

УДК 612.82/83

О. Книр, студ., Н. Філімонова, канд. фіз.-мат. наук,
М. Макарчук, д-р біол. наук, А. Чебуркова, студ., І. Зима, д-р біол. наук
ННЦ "Інститут біології та медицини",
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ,
В. Кальниш, д-р біол. наук, проф.
ДУ "Інститут медицини праці ім. Ю. І. Кундієва НАМН України", Київ

ОСОБЛИВОСТІ МІЖРЕГІОНАЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ГОЛОВНОМУ МОЗКУ БІЙЦІВ ІЗ ЧЕРЕПНО-МОЗКОВИМИ ТРАВМАМИ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ ПРОСТОЇ СЕНСОМОТОРНОЇ РЕАКЦІЇ

В обстеженні взяли участь 16 добровольців-чоловіків, правші, віком 18–21 роки, без скарг на здоров'я – студенти Київського національного університету імені Тараса Шевченка (контрольна група) та 16 добровольців-чоловіків, правші, віком 27–43 роки, військовослужбовці, які брали участь у бойових діях на сході України та отримали черепно-мозкові травми (ЧМТ), у подальшому – бійці із ЧМТ – пацієнти ДУ Інституту медицини праці ім. Ю. І. Кундієва НАМН України. ЕЕГ-дослідження, когерентний аналіз та аналіз диполів активності головного мозку показали, що при здійсненні простої сенсомоторної реакції в обстежуваних контрольної групи активно залучені мозкові процеси виявлення цільових стимулів, мисленого уявлення та планування моторної відповіді та її виконання, які були узгоджені із базовою обробкою зорової інформації на основі інтеграції дорсальних і вентральних зорових потоків та окремих елементів у цілісний образ. При цьому також були залучені вербальні процеси прийняття рішення, виконавчого контролю та координації поведінки на основі обробки поточної сенсорної інформації. Це дозволяє припустити, що в обстежуваних контрольної групи при виконанні таких задач формуються узгоджені фронто-парієтальні нейромережі різного масштабу для виявлення цілі, планування та виконання вольового руху при домінуючому контролі фронтальної кори. У бійців із ЧМТ при виконанні такої реакції був виявлений міжпівкульний взаємозв'язок у соматосенсорній корі при домінуючій ролі в її здійсненні зорової та парієтальної зон кори. Оскільки в обстежуваних обох груп не було виявлено значущих відмінностей у латентних періодах простої сенсомоторної реакції, можна припустити, що випадіння у бійців із ЧМТ фронто-парієтальної взаємодії при її здійсненні компенсується більш ефективним включенням кіркових зон мозку, які пов'язані із вербальними процесами семантичного аналізу зорової інформації, яка надходила переважно із дорсального шляху її обробки. При цьому замість вищого контролю такої реакції з боку фронтальної кори, контроль моторної відповіді, можливо, беруть на себе вищі асоціативні зони порієтальної кори.

Ключові слова: проста сенсомоторна реакція, ЕЕГ, когерентний аналіз, LORETA, черепно-мозкова травма, сенсомоторна кора.

Вступ. Розумові здібності людини давно пов'язують із хронометричними показниками ефективності діяльності. Час реакції є суттєвим обмеженням при прийнятті рішення і визначальним елементом компромісу між швидкістю та точністю, які характеризують якість більшості рішень. Різні когнітивні фактори модулюють час реакції, наприклад, він також корелює із загальними ментальними здібностями, у т. ч. із рівнем інтелекту. Саме цим у нейронауках обумовлений інтерес до розуміння того, як сенсорна інформація трансформується в моторну відповідь. Дослідження латентних періодів (ЛП) простої сенсомоторної реакції (ПСМР) є основою при вивченні процесів обробки інформації, які визначають різні розумові здібності.

Метою роботи було визначити особливості міжрегіональної взаємодії у головному мозку військовослужбовців ЗСУ, які отримали черепно-мозкові травми (ЧМТ) під час бойових дій на сході України, у подальшому – бійців із ЧМТ, при здійсненні ПСМР.

