

Застосування методу електроенцефалографії у практиці сучасного тенісу

УДК 612.821:612 82/.83

О. І. Корбуш¹, С. В. Федорчук¹, С. В. Тукаєв^{1,2,3},
Т. В. Куценко¹, О. М. Лисенко^{1,4}

¹Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

³Університет Лугано (USI, Università della Svizzera italiana, Lugano)

⁴Київський університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна

Резюме. Розглянуто методи дослідження електричної активності мозку спортсменів, які спеціалізуються у тенісі. *Мета.* Оцінювання показників електричної активності мозку кваліфікованої тенісистки під час виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів; розробка протоколу визначення рівня підготовки кваліфікованих спортсменів за показниками стану психофізіологічних функцій та електричної активності мозку (з використанням мобільного електроенцефалографа). *Методи.* Аналіз наукової літератури, тестування, методика «Кільця Ландольта». *Результати.* Показники електричної активності мозку спортсменки, яка взяла участь у дослідженні, були зареєстровані протягом виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів: простої зорово-моторної реакції, реакції вибору одного із трьох сигналів, реакції вибору двох із трьох сигналів, тестів «120 сигналів» і «5 хвилин» у режимі зворотного зв'язку, тесту визначення рівня функціональної рухливості та сили нервових процесів в режимі нав'язаного ритму, реакції на рухомий об'єкт. Завдання були підібрані з урахуванням вимог, що ставилися до оцінки рівня уваги, моторної продуктивності та емоційного вираження, також оцінювався рівень навантаження мозку. За даними електроенцефалографічного обстеження, спортсменка мала високий рівень функціонального стану головного мозку. Найвищий рівень навантаження мозку спостерігався під час виконання коректурної проби та тестів у режимі зворотного зв'язку, але в цілому він знижувався до закінчення тестування, що може свідчити про високий рівень моторної тренуваності.

Ключові слова: електроенцефалографія, стан психофізіологічних функцій, електрична активність мозку, теніс.

Application of the electroencephalography method in practice of modern tennis

O. I. Korbush¹, S. V. Fedorchuk¹, S. V. Tukaiev^{1,2,3}, T. V. Kutsenko², O. M. Lysenko^{1,4}

¹National University of Physical Education and Sport of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Kyiv National Taras Shevchenko University, Kyiv, Ukraine

³University of Lugano (USI, Università della Svizzera italiana, Lugano)

⁴Borys Grinchenko Kyiv University, Kyiv, Ukraine

Abstract. The methods of studying the electrical activity of the brain of athletes specializing in tennis are considered. *Objective.* To evaluate the indicators of electrical activity of the brain of a skilled female tennis player during the performance of a correctional test and psychophysiological tests; to develop a protocol for determining the level of training of qualified athletes according to indicators of the state of psychophysiological functions and brain electrical activity (using a mobile electroencephalograph). *Methods.* Analysis of scientific literature, testing, Landolt's Rings methodology. *Results.* Indicators of brain electrical activity of the sportswoman who took part in the research were registered during the performance of a correctional test and psychophysiological tests: a simple visuomotor response, a reaction of choice of one of three signals, a reaction of choice of two of three signals, tests "120 signals" and "5 minutes" in the feedback mode, a test for determining the level of functional mobility and strength of nervous processes in the mode of the imposed rhythm, a reaction to a moving object. The tasks were selected with account for the

requirements for assessing the level of attention, motor performance, and emotional expression. In addition, the level of brain load was also assessed. According to the electroencephalographic examination, the athlete had a high level of functional state of the brain. The highest level of brain load was observed during the correctional test and feedback tests, but in general it decreased by the end of the test, which may indicate a high level of motor training.

Keywords: electroencephalography, state of psychophysiological functions, electrical activity of the brain, tennis.

Постановка проблеми. Наш мозок — це складна мережа, що складається з численних ділянок, кожна з яких виконує свою унікальну функцію. Вони постійно взаємодіють, обмінюючись інформацією, таким чином утворюючи складну інтегровану мережу, в якій інформація постійно обробляється і транспортується між структурно і функціонально пов'язаними частинами. З урахуванням властивостей мозкових мереж [12, 21, 22], припускається, що адаптивна та ефективна функціональна реорганізація нейронних мереж відбувається залежно від різних станів активності. Якщо це так, то можна допустити ідею швидкої адаптивної реорганізації функціональних мереж при зміні навколишнього середовища [14].

