УДК 159.9
DOI: https://doi.org/10.17721/1728.2748.2025.100.26-34

Юлія ВЕЛИЧКО, студ.
ORCID ID: 0009-0004-9128-8616
e-mail: velychkoyul@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Марія ЧЕРНИХ, д-р філософії, асист.
ORCID ID: 0000-0001-5091-5071
e-mail: mariia.chernykh@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Олександр КОВАЛЬЧУК, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-6311-3518
e-mail: kovalchuk@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРОЦЕСИ ЛОКАЛЬНОЇ ТА ДИСТАНТНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЛЮДИНИ ПРИ СПРИЙНЯТТІ КОЛЬОРІВ

Вступ. *Мозок людини, з його складною структурою та функціональними особливостями, завжди був об'єктом інтенсивного дослідження вченими. Один із ключових аспектів діяльності головного мозку – це можливість сприймати, обробляти та інтерпретувати різноманітні зовнішні стимули. Серед цих стимулів особливе місце займають кольори, які не лише впливають на наш настрій і стан, але й мають значення у визначеному сприйнятті нашого почуття оточуючого світу та впливають на когнітивні процеси. Метою даного дослідження було вивчення впливу чотирьох фокусних кольорів на процеси біоелектричної активності відділів головного мозку та аналіз за допомогою методу щільності спектральної потужності. Поставленими задачами були дослідження відмінності сприйняття чотирьох різних кольорів і доведення ефективності методу оцінки спектральної потужності при сприйнятті та обробці кольорових стимулів.*

Методи. *У даному дослідженні на добровільних засадах взяли участь 21 обстежуваний без вад здоров'я ($n_{жін}$ = 11) віком від 18 до 27 років. Обстежувані переглядали відео, під час демонстрації якого відбувалась реєстрація ЕЕГ. На відео обстежувані переглядали чотири фокусні кольори в певному порядку (червоний #FF0000, жовтий #FFFF00, зелений #008000 та синій #0000FF), між якими відбувався засвіт звичайного сірого (#808080). Для аналізу θ, α та β діапазони були розділені на піддіапазони таким чином θ1 (3,5 7,4) Гц, α1 (7,5 9,4) Гц, α2 (9,5 10,7) Гц, α3 (10,8 13,5) Гц, β1 (13,6 19,9) Гц, β2 (20, 30) Гц.*

Результати. *Результати аналізу виявили значущу відмінність у потужності α3-піддіапазону при сприйнятті червоного кольору, що може бути характерним для негативної емоційної реакції на цей колір, спричиненої підвищенням рівня тривоги. У той же час суттєва відмінність спостерігалась у β1-діапазоні на синій та зелений кольори, що може бути свідченням можливого підвищення концентрації уваги при подразненні даними візуальними стимулами.*

Висновки. *Дослідження показало, що сприйняття кольорів впливає на біоелектричну активність мозку, зокрема червоний колір асоціюється з підвищеною тривожністю (α3-діапазон), а синій і зелений – зі зростанням концентрації уваги (β1-діапазон). Отримані результати підтверджують ефективність спектрального аналізу для дослідження нейрофізіологічних механізмів сприйняття кольорів і можуть бути використані в нейропсихології та когнітивних науках.*

Ключові слова: *електроенцефалографія (ЕЕГ); метод щільності спектральної потужності (PSD); нейрофізіологія кольору; колірне сприйняття.*

Вступ

Мозок людини, з його складною структурою та функціональними особливостями, завжди був об'єктом інтенсивного дослідження вченими. Один із ключових аспектів його діяльності – це можливість сприймати, обробляти та інтерпретувати різноманітні зовнішні стимули. Серед цих стимулів особливе місце займають кольори, які не лише впливають на наш настрій та стан, але мають значення у визначеному сприйнятті нашого почуття оточуючого світу та впливають на когнітивні процеси. На сьогодні із розвитком сучасних методів образного та функціонального обстеження мозку, таких як електроенцефалографія (ЕЕГ), магнітно-резонансна томографія (МРТ) і функціональна магнітно-резонансна томографія (фМРТ), ми маємо можливість вивчати електричну активність мозку в реальному часі та в умовах різних сприйняття стимулів, зокрема кольорів. Інтеграція цих методів дослідження дозволяє нам отримати глибше розуміння процесів, які відбуваються у відділах головного мозку під час сприйняття кольорів. Розуміння механізмів роботи головного мозку під час сприйняття кольорів може мати значення дослідження для різних сфер життя, включаючи медицину, психологію, дизайн та інші. Наприклад, вивчення цих процесів може допомогти у покращенні методів діагностики та лікування різноманітних порушень сприйняття, від неврологічних захворювань до психічних розладів.

Червоний, жовтий, зелений і синій займають особливе місце в кольоросприйнятті. Людське око здатне розрізняти широкий спектр відтінків (Witzel, & Gegenfurtner, 2018), проте, описуючи кольори, ми використовуємо певні терміни, що класифікують відтінки в категорії, такі як червоний, помаранчевий і жовтий. Ці категорії можна назвати "лінгвістичними", оскільки вони відповідають мовним назвам кольорів. Дослідження показали, що в різних мовах існує тенденція використовувати терміни, які позначають найтиповіші варіанти червоного, жовтого, зеленого та синього. Зокрема, прототипи кольорових категорій різних мов згруповані навколо англійських стандартів червоного, жовтого, зеленого та синього, які приблизно збігаються з унікальними відтінками (Chai et al., 2019). Припускається, що ці відтінки мають особливі властивості сприйняття, тому їх називають фокусними кольорами. Деякі дослідження виявили, що чутливість до відмінностей відтінків знижується біля так званої "блакитної лінії", яка з'єднує унікальний синій та унікальний жовтий через адаптаційну

© Величко Юлія, Черних Марія, Ковальчук Олександр, 2025

ISSN 1728-3817 (Print), ISSN 2308-8036 (Online)

точку білого (Danilova, & Mollon., 2016). Дослідники припустили, що існує специфічний механізм розрізнення блакитної лінії, що приблизно відповідає контрасту між синім і жовтим. Водночас для унікального зеленого результати були протилежними, а для унікального червоного залишалися неоднозначними.

Хоча була висунена гіпотеза про нейронну основу оцінки унікальності відтінків, але ці результати згодом були спростовані (Forder et al., 2017). Інші дослідження не виявили нейрофізіологічних підтверджень існування унікальних відтінків (Geisel, Hansen, & Gegenfurtner, 2009). Одне з досліджень зафіксувало коротший час реакції для унікальних кольорів порівняно з проміжними. Оскільки цей компонент пов'язаний із пострецепторними процесами (напр., увагою та робочою пам'яттю), зв'язок між унікальними відтінками й механізмами кольорового сприйняття залишається відкритим (Rosenthal et al., 2021)

Крім того, під сумнів ставиться особливий статус червоного, жовтого, зеленого і синього. Останні дослідження показали, що замість них можна використовувати інші референтні кольори (приміром, салатовий, помаранчевий, фіолетовий і блакитний) для опису всіх відтінків (Bosten, & Lawrence-Owen, 2014). Було також виявлено, що унікальні налаштування відтінків залежать від вибору кольорів для порівняння в інструкціях: наприклад, визначення унікального червоного змінюється залежно від того, як саме сформульоване завдання (відсутність синього й оранжевого або синього та жовтого). Існує таке припущення, що унікальні відтінки мають бути більш стабільними у параметрах, якщо вони є базовими для сприйняття всіх кольорів. Проте результати показали, що менша індивідуальна мінливість (тобто більша сталість) не є загальною властивістю унікальних кольорів. Інші експерименти також довели, що унікальні відтінки не є більш помітними порівняно з усіма іншими кольорами (Wool·et al., 2015).