Об'єкт та методи досліджень. В обстеженні взяли участь 16 добровольців-чоловіків, правші, віком 18–21 роки, без скарг на здоров'я – студенти КНУ імені Тараса Шевченка (контрольна група) та 16 добровольців-чоловіків, правші, віком 27–43 роки, бійців із ЧМТ – пацієнти ДУ Інституту медицини праці ім. Ю. І. Кундієва НАМН України. Усі обстежувані були поінформовані стосовно схеми проведення обстежень і надали письмову згоду відповідно до Гельсінської етичної декларації. У всіх обстежуваних реєстрували електроенцефалограму (ЕЕГ) до початку обстеження (по 3 хв фоновий запис із закритими й відкритими очима) і під час проходження комп'ютерного тесту ПСМР. При цьому обстежуваному на екрані комп'ютера давалась інструкція, за якою на появу зображення (квадрата) він мусив якомога швидше натиснути на будь-яку клавішу, після чого на екрані з'являлось слово "Старт" і 2 с надавались для зосередження, після

чого висвічувалось 15 зображень (квадратів) для адаптації, а потім послідовно – 100 квадратів. Пауза між зображеннями обиралась випадково з інтервалу 500–600 мс для того, щоб наступний сигнал був очікуваним, але не було настанови на ритм наведення зображень. Зображення зникало після натискання будь-якої клавіші, у протилежному випадку воно висвічувалось 1500 мс. Реєструвались ЛП ПСМР із точністю до 10 мс.

Для реєстрації та аналізу ЕЕГ використовували комплекс "Нейрон-Спектр-4/ВР" (НейроСофт, Росія). Запис ЕЕГ здійснювався монополярно, референтний електрод було розташовано на мочці вуха з кожного боку, частота квантування ЕЕГ дорівнювала 500 Гц. Було використано мостикові посріблені електроди, які накладались за міжнародною системою 10–20 % у 19-ти 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" обчислювались спектральні потужності та коефіцієнти когерентності. Аналіз дистантної синхронізації зон мозку при виконанні тестових завдань проводили за допомогою когерентного аналізу. Середнє значення функції когерентності залежить від наявності шуму в сигналах. Так, якщо він становить більш ніж 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, має місце не плавний перехід, а випадкові скачки амплітуди, тому, відповідно, – і фази, які відображаються у кроссфазі двох процесів і, як наслідок, у значеннях когерентності. Тим самим коефіцієнт когерентності дає завищену оцінку стосовно ступеня синхронізації процесів, тому достовірною когерентність можна вважати тільки, якщо вона $\geq 0,7$ [1]. Саме тому в ПСМР

визначалась достовірна синхронізація тільки для тих пар відведень, для яких медіана $\geq 0,7$.

Крім того, у програмі нейровізуалізації LORETA було визначено координати диполів активності при виконанні тестового завдання для всіх частотних діапазонів.

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 Мана – Вітні. Для опису вибіркового розподілу вказували медіану (Me) і нижній (25 %) та верхній (75 %) квартилі: Me [25 %; 75 %].

Результати та їх обговорення. Передусім треба зазначити, що значущих відмінностей у ЛП ПСМР між контрольною групою та групою бійців із ЧМТ виявлено не було (280 [258; 286] мс та 284 [271; 384] мс відповідно).

Як відомо, активність нейромереж у дельта-діапазоні пов'язана з активною, цілеспрямованою когнітивною увагою. Синхронізація в дельта-діапазоні відображає кіркову великомасштабну інтеграцію та формування відповідних нейромереж. Ці мережі формуються залежно від характеру вхідної сенсорної інформації [17], забезпечуючи відповідну пізнавальну діяльність і систему прийняття рішення у тестовому завданні [3]. Було виявлено, що в контрольній групі в дельта-діапазоні ЕЕГ були сформовані дві нейромережі, а саме – у центрально-парієтальній зоні лівої півкулі та у фронто-парієтальній зоні правої півкулі (рис. 1). Оптимальне виконання рухів потребує точної обробки сенсорної інформації від оточуючого середовища та внутрішніх джерел. Права inferior frontal gyrus (IFG) отримує конвергентний вхід як із вентрального, так і дорзального візуальних потоків [19]. Крім того, IFG залучена до визначення важливих сигналів незалежно від того, чи буде генерація моторного відгуку, чи буде в подальшому його гальмування, або взагалі буде відсутня відповідь [6]. Наявність зв'язку фронтальної зони із сенсомоторною корою є більш вираженою при реальній руховій активності, у той час як за уявних рухів сенсомоторна кора отримує вхідну інформацію від posterior parietal cortex (PPC) [7]. Для виконання точних рухів необхідні механізми підготовки, виконання й моніторингу. Перші дві кодуються руховою системою, а остання – сенсорною системою. Для того, щоб забезпечити адаптивну поведінку, необхідна відповідна 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 і еферентну копію. Моторний вихідний потік запускає наступну команду, а еферентна копія використовується для прогнозування кінестетичної та соматосенсорної (моделі зворотного зв'язку) послідовності рухів. Різниця між реальним і уявним сенсорним ефектом корегується вже у наступному русі [14]. PPC є ключовим вузлом у сенсо-моторній інтеграції, оскільки саме тут об'єднуються зовнішні та пропріоцептивні сенсорні потоки для планування моторної відповіді [2].

