

ОЦІНКА НЕЙРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЮНАКІВ З ВРОДЖЕНИМИ ЗОРОВИМИ ДИСФУНКЦІЯМИ В УМОВАХ СЕНСОРНО-МОТОРНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ

Методами нелінійного аналізу здійснено оцінку нейродинамічних систем головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями та нормальнозорих юнаків в умовах спокійного неспання та сенсорно-моторної інтеграції. Вивчалися показники розмірності внесків, кореляційної розмірності, максимальної експоненти Ляпунова та ентропії Колмогорова-Сіная.

Встановлено, що вроджені зорові дисфункції призводять до функціональної реорганізації головного мозку. В умовах спокійного неспання юнакам з вродженими зоровими дисфункціями притаманний стан напруженої слухової уваги та постійний перебіг мультисенсорних інформаційних процесів у правій півкулі.

Сенсорно-моторна інтеграція викликала значні зміни нейродинамічних систем головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями, тоді як серед нормальнозорих юнаків нелінійна динаміка електричної активності головного мозку суттєво не змінювалася.

За умов сенсорно-моторної інтеграції у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями поряд з адекватними змінами нейродинаміки, спрямованими на покращення дискримінації тонів, ми спостерігали недостатність контролюючо-виконавчих церебральних систем, що ускладнювали процес порівняння звукового сигналу з еталоном у робочій пам'яті та/або прийняття рішення щодо типу моторної відповіді.

Показано, що у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями в процесі сенсорно-моторної інтеграції зорова кора може приймати участь у дискримінації звукових подразників.

Ключові слова: ЕЕГ, нелінійна динаміка, сенсорно-моторна інтеграція, зорові дисфункції, юнацький вік

Постановка проблеми. У другій половині ХХ ст. Нобелівськими лауреатами Д. Хьюбелом та Т.Н. Візелом на моделі зорової депривації у тварин вперше показано високу чутливість незрілого мозку до змінених сенсорних умов існування на ранніх етапах постнатального розвитку [12]. З того моменту накопичено багато даних щодо структурної реорганізації деаферентованої сенсорної кори у тварин, а у ХХІ ст. – щодо структурно-функціональної реорганізації зорової кори у сліпих людей [9; 13; 17; 23; 25; 28; 33]. Результати цих досліджень свідчать про високу пластичність головного мозку, але її механізми на різних рівнях організації живої матерії повністю не розкриті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна частина досліджень нейроанатомії та нейрофізіології сліпих людей акцентує свою увагу лише на характеристиках зорової системи. Зокрема, встановлено, що у *людей з вродженою сліпотою*, порівняно зі зрячими, значно зменшений об'єм *сірої речовини* у латеральних колінчастих тілах [23], задній частині подушки таламуса [23], стріарній [23] та екстрастріарній [28] корі, структурах вентрального зорового тракту [23]. У той же час показано, що об'ємна атрофія сірої речовини у зоровій корі при вродженій або рано набутій сліпоті обумовлена зменшенням площі поверхні кори, а не її стоншенням [13].

Методами викликаних і пов'язаних з подіями потенціалів, транскраніальної магнітної стимуляції та сучасної нейровізуалізації (функціональної магніторезонансної томографії, позитронно-емісійної томографії) показана активація потиличної області кори головного мозку сліпих в обробці сигналів незорової модальності [9; 17; 25; 33]. Отримані дані вказують на пластичні зміни у зоровій корі сліпих, але залишається дискусійним питання про те чи є ці зміни наслідком кросс-модальної пластичності та/або надмодальних властивостей зорової кори?

Вивчення феномену зорової депривації у людини пов'язано головним чином з дослідженнями сліпих людей, що сприяє більш чіткому виявленню ефектів зорової депривації. У той же час до цих досліджень залучаються дорослі (від 20 років і старше) сліпі, а їх кількість досить часто не перевищує 10 осіб різної статі. У той же час залишається незрозумілим, чи буде виникати структурно-функціональна реорганізація головного мозку за умов частково обмеженої зорової аферентації? Як співвідносяться процеси реорганізації за умов депривації з загальними механізмами нейроонтогенезу? Чи мають процеси реорганізації головного мозку гендерні особливості?

Необхідно відзначити, що більшість з досліджень головного мозку сліпих ґрунтується на даних магніто-резонансної або позитронно-емісійної томографії, що характеризуються низькою просторовою роздільною здатністю та пов'язані з опосередкованим аналізом активності структур головного мозку на підставі коливання гемодинамічних та/або метаболічних параметрів. У той же час електроенцефалографія на сьогодні залишається єдиним методом, що безпосередньо реєструє електричну активність головного мозку та має високу часову роздільну здатність. Традиційні методи кореляційно-спектрального аналізу не використовують таку перевагу ЕЕГ як висока роздільна здатність, оскільки дають характеристику стану системи, а не її динаміки. Утім в останні десятиліття все більше даних накопичено щодо нелінійної природи ЕЕГ-сигналів, тобто електрична активність головного мозку характеризується значною динамікою у просторово-часовому континуумі. Саме тому для поглиблення сучасних уявлень і виявлення більш тонких закономірностей функціонування головного мозку в нагоді можуть стати методи нелінійної динаміки, які добре зарекомендували себе в клінічній нейрофізіології.

Мета статті – виявити особливості нейродинамічних систем головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями порівняно з нормальнозорим контролем в умовах сенсорно-моторної інтеграції.