Кожен візуальний стимул, який обробляється системою сприйняття, містить інформацію про колір. З огляду на поширеність кольору в нашому житті, можна було б припустити, що психологія кольору є добре розвиненою сферою. Однак на сьогодні існує небагато теоретичних та емпіричних досліджень, які розглядають вплив кольорів на психологічні процеси. Хоча популярна література часто містить твердження про кольорові асоціації та їх вплив на поведінку (як приклад, зелений колір сприяє розслабленню), наявні належні теоретичні основи й контрольовані експерименти ускладнюють формування обґрунтованих висновків. (Elliot et al., 2007).

Деякі дослідження (Elliot et al., 2007) свідчать, що червоний і жовтий кольори викликають збудження та вважаються менш приємними, фокусуючи увагу людей на зовнішньому середовищі й зумовлюють сильну, експансивну поведінку, тоді як зелений і синій – навпаки, допомогають досягнути спокою та внутрішньої зосередженості, сприяючи стриманій поведінці. Це пояснюється довжиною хвилі: кольори з більшою довжиною хвилі (червоний, жовтий) сприймаються як стимулюючі, тоді як короткохвильові (зелений, синій) – як заспокійливі. Загалом переважаюча кількість теорій про колір базуються на загальних асоціаціях. Уважається, що різні кольори спричиняють певні емоційні реакції: чорний асоціюється зі смертю і може провокувати агресію, тоді як червоний і синій пов'язані зі щастям і сумом відповідно. Дослідження кольору фактично зосереджуються на окремих кольорах та їхньому впливі в певних ситуаціях.

Проте наявні експериментальні дані щодо цих гіпотез є рідкісними і часто суперечливими. Попри теорію про стимулюючий ефект довгохвильових кольорів і заспокійливий вплив короткохвильових, емпіричні дослідження не завжди це підтверджують. Крім того, багато досліджень мають методологічні недоліки: недостатньо контрольовані умови, (напр., подання кольору через верхнє й бокове освітлення), тощо. Крім цього, більшість існуючих досліджень не враховували вплив відтінків, спричинених параметрами світла та насиченості (Wool et al., 2015).

Деякі колірні асоціації можуть бути результатом навчання, проте є припущення, що багато з них мають еволюційне коріння. Приміром, у тварин червоний колір може сигналізувати про стиглість плодів, що впливає на їхню поведінку. Якщо у людей подібні механізми збережені, це можна пояснити певними когнітивними підсиленнями або формуванням біологічних тенденцій відповіді. Обчислення кольору й оцінювальні процеси наявні у більшості форм живих організмів, що підтверджує їх фундаментальність. Це допомагає розрізнити ворожість і гостинність подразника (Elliot et al., 2007). Залежно від того, чи є стимул позитивним або негативним формуватиметься реакція наближення чи уникнення. Вплив кольору традиційно відбувається на несвідомому рівні, а його значення залежить від контексту. Наприклад, червоний може символізувати любов і пристрасть у романтичних ситуаціях, що частково пояснюється культурними традиціями (використання червоної помади, сердець тощо) і біологічними чинниками (демонстрація червоного кольору у тварин для залучення партнера). Інші кольори також впливають на емоції, мислення й поведінку. Наприклад, зелений може асоціюватися з грошима та заохочувати витрати, а в певних випадках – навпаки, туркезовий або синьо-зелений може пов'язуватися із цвіллю та пригнічувати апетит у кулінарному контексті. Чорний може викликати агресію або, залежно від контексту, сексуальне бажання (Elliot et al., 2007).

Методи дослідження в цій сфері містять аналіз мозкової активності за допомогою електроенцефалографії (ЕЕГ). Вивчення результатів показало, що рівень альфа-хвиль був підвищеним під час демонстрації різних кольорів учасникам. Також було доведено, що жінки продемонстрували більш виражене збудження при перегляді певних кольорів порівняно з чоловіками. Результатами досліджень були припущення, що потилична ділянка головного мозку має високу альфа-активність, а електродні канали O7 і O8 відіграють ключову роль у розпізнаванні кольорів (Chai et al., 2019). Дані свідчать, що в ранні сенсорні періоди бета-коливання зеленого кольору є відмінними від червоного та синього, а в потиличній частці відзначається спостерігається зниження тета-активності при сприйнятті синього кольору. Одночасно в корі лобової частки зелений колір спричиняє підвищення фазової узгодженості, тоді як синій – її зменшення. Гамма-коливання у зоровій корі відображають ритмічні патерни популяційної активності, що формуються ланцюгами, які відповідають за локалізацію, орієнтацію та сприйняття кольору. Деякі теорії підкреслюють свою роль у кодуванні та передаванні видимої інформації. Проте останні результати свідчать про складніший механізм, залежний від таких конкретних характеристик, як орієнтовані контури й окремі відтінки.

Метою цього дослідження було вивчення впливу чотирьох фокусних кольорів на процеси біоелектричної активності відділів головного мозку й аналіз за допомогою методу щільності спектральної потужності. Таким чином, об'єктом цієї роботи стає вивчення електричної активності мозку при сприйнятті кольорів. Предметом є мозкова активність при впливі чотирьох

фокусних кольорів тривалістю 20 с. Основні задачі – дослідження відмінності сприйняття чотирьох різних кольорів і доведення ефективності методу оцінки спектральної потужності при сприйнятті й обробці кольорових стимулів.

Методи

При записі ЕЕГ важливим є розташування електродів, за якого електрична активність, яка фіксується з різних точок голови, суттєво відрізняється. При реєстрації використовують два основні методи (монтажі): біполярний і монополярний. При біполярному методі електроди розміщуються на електрично активних точках скальпу, а при монополярному один із електродів розташовується в точці скальпу, яка умовно вважається електрично нейтральною, наприклад на мочці вуха. Електрод, віддалений від мозкової тканини, має назву пасивного або референтного. Референтний розташовують на мочці іпсилатерального вуха, на підборідді або іноді на носі. Встановлення референтного електрода на більш віддалених частинах тіла має ряд труднощів, пов'язаних із фіксацією електрода, а головним чином, з артефактами від інших електрично-активних органів тіла – м'язів і серця. Кріплення електрода на носі створює деяку незручність для обстежуваного і використовується тільки у спеціальних дослідженнях, у яких встановлення електрода на мочці вуха з яких-небудь причин небажане. При біполярному монтажі реєструється ЕЕГ, яка являє собою результат взаємодії двох електрично активних точок, при монополярному записі – активність одного із відведень відносно електрично нейтральної точки. Вибір того чи іншого варіанту запису залежить від мети дослідження: у дослідницькій практиці ширше використовується монополярний варіант реєстрації, оскільки він дозволяє вивчати ізольований внесок тієї чи іншої зони мозку в процес вивчення, зокрема він використовувався в даному дослідженні.