Оскільки всі обстежувані були правші, логічно, що планування рухів правою рукою здійснювалось у центрально-парієтальній зоні лівої півкулі.

Активність у тета-діапазоні загалом пов'язана з різними функціями формування мережі під задачу, кодуванні/пошуку нової інформації [9], виявленням помилок та корекції сформованої нейромережі [3]. Виявлена нами наявність двох аналогічних нейромереж у дельта-і тета-діапазонах у контрольній групі свідчить, на наш погляд, про планування та реалізацію точних цілеспрямованих рухів за активної участі правої префронтальної кори (виявлення цільових стимулів).

Активність у альфа-діапазоні збільшується при блокуванні нерелевантних спогадів (інформації, яка не запам'ятовується), що у свою чергу сприяє кодуванню релевантної інформації в пам'яті [13]. Зміни альфа1-діапазону пов'язуються із формуванням локальних нейромереж для забезпечення процесів уваги та семантичного аналізу [8]. Таким чином, активність в альфа1-діапазоні можна розглядати як високоспецифічний фільтр релевантної невербальної інформації у правій парієтальній зоні.

Відомо, що чим вищою є частота ЕЕГ-коливань, тим меншою є нейромережа, що її генерує [16]. Це дозволяє припустити, що в обстежуваних контрольної групи при виконанні таких задач формуються узгоджені фронто-парієтальні нейромережі різного масштабу для виявлення цілі, планування та виконання вольового руху при домінуючому контролі фронтальної кори.

У групі бійців із ЧМТ у дельта- і тета-діапазонах виявлено міжпівкульний взаємозв'язок у сенсомоторній зоні та у скронево-задньоскроневої зоні лівої півкулі (рис. 1). Тобто в лівій півкулі була сформована нейромережа, яка поєднувала слухову кору та зону Верніке – розуміння мови, а в центральній зоні була сформована нейромережа готовності до дії. Зазначені нейромережі були представлені виключно у дельта- і тета-діапазонах, у той час як інших ЕЕГ-діапазонах достовірних взаємозв'язків виявлено не було. Підкреслимо, що ці дві мережі жодним чином не були адаптованими до поставленого завдання, а виконання тесту здійснювалось на фоні сформованого домінантного взаємозв'язку. Оскільки в обстеженні брали участь військовослужбовці, можна припустити, що вони налаштовані на сприйняття та виконання мовних наказів. Але в роботі [18] у пацієнтів із травмами головного мозку виявлено посилення зв'язності у сенсомоторній мережі у стані спокою (resting-state networks), яке корелювало зі зниженим рівнем уваги. Результати [15] свідчать про зменшення у пацієнтів із травмами головного мозку міжпівкульної зв'язності для зовнішньо-орієнтованих нейромереж, таких, як фронто-парієтальні й виконавчі, та підвищення міжпівкульної взаємодії у дефолтних нейромережах. Як показано в огляді [12] для пацієнтів із травмами головного мозку, характерним є порушення у взаємозв'язках між різними відділами мозку навіть у стані спокою.