Методика

У дослідженні прийняло участь 14 юнаків (18,14±0,28 років) з вродженими двобічними зоровими дисфункціями (середня коригована гострота зору 0,09±0,003 на обох очах) та 12 нормальнозорих юнаків (17,50±0,18 років). Загальними критеріями для включення юнаків у дослідження була відсутність органічної патології ЦНС та черепно-мозкової травми в анамнезі, неврологічних чи психічних розладів, фармакологічної терапії на момент обстеження. Дослідження проводилися з дотриманням національних норм біоетики та положень Хельсинської декларації 1975 р. (у редакції 2000 р.) за попередньою згодою самих досліджуваних та/або їх батьків після інформування про цілі, тривалість та процедуру дослідження.

ЕЕГ-потенціали відводили монополярно у 23 відведеннях відповідно до міжнародної системи «10-20» з усередненим референтним електродом за D. Goldman з симетричних областей. Виявлення окорухових артефактів на ЕЕГ здійснювали за окулограмою. Реєстрацію ЕЕГ проводили при закритих очах за двох станів (по 2,5 хв. кожний): 1) спокійне неспання; 2) виконання складної аудіо-моторної реакції вибору. Для цього за допомогою АПК для проведення психофізіологічних досліджень [1] через колонки бінаурально пред'являлися звуки двох тональностей (500 Гц, 1 кГц), у відповідь на які досліджуваному необхідно було натискати правою рукою на праву (для 500 Гц), а лівою рукою на ліву (для 1кГц) кнопку на пульті. Тривалість експозиції тональних сигналів становила 700 мс, а міжстимульний інтервал – від 500 до 1500 мс. Запису ЕЕГ передувала тренувальна вправа.

Для подальшого нелінійного аналізу відбирали 35–45 с безартефактні фрагменти запису для кожного стану. Для цього здійснено відновлення аттрактора у фазовому

просторі методом затримки. Визначання часу затримки проводилося на основі оцінки «форми» аттрактора, що реконструюється: час затримки обирають таким чином, щоб розміри реконструйованого аттрактора за всіма осями були максимально наближеними [2].

Після реконструкції аттрактора у фазовому просторі визначали наступні ключові нелінійні показники: *кореляційна розмірність* ($D2$, од.) на підставі кореляційного інтегралу [10]; *розмірність внесків* (PB , од.) на підставі стабілізації значень кореляційної розмірності [3]; *максимальна експонента (показник) Ляпунова* (mEL , од./с) на підставі алгоритму A. Wolf et al. (1985) і J.P. Eckmann et al. (1986) та метода аналога [15]; *ентропія Колмогорова-Сіная* (метрична, динамічна ентропія, eKS , біт/с) на підставі спектра показників Ляпунова [2].

Розмірність внесків (PB , од.) дозволяє зробити припущення про те, як багато компонентів формують дану динамічну систему; *кореляційна розмірність* ($D2$, од.) – міра складності (число ступенів свободи) системи; *ентропія Колмогорова-Сіная* (eKS , біт/с) – міра регулярності або впорядкованості системи; *максимальна експонента Ляпунова* (mEL , од./с) – міра хаотичності, складності та гнучкості динамічної системи [3].

Електрофізіологічні дані оброблялися загальноприйнятими методами варіаційної статистики та представлені у вигляді $\bar{x} \pm m$. Для порівняння груп дітей з різним станом зорової функції використовувався непараметричний критерій “U” Вілкоксона-Манна-Уїтні. Достовірними вважалися відмінності при значеннях $P \leq 0.05$.

Результати та їх обговорення

За результатами дослідження виявлено особливості нелінійної динаміки електричної активності головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями порівняно з нормальнозорими як в умовах спокійного неспання, так і при сенсорно-моторній інтеграції.

Міжгрупові порівняння в умовах спокійного неспання. Юнаки з вродженими двобічними зоровими дисфункціями характеризувалися більш низькими, порівняно з контролем, значеннями mEL і eKS у правій передньо-скроневій області та більш високими значеннями цих показників у правій тім'яній області (рис. 1).

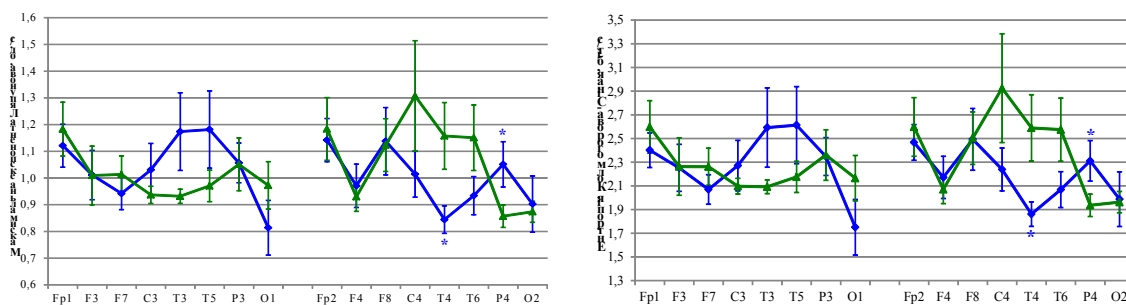


Рис. 1. Значення параметрів нелінійної динаміки електричної активності головного мозку юнаків з різним станом зорової функції

Примітки: -◆- – юнаки з вродженими зоровими дисфункціями, -▲- – нормальнозорі юнаки (контроль), * - достовірність відмінностей з контролем при $P \leq 0,05$

Тобто у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями спостерігався більш низький, порівняно з контролем, рівень хаосу та кількості конкуруючих нервових процесів у передньо-скроневій області. Значна частина цієї області належить до проєкційних зон слухового аналізатора та має переваги в аналізі мови та тональності звукових подразників [21], що дає підставу говорити про стан підвищеної слухової уваги до звукових подразників, зокрема, мовних, серед юнаків з вродженими зоровими

дисфункціями. Враховуючи, що до тім'яної області надходить інформація від інших вторинних проекційних зон [6], то більш високі значення мЕЛ і еКС у цій області можуть вказувати на посилення гнучкості обробки різномодальної (тактильної, кінестетичної, вестибулярної, слухової, зорової) інформації серед юнаків з зоровими дисфункціями.