Для накладання електродів використовують систему "10–20 %", що була прийнята Міжнародною асоціацією електроенцефалографії та клінічної нейрофізіології, вона дозволяє точно визначати топографію розташування електродів. У цьому дослідженні на добровільних засадах взяли участь 21 обстежуваний без вад здоров'я (10 чоловіків та 11 жінок) віком від 18 до 27 років. Запис рутинної ЕЕГ проводився із застосуванням комп'ютерного електроенцефалографічного–комплексу "Нейроком" (ХАІ Медика, м. Харків, Україна). Накладання електродів на голову відбувалося згідно з міжнародною системою "10–20 %". Учасників було поінформовано про протокол експерименту, і від кожного з них отримано письмову згоду відповідно до Декларації Всесвітньої медичної асоціації (WMA) у Гельсінкі – "Етичні принципи медичних досліджень за участю людини" (Гельсінкі, Фінляндія, червень 1964 р.), Декларації принципів толерантності (28-ма сесія Генеральної конференції ЮНЕСКО, Париж, 16 листопада 1995 р.), а також Конвенції про захист прав людини та гідності у зв'язку з використанням біології та медицини: "Конвенція про права людини та біомедицину" (Oviedo, 4 квітня 1997 р.).

Структура експерименту була такою: обстежувані переглядали відео тривалістю 6 хв 20 с, під час демонстрації якого відбувалась реєстрація ЕЕГ. Відео передували записи електроенцефалограми у стані спокою із заплющеними очима протягом 1 хв, та з розплющеними очима протягом 1 хв. Також після відео відбувався запис із заплющеними очима протягом 1 хв. У відео були показані чотири фокусні кольори системи RGB (червоний #FF0000, жовтий #FFFF00, зелений #008000 та синій #0000FF) протягом 20 с, перед та після яких було відображено звичайний сірий (#808080) тривалістю 60 с (рис. 1). Перед відео всі обстежувані проходили тест із застосуванням табличок Рабкіна, щоб підтвердити своє адекватне сприйняття кольорів і виключити випадки порушень кольорового зору.

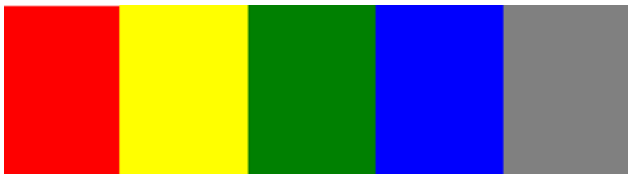

Рис. 1. Приклади кольорів, що використовувались в експериментах (червоний #FF0000, жовтий #FFFF00, зелений #008000, синій #0000FF та сірий #808080)

Опрацювання отриманих даних було виконано за допомогою програмного пакету EEGLAB на базі програми MATLAB. Було проведено фільтрацію (2–30 Гц), виявлення й очищення від артефактів і ICA-аналіз. Для аналізу θ, α та β-діапазони були розділені на піддіапазони таким чином θ1 (3,5 7,4) Гц, α1 (7,5 9,4) Гц, α2 (9,5 10,7) Гц, α3 (10,8 13,5) Гц, β1 (13,6 19,9) Гц, β2 (20, 30) Гц. Також для обраних піддіапазонів було створено топографічні карти активації за допомогою методу щільності спектральної потужності, а також проведено порівняння топографічного розподілу значень потужностей електричної активності. Для статистичного аналізу використовувались тести на заміну, а саме метод перестановки, який є оптимальним для аналізу даних ЕЕГ, оскільки він не вимагає припущень щодо їхнього розподілу. Суть цього методу полягає у багаторазовому випадковому перетасуванні значень між умовами й повторному обчисленні досліджуваного показника на основі змінених даних (напр., різниці між двома умовами) і передбачає вибір випадкових зразків без повернення. Це дозволяє отримати розподіл різниці, аналізуючи, чи потрапляє початкове значення у крайні області цього розподілу. Якщо відповідно до нульової гіпотези відмінності між умовами відсутні, початкове значення не повинно перебувати у хвості розподілу. Якщо ж воно там опиняється, можна оцінити ймовірність відхилення H_0. Під час проведення великої кількості статистичних тестів необхідно враховувати корекцію на множинні порівняння. Це важливо, оскільки при використанні стандартного порогу значущості $p < 0,05$ приблизно 5 % виявлених значущих результатів можуть бути хибнопозитивними. Одним із найконсервативніших методів корекції є метод Бонферроні, який і використовувався в цьому дослідженні. Він передбачає поділ рівня значущості *p* на кількість проведених порівнянь. Приміром, під час аналізу частотно-часових зображень ERSP із 100 частотами та 200 часовими точками загальна кількість статистичних висновків становить 20 000. Для врахування множинних порівнянь потрібно застосувати скоригований поріг значущості: 0,05/20000 = 0,0000025. Попри свою ефективність у зменшенні ймовірності хибнопозитивних результатів, метод Бонферроні є доволі консервативним. Він передбачає, що всі часові й частотні точки є незалежними, що в реальності не завжди відповідає дійсності.

Результати

Під час аналізу спектральної потужності тета-діапазону синього і зеленого порівняно із жовтим було виявлено статистичну відмінність у темпеpальній частині правої півкулі головного мозку (рис. 2) (51 мкВ^2/Гц та 49 мкВ^2/Гц відповідно). Це може відображати емоційні

вияви під час процесів, що пов'язані з пам'яттю. Крім цього, різницю було також помітно при порівнянні синього та червоного кольорів із зеленим у фронтальній частині біля області центральної борозни (рис. 3) (від 52,8 до 53 мкВ^2/Гц та від 53,1 до 54 мкВ^2/Гц відповідно).