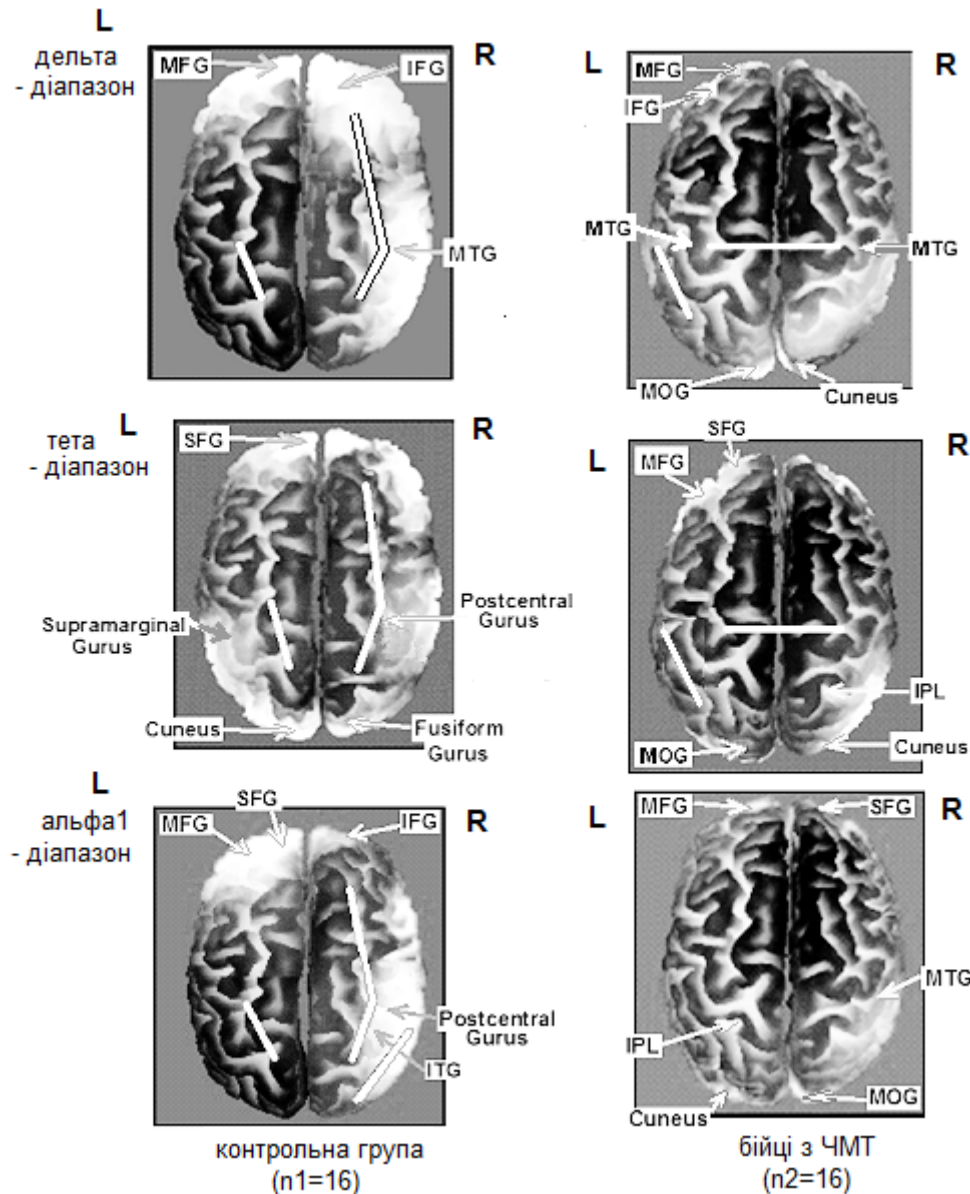


Рис. 1. Синхронізація активності головного мозку та диполі активності під час виконання тесту ПСМР у контрольній групі та групі бійців із ЧМТ

Контрольну групу становили обстежувані віком 18–21 роки, а групу бійців із ЧМТ – обстежувані віком 27–43 роки. Ми припустили, що зміни в активності головного мозку внаслідок травм переважають вікові зміни. На підтвердження цього припущення можна навести результати роботи [11], в якій досліджено вплив старіння на взаємозв'язок областей головного мозку при виборі та ініціюванні рухів. Показано наявність вікових компенсаторних механізмів, в яких задіяна префронтальна кора – з віком відбувається підвищення префронтально-премоторного зв'язку у відповідь на погіршення сенсорної обробки у парієтально-окципітальних зонах, які задіяні у bottom-up процесах. Такий процес є невідповідним до виявленого нами взаємозв'язку в сенсомоторній корі, тобто виявлені особливості не можуть бути пов'язані з віковими змінами.

На думку Maia, зниження дистантної синхронізації внаслідок отриманих травм головного мозку може бути пов'язаним із пошкодженням аксонів та зниженням їхньої здатності до генерації послідовності імпульсів, що знижує можливості передавання інформації в нейромережах [10].

Такі пошкодження можуть перешкоджати створенню саме глобальної нейромережі.