Внутрішньогрупові порівняння при сенсорно-моторній інтеграції. Виконання аудіо-моторної реакції вибору не викликало суттєвих змін нелінійної динаміки електричної активності головного мозку нормальнозорих юнаків: значення нелінійних показників мали тенденцію до підвищення практично по всій конвексимальній поверхні кори головного мозку (рис. 2). Утім в правій лобово-полюсній та лівій передньо-скроневої області збільшення значень мЕЛ наближувалося до рівня статистичної значимості ($P=0,08$), що відображає тенденцію до зростання числа конкуруючих нервових процесів у даних коркових областях.

Як зазначалося передньо-скронева область пов'язана з аналізом тональності звукових подразників [21], а лобово-полюсна кора приймає участь в прийнятті рішення підчас альтернативного бінарного вибору [24]. Лобово-полюсна кора отримує проекції від слухової кори та може здійснювати керівні впливи на скронево-полюсну частину верхньої скроневої звивини [19]. Окрім означених функцій передньо-скронева кора [11] і лобово-полярну кору [34] пов'язують з короткотривалою та робочою пам'яттю. Зазначене дозволяє розглядати виявлені тенденції у зміні нелінійної динаміки електричної активності головного мозку нормальнозорих юнаків при виконанні аудіо-моторної реакції як кореляти складності дискримінації та/або прийняття рішення щодо типу моторної відповіді.

На відміну від контролю виконання аудіо-моторної реакції вибору юнаками з вродженими двобічними зоровими дисфункціями супроводжувалося значними змінами нейродинаміки електричної активності лобових, передньо-скроневих та потиличних областей головного мозку (рис. 2). У них спостерігалось достовірне:

- 1) зниження значень РВ у білатеральній лобово-полюсній ($P \leq 0,05$) та правій передньо-скроневої ($P \leq 0,05$) областях; D2 – у лівій лобово-полюсній ($P \leq 0,05$), правій передньо-скроневої ($P \leq 0,01$), лівій потиличній ($P \leq 0,05$) областях; мЕЛ і еКС – у лівій передньо-скроневої ($P \leq 0,05$) і правій потиличній ($P \leq 0,05$) областях;
- 2) збільшення значень мЕЛ і еКС у білатеральній лобово-полюсній ($P \leq 0,05$), лівій верхньо-лобовій ($P \leq 0,05$), правій передньо-скроневої ($P \leq 0,05$), лівій потиличній ($P \leq 0,01$) областях.

Зміни нелінійної динаміки електричної активності передньо-скроневих областей, що мають безпосереднє відношення до дискримінації звукових тонів [21], мали протилежну спрямованість у правій та лівій півкулі. Так, у лівій передньо-скроневої області відбувається зниження рівня хаосу та звуження стратегії обробки інформації на фоні підвищення інформаційного змісту нервових процесів. Зазначене поряд з тенденцією до зниження числа ступенів свободи (D2 на 6,7%, $P=0,064$) у діяльності даної нейродинамічної системи може вказувати на явища концентрації нервових процесів та формування поведінкової домінанти, що адекватна до задачі дискримінації тонів.

Можемо припустити, що протилежні зміни нелінійної динаміки електричної активності у правій та лівій передньо-скроневої областях відображають перебіг різних когнітивних процесів: ліва передньо-скронева область у більшій мірі пов'язана з дискримінацією тонів, тоді як права передньо-скронева область – з процесами робочої пам'яті.