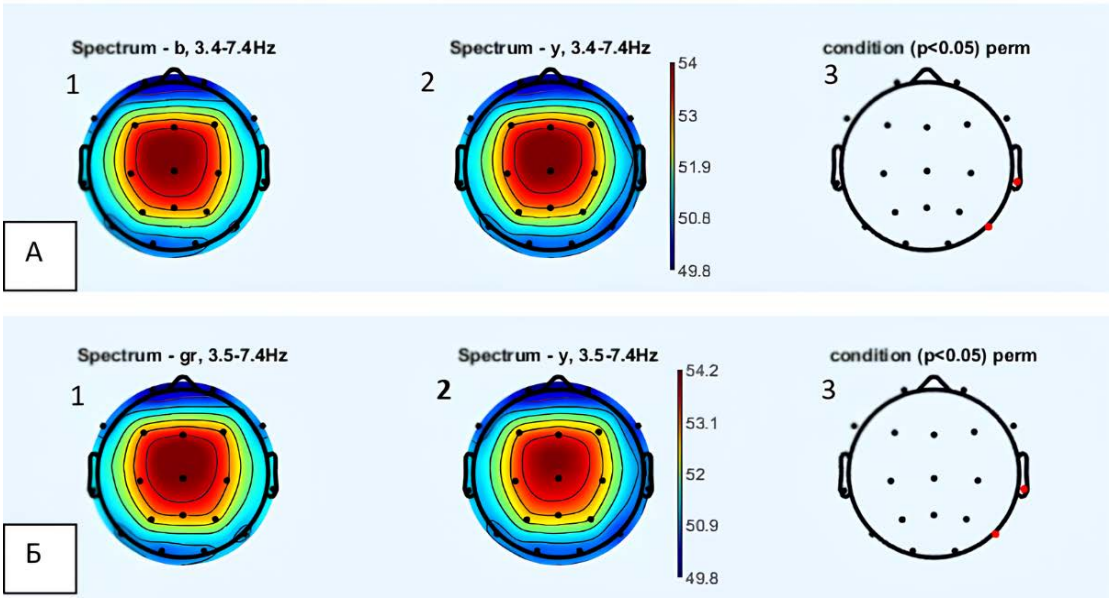

Рис. 2. Топографія розподілу активаційних змін щільності спектральної потужності у θ-діапазоні при сприйнятті синього (А) та зеленого (Б) кольорів (1) порівняно із жовтим (2). На схемах А.3 та Б.3 червоним виділено ділянки зі статистично значущими відмінностями (p < 0,05), n = 21

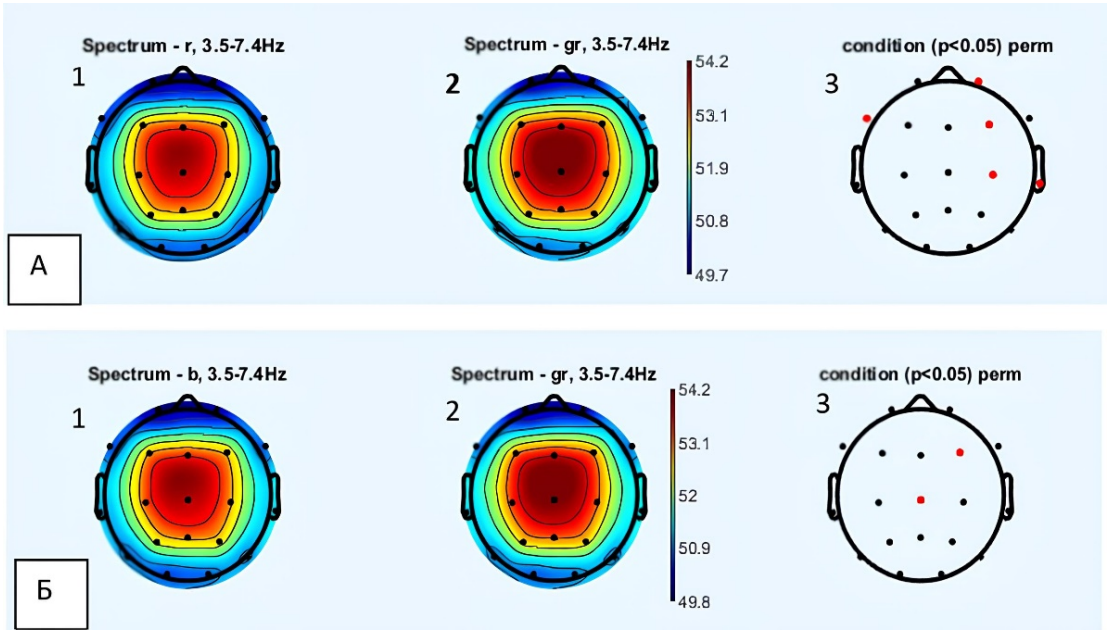

Рис. 3. Топографія розподілу активаційних змін щільності спектральної потужності у θ-діапазоні при сприйнятті червоного (А) та синього (Б) кольорів (1) порівняно із зеленим (2). На схемах А.3 та Б.3 червоним виділено ділянки зі статистично значущими відмінностями (p < 0,05), n = 21

У той же час при розгляданні альфа-ритміки значущу відмінність можна було побачити саме в α1- та α3-піддіапазонах. Такого не можна сказати про α2-піддіапазон, у якому статистична відмінність спостерігалась тільки при порівнянні зеленого кольору з червоним у потиличній зоні, яка відповідає за зорову обробку інформації (53 і 52 мкВ^2/Гц) та зеленого із синім у дорзальній частині передлобової кори, що може вказувати на певні вияви уваги або когнітивні навантаження.

Щодо коливань у α3-діапазоні, то виникла вагома відмінність у червоному кольорі. Отже, червоний колір має значне зменшення потужності по всій корі правої півкулі порівняно із жовтим кольором, також у великому діапазоні кори потиличної та тім'яної часток правої півкулі на противагу зеленому кольору і в потиличній зоні порівняно із синім кольором (рис. 5).

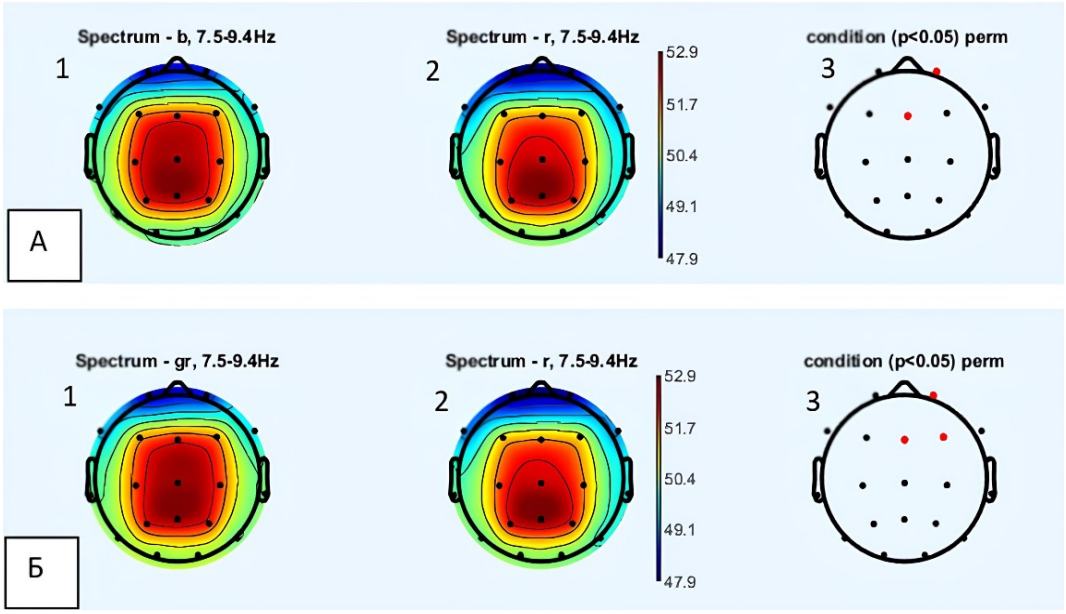

Рис. 4. Топографія розподілу активаційних змін щільності спектральної потужності в α1-піддіапазоні при сприйнятті синього (А) та зеленого (Б) кольорів (1) порівняно із червоним (2). На схемах А.3 і Б.3 червоним виділено ділянки зі статистично значущими відмінностями (p < 0,05), n = 21