Оскільки нами не було виявлено значущих відмінностей у ЛП ПСМР між контрольною групою та групою бійців із ЧМТ, відсутність фронто-парієтальної мережі мала бути скомпенсована. У контрольній групі було виявлено диполі активності в дельта-діапазоні в MFG(BA10) (-5, 65, 10), IFG(BA10) (5,65,-15) та в MTG (BA21) (70,-35,-10), у тета-діапазоні – у SFG (BA11) (-20,65,-15), Supramarginal gyrus(BA45) (-65,45,35), Postcentral gyrus(BA5)(65,-13,35), Fusiform gyrus(BA18) (25,-95, -20) та Cuneus(BA19) (-30,-90,30), а в альфа1-діапазоні – у MFG (BA11) (-35,60,-10), SFG(BA11) (-15,65,-15), IFG(BA45) (60,20,20), ITG(BA20) (65,-20,-20) та Postcentral gyrus(BA1) (55,-20,55) (рис. 1). Диполі активності свідчили про включення процесів виявлення цільових стимулів (rIFG), мисленого уявлення та планування моторної відповіді (rMTG) [7], організації й виконання рухів (rPostcentral gyrus та rSupramarginal gyrus), узгоджених із базовою обробкою зорової інформації (rCuneus та IFusiform gyrus), узгодженістю

дорсального та вентрального зорових потоків (rIFG) [19] та інтеграцією окремих елементів у цілісний образ (rITG). Причому було залучено вербальні процеси прийняття рішення, виконавчого контролю (IMFG) та координації поведінки із сенсорною системою (ISFG). Таким чином, при здійсненні простої сенсомоторної реакції в обстежуваних контрольній групі активно залучено мозкові процеси виявлення цільових стимулів, мисленого уявлення та планування моторної відповіді та її виконання, які були узгоджені із базовою обробкою зорової інформації на основі інтеграції дорсальних і вентральних зорових потоків та окремих елементів у цілісний образ. При цьому також було залучено вербальні процеси прийняття рішення, виконавчого контролю та координації поведінки на основі обробки поточної сенсорної інформації.

На відміну від групи контролю у групі бійців із ЧМТ було виявлено диполі активності в дельта-діапазоні в MFG (BA11)(-35,65,-15), IFG (BA45)(-50,45,-10), MTG (BA21) (-65,-50,-5), MTG (BA21) (70,-25,-10), MOG (BA19) (-20,-100,5) та Cuneus (BA18) (5,-100,15), у тета-діапазоні – MFG (BA11) (-5,65,-15), SFG (BA11) (-15,65,-15), IPL (BA39) (50,-65,-45), MOG (BA18) (-25,-95,0), Cuneus (BA18) (15,-100,15), а в альфа1-діапазоні – у MFG (BA11) (-5,65,-15), SFG (BA11) (20,65,-15), Cuneus (BA18) (-10,-100,-15), MOG (BA37) (55,-70,0), IPL (BA39) (-40,-65,45) та MTG (BA21) (70,-25,-10) (рис. 1). При здійсненні ПСМР у бійців із ЧМТ була активована IIFG, а не rIFG, що свідчило про залучення семантичних процесів до аналізу зорової інформації, rSFG (а не rIFG) – до якої надходить візуальна інформація тільки з дорсального зорового потоку [19]. Крім того, у них було залучено зони IPL (активується в мовних задачах із фокусом на семантичних на фонологічних проблемах) та rIPL (має сильний зв'язок із візуальними зонами, премоторними, соматосенсорними областями, бере участь у підготовці рухових актів) [4]. Зазначимо, що зона MOG – це комплексна зона, що займається різними функціями. Вона бере участь у мовних схемах, візуальній схемі, включаючи зону BA18, а також у деяких виконавчих функціях, які суттєво пов'язані із префронтальними областями. Зони rSFG та ISFG беруть участь у контурі обробки зорової інформації в BA18/19 [5]. Це свідчить про координацію процесів прийняття рішення не тільки із сенсорною інформацією, але і про вербальний контроль при формуванні відповіді, тобто компенсаційні механізми у бійців із ЧМТ при здійсненні ПСМР викликали посилення внеску вербально-семантичних процесів, активацію процесів у зоровій корі та парієтальній, із використанням існуючих локальних взаємозв'язків.

Таким чином, можна припустити, що випадіння у бійців із ЧМТ фронто-парієтальної взаємодії при здійсненні простої сенсомоторної реакції компенсується більш ефективним включенням кіркових зон мозку, які пов'язані із вербальними процесами семантичного аналізу зорової інформації, яка надходила переважно із дорсального шляху її обробки. При цьому замість вищого контролю такої реакції з боку фронтальної кори, контроль моторної відповіді, можливо, беруть на себе вищі асоціативні зони парієтальної кори.