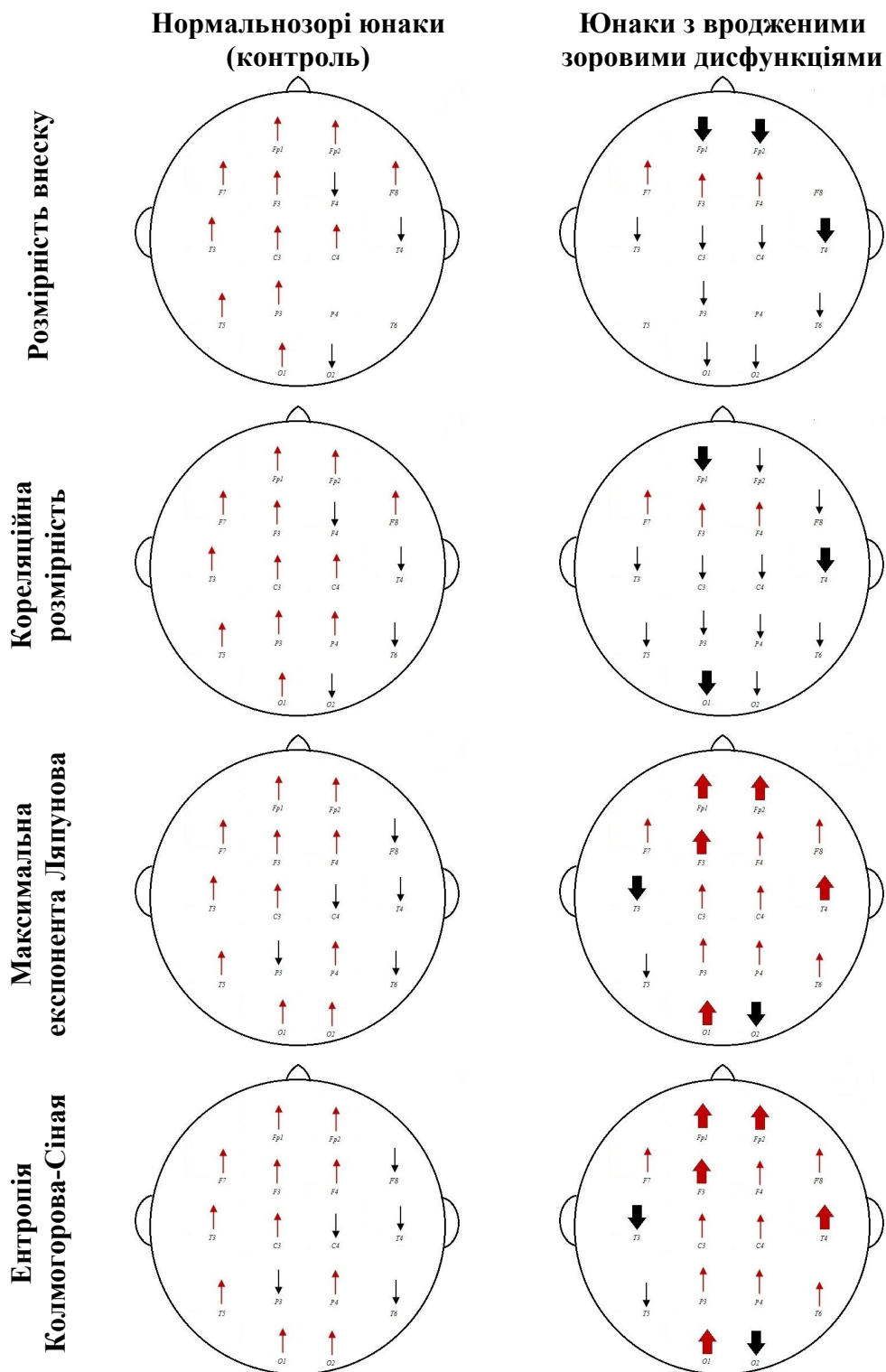


Рис. 2. Топокарти напрямів змін параметрів нелінійної динаміки електричної активності головного мозку юнаків з різним станом зорової функції при сенсорно-моторній інтеграції
 Примітки: збільшення/зменшення параметрів нелінійної динаміки EEG-сигналу \uparrow/\downarrow – при $P > 0,05$; $\blacktriangle/\blacktriangledown$ – при $P \leq 0,05$

Обґрунтуванням участі лівої передньо-скроневої області в задачах дискримінації тональних сигналів можуть бути наступні аргументи:

- 1) методом пов'язаних з подіями потенціалів показано, що ліва півкуля залучається до обробки звуків (на підставі чистих тонів та голосних) на 100-150 с раніше, ніж права півкуля [26];
- 2) за умов бінауральної стимуляції чистим тоном виявлено домінування активності лівої скроневої області [20];
- 3) посилення спектральної потужності МEG-сигналу лівої скроневої області в діапазоні 5-12 Гц [31] при необхідності збереження звукових тонів у робочій пам'яті.

У дослідженні Н. van Dijk et al. (2010) встановлено, що необхідність збереження звукових тонів у робочій пам'яті супроводжувалася лівостороннім збільшенням спектральної потужності МEG-сигналів у діапазоні 5-12 Гц, генератор якої розташований у лівій скроневої області. Ця стимул-залежна синхронізація, на думку авторів, відображає функціональне звільнення лівої скроневої області від участі у процесах зберігання звукових тонів [31], що знаходиться у чіткій відповідності з гіпотезою гальмівної синхронізації W. Klimesch et al. (2007) [16]. Виявлене авторами посилення синхронізації МEG-сигналу лівої скроневої області повинно супроводжуватися посиленням регулярності та впорядкованості електричної активності даної коркової області, тобто зниженням її складності. Зазначене повинно знайти відображення у параметрах нелінійної динаміки у формі зниження значень еКС, що ми й спостерігали у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями.

Експериментальними аргументами щодо участі правої передньо-скроневої області в процесах пам'яті можуть бути наведені нижче дані. Так, нейропсихологічними дослідженнями 71 особи з резистентною епілепсією, що перенесли локальну резекцію у правій та лівій скроневої долях, показано, що права верхня скронева область спеціалізується на збереженні у короткотривалій пам'яті слухової інформації (тонів) [36].

Навантаження на робочу пам'ять призводили до зниження розмірної складності коркової активності мозку у правій лобово-скроневої області [27].

Виявлене нами зниження значень кореляційної розмірності у правій передньо-скроневої області серед юнаків з вродженими зоровими дисфункціями під час аудіо-моторної реакції, що вимагає залучення робочої пам'яті в процес своєї реалізації, узгоджується з наведеними вище даними.