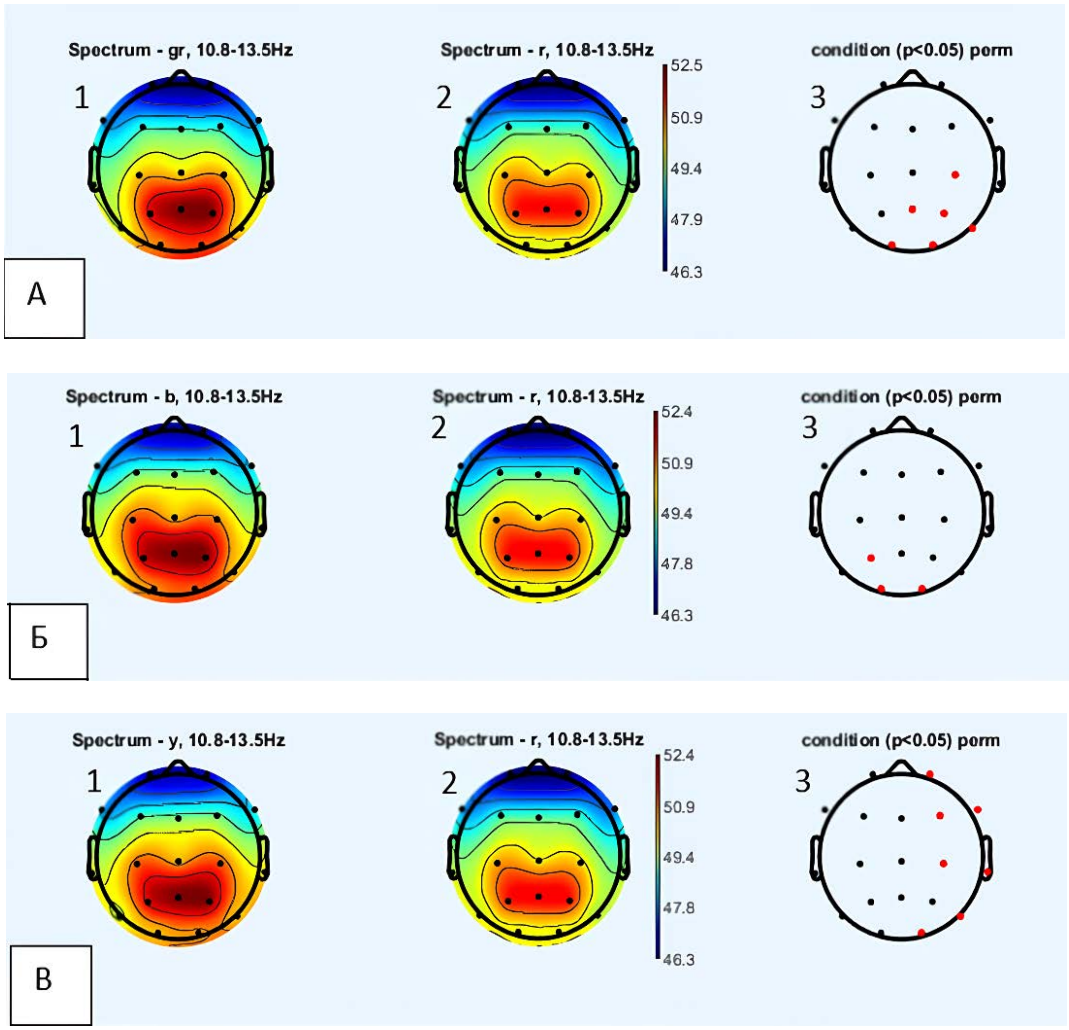

Рис. 5. Топографія розподілу активаційних змін щільності спектральної потужності в α3-піддіапазоні при сприйнятті зеленого (А), синього (Б) та жовтого (В) кольорів (1) порівняно із червоним (2). На схемах А.3, Б.3 та В.3 червоним виділено ділянки зі статистично значущими відмінностями (p < 0,05), n = 21

У свою чергу, бета-активність дозволила нам спостерігати найсуттєвішу різницю потужностей у широкому діапазоні кори головного мозку. Цю активність було поділено на β1 (13,6– 19,9 Гц) та β2 (20–30Гц) піддіапазони, у зв'язку із характерним для них функціональним значенням. У низькочастотному β1-діапазоні спектральні потужності червоного кольору порівняно із жовтим та зеленого порівняно із синім кольором не мали значної відмінності між собою та були досить схожими (на відміну від порівняння зеленого та синього кольорів із жовтим і червоним). Це показало значущу відмінність по всій корі головного мозку від лобової до потиличної часток кори півкуль (рис. 6). У даному випадку зелений та синій кольори проілюстрували значно більшу спектральну потужність. Не дивлячись на схожість розподілу між кольорами (відсутність значущої різниці між сприйняттям синього та зеленого, і навпаки, помітну вищу потужність між вищезгаданими кольорами на противагу жовтому та червоному), порівняно із β1-піддіапазоном, β2 показав трохи менш помітну відмінність спектральної потужності, яка в даному випадку була сконцентрована саме у лобових ділянках мозку (перевагою у правій півкулі). Окрім цього, спостерігалась невелика різниця в правій частині кори потиличної та тім'яної часток між сприйняттям червоного та жовтого кольорів (рис. 7).

