлено в межах дельта- й тета-діапазонів. У межах альфа- та бета-діапазонів EEG значущих взаємозв'язків не виявлено.

Зазначимо, що виявлені мережі жодним чином не адаптовані до поставленого завдання, а виконання тесту здійснювали на фоні сформованого домінантного взаємозв'язку. Оскільки в обстеженні брали участь військовослужбовці, можна було б припустити, що вони налаштовані на сприйняття та виконання мовних наказів. Але в роботі [30] у пацієнтів з травмами головного мозку виявлено посилення зв'язності в сенсомоторній мережі в стані спокою (resting-state networks), яке корелювало із зниженим рівнем уваги. Крім того, результати [31] свідчать про зменшення в пацієнтів із травмами головного мозку міжпівкульної зв'язності для зовнішньорієнтованих нейромереж, таких як фронто-парієтальні й виконавчі, та підвищення міжпівкульної взаємодії в дефолтних нейромережах. В огляді [32] показано, що для пацієнтів зі травмами головного мозку характерне порушення у взаємозв'язках між різними відділами мозку навіть у стані спокою.

Зниження дистантної синхронізації внаслідок отриманих травм головного мозку може бути пов'язано з пошкодженням аксонів і зниженням їх здатності до генерації послідовності імпульсів, що зменшує можливість передачі інформації в нейромережах [9]. Такі пошкодження можуть перешкоджати створенню саме глобальних нейромереж.

У контрольній групі під час тестування ВОП виявлено диполі активності в дельта-діапазоні в

MFG (BA11) (5,65,-15), MFG (BA10) (-5,65,-15), SFG (BA10) (25,65,-5), SFG (BA11) (-15,65,-15), Rectus gyrus (BA11) (5,55,-25), IFG (BA45) (60,20,20), IFG (BA47) (-50,45,-10), MTG (BA21) (70,-35,-10), Postcentral gyrus (BA1) (55,-20,55), IPL (BA40) (-45,-60,50), в тета-діапазоні – в MFG (BA10) (-5,65,10), MFG (BA11) (45,45,-15), IFG (BA47) (505,45,-10), SFG (BA10) (25,65,0), SFG (BA10) (-15,65,-15), Supramarginal gyrus (BA40) (-60,-35,35), ITG (BA20) (65,-25,-20), MTG (BA21) (70,-35,-10), STG (BA22) (70,-25,-5), Postcentral gyrus (BA3) (65,-15,35), Angular gyrus (BA39) (-45,-80,30), SPL (BA7) (-20,-75,-55), Cuneus (BA19) (-30,-90,-20), IOG (BA18) (-35,-90,-10), а в альфа1-діапазоні – в MFG (BA11) (-40,55,-10), MFG (BA10) (5,65,-5), SFG (BA11) (-15,65,-15), IFG (BA47) (50,45,-10), ITG (BA20) (-65,-65,-20), Postcentral gyrus (BA1) (55,-20,55), Angular gyrus (BA39) (-55,-65,35) (рис. 3). Диполі активності свідчили про включення процесів виявлення цільових стимулів (rIFG), мисленне уявлення та планування моторної відповіді (rMTG) [19], організації й виконання рухів (rPostcentral gyrus), узгоджених із дорсальним і вентральним зоровими потоками (rIFG) [17] та інтеграцією окремих елементів у цілісний образ (rITG). Причому залучено вербальні процеси прийняття рішення, виконавчого контролю (IMFG) та координації поведінки із сенсорною системою (ISFG).

За даними [9], зниження дистантної синхронізації внаслідок отриманих травм головного мозку може бути пов'язано з пошкодженням аксонів та зниженням їх здатності до генерації послідовності імпульсів, що знижує можливості передачі інформації в нейромережах. Такі пошкодження можуть перешкоджати створенню саме глобальних нейромереж.