Дослідження просторової синхронізації біопотенціалів мозку дозволили сформулювати концепцію ієрархічної багаторівневої організації функціональних систем, що лежать в основі поведінки та різноманітних психічних станів. Ця організація полягає в тому, що різні кіркові та підкіркові структури синхронізуються на різних частотах [6, 17, 25]. Вивчення біопотенціалів мозку, аналізу викликаних потенціалів, когерентності електроенцефалограми (ЕЕГ) та методу пов'язаної з подією синхронізації/десинхронізації ЕЕГ, на основі раніше накопичених знань та останніх досліджень, дозволили виявити функціональну значущість різних діапазонів частот [4, 13].

Зміни в ЕЕГ відображають функціональний стан (ФС) мозку і залежать від рівня функціонального навантаження [5, 8–10, 15, 26].

Формування спортивної майстерності також відображається у змінах електричної активності мозку [10]. За попередніми дослідженнями, проведеними за участю спортсменок ігрових видів спорту, спостерігалось генералізоване збільшення спектральної потужності в дельта-діапазоні та менш виражене збільшення в тета-діапазоні, що може свідчити про більші витрати ресурсів мозку (включаючи поживні речовини, що поступають до мозку з кров'ю), на рефлексію та увагу у більш професійних гравців. З урахуванням того, що фронтальна кора конкурує з моторною за ці ресурси, було зроблено припущення, що

менш професійним волейболісткам не вистачало ресурсів мозку для когнітивних процесів [10].

У менш професійних спортсменок спостерігалось генералізоване збільшення спектральної потужності альфа-ритму, що може свідчити про необхідність більш вираженого гальмівного контролю для приглушення непотрібної обробки та вказувати на більшу ефективність такої обробки у більш тренуваних гандболісток. Генералізоване збільшення активності бета-ритму у менш професійних спортсменок, відповідно до гіпотези «нейронної ефективності», може пояснюватися менш ефективною обробкою інформації. Менша активність бета-ритму свідчить про підвищену автоматичність виконання і, таким чином, відображає процеси рухового навчання [10].

Загальна активність нижнього гамма-ритму в моторній та фронтальній корі у студенток-волейболісток виявила більш виражене збільшення, що може свідчити про підвищену потребу в полегшенні обробки інформації в цих ділянках під час фізичного навантаження. Особливо виражене збільшення активності нижньої гамми у фронтальній корі, включаючи останню хвилину навантаження, імовірно, вказує на те, що початківцям потрібно докладати більше зусиль для пригнічення виражених неприємних емоцій під час інтенсивного навантаження, оскільки, за науковими даними, таке пригнічення корелює зі збільшеною гамма-активністю у фронтальній ділянці [10].

Роботу виконано у Науково-дослідному інституті НУФВСУ відповідно до тематичного плану наукових досліджень та розробок, які виконує Національний університет фізичного виховання та спорту України за рахунок коштів державного бюджету у 2023 р. за темою «Прогнозування стрессореактивності спортсменів та військово-службовців в умовах періоду глобальних змін і невизначеності за психофізіологічними та нейрофізіологічними критеріями» (номер держреєстрації 0123U102226)

Мета дослідження — оцінювання показників електричної активності мозку кваліфікованої тенісистки під час виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів; розробка протоколу визначення рівня підготовки кваліфікова-

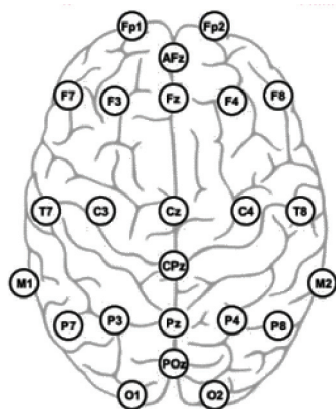


Рисунок 1 – Схема розміщення електродів (SMARTING)

них спортсменів за показниками стану психофізіологічних функцій та електричної активності мозку (з використанням мобільного електроенцефалографа).

Методи дослідження: аналіз наукової літератури, тестування, обстеження.