Однак, згідно даних [30] мнемічні процеси супроводжувалися зниженням значень апроксимованої ентропії (зниження регулярності та збільшення складності ЕЕГ-сигналу) та збільшення значень RQA-показника (збільшення повторень траєкторій у фазовому просторі; *Recurrence quantification analysis*;) під час мнемічних процесів, тоді як у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями ми спостерігали протилежні зміни – збільшення значень еКС та мЕЛ. У тім у попередньо цитованій роботі [30] показано, що введення медізоламу – бензодіазепіну, що знижує точність зберігання інформації у пам'яті, призводило до збільшення значень апроксимованої ентропії. Автори пояснюють це тим, що медізолам пригнічує пейсмейкерні ГАМК-ергічні нейрони гіпокампу, які, в свою чергу, регулюють упорядковану генерацію потенціалів дії більшості нейронів гіпокампу, то, як наслідок, слід пам'яті виявляється «забрудненим шумами» у більшій мірі, що зумовлює збільшення складності (зменшення впорядкованості) нейродинамічної системи [30].

Отже, з наведеного вище можемо дійти висновку, що виявлене нами серед юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при сенсорно-моторній інтеграції зниження значень РВ і D2 на фоні одночасного збільшення значень еКС і мЕЛ у правій передньо-

скроневій області, на яку проектується активність гіпокампу, найімовірніше відображає порушення процесів мнемічного пошуку внаслідок більш високого рівня випадковості коркової нейродинаміки, пов'язаної з упізнанням звукового тону. Зрештою ми отримали підтвердження раніше висунутому нами припущенню про збільшення кількості «шумових» нервових процесів у правій передньо-скроневій області юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при виконанні АМР.

Значні зміни нелінійної динаміки спостерігалися в лобових частках головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при виконанні АМР. Виявлене підвищення значень e_{KS} і mEL у лівій верхньо-лобовій області на фоні тенденції до підвищення значень D_2 (F_3 на 7,2%, $P=0,064$) вказують на зниження впорядкованості електричної активності цієї області, що супроводжується розширенням стратегії обробки інформації та зростанням складності обробки та інтеграції інформації. Отже, у лівій дорсолатеральній префронтальній корі спостерігалось зниження регулярності та сталості нейродинамічної системи, тобто збільшення рівня хаосу.

У лобово-поліусній корі, яка є вищим контролюючим та виконавчим центром головного мозку, спостерігалось білатеральне зменшення кількості компонентів нейродинамічної системи на фоні збільшення кількості паралельних конкуруючих нервових процесів та зниження інформаційного змісту нервових потоків. Тобто відбулося формування структурно локалізованої нейронної мережі з високим рівнем функціональної нестабільності (невпорядкована електрична активність).

У зв'язку з тим, що лобово-поліусна кора має сильний взаємозв'язок зі слуховою корою [19], доцільно припустити, що виявлене зменшення кількості компонентів нейронної мережі у лобово-поліусній корі, тобто структурну локалізацію, необхідно розглядати, як адекватну реакцію на виконання аудіо-моторної реакції, що спрямована на посилення низхідного контролю над діяльністю задаче-специфічних церебральних структур.

Однак, виявлена функціональна нестабільність сформованої локальної нейронної мережі лобово-поліусної кори не дозволяє в повній мірі реалізовувати свої регулюючі впливи. Враховуючи тісні зв'язки лобово-поліусної кори з кортикальною лімбічною системою [19], можемо припустити, що виявлена функціональна нестабільність електричної активності лобово-поліусної кори зумовлена станом емоційного напруження серед юнаків з вродженими зоровими дисфункціями. Зокрема це припущення ґрунтується на виявленому нами станом іритації лобово-поліусної кори в умовах спокійного неспання, що в клінічній нейрофізіології розглядається як маркер іритативних станів лімбічної системи, та більш високим рівнем особистісної тривожності серед юнаків з вродженими зоровими дисфункціями, порівняно з контролем. Крім того, у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при виконанні АМР також спостерігалось збільшення рівня хаотичності в електричній активності правої передньо-скроневої області, на поверхню якої проектується активність лімбічних структур (гіпокамп, мигдалина). Надмірна активність лімбічної системи може знижувати ефективність діяльності передньої та дорсолатеральної префронтальної кори шляхом зміни концентрації катехоламінів [4].

Лобово-поліусна кора пов'язана з координацією обробки інформації та передачею інформації між кількома областями мозку при виконанні паралельних задач, забезпечує інтеграцію процесів робочої пам'яті та виокремлення ресурсів уваги, а також активується при переході до альтернативного варіанту реагування, особливо, в умовах бінарного вибору [24].

Дорсолатеральна префронтальна кора є центральною структурою дорсальної системи уваги [7] та відіграє важливу роль в процесах робочої пам'яті, забезпечуючи утримання інформації, яка необхідна для виконання поточного завдання [22].

Зазначені функції дорослатеральної та передньої префронтальної кори, а також наявні зв'язки між цими корковими областями [19], дозволяють припускати, що виявлені зміни нелінійної динаміки електричної активності цих структур при АМР у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями пов'язані з процесами низхідного контролю за розподілом уваги та реалізацією робочої пам'яті.

Отже, виявлене нами збільшення рівня хаосу в електричній активності лобово-полюсної та дорослатеральної префронтальної кори може відображати функціональну недостатність низхідного (*top-down*) контролю сенсорних потоків та процесів робочої пам'яті, що підвищує рівень сенсорних «шумів» і як наслідок утруднює реалізацію аудіо-моторної реакції.

Ще одним фактом, що заслуговує на увагу є виявлені серед юнаків з вродженими зоровими дисфункціями достовірні зміни нелінійної динаміки електричної активності потиличних областей при виконанні аудіо-моторної реакції, чого не спостерігалось серед юнаків контрольної групи. На нашу думку, даний факт може бути зумовлений явищами кросс-модальної пластичності та/або надмодальними властивостями потиличної кори.