Під час тестування ВОП у контрольній групі нами виявлено такі диполі активності: у дельта-діапазоні в MFG (BA11) (5,65,-15), MFG (BA10) (-5,65,-15), SFG (BA10) (25,65,-5), SFG (BA11) (-15,65,-15), Rectus gyrus (BA11) (5,55,-25), IFG (BA45) (60,20,20), IFG (BA47) (-50,45,-10), MTG (BA21) (70,-35,-10), Postcentral gyrus (BA1) (55,-20,55), IPL (BA40) (-45,-60,50), у тета-діапазоні – у MFG (BA10) (-5,65,10), MFG (BA11) (45,45,-15), IFG (BA47) (505,45,-10), SFG (BA10) (25,65,0), SFG (BA10) (-15,65,-15), Supramarginal gyrus (BA40) (-60,-35,35), ITG (BA20) (65,-25,-20), MTG (BA21) (70,-35,-10), STG (BA22) (70,-25,-5), Postcentral gyrus (BA3) (65,-15,35), Angular gyrus (BA39) (-45,-80,30), SPL (BA7) (-20,-75,-55),

Cuneus (BA19) (-30,-90,-20), IOG (BA18) (-35,-90,-10). а в альфа 1-діапазоні – в MFG (BA11) (-40,55,-10), MFG (BA10) (5,65,-5), SFG (BA11) (-15,65,-15), IFG (BA47) (50,45,-10), ITG (BA20) (-65,-65,-20), Postcentral gyrus (BA1) (55,-20,55), Angular gyrus (BA39) (-55,-65,35) (рис. 3). Ці диполі активності свідчили про включення процесів виявлення цільових стимулів (rIFG), мисленне уявлення та планування.

На відміну від групи контрольних обстежень, у групі бійців із ЧМТ виявлено диполі активності в дельта-діапазоні у SFG (BA10) (-5,65,-5), SFG (BA10) (20,65,0), MFG (BA11) (35,55,-15), MTG (BA21) (-65,-5,15), STG (BA22) (-65,-50,20), IFG (BA47) (-50,45,-10), Postcentral gyrus (BA3) (-45,-25,65), Cuneus (BA18) (15,-100,15), в тета-діапазоні – MFG (BA10) (45,50,5), SFG (BA10) (-5,65,-5), SFG (BA11) (15,65,-15), ITG (BA20) (-65,-20,-25), STG (BA22) (-65,-50,20), MTG (BA20) (65,-5,-5), Postcentral gyrus (BA40) (-55,-35,55), Cuneus (BA18) (5,-100,0), а в альфа1-діапазоні – у MFG (BA10) (45,50,5), SFG (BA11) (15,65,-15), SFG (BA10) (-5,65,-5), IFG (BA47) (-50,45,-10), ITG (BA20) (-65,-20,-25), STG (BA22) (-65,-50,20), MTG (BA21) (65,-5,-5), Cuneus (BA18) (5,-100,0), MOG (BA19) (-40,-90,5) (рис. 3). Під час реалізації процесів ВОП у бійців із ЧМТ активовано left IFG, а не right IFG, що свідчило про залучення семантичних процесів до аналізу зорової інформації, rSFG (а не rIFG), до якої надходить візуальна інформація лише з дорсального зорового потоку [17]. Зона Cuneus належить до первинної зорової кори, а MOG – це комплексна зона, що займається різними функціями: вона бере участь у мовних схемах, у візуальній схемі, включаючи зону BA18, а також бере участь у деяких виконавчих функціях, які суттєво пов'язані з префронтальними ділянками. Організація візуальної інформації під bottom-up контролем (а це активація саме в альфа-діапазоні) забезпечує зберігання інформації за виділеними ознаками [33] та визначення того, є інформація новою чи відомою [34]. Зони right SFG та left SFG беруть участь у контурі обробки зорової інформації у BA18/19 [35], а зона rMTG залучена до інтеграції зорових елементів у цілісний образ [36], у той час як ліва скронева зона залучена до вебального семантичного аналізу [37]. Це свідчить про координацію процесів прийняття рішення не лише із сенсорною інформацією, але й про вербальний контроль під час формування відповіді.