Результати дослідження. Зміну електричної активності мозку під час виконання коректурної проби (КП) та батареї психофізіологічних тестів реєстрували, застосовуючи мобільну електроенцефалографічну систему SMARTING (mBrainTrain, Сербія). У складі комплекту були: Smarting підсилювач, Smarting стример – прилад потокового запису, EASYCAP RBE 24 – шапочка для реєстрації ЕЕГ у режимі реального часу, що не обмежує рухи обстежуваного, з 24 вмонтованими відведеннями, які відповідають міжнародній системі 10–10 %. Імпеданс під час запису ЕЕГ не перевищував 5 кОм [10].

Реєстрацію ЕЕГ проводили монополярно в симетричних відведеннях (рис. 1): передньо-фронтальних (Fp1, Fp2, AFz), середньофронтальних (F3, F4), центральнофронтальному (Fz), латерально-фронтальних (F7, F8), центральних (C3, C4), вертексних центральному (Cz), середньо-центрально-тім'яному (CPz), скроневих (T7, T8),тім'яних (P3, P4), задньотім'яних (P7, P8), середньо-тім'яному (Pz), потиличних (O1, O2) і середньотім'янопотиличному (POz). Відведення M1 і M2 поміщені на соскоподібному відростку. Відведення Fpz використовували для заземлення як усереднений референтний електрод – фронтально-вертексний електрод FCz. Запис ЕЕГ відбувався в частотному діапазоні 1-100 Гц з частотою дискретизації 500 Гц. Оцінювали спектральну потужність окремих піддіапазонів ЕЕГ від 4 до 45 Гц: тета – (4–7,49 Гц), альфа – (7,5–12,9 Гц), бета – (13–34,9 Гц), гамма – (35–45 Гц). Для аналізу було відібрано безартефактні записи ЕЕГ обстеженої спортсменки.

Обробка отриманих даних – препроцесинг. Для попередньої обробки даних, віді-

лення частотних діапазонів та статистичної обробки, використовували програмне середовище MATLAB 2022B (The MathWorks) за допомогою програмного пакета EEGLAB2023.0 (SCCN) (Delorme, 2004) та пакета статистичної обробки даних SPSS Statistics 17.0 [10].

На основі даних спектральної потужності було розраховано такі показники: індекс навантаження мозку; індекс рівня уваги; індекс емоційного вираження; індекс моторного контролю.

Індекс навантаження мозку визначається як відношення спектральної потужності тета-діапазону у фронтально-центральному відведенні (Fz) до спектральної потужності альфа-ритму втім'яному центральному відведенні (Pz): $BLI = \theta(Fz) / \alpha(Pz)$. Зміни цього індексу вказують на рівень стресу та когнітивного контролю [19].

Індекс рівня уваги визначається як відношення спектральних потужностей тета- та альфа-діапазону до бета- та гамма-діапазону у лівому передньофронтальному відведенні (Fp1). Зміни цього індексу вказують на фокус уваги [23].

Індекс емоційного вираження визначається як відношення спектральних потужностей тета- та альфа-діапазону до бета- та гамма-діапазону у правому скроневому відведенні (T8). Зміни цього індексу вказують на ступінь пережитої емоції та рівень стресу [20].

Індекс моторного контролю визначається як спектральна потужність альфа-діапазону у вертексному центральному відведенні (Cz). Зміни його вказують на ступінь активності моторної кори головного мозку [18].

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

Для визначення властивостей уваги з використанням коректурної проби (за методикою «Кільця Ландольта») використовували програмно-апаратний комплекс психологічної та психофізіологічної діагностики «БОС-тест-Професійний» [1, 7].

Під час проведення комплексних досліджень за участю спортсменок відповідно до принципів біоетики дотримувалися розробленої в НДІ НУФВСУ «Програми комплексного біологічного дослідження особливостей функціональних можливостей спортсменів», а також законодавства України про охорону здоров'я та Гельсінкської декларації 2000 р., директиви Європейського товариства 86/609 щодо участі людей в медико-біологічних дослідженнях [11]. Перед початком тестування було отримано письмову інформовану згоду учасника відповідно до Гельсінк-