На користь гіпотези про кросс-модальну пластичність свідчать численні дані нейровізуалізації, що демонструють залучення зорових областей головного мозку сліпих людей до обробки стимулів незорової модальності, зокрема слухової. Так, фМРТ і ПЕТ дослідження виявили сильну модуляцію гемодинамічних і метаболічних сигналів зорової кори сліпих, переважно первинної та вторинної, при визначенні локалізації звука [9; 25; 33], дискримінації тонів і музики [25; 33], сприйнятті мови [17].

Тривалий час вважалося, що кросс-модальна взаємодія є наслідком реорганізації деаферентованої зорової кори у сліпих людей. У той же час з'являється все більше даних, що вказують на модуляцію зорової кори у зрячих при виконанні слухових задач. При цьому одні дослідники відзначають дезактивацію зорової кори зрячих при виконанні слухових задач [9], а інші – активацію [35], треті – одночасну активацію та дезактивацію різних областей зорової кори [25; 33].

Зазначене дозволяє припускати наявність різних механізмів кросс-модальної взаємодії у сліпих і зрячих: у сліпих спостерігається взаємодоповнення функцій слухової кори активністю зорової кори, тоді як у зрячих – зворотне гальмування активності конкуруючих сенсорних модальностей.

З метою перевірки висунутих вище гіпотез розглянемо більш детально власні експериментальні дані щодо зміни нелінійної динаміки електричної активності потиличних областей головного мозку при сенсорно-моторній інтеграції.

У наших дослідженнях не виявлено достовірних змін нелінійної динаміки електричної активності потиличних областей головного мозку нормальнозорих юнаків при виконанні АМР, що може бути зумовлено змістом завдання, а саме – дискримінація тонів, а не просторова локалізація звуків, як у цитованих вище роботах.

Серед юнаків з вродженими зоровими дисфункціями, які у нашому дослідженні не були сліпими, ми спостерігали різноспрямовані зміни нелінійної динаміки електричної активності правої та лівої потиличних областей. Так, у лівій потиличній області спостерігалось зниження складності обробки та інтеграції інформації на фоні розширення стратегії обробки інформації та збільшення рівня хаотичності в електричній активності. У той же час у правій потиличній області спостерігалися протилежні ефекти, а саме: звуження стратегії обробки інформації та підвищення інформаційного змісту нервових процесів.

Отже, згідно наших даних бінауральна стимуляція призводила до односпрямованих змін нелінійної динаміки електричної активності контрлатеральних передньо-скроневих і потиличних областей у юнаків з вродженими зоровими

дисфункціями. У той же час за даними [14] унімодальна бінауральна стимуляція у зрячих призводила до активації обох слухових областей та дезактивації правої потиличної області. Тобто у зоровій та слуховій корі зрячих спостерігалися антагоністичні зміни, що автор пов'язував з кросс-модальним інгібуванням іррелевантної сенсорної кори [14]. Наші ж дані свідчать про односпрямованість змін нелінійної динаміки електричної активності слухових і зорових областей при вирішенні слухових задач юнаками з вродженими зоровими дисфункціями. Тому власні експериментальні дані підтверджують раніше висунуту гіпотезу про різні механізми кросс-модальної взаємодії за умов нормальної та обмеженої зорової аферентації.

Для їх уточнення більш детально проаналізуємо характер змін нелінійної динаміки електричної активності потиличних областей головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при сенсорно-моторній інтеграції.

Згідно наших даних у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при сенсорно-моторній інтеграції зміни нелінійної динаміки електричної активності правої потиличної області подібні до змін у лівій передньо-скроневої області. Попередні дослідження свідчать, що у зрячих моноуральна слухова стимуляція активує контрлатеральну потиличну область [8], а транскраніальна магнітна стимуляція правої потиличної області погіршує локалізацію звуків [18]. Крім того у дослідах з бінауральною стимуляцією у сліпих виявлялася переважна активація правої потиличної області [17; 29]. Враховуючи обґрунтовану раніше участь лівої передньо-скроневої області головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями в дискримінації тонів при АМР та наведені дані щодо активності правої потиличної кори при звуковій стимуляції серед сліпих і зрячих, можемо припускати, що у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями права потилична кора залучена до процесів дискримінації тонів при виконанні АМР. Даний феномен можна розглядати як компенсаторну функціональну реорганізацію зорової кори внаслідок дефіциту модально-специфічної аферентації, що спричинено зоровими дисфункціями. Аргументом на користь цього припущення може стати виявлена достовірна позитивна кореляція між значеннями еКС і мЕЛ правої потиличної області та варіативністю латентного періоду АМР ($r=0,733$ і $r=0,713$ відповідно, $P \leq 0,01$) у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями, чого не спостерігалось у нормальнозорих юнаків.

Нещодавно виявлено прямі проєкції від слухової кори до зорової кори, що закінчуються у ретинотопічних областях, що відповідають периферичній частині поля зору [5]. Оскільки при значному зниженні гостроти зору організм в більшій мірі починає орієнтуватися на слухові подразники при взаємодії з оточуючим середовищем, то виявлені нами односпрямовані зміни нелінійної динаміки електричної активності у контрлатеральній потиличній області головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями при АМР у відповідності з даними [8] можуть розглядатися як нейронні кореляти автоматичної орієнтації зорової уваги у бік локалізації слухового подразника. У даному випадку цей процес протікає приховано, оскільки досліджувані згідно інструкції змушені утримувати очі та частини тіла у нерухомому стані (окрім цільових рухів).