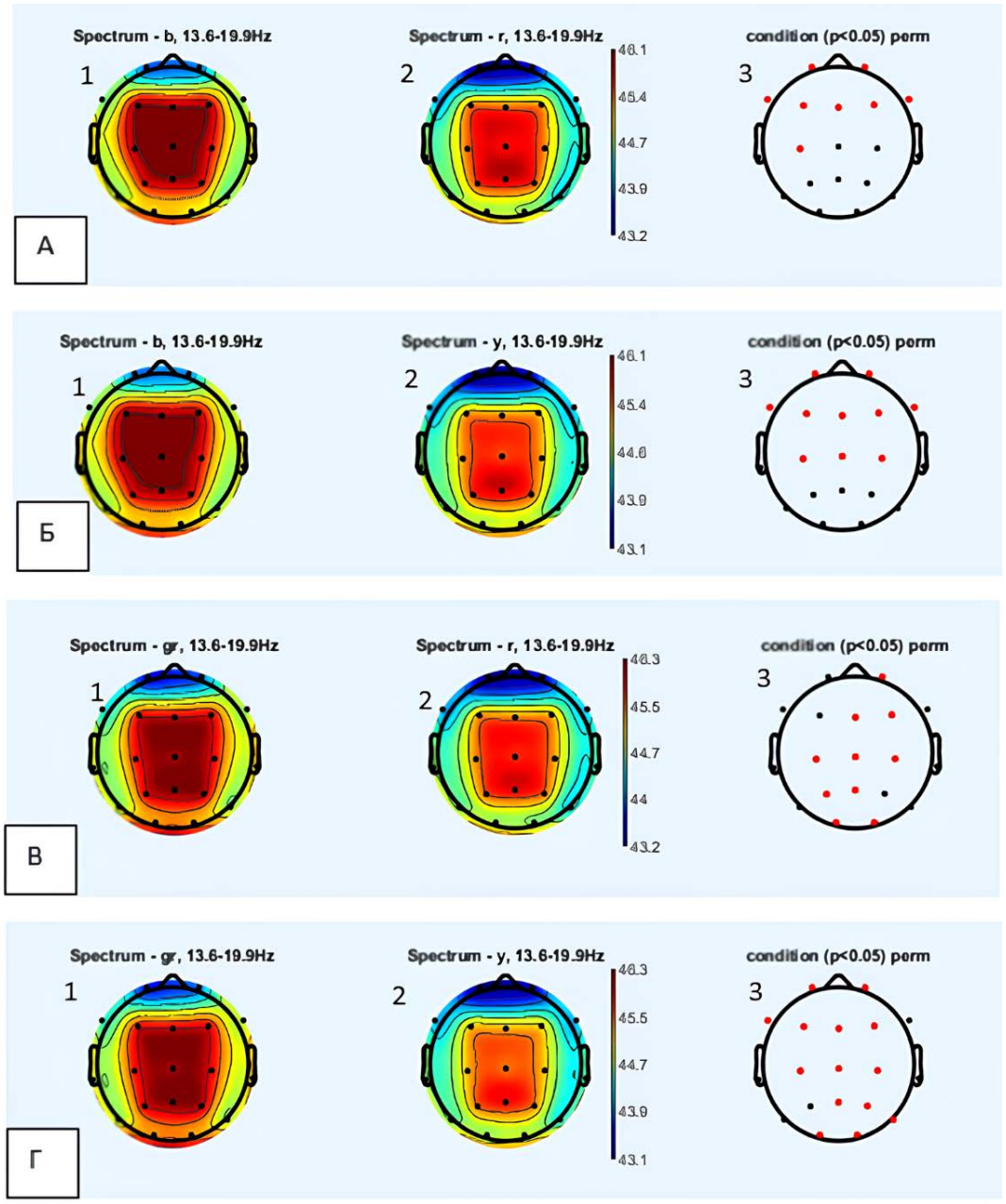

Рис. 6. Топографія розподілу активаційних змін щільності спектральної потужності у β1-піддіапазоні при сприйнятті синього (А) та зеленого (Б) кольорів (1) порівняно з червоним (2), а також порівняно із жовтим (2, В і Г відповідно). На схемах А.3, Б.3, В.3 та Г.3 червоним виділено ділянки зі статистично значущими відмінностями (p < 0,05), n = 21

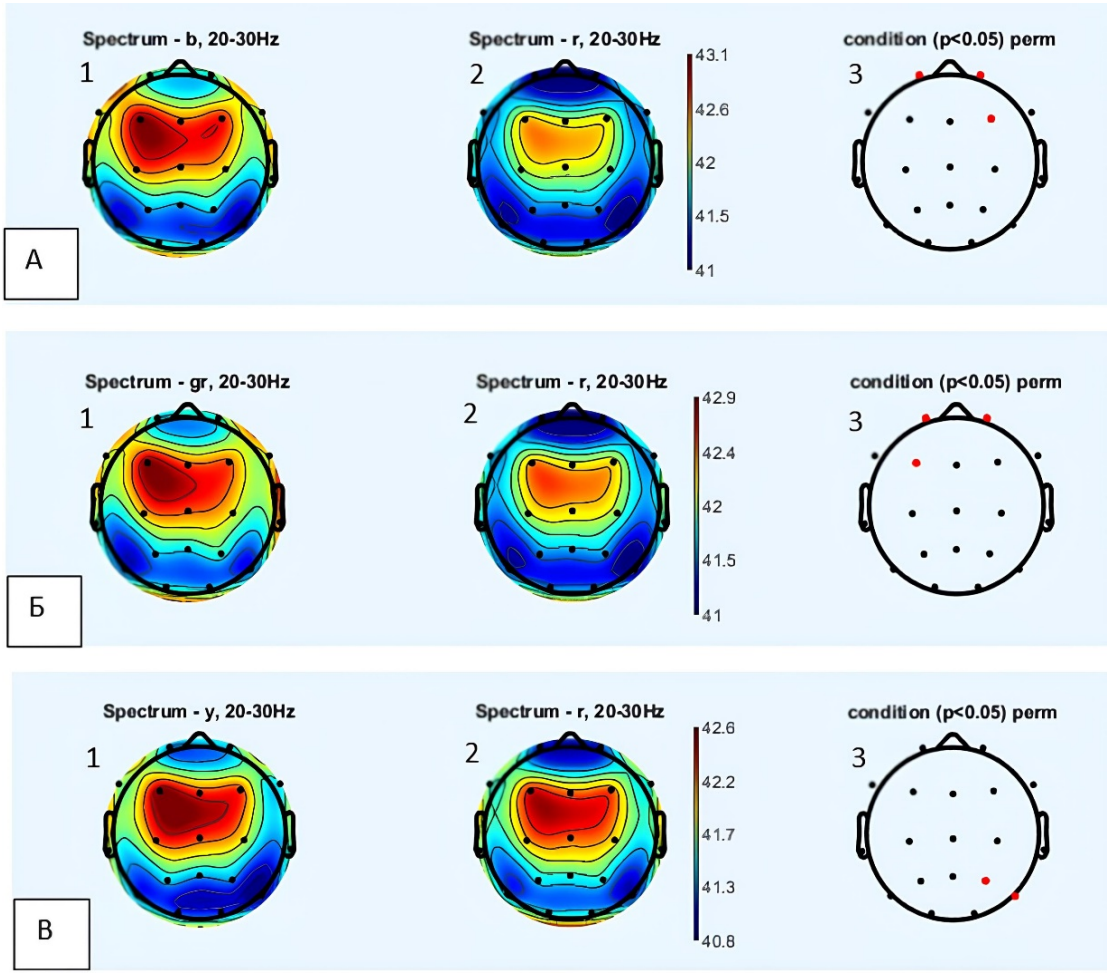

Рис. 7. Топографія розподілу активаційних змін щільності спектральної потужності у β2-піддіапазоні при сприйнятті синього (А), зеленого (Б) та жовтого (В) кольорів (1) порівняно з червоним (2). На схемах А.3, Б.3 та В.3 червоним виділено ділянки зі статистично значущими відмінностями (p < 0,05), n = 21

Дискусія і висновки

Одже, досліди, пов'язані з нейрофізіологічним сприйняттям кольорів, актуальні і на сьогодні, тому завданням нашої роботи були дослідити відмінності сприйняття чотирьох різних кольорів, а також перевірити ефективність методу оцінки спектральної потужності при сприйнятті й обробці кольорових стимулів. Безпосередньо порівняння спектральної потужності проводилось між сприйняттям власне фокусних кольорів стосовно один до одного (тобто червоний із зеленим, червоний із жовтим, червоний із синім, жовтий із зеленим, жовтий із синім та синій із зеленим).