Індекс рівня уваги

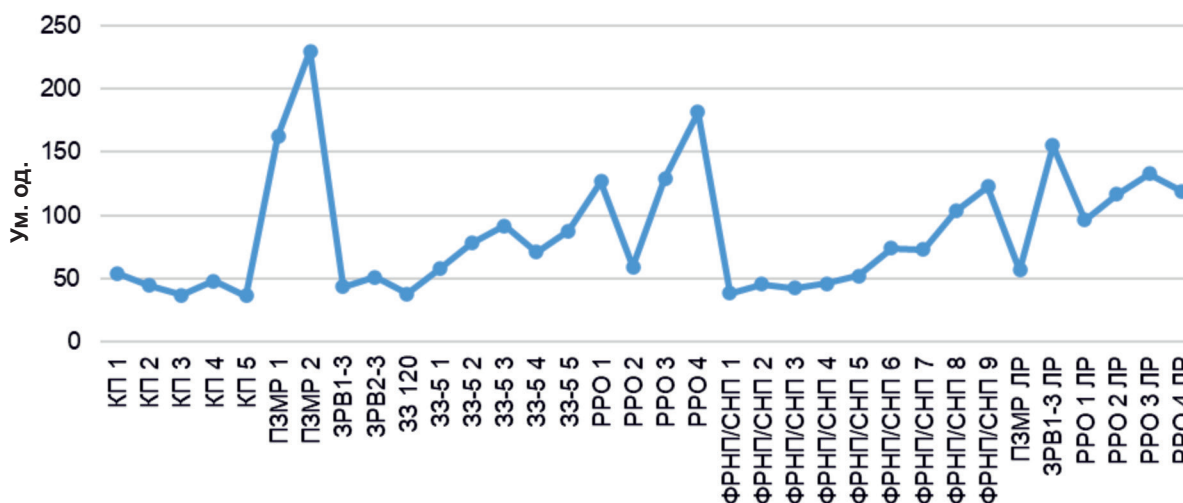


Рисунок 2 – Динаміка індексу рівня уваги (за показниками ЕЕГ) під час послідовного проходження обстежуваною коректурної проби та психофізіологічних тестів

Примітки (тут і далі): КП1, КП2, КП3, КП4, КП5 – виконання коректурної проби: відповідно 1 хв, 2 хв, 3 хв, 4 хв, 5 хв; ПЗМР1, ПЗМР2 – виконання простої зорово-моторної реакції двічі правою рукою; ЗРВ1-3 – виконання реакції вибору одного з трьох сигналів правою рукою; ЗРВ2-3 – виконання реакції вибору двох із трьох сигналів обома руками; ЗЗ-120 – виконання тесту «120 сигналів» у режимі зворотного зв'язку обома руками; ЗЗ-5 – виконання тесту «5 хвилин» у режимі зворотного зв'язку обома руками: відповідно, 1 хв, 2 хв, 3 хв, 4 хв, 5 хв; РРО – виконання реакції на рухомий об'єкт правою рукою: відповідно, 1 хв, 2 хв, 3 хв, 4 хв; ФРНП/СНП – виконання тесту визначення рівня функціональної рухливості і сили нервових процесів у режимі нав'язаного ритму обома руками: відповідно 1 хв, 2 хв, 3 хв, 4 хв, 5 хв, 6 хв, 7 хв, 8 хв, 9 хв; ПЗМР ЛР – виконання простої зорово-моторної реакції лівою рукою; ЗРВ1-3 ЛР – виконання реакції вибору одного з трьох сигналів лівою рукою; РРО ЛР – виконання реакції на рухомий об'єкт лівою рукою: відповідно, 1 хв, 2 хв, 3 хв, 4 хв.

ської декларації Всесвітньої медичної асоціації (WMA) (Гельсінкі, Фінляндія, червень 1964 р.). Обстежувана була проінструктована про мету і завдання дослідження.

Дослідження проводили на базі Науково-дослідного інституту Національного університету фізичного виховання і спорту України. У дослідженні брала участь кваліфікована спортсменка (МС), чемпіонка України, вік – 18 років (вид спорту – теніс), спортивний стаж – 13 років. Тестування спортсменки відбувалось у період підготовки до міжнародних професійних турнірів.

Дослідження проводили за допомогою ЕЕГ-обстеження мозку спортсменки під час виконання коректурної проби та психофізіологічних тестів: простої зорово-моторної реакції (ПЗМР), реакції вибору одного з трьох сигналів (ЗРВ1-3), реакції вибору двох із трьох сигналів (ЗРВ2-3), тестів «120 сигналів» і «5 хвилин» у режимі зворотного зв'язку (ЗЗ-120, ЗЗ-5), тесту визначення рівня функціональної рухливості і сили нервових процесів в режимі нав'язаного ритму (ФРНП/СНП), реакції на рухомий об'єкт (РРО). Завдання були підібрані з урахуванням вимог, що ставилися до оцінювання рівня уваги, моторної продуктивності та емоційного вираження, також оцінювали рівень навантаження мозку.