У той же час в електричній активності лівої потиличної області головного мозку юнаків з вродженими зоровими дисфункціями ми спостерігали збільшення рівня хаотичності й, як наслідок, зниження інформаційного змісту нервових процесів. Паралельно у лівій півкулі спостерігалось збільшення рівня хаосу в електричній активності лобово-полюсної та дорсолатеральної префронтальної кори, що є ключовими структурами низхідного контролю та розподілу уваги. Зокрема дорсолатеральна префронтальна кора є найвищим церебральним центром дорсолатеральної системи уваги [7], а лобово-полюсна кора – лобово-тім'яної системи

уваги [32], що регулює активність дорсолатеральної (зверху-вниз, цілеспрямованої, довільної) та вентролатеральної (знизу-вверх, стимул-зумовленої, мимовільної) систем уваги [7]. До складу дорсолатеральної системи уваги також входить потилична область [7]. Враховуючи зазначене та той факт, що діяльність сенсорних областей нижчого порядку здатна моделюватися станом уваги [14], можемо припускати, що у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями виявлені зміни нелінійної динаміки електричної активності лівої потиличної області зумовлені недостатніми низхідними модулюючими впливами префронтальної кори.

Міжгрупові порівняння при сенсорно-моторній інтеграції. Характер відмінностей нелінійної динаміки електричної активності головного мозку між юнаками з різним станом зорової функції при сенсорно-моторній інтеграції відрізнявся від такого в умовах спокійного неспання. Так, юнаки з вродженими зоровими дисфункціями характеризувалися більш низькими, порівняно з контролем, значеннями РВ у лобово-полюсних областях ($P \leq 0,05$), D2 у правій лобово-полюсній області ($P \leq 0,05$) та більш високими значеннями РВ у правій верхньо-лобовій області ($P \leq 0,05$).

Отже нейродинамічні перебудови функціональних систем головного мозку при сенсорно-моторній інтеграції в кінцевому результаті призвели до того, що у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями, порівняно з контролем, сформувався більш локальний нейронний ансамбль, діяльність якого регулюється меншою кількістю змінних, та дифузна нейронна мережа у дорсолатеральній префронтальній корі. Зазначені зміни вказують на недостатність низхідних регуляторних впливів дорсальної системи уваги та більш напружений стан вищих контролюючо-виконавчих церебральних систем мозку, імовірно, лобово-тім'яної системи.

Висновки

Вроджені зорові дисфункції призводять до функціональної реорганізації головного мозку. В умовах спокійного неспання юнакам з вродженими зоровими дисфункціями притаманний стан напруженої слухової уваги та постійний перебіг інформаційних процесів у правій задній асоціативній області.

За умов сенсорно-моторної інтеграції у юнаків з вродженими зоровими дисфункціями поряд з адекватними змінами нейродинаміки, спрямованими на покращення дискримінації тонів, ми спостерігали недостатність контролюючо-виконавчих церебральних систем, що ускладнювало процес порівняння звукового сигналу з еталоном у робочій пам'яті та/або прийняття рішення щодо типу моторної відповіді.

Отримані результати підтверджують раніше виявлену кросс-модальну пластичність при зоровій депривації та демонструють наявність такої при частковому обмеженні зорової аферентації, починаючи з ранніх етапів постнатального розвитку. У юнаків з вродженими зоровими дисфункціями зорова кора може приймати участь у дискримінації звукових подразників.

Література

1. Кочина М.Л. Апаратно-програмный комплекс для проведения психофизиологических исследований / Л.М. Кочина, А.Г. Фирсов // Клиническая информатика и телемедицина. – 2010. – Т. 6, Вып. 7. – С. 113 – 117.
2. Майоров О.Ю. Реализация метода смещения с помощью оценки размеров осей аттрактора динамической системы мозга / Майоров О.Ю., Глухов А.Б., Фенченко В.Н. // Кибернетика и вычислительная техника. – 2007. – Вып. 153. – С. 3 – 11.
3. Майоров О.Ю. Исследование биоэлектрической активности мозга с позиций многомерного линейного и нелинейного анализа ЭЭГ / О.Ю. Майоров, В.Н. Фенченко // Журнал клинической информатики и телемедицины. – 2008. – Т.4, Вып. 5. – С. 12 – 20.