Результати показали різницю потужності у тета-ритмі при сприйнятті жовтого та зеленого кольорів (рис. 2, 3), однак питання про функціональне значення тета-ритму й на сьогодні є предметом деяких дискусій. Однак існують дослідження (Fusco, Fusaro, & Aglioti, 2020), які розглядють цей ритм у контексті стану психофізіологічної спрямованості людини як індикатор емоційного збудження або певний "ритм напруги". Відмінність у спектральній потужності α1 піддіапазону спостерігалась у вентральній частині передлобової кори правої півкулі під час порівняння блакитного та зеленого кольорів із червоним (рис. 4). Також було виявилено значущу відмінність у потужності α3 піддіапазону при сприйнятті червоного кольору (рис. 5), що може бути характерним для негативної емоційної реакції на цей колір, спричиненої підвищенням рівня тривоги. За деяким дослідженнями (Su et al., 2018), це може бути спричинено певними процесами, пов'язаними з емоційним навантаженням. Крім того, різниця була помітна у скроневій та тім'яній частках правої півкулі головного мозку при сприйнятті зеленого й червоного кольорів порівняно із жовтим, який, відповідно, мав нижчу потужність. Існують дані, що вказують на значне посилення альфа-активності саме у правій півкулі мозку при негативному емоційному стані. Одночасно з цим було встановлено, що альфа-ритм пригнічується у зв'язку з відчуттям пригніченості та емоційними переживаннями, а його зміна є відображенням розвитку реакції на стрес. Інші дані свідчать про специфічність відображення різних емоцій у потужності альфа-ритму (зниження при відчутті смутку і страху та навпаки, підвищення при появі радості чи гніву). Отже, ми можемо зробити деякі висновки про гнітючий і тривожний вплив, який відчували обстежувані при перегляді червоного кольору. Зазначимо, що значна частина обстежуваних вибрали червоний колір як найбільш неприємний на їхню думку. У той же час, суттєва відмінність спостерігалась у β1-діапазоні на синій і зелений кольори (рис. 6), що може бути свідченням можливому підвищенню концентрації уваги при подразненні даними візуальними стимулами. Найчастіше в літературі β1-піддіапазон будуть пов'язувати з увагою людини на зовнішньому середовищі, що і буде

поясненням подібного поширення реакції (Illman et al., 2022). Ці спостереження дозволяють провести кореляцію між отриманими нами даними та загальною думкою про позитивний вплив на концентрацію власне зеленого та синього кольорів. Якщо β1-піддіапазон, як згадувалось раніше, прив'язують до зовнішньої уваги, то на противагу йому, β2-активність прийнято вважати зосередженням на власних думках, почуттях і переживаннях. До того ж, до функцій лобової зони можна віднести емоційну регуляцію та вольовий контроль концентрації уваги на необхідному об'єкті.

У ході проведеного дослідження було виявлено, що сприйняття кольорів впливає на біоелектричну активність головного мозку, що відображається у зміні потужності спектральних діапазонів. Найсуттєвіші зміни зазначені в α3-піддіапазоні при сприйнятті червоного кольору, що може свідчити про його зв'язок із підвищеним рівнем тривоги або стресовими реакціями. Ці результати узгоджуються з існуючими дослідженнями, які вказують на можливий вплив червоного кольору на емоційний стан людини. Також було виявлено суттєву відмінність у β1-діапазоні при сприйнятті синього та зеленого кольорів. Ця знахідка може вказувати на підвищення концентрації уваги й когнітивної активності під впливом цих кольорів. Отримані дані можуть бути корисними для розуміння впливу кольорів на когнітивні процеси та їхнє потенційне застосування у нейропсихології, освіті та ергономіці.

Результати дослідження підтверджують ефективність методу оцінки спектральної потужності при аналізі впливу й обробці кольорових стимулів, а також дозволяють детальніше дослідити нейрофізіологічні механізми сприйняття кольорів. Подальші розвідки можуть бути спрямовані на вивчення довгострокового впливу кольорів на когнітивну діяльність, а також на використання функціональної нейровізуалізації для глибшого аналізу залучених нейронних структур.

Внесок авторів: Юлія Величко – концептуалізація; методологія; аналіз джерел, підготування огляду літератури або теоретичних засад дослідження, збір емпіричних даних та їх валідація; емпіричне дослідження. Марія Черних – концептуалізація, написання (перегляд і редагування). Олександр Ковальчук – написання (перегляд і редагування).

Подяки, джерела фінансування. Ми висловлюємо щиру подяку доктору біологічних наук, професору Зимі Ігорю Григоровичу за цінні наукові консультації, методичну підтримку та внесок у розвиток даного дослідження. Ми завжди пам'ятатимемо його глибокі знання, відданість науці та натхнення, яке він дарував усім, хто мав честь працювати разом.

Список використаних джерел

Bosten, J. M., & Lawrance-Owen, A. J. (2014). No difference in variability of unique hue selections and binary hue selections. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(4), A357. https://doi.org/10.1364/josaa.31.00a357

Chai, M. T., Amin, H. U., Izhar, L. I., Saad, M. N., Abdul Rahman, M., Malik, A. S., & Tang, T. B. (2019). Exploring EEG effective connectivity network in estimating influence of color on emotion and memory. *Frontiers in Neuroinformatics*, 13. https://doi.org/10.3389/fninf.2019.00066

Danilova, M. V., & Mollon, J. D. (2014). Is discrimination enhanced at the boundaries of perceptual categories? A negative case. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1785), 20140367. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0367

Elliot, A. J., Maier, M. A., Moller, A. C., Friedman, R., & Meinhardt, J. (2007). Color and psychological functioning: The effect of red on performance attainment. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(1), 154–168. https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.1.154

Forder, L., Bosten, J., He, X., & Franklin, A. (2017). A neural signature of the unique hues. *Scientific Reports*, 7(1). https://doi.org/10.1038/srep42364

Fusco, G., Fusaro, M., & Aglioti, S. M. (2020). Midfrontal-occipital Θ-tACS modulates cognitive conflicts related to bodily stimuli. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. https://doi.org/10.1093/scan/nsaa125

Giesel, M., Hansen, T., & Gegenfurtner, K. R. (2009). The discrimination of chromatic textures. *Journal of Vision*, 9(9), 11. https://doi.org/10.1167/9.9.11