Згідно з отриманими даними ЕЕГ-обстеження, спортсменка мала високий рівень ФС головного мозку. Рівень уваги спостерігався на високому рівні та поступово збільшувався до закінчення тестування, ймовірно, внаслідок розвитку втоми. Окремі тести викликали сильне підвищення рівня уваги (ПЗМР, РРО 4 хвилини, ЗРВ1-3 лівою рукою), але воно було нетривалим, та після цього рівень уваги повертався до вихідних значень (рис. 2).

Показник моторного контролю не зазнавав значних відхилень під час тестування та не демонстрував певного тренду. Він мав найвищі значення в тестах ПЗМР та ЗРВ1-3 правою та лівою рукою, що може відображати складність виконання завдання (рис. 3).

Під час проходження тестів рівень емоційного вираження поступово збільшувався. Також, спостерігалось сильне зростання рівня емоційного вираження під час виконання тестів зорово-моторної реакції правою та лівою рукою (а саме – ПЗМР, ЗРВ1-3, ЗРВ2-3, РРО), що може свідчити про зміни емоційного контролю (рис. 4).

Навантаження мозку: спостерігалися найвищі рівні навантаження мозку під час виконання коректурної проби та обох тестів у режимі зворотного зв'язку (тобто, тестів з прискоренням



Рисунок 3 – Динаміка індексу моторного контролю (за показниками ЕЕГ) під час послідовного проходження обстежуваною коректурної проби та психофізіологічних тестів



Рисунок 4 – Динаміка індексу емоційного вираження (за показниками ЕЕГ) під час послідовного проходження обстежуваною коректурної проби та психофізіологічних тестів

подачі сигналів – 33-120 і 33-5). Піки показника спостерігалися на 3 хв тесту КП та 4 хв тесту ФРНП/СНП з наступним зниженням, що може відображати швидке навчання/впрацювання. До закінчення тестування показник навантаження мозку знижувався, що може свідчити про високий рівень моторної тренуваності (рис. 5).

Дискусія. Сьогодні суттєво зростає інтерес до розуміння нейронної основи спортивних результатів високого рівня, включаючи відмінності, пов'язані з досвідом у специфічних спортивних навичках, в тенісі зокрема. Так, у роботі А. Visser et al. технологія викликаного потенціалу (пов'язаного

з подіями), event-related potential (ERP), використовується для вивчення розподілу ресурсів уваги інформації, пов'язаної з тенісом [27].

Електроенцефалографічне дослідження дозволяє досліджувати зміни кортикальної обробки як протягом когнітивних навантажень, так і під час руху. Новітні дослідження продемонстрували, що експерти з настільного тенісу порівняно з початківцями використовували меншу кількість кіркових ресурсів для досягнення найкращих поведінкових показників [16]. Крім того, висновки цих фахівців свідчать про те, що складність завдання різних ударів у настільному



Рисунок 5 – Динаміка індексу навантаження мозку (за показниками ЕЕГ) під час послідовного проходження обстежуваною коректурної проби та психофізіологічних тестів

тенісі відображається в різних патернах кіркової активації [16]. Як зазначають Y. Liu, X. Sun, координаційні складні вправи в мінливому середовищі, які називаються вправами відкритих навичок, корисні для когнітивних функцій [24]. Дослідження фронтальної активації мозку під час гри в настільний теніс (як вправи для відкритих навичок) порівняно з вправами їзди на велосипеді та когнітивним завданням продемонструвало збільшення тета-потужності під час безперервної гри в настільний теніс, що може відображати підвищені вимоги до сприйняття та обробки подразників навколишнього середовища під час вправ із відкритими навичками. Це дослідження підтверджує сприятливий вплив вправ відкритих навичок на функцію мозку та припускає, що їх використання може посилювати активацію лобової кори [24].

За результатами проведеного дослідження, під час тестування було зафіксовано, що рівень уваги поступово збільшувався протягом тестування, окремі тести викликали підвищення рівня уваги, але після цього він повертався до вихідних значень. Показник моторного контролю не зазнавав значних відхилень під час тестування,

а показник емоційного вираження збільшувався під час проходження тестів.

Висновки:

1. За даними ЕЕГ-обстеження, спортсменка мала високий рівень функціонального стану головного мозку.