Висновки. Не було виявлено значущих відмінностей у ЛП ПСМР між контрольною групою та групою бійців із ЧМТ при здійсненні простої сенсомоторної реакції. У контрольній групі було розкрито скоординовану систему виявлення цільового стимулу, мисленого уявлення, планування, здійснення моторної відповіді та координації поведінки із сенсорною системою під контролем фронтальної кори. У групі бійців із ЧМТ був

виявлений міжпівкульний взаємозв'язок у соматосенсорній корі, а до реалізації ПСМР більшою мірою було залучено зорову та парієтальну зони мозку.

Список використаних джерел:

1. Кулаичев А. Об информативности когерентного анализа / А. П. Кулаичев // Журнал высшей нервной деятельности. – 2009. – Вып. 59. – С. 766–775.
2. Avanzino L. Sensorymotor integration in focal dystonia / L. Avanzino, M. Tinazzi, S. Ionta // *Neuropsychologia*. – 2015. – № 79. – P. 288–300.
3. Bernat E. Separating cognitive processes with principal components analysis of EEG time-frequency distributions / E. Bernat, L. Nelson, C. Holroyd et al. – 2008. – Vol. 70. – № 74. – 10.
4. Caspers S. Organization of the human inferior parietal lobule based on receptor architectonics / S. Caspers, A. Schleicher, M. Bacha-Trams et al. // *Cereb Cortex*. – 2013. – Vol. 3. – № 23. – P. 615–628.
5. Ernst M. Choice selection and reward anticipation: an fMRI study / M. Ernst, M. Paulus // *Neuropsychologia*. – № 42. – P. 1585–1597.
6. Hampshire A. The role of the right inferior frontal gyrus: inhibition and attentional control / A. Hampshire, S. Chamberlain, M. Monti et al. // *Elsevier*. – 2010. – Vol. 50. – P. 1313–1319.
7. Kim Y. Changes in network connectivity during motor imagery and execution / Y. Kim, E. Park, A. Lee et al. // *PLoS ONE*. – 2018. – Vol. 1. – № 13: Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190715>.
8. Klimesch W. EEG alpha oscillations: The inhibition-timing hypothesis / W. Klimesch, P. Sauseng, S. Hanslmayr // *Elsevier*. – 2007. – Vol. 53. – P. 63–88.
9. Klimesch W. What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? / W. Klimesch // *Neuroscience*. – 2008. – P. 344–361.
10. Maia D. Pedro. Reaction time impairments in decision-making networks as a diagnostic marker for traumatic brain injuries and neurodegenerative diseases / Maia D. Pedro, J. Kuts // *Comput Neurosci*. – 2017. – Vol. 42. – P. 323–347.
11. Michely J. Network connectivity of motor control in the ageing brain / J. Michely, L. Volz, P. Hoffstaedter et al. // *Neuroimage Clin*. – 2018. – № 18. – P. 443–455.
12. O'Neill T. Applications of Resting State Functional MR Imaging to Traumatic Brain Injury / T. O'Neill, E. Davenport, C. Murugesan et al. // *Neuroimaging Clin N Am*. – 2017. – Vol. 4. – № 27. – P. 685–696.
13. Park H. Blocking of irrelevant memories by posterior alpha activity boosts memory encoding / H. Park et al. // *Hum Brain Mapp*. – 2014. – Vol. 35. – P. 3972–3987.
14. Perruchoud D. Focal dystonia and the sensory-motor integrative loop for enacting (SMILE) / D. Perruchoud, M. Murra, J. Lefebvre, S. Ionta // *Frontiers in human neuroscience*. – 2014. – Vol. 8. – P. 458.
15. 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 / A. Rigon, M. Duff, E. McAuley, F. Arthur // *Journal of neurotrauma*. – 2016. – № 33. – P. 977–989.
16. Sauseng P. Control mechanisms in working memory: A possible function of EEG theta oscillations / P. Sauseng, B. Griesmayr, R. Freunberger, W. Klimesch // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. – 2010. – Vol. 34. – P. 1015–1022.
17. Schroeder C. Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection / C. Schroeder, P. Lakatos // *Trends in Neurosciences*. – 2009. – Vol. 32, № 1. – P. 9–18.
18. Shumskaya E. Abnormal connectivity in the sensorimotor network predicts attention deficits in traumatic brain injury / E. Shumskaya, M. Gerven [et al.] // *Exp Brain Res*. – 2014. – Vol. 3, № 235. – P. 799–807.
19. Takahashi E. Dissociation and convergence of the dorsal and ventral visual working memory streams in the human prefrontal cortex / E. Takahashi et al. // *NeuroImage*. – 2013. – № 65. – P. 488–498.