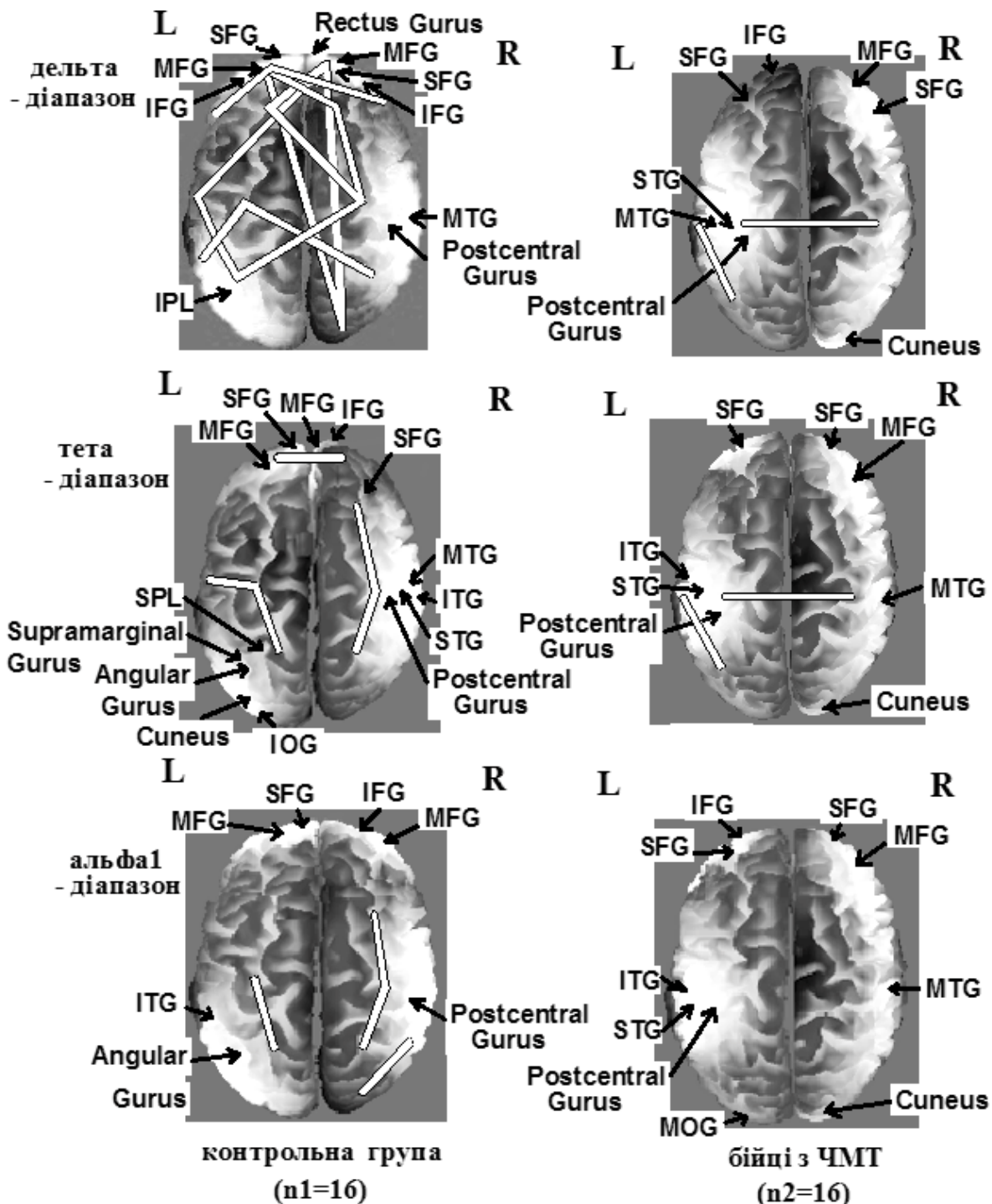


Рис. 3. Синхронізація активності головного мозку та диполі активності під час тестування візуальної оперативної пам'яті в контрольній групі та в групі бійців із ЧМТ

**Примітки.** SFG – superior frontal gyrus; MFG – middle frontal gyrus; IFG – inferior frontal gyrus; STG – superior temporal gyrus; MTG – middle temporal gyrus; ITG – inferior temporal gyrus; SPL – superior parietal lobule; MOG – middle occipital gyrus.