2. Найвищий рівень навантаження мозку спостерігався під час виконання коректурної проби та тестів у режимі зворотного зв'язку, але в цілому він знижувався до закінчення тестування, що може свідчити про високий рівень моторної тренуваності.

3. Виявлені зміни індексів електроенцефалографічних показників у обстеженої спортсменки під час проходження коректурної проби та батареї психофізіологічних тестів можуть мати прогностичну цінність і використовуватися для оптимізації спортивного удосконалення в даному виді спорту.

Колектив авторів висловлює щирі подяку Науково-дослідному інституту НУФВСУ, директору НДІ І. О. Когут, спортсменці, майстру спорту України, чемпіонці України та її тренеру В. В. Верхняцькому за участь в організації і проведенні досліджень.

Література

1. Комплекс для психологического тестирования «БОС-тест» [Complex for psychological testing «BOS-test»]. Компания «Сиата» – Медицинская техника и оборудование. Режим доступу: <http://www.siata.net.ua/index.php/kompleks-dlya-psihologicheskogo-testirovaniya-bos-test/>
2. Макаренко МВ, Лизогуб ВС. Онтогенез психофізіологічних функцій людини [Ontogenesis of human psychophysiological functions]. Черкаси; 2011. 256 с.
3. Макаренко МВ, Лизогуб ВС, Безкопильний ОП. Методичні вказівки до практикуму з диференціальної психофізіології та фізіології вищої

нервової діяльності людини [Methodical instructions to the workshop on differential psychophysiology and physiology of human higher nervous activity]. Київ; Черкаси; 2014. 102 с.

4. Правда ОІ. ЕЕГ-кореляти стійкості уваги в тесті «Коректурна проба» [EEG-correlates of attention sustainability in the «Proofreading test»]. [Кваліфікаційна робота бакалавра]; 2019. 49 с. <https://biomed.knu.ua/images/stories/Kafedry/Fiziology/Anotatsii/Bakalavr/Pravda.pdf>

5. Правда ОІ, Тукаєв СВ, Комаренко ВІ, Данилов СА, Лукашевич ВА, Макачук МЮ, Федорчук СВ. Гаптическое підкріплення для розвитку рухових

навичок [Haptic reinforcement for the development of motor skills]. Інноваційні та інформаційні технології у фізичній культурі, спорті, фізичній терапії та ерготерапії: V Всеукраїнська електронна науково-практична конференція з міжнародною участю, 31 травня 2022 р., Київ: НУФВСУ; 2022: 97-98. https://reposit.uni-sport.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/787878787/4006/%D0%86%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y

6. Русалова МН. Функциональная асимметрия мозга: эмоции и активация [Functional asymmetry of the brain: emotions and activation]. Успехи физиологических наук. 2003;34(5):93-112. <http://cerebral-asymmetry.narod.ru/Rusalova.pdf>

7. Сысоев ВН. Тест Ландольта [The Landolt test. Work capacity diagnostics]. Диагностика работоспособности. Санкт-Петербург; 2007. 32 с.

8. Тукаєв СВ, Федорчук СВ, Гарматюк ДВ, Правда ОІ, Макачук МЮ, Попов АО. Реєстрація змін електроенцефалограми студентів, які займаються масовим спортом [Registration of electroencephalogram changes in students engaged in mass sports]. Молодь та олімпійський рух: Збірник тез доповідей XIV Міжнародної конференції молодих вчених, 19 травня 2021 року [Електронний ресурс]. Київ; 2021: 212. https://uni-sport.edu.ua/sites/default/files/konferencya/molod_xiv_zbirnyk_traven_2021.pdf

9. Тукаєв СВ, Правда ОІ, Данилов СА, Комаренко ВІ, Лукашевич ВА, Макачук МЮ, Федорчук СВ. Вплив галтичних стимулів на викликану десинхронізацію та синхронізацію під час навчання [Effect of haptic stimuli on evoked desynchronization and synchronization during learning]. Ukrainian conference on Neuroscience '22: Всеукраїнська конференція з нейронаук з міжнародною участю, присвячена 90-річчю від дня народження видатного українського нейрофізіолога академіка Володимира Скока, 25-27 липня 2022 р., Київ; 2022: 54-55. https://fz.kiev.ua/journals/2022_V.68/3S/2022-68-3S.pdf

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

11. Шинкарук ОА, Лисенко ОМ, Гуніна ЛМ, Карленко ВП, Земцова ІІ, Олішевський СВ та ін. Медико-біологічне забезпечення підготовки спортсменів збірних команд України з олімпійських видів спорту [Medicobiological support of training of athletes of national teams of Ukraine in Olympic sports]. Київ; 2009. 144 с.