Illman, M., Laaksonen, K., Jousmäki, V., Forss, N., & Piitulainen, H. (2022). Reproducibility of Rolandic beta rhythm modulation in MEG and EEG. *Journal of Neurophysiology*, 127(2), 559–570. https://doi.org/10.1152/jn.00267.2021

Rosenthal, I. A., Singh, S. R., Hermann, K. L., Pantazis, D., & Conway, B. R. (2021). Color space geometry uncovered with magnetoencephalography. *Current Biology*, 31(5), 1127–1128. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.02.023

Su, H., Zuo, C., Zhang, H., Jiao, F., Zhang, B., Tang, W., Geng, D., Guan, Y., & Shi, S. (2018). Regional cerebral metabolism alterations affect resting-state functional connectivity in major depressive disorder. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 8(9), 910–924. https://doi.org/10.21037/qims.2018.10.05

Witzel, C., & Gegenfurtner, K. R. (2018). Are red, yellow, green, and blue perceptual categories? *Vision Research*, 151, 152–163. https://doi.org/10.1016/j.visres.2018.04.002

Wool, L. E., Komban, S. J., Kremkow, J., Jansen, M., Li, X., Alonso, J. M., & Zaidi, Q. (2015). Salience of unique hues and implications for color theory. *Journal of Vision*, 15(2), 10. https://doi.org/10.1167/15.2.10

References

Bosten, J. M., & Lawrance-Owen, A. J. (2014). No difference in variability of unique hue selections and binary hue selections. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(4), A357. https://doi.org/10.1364/josaa.31.00a357

Chai, M. T., Amin, H. U., Izhar, L. I., Saad, M. N., Abdul Rahman, M., Malik, A. S., & Tang, T. B. (2019). Exploring EEG effective connectivity network in estimating influence of color on emotion and memory. *Frontiers in Neuroinformatics*, 13. https://doi.org/10.3389/fninf.2019.00066

Danilova, M. V., & Mollon, J. D. (2014). Is discrimination enhanced at the boundaries of perceptual categories? A negative case. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1785), 20140367. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0367

Elliot, A. J., Maier, M. A., Moller, A. C., Friedman, R., & Meinhardt, J. (2007). Color and psychological functioning: The effect of red on performance attainment. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(1), 154–168. https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.1.154

Forder, L., Bosten, J., He, X., & Franklin, A. (2017). A neural signature of the unique hues. *Scientific Reports*, 7(1). https://doi.org/10.1038/srep42364

Fusco, G., Fusaro, M., & Aglioti, S. M. (2020). Midfrontal-occipital Θ-tACS modulates cognitive conflicts related to bodily stimuli. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. https://doi.org/10.1093/scan/nsaa125

Giesel, M., Hansen, T., & Gegenfurtner, K. R. (2009). The discrimination of chromatic textures. *Journal of Vision*, *9*(9), 11. https://doi.org/10.1167/9.9.11

Illman, M., Laaksonen, K., Jousmäki, V., Forss, N., & Piitulainen, H. (2022). Reproducibility of Rolandic beta rhythm modulation in MEG and EEG. *Journal of Neurophysiology*, 127(2), 559–570. https://doi.org/10.1152/jn.00267.2021

Rosenthal, I. A., Singh, S. R., Hermann, K. L., Pantazis, D., & Conway, B. R. (2021). Color space geometry uncovered with magnetoencephalography. *Current Biology*, 31(5), 1127–1128. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.02.023

Su, H., Zuo, C., Zhang, H., Jiao, F., Zhang, B., Tang, W., Geng, D., Guan, Y., & Shi, S. (2018). Regional cerebral metabolism alterations affect resting-state functional connectivity in major depressive disorder. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 8(9), 910–924. https://doi.org/10.21037/qims.2018.10.05

Witzel, C., & Gegenfurtner, K. R. (2018). Are red, yellow, green, and blue perceptual categories? *Vision Research*, 151, 152–163. https://doi.org/10.1016/j.visres.2018.04.002

Wool, L. E., Komban, S. J., Kremkow, J., Jansen, M., Li, X., Alonso, J. M., & Zaidi, Q. (2015). Salience of unique hues and implications for color theory. *Journal of Vision*, 15(2), 10. https://doi.org/10.1167/15.2.10

Отримано редакцією журналу / Received: 10.01.25
Прорецензовано / Revised: 14.02.25
Схвалено до друку / Accepted: 11.03.25

Yuliia VELYCHKO, Student
ORCID ID: 0009-0004-9128-8616
e-mail: velychkoyul@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Mariia CHERNYKH, PhD (Biol.), Assist.
ORCID ID: 0000-0001-5091-5071
e-mail: mariia.chernykh@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Oleksandr KOVALCHUK, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-6311-3518
e-mail: kovalchuk@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

PROCESSES OF LOCAL AND DISTANT SYNCHRONIZATION OF ELECTRICAL BRAIN ACTIVITY DURING COLOR PERCEPTION

B a c k g r o u n d . ***The human brain, with its complex structure and functional characteristics, has always been an object of intensive scientific research. One of the key aspects of brain activity is its ability to perceive, process, and interpret various external stimuli. Among these stimuli, colors hold a special place, as they not only influence our mood and state but also play a role in shaping our perception of the surrounding world and affecting cognitive processes. The aim of this study was to examine the impact of four focal colors on the bioelectrical activity of different brain regions and to analyze it using the spectral power density method. The objectives included investigating the differences in the perception of four distinct colors and proving the effectiveness of the spectral power assessment method in the perception and processing of color stimuli.***

M e t h o d s . ***This study involved 21 healthy volunteers (n♀ = 11), aged 18 to 27 years. Participants watched a video while EEG recording was conducted. In the video, the subjects viewed four focal colors in a specific sequence (red #FF0000, yellow #FFFF00, green #008000, and blue #0000FF), with an intermediate display of neutral gray (#808080) between them. For analysis, the θ, α, and β frequency bands were divided into the following sub-bands: θ1 (3.5–7.4 Hz), α1 (7.5–9.4 Hz), α2 (9.5–10.7 Hz), α3 (10.8–13.5 Hz), β1 (13.6–19.9 Hz), and β2 (20–30 Hz).***

R e s u l t s . ***The analysis revealed a significant difference in the power of the α3 sub-band when perceiving red, which may be characteristic of a negative emotional response caused by increased anxiety levels. At the same time, a significant difference was observed in the β1 band in response to blue and green colors, which may indicate increased attention and concentration when exposed to these visual stimuli.***

C o n c l u s i o n s . ***The study showed that color perception affects the bioelectrical activity of the brain, in particular, red is associated with increased anxiety (alpha-3 range), and blue and green with increased concentration of attention (beta-1 range). The results confirm the effectiveness of spectral analysis in studying the neurophysiological mechanisms of color perception, and it can be used in neuropsychology and cognitive sciences.***

K e y w o r d s : ***electroencephalography (EEG); power spectral density (PSD) method; neurophysiology of color; color perception.***

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

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