Отже, у бійців із ЧМТ більшу активність виявлено не у фронто-парієтальній системі ВОП, а в парієтальній. Треба зазначити, що в парієтальній мережі оперативної пам'яті більше задіяні процеси bottom-up контролю, причому в

цьому випадку процеси оперативної пам'яті спираються на кодування стимулів та пошук як нових, так і знайомих стимулів за їх ознаками [38]. Зорову кору розглядають як «дошку», на якій можуть генеруватись уявні образи (образи



depono) та яка використовується під час мнемонічних процесів, надаючи відповідний контекст [39]. Роль префронтальної кори в інтеграції різних форм інформації в робочу пам'ять може бути підставою для її унікального внеску в пізнання високого рівня, що вимагає гнучких психічних уявлень, у той час як активація парієтальної кори спостерігається під час обробки не інтегрованих уявлень [40].

Отже, можна припустити, що відсутність у бійців із ЧМТ фронто-парієтальної взаємодії в процесах візуальної оперативної пам'яті компенсується більш ефективним уключенням кіркових зон мозку, котрі пов'язані з вербальними процесами семантичного аналізу зорової інформації, що надходила переважно з дорсального шляху її обробки. При цьому, замість вищого контролю за процесами кодування, утримання та відновлення інформації з боку фронтальної кори, контроль за процесами візуальної оперативної пам'яті, можливо, беруть на себе вищі асоціативні зони парієтальної кори, які більшою мірою спираються на пошук як нових, так і вже знайомих стимулів за їх ознаками.

## Висновки

Виявлено, що під час тестування візуальної оперативної пам'яті час реакції в групі бійців із ЧМТ був більшим, ніж у контрольній групі, хоча значущих відмінностей між відносною кількістю помилок не знайдено. У групі бійців із ЧМТ виявлено міжпівкульний взаємозв'язок у соматосенсорній корі, у той час, як у контрольній групі – складну фронто-парієтальну систему міжпівкульних взаємозв'язків. Під час запам'ятовування візуальних стимулів у бійців із ЧМТ, замість вищого контролю за процесами кодування, утримання й відновлення інформації з боку фронтальної кори, контроль за процесами візуальної оперативної пам'яті, можливо, беруть на себе вищі асоціативні зони парієтальної кори, які більшою мірою спираються на пошук і використання як нових, так і знайомих стимулів за їхніми ознаками.

## Література

1. Baddeley, A. Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*; 2003, 4, pp 829–839.
2. Schweizer, K.; Moosbrugger, H. Attention and working memory as predictors of intelligence. *Intelligence*; 2004, 32(4), pp 329–347.

3. Fukuda, K. Quantity, not quality: the relationship between fluid intelligence and working memory capacity. *Psychon Bull Rev*; 2010, 17(5), pp 673–679.

4. Wongupparaj, P.; Kumari, V.; Robin, G. The relation between a multicomponent working memory and intelligence: The roles of central executive and short-term storage functions. *Intelligence*; 2015, 53, pp 166–180.

5. Brewin, C. R.; Beaton, A. Thought suppression, intelligence, and working memory capacity. *Behaviour. Research and Therapy*; 2002, 40, pp 923–930.

6. Lauer, J. Neural correlates of visual memory in patients with diffuse axonal injury. *Brain Injury*; 2017, 31(11), pp 1513–1520.

7. David, N. K. Effects of severe traumatic brain injury on visual memory. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*; 2000, 22(1), pp 25–39.

8. Кулаичев, А. П. Об информативности когерентного анализа. *Журнал высшей нервной деятельности*; 2009, 59, с 766–775.

9. Maia, Pedro, D.; Kutz, J. N. Reaction time impairments in decision-making networks as a diagnostic marker for traumatic brain injuries and neurodegenerative diseases. *ComputNeurosci*; 2017, 42(3), pp 323–347.

10. Schroeder, C.; Lakatos, P. Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends in Neurosciences*; 2009, 32(1), pp 9–18.

11. Bernat, E. Separating cognitive processes with principal components analysis of EEG time-frequency distributions; 2008, 70(74), pp 1–10.

12. Christophel, T. B. The distributed nature of working memory. *Trends Cogn Sci*; 2017, 21(2), pp111–124.

13. Zanto, T. P. Causal role of the prefrontal cortex in top-down modulation of visual processing and working memory. *Nat Neurosci*; 2011, 14(5), pp 656–661.

14. Muhle-Karbe, P. S. Co-activation-based parcellation of the lateral prefrontal cortex delineates the inferior frontal junction area. *Cereb Cortex*; 2016, 26(5), pp 2225–2241.