12. Achard S, Bullmore E. Efficiency and cost of economical brain functional networks. PLoS Computational Biology. 2007; 3(2): 174-185.

13. Allen JJ, Coan JA, Nazarian M. Issues and assumptions on the road from raw signals to metrics of frontal EEG asymmetry in emotion. Biological psychology. 2004 Oct 1; 67(1-2): 183-218. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.007>

pravda.oleksandr13@gmail.com

lanasvet778899@gmail.com

tukaev@univ.kiev.ua, serhii.tukaiev@knu.ua

tetianakutsenko@ukr.net

markizalus14@gmail.com

14. Bassett DS, Meyer-Lindenberg A, Achard S, Duke T, Bullmore E. Adaptive reconfiguration of fractal small-world human brain functional networks. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2006; 103(51): 19518-19523.

15. Bojić T, Vuckovic A, Kalauzi A. Modeling EEG fractal dimension changes in wake and drowsy states in humans – a preliminary study. Journal of theoretical biology. 2010; 262(2): 214-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2009.10.001>

16. Carius D, Herold F, Clauß M, Kaminski E, Wagemann F, Sterl C, Ragert P. Increased Cortical Activity in Novices Compared to Experts During Table Tennis: A Whole-Brain fNIRS Study Using Threshold-Free Cluster Enhancement Analysis. Brain Topogr. Published online 29 April 2023: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10548-023-00963-y>

17. Crespo-García M, Cantero JL, Pomyalov A, Boccaletti S, Atienza M. Functional neural networks underlying semantic encoding of associative memories. NeuroImage. 2010; 50(3): 1258-1270.

18. Ghasemian M, Taheri H, Saberi Kakhki A, Ghoshuni M. Electroencephalography Pattern Variations During Motor Skill Acquisition. Perceptual and Motor Skills. 2017; 124(6): 1069-1084. doi:10.1177/0031512517727404

19. Giannakakis G, Grigoriadis D, Tsiknakis M. Detection of stress/anxiety state from EEG features during video watching. In 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2015 Aug 25: 6034-37. IEEE. doi: 10.1109/EMBC.2015.7319767.

20. Jatupaiboon N, Pan-ngum S, Israsena P. Real-Time EEG-Based Happiness Detection System. The Scientific World Journal. 2013: 1-12. doi:10.1155/2013/618649

21. Jin SH, Lin P, Hallett M. Reorganization of brain functional small-world networks during finger movements. Human Brain Mapping. 2012; 33(4): 861-872.

22. Kitzbichler MG, Henson RNA, Smith ML, Nathan PJ, Bullmore ET. Cognitive Effort Drives Workspace Configuration of Human Brain Functional Networks. Journal of Neuroscience. 2011; 31(22): 8259-8270.

23. Liu NH, Chiang CY, Chu HC. Recognizing the degree of human attention using EEG signals from mobile sensors. Sensors (Basel, Switzerland). 2013; 13(8): 10273-10286. <https://doi.org/10.3390/s130810273>

24. Liu Y, Sun X. EEG analysis of Attention Resource Allocation of Tennis Players. NeuroQuantology. 2018; 16(5). DOI:10.14704/nq.2018.16.5.1423

25. Sauseng P, Griesmayr B, Freunberger R, Klimesch W. Control mechanisms in working memory: A possible function of EEG theta oscillations. Neuro-science & Biobehavioral Reviews. 2010; 34(7): 1015-1022.

26. Tukaiev S, Fedorchuk S, Ocheretko B, Pravda O, Harmatiuk D, Popov A, Makarchuk M. EEG biomarkers of mastery in team sports. In Psychophysiology. (2021, October). 111 River St, Hoboken 07030-5774, NJ USA: WILEY. 2021; 58: S55-S55.

27. Visser A, Büchel D, Lehmann T, Baumeister J. Continuous table tennis is associated with processing in frontal brain areas: an EEG approach. Experimental Brain Research. 2022; 240(6): 1899-1909. <https://doi.org/10.1007/s00221-022-06366-y>