References (Scopus)

1. Kulaichev A. On the informative value of coherence analysis in EEG studies. *Journal of Higher Nervous Activity*. 2009; 59:766-775. (in Russian)
2. Avanzino L., Tinazzi M., Ionta S., Florio M. Sensory-motor integration in focal dystonia. *Neuropsychologia*. 2015;79:288-300.
3. Bernat E., Nelson L., Holroyd C. et al. Separating Cognitive Processes with Principal Components Analysis of EEG Time-Frequency Distributions. 2008; 70(74):10.
4. Caspers S., Schleicher A., Bacha-Trams M., Palomero-Gallagher N., Amunts K., Zilles K. Organization of the human inferior parietal lobule based on receptor architectonics. *Cereb Cortex*. 2013; 23(3):615-28.
5. Ernst M., Paulus M. Choice selection and reward anticipation: an fMRI study. *Neuropsychologia*. 2005;42:1585–1597.
6. Hampshire A., Chamberlain S., Monti M. et al. The role of the right inferior frontal gyrus: inhibition and attentional control. *Elsevier*. 2010; 50:1313-1319.
7. Kim Y., Park E., Lee A., Im C., Kim Y. Changes in network connectivity during motor imagery and execution. *PLoS ONE*. 2018; 13(1):e0190715.
8. Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: The inhibition-timing hypothesis. *Elsevier*. 2007; 53:63–88.

9. Klimesch W. What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? *Neuroscience*. 2008; 344:361.
10. Maia P., Kutz J. Reaction time impairments in decision-making networks as a diagnostic marker for traumatic brain injuries and neurodegenerative diseases. *ComputNeurosci*. 2017; 3(42):323–347.
11. Michely J., Volz L., Hoffstaedter F., Tittgemeyer M., Eickhoff S., Fink G., Greffkes C. Network connectivity of motor control in the ageing brain. *NeuroimageClin*. 2018; 3(18):443–455.
12. O'Neill T., Davenport E., Murugesan G., Montillo A., Maldjian J. Applications of Resting State Functional MR Imaging to Traumatic Brain Injury. *Neuroimaging Clin N Am*. 2017; 27(4):685–696.
13. Park H. [et al.]. Blocking of irrelevant memories by posterior alpha activity boosts memory encoding. *Hum Brain Mapp*. 2014; 35:3972–3987.
14. Perruchoud D., Murray M., Lefebvre J., Ionta S. Focal dystonia and the sensory-motor integrative loop for enacting (SMILE). *Frontiers in human neuroscience* 2014; 8:458.
15. Rigon A., Duff M., Mc Auley E., Kramer A., Voss M. 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; 33:977–989.

16. Sauseng P., Griesmayr B., Freunberger R., Klimesch W. Control mechanisms in working memory: A possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 2010; 34:1015–1022.
17. Schroeder C., Lakatos P. Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends in Neurosciences*. 2009; 1(32):9–18.
18. Shumskaya E., Gerven M., Norris D., Vos P., Kessels R. Abnormal connectivity in the sensorimotor network predicts attention deficits in traumatic brain injury. *Exp Brain Res*. 2017; 235(3):799–807.
19. Takahashi E. et al. Dissociation and convergence of the dorsal and ventral visual working memory streams in the human prefrontal cortex. *NeuroImage*. 2013; 65:488–498.

Надійшла до редколегії 03.04.2018

Отримано виправлений варіант 11.05.2018

Підписано до друку 11.05.2018

Received in the editorial 03.04.2018

Received a revised version on 11.05.2018

Signed in the press on 11.05.2018

А. Книр, студ., Н. Филимонова, канд. физ.-мат. наук, Н. Макачук, д-р биол. наук,
А. Чебуркова, студ., І. Зима, д-р биол. наук
УНЦ "Інститут біології та медицини",
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
В. Кальніш, д-р биол. наук, проф.
ГУ Інститут медицини труда ім. Ю. І. Кундієва НАМН України, Київ, Україна

ОСОБЕННОСТИ МЕЖПОЛУШАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГОЛОВНОМ МОЗГЕ БОЙЦОВ С ЧЕРЕПНО-МОЗГОВЫМИ ТРАВМАМИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПРОСТОЙ СЕНСОМОТОРНОЙ РЕАКЦИИ