15. Euston, D. R. The role of medial prefrontal cortex in memory and decision-making. *Neuron*; 2012, 76(6), pp 1057–1070.

16. Domenech, P.; Koehlin, E. Executive control and decision-making in the prefrontal cortex. *Current Opinion in Behavioral Sciences*; 2015, 1, pp 101–106.

17. Takahashi. Dissociation and convergence of the dorsal and ventral visual working memory streams in the human prefrontal cortex. *NeuroImage*; 2013, 65, pp 488–498.

18. Hampshire, A. The role of the right inferior frontal gyrus: inhibition and attentional control. *Elsevier*; 2010, 50, pp 1313–1319.

19. Kim, Y. K. Changes in network connectivity during motor imagery and execution. *PLoS ONE*; 2018, 13(1), e0190715.

20. Perruchoud, D. Focal dystonia and the sensory-motor integrative loop for enacting (SMILE). *Frontiers in human neuroscience*; 2014, 8, pp 458–464.



21. Avanzino, L. Sensory-motor integration in focal dystonia. *Neuropsychologia*; 2015, pp 288–300.
22. Klimesch, W. What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? *Neuroscience*; 2008, pp 344–361.
23. Sauseng, P. Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *International Journal of Psychophysiology*; 2005, 57, pp 97–103.
24. Estera, M. K. Theta–gamma coupling during episodic retrieval in the human EEG. *Brain research*; 2014, 15(77), pp 57–68.
25. Daume, J. Phase-amplitude coupling and long-range phase synchronization reveal frontotemporal interactions during visual working memory. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*; 2016, 37(2), pp 313–322.
26. Park, H. Blocking of irrelevant memories by posterior alpha activity boosts memory encoding. *Hum Brain Mapp*; 2014, 35, pp 3972–3987.
27. Klimesch, W.; Sauseng, P.; Hanslmayr, S. EEG alpha oscillations: The inhibition–timing hypothesis. *Elsevier*; 2007, 53, pp 63–88.
28. Ranganath, C.; D'Esposito, M. Directing the mind's eye: *Prefrontal, inferior and medial temporal mechanisms for visual working memory*; 2005, 15(2), pp 175–182.
29. Sauseng, P. Control mechanisms in working memory: a possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*; 2010, 34, pp 1015–1022.
30. Shumskaya, E. Abnormal connectivity in the sensorimotor network predicts attention deficits in traumatic brain injury; 2017, 235(3), pp 799–807.
31. Rigon, A. Is traumatic brain injury associated with reduced inter-hemispheric functional connectivity? A study of large-scale resting state networks following. *Traumatic Brain Injury. Journal of neurotrauma*; 2016, 33, pp 977–989.
32. O'Neil, T. G. Applications of resting state functional mr imaging to traumatic brain injury. *Neuroimaging Clin NA*; 2017, 27(4) pp 685–696.
33. Woodman, G. F.; Vecera, S. P.; Luck, S. J. Perceptual organization influences visual working memory. *Psychon Bull Rev*; 2003, 10(1), pp 80–87.
34. Slotnick, S. D.; Schacter, D. L. The nature of memory related activity in early *visual areas*. *Neuropsychologia*; 2006, 44(14), pp 2874–2886.
35. Ernst, M.; Paulus, M. P. Choice selection and reward anticipation: an fMRI study. *Neuropsychologia*; 2005, 42, pp 1585–1597.
36. Gerlacha, C. Law Brain activity related to integrative processes in visual object recognition: bottom-up integration and the modulatory influence of stored knowledge. *Neuropsychologia*; 2002, 40, pp 1254–1267.
37. Chou, T. L. Developmental and skill effects on the neural correlates of semantic processing to visually presented words. *Human brain mapping*; 2006, 27(11), pp 915–924.
38. Adrian, W. A parietal memory network revealed by multiple MRI methods. *Trends in Cognitive Sciences*; 2015, 19(9), pp 534–543.
39. Alers, A. M. Shared representations for working memory and mental imagery in early visual cortex. *Current Biology*; 2013, 23(15), pp 1427–1431.
40. Prabhakaran, V. Integration of diverse information in working memory within the frontal lobe. *Nat Neurosci*; 2000, 3(1), pp 85–90.