В обследовании приняли участие 16 добровольцев-мужчин, правши, возрастом 18–21 год, без жалоб на здоровье – студенты КНУ имени Тараса Шевченко (контрольная группа) и 16 добровольцев-мужчин, правши, в возрасте 27–43 года, военнослужащие, принимавшие участие в боевых действиях на востоке Украины и получившие черепно-мозговые травмы (ЧМТ), в дальнейшем – бойцы с ЧМТ – пациенты ГУ Институт медицины труда им. Ю. И. Кундиева НАМН Украины. ЭЭГ-исследование, когерентный анализ и анализ диполей активности головного мозга показали, что при осуществлении простой сенсомоторной реакции у обследуемых контрольной группы активно вовлекаются мозговые процессы выявления целевых стимулов, мысленного представления и планирования моторного ответа и его выполнения, которые были согласованы с базовой обработкой зрительной информации на основе интеграции ее отдельных дорсальных и вентральных потоков и отдельных элементов в целостный образ. При этом также были вовлечены вербальные процессы принятия решения, исполнительного контроля и координации поведения на основе обработки текущей сенсорной информации. Это позволяет предположить, что у обследуемых контрольной группы при выполнении таких задач формируются согласованные фронто-париетальные нейросети различного масштаба для обнаружения цели, планирования и выполнения волевого движения при доминирующем контроле фронтальной коры. У бойцов с ЧМТ при выполнении такой реакции выявляется межполушарная взаимосвязь в соматосенсорной коре при доминирующей роли в ее реализации зрительной и париетальной зон коры. Поскольку у обследуемых обеих групп не было выявлено значимых различий в латентных периодах простой сенсомоторной реакции, можно предположить, что выпадение у бойцов с ЧМТ фронто-париетального взаимодействия при ее осуществлении компенсируется более эффективным включением корковых зон мозга, связанных с вербальными процессами семантического анализа зрительной информации, поступающей преимущественно из дорсального пути ее обработки. При этом вместо высшего контроля такой реакции со стороны фронтальной коры, контроль моторного ответа, возможно, берет на себя высшие ассоциативные зоны париетальной коры.

Ключевые слова: простая сенсомоторная реакция, ЭЭГ, когерентный анализ, LORETA, черепно-мозговая травма, сенсомоторная кора.

A. Knyr, stud., N. Filimonova, PhD., M. Makarchuk, Dr. Sc.,
A. Cheburkova, stud., I. Zyma, Dr. Sc.
ESC "Institute of Biology and medicine",
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
V. Kalnysh, Dr. Sc. Prof.
Yu. I. Kundiyeva Institute for occupation health NAMS of Ukraine, Kiev, Ukraine

FEATURES OF INTERHEMISPHERIC FUNCTIONAL CONNECTIVITY IN THE BRAIN OF MILITARY MAN WITH TRAUMATIC BRAIN INJURY DURING THE REALIZATION OF A SIMPLE SENSORIMOTOR REACTION

This study involved 16 male volunteers, right-handers, ages 18–21, without complaints of health – students of Taras Shevchenko National University of Kyiv (control group) and 16 male volunteers, right-handers, aged 27–43, military men who took part in the operations in the east of Ukraine and have craniocerebral injuries (CCI), later – military men with CCI – patients of the Yu. I. Kundiyeva Institute for occupation health NAMS of Ukraine, Kiev. EEG-study, coherent analysis and analysis of brain activity dipoles showed that in the realization of a simple sensorimotor reaction in the control group, the processes of target detection, mental imagery and planning of the motor response, organizing and performing movements that were consistent with the basic processing of visual information, dorsal and ventral visual streams and the integration of separate elements into a integral image. At the same time, verbal decision-making processes, executive control and coordination of behavior were also involved, based on the processing of current sensory information. Thus, the control groups were matched with coordinated front-parietal neural networks of different scales for the target detection, planning and execute volitional movements with the dominant control of the frontal cortex. In the military men with CCI, an interhemispheric relationship was found in the sensorimotor cortex with the dominant role in the realization of a simple sensorimotor reaction of the visual and parietal cortical areas. Since there were no significant differences in the latent periods of a simple sensorimotor reaction between the control group and the group of military men with CCI, it can be assumed that the loss of front-parietal interaction in the military men with CCI was compensated for its realization by more effective inclusion of cortical brain zones associated with verbal processes of semantic analysis of visual information, which came mainly from the dorsal visual stream. In this case, instead of the higher control of such reaction from the frontal cortex, the control of the motor response may be assumed by the higher associative zones of the parietal cortex.

Keywords: simple sensorimotor reaction, EEG, coherent analysis, LORETA, traumatic brain injury, sensorimotor cortex.