4. Arnsten A. F. T. Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function / Amy F. T. Arnsten // *Nat. Rev. Neurosci.* – 2009. – Vol. 10 (6). – P. 410–422.
5. Cappe C. Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey / Cappe C., Barone P. // *Eur. J. Neurosci.* – 2005. – Vol. 22 (11). – P. 2886–28902.
6. Cappe C. Multisensory anatomical pathways / C. Cappe, E. M. Rouiller, P. Barone // *Hearing Research.* – 2009. – Vol. 258 (1-2). – P. 28–36.
7. Corbetta M. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain / Corbetta M., Shulman G.L. // *Nature Reviews Neuroscience.* – 2002. – Vol. 3 (3). – P. 201–215.
8. Feng W. Sounds activate visual cortex and improve visual discrimination / Feng W., Störmer V.S., Martinez A., McDonald J.J., Hillyard S.A. // *J. Neurosci.* – 2014. – Vol. 34 (29). – P. 9817–9824.
9. Gougoux F. A Functional Neuroimaging Study of Sound Localization: Visual Cortex Activity Predicts Performance in Early-Blind Individuals / F. Gougoux, R.J. Zatorre, M. Lassonde, P. Voss, F. Lepore // *PLoS Biology.* – 2005. – Vol. 3 (2), e 27. – P. 0324–0333.
10. Grassberger P. Measuring the strangeness of strange attractors / Grassberger P., Procaccia I. // *Physica D.* – 1983. – Vol. 9. – P. 189–208.
11. Guillem F. Differential involvement of the human temporal lobe structures in short- and long-term memory processes assessed by intracranial ERPs / Guillem F., N'Kaoua B., Rougier A., Claverie B. // *Psychophysiology.* – 1996. – Vol. 33 (6). – P. 720–730.
12. Hubel D.H. The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens / Hubel D.H., Wiesel T.N. // *J. Physiol.* – 1970. – Vol. 206 (2). – P. 419–436.
13. Jiang J. Thick Visual Cortex in the Early Blind / J. Jiang, W. Zhu, F. Shi, Y. Liu, J. Li, W. Qin, K. Li, Ch. Yu, T. Jiang // *J. Neurosci.* – 2009. – Vol. 29 (7). – P. 2205–2211.
14. Johnson J.A. Attention to simultaneous unrelated auditory and visual events: behavioral and neural correlates / Johnson J.A., Zatorre R.J. // *Cereb. Cortex.* – 2005. – Vol. 15 (10). – P. 1609–1620.
15. Kantz H. *Nonlinear Time Series Analysis* / Holger Kantz, Thomass Schreiber. – Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. – 2 edition. – 388 p.
16. Klimesch W. EEG alpha oscillations: The inhibition–timing hypothesis / Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. // *Brain Research Reviews.* – 2007. – Vol. 53 (1). – P. 63–88.
17. Klinge C. Increased amygdala activation to emotional auditory stimuli in the blind / C. Klinge, B. Röder, Ch. Büchel // *Brain.* – 2010. – Vol. 133 (Pt 6). – P. 1729–1736.
18. Lewald J. Involvement of the superior temporal cortex and the occipital cortex in spatial hearing: evidence from repetitive transcranial magnetic stimulation / Lewald J., Meister I.G., Weidemann J., Töpfer R. // *J. Cogn. Neurosci.* – 2004. – Vol. 16 (5). – P. 828–838.
19. Medalla M. Specialized prefrontal “auditory fields”: organization of primate prefrontal-temporal pathways / Maria Medalla and Helen Barbas // *Frontiers in Neurosci.* – 2014. – Vol. 8, Article 77. – 15 p.
20. Millen S.J. Functional magnetic resonance imaging of the central auditory pathway following speech and pure-tone stimuli / S. J. Millen, V. M. Haughton, Z. Yetkin // *The Laryngoscope.* – 1995. – Vol. 105 (12). – P. 1305–1310.
21. Moerel M. An anatomical and functional topography of human auditory cortical areas / Michelle Moerel, Federico De Martino and Elia Formisano // *Front Neurosci.* – 2014. – Vol. 8, article 225. – 14 p.
22. Petrides M. Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization / Michael Petrides // *Phil. Trans. R. Soc. B.* – 2005. – Vol. 360. – P. 781–795.
23. Ptito M. Alterations of the visual pathways in congenital blindness / Ptito M., Schneider F., Paulson O. B., and Kupers R. // *Exp. Brain Res.* – 2008. – Vol. 187 (1). – P. 41–49.
24. Ramnani N. and Owen A.M. Anterior prefrontal cortex: insights into function from anatomy and neuroimaging / Ramnani N. and Owen A.M. // *Nat. Rev. Neurosci.* – 2004. – Vol. 5 (3). – P. 184–194.
25. Renier L.A. et al. Preserved functional specialization for spatial processing in the middle occipital gyrus of the early blind / Renier L.A., Anurova I., De Volder A.G., Carlson S., VanMeter J., Rauschecker J.P. // *Neuron.* – 2010. – Vol. 68 (1). – P. 138–148.
26. Rinne T. Analysis of speech sounds is left-hemisphere predominant at 100–150ms after sound onset / Rinne T., Alho K., Alku P., Holi M., Sinkkonen J., Virtanen J., Bertrand O., Näätänen R. // *Neuroreport.* – 1999. – Vol. 10 (5). – P. 1113–1117.
27. Sammer G. Working-memory load and dimensional complexity of the EEG / G. Sammer // *Int. J. Psychophysiol.* – 1996. – Vol. 24. – P. 173–182.
28. Shimony J. S. Diffusion tensor imaging processing in the middle occipital gyrus of the early blind / Shimony J. S., Burton H., Epstein A. A., McLaren D. G., Sun S. W., and Snyder A. Z. // *Neuron.* – 2006. – Vol. 68. – P. 138–148.
29. Stevens A.A. et al. Preparatory activity in occipital cortex in early blind humans predicts auditory perceptual performance / Stevens A.A., Snodgrass M., Schwartz D., Weaver K. // *J. Neurosci.* – 2007. – Vol. 27(40). – P. 10734–10741.

30. Talebi N. Investigation of changes in EEG complexity during memory retrieval: the effect of midazolam / Nasibeh Talebi, Ali M. Nasrabadi, Tim Curran // *Cogn. Neurodyn.* – 2012. – Vol. 6. – P. 537–546.
31. van Dijk H. Left temporal alpha band activity increases during working memory retention of pitches / van Dijk H., Nieuwenhuis I.L., Jensen O. // *Eur. J. Neurosci.* – 2010. – Vol. 31 (9). – P. 1701–1707.
32. Vincent J.L. Evidence for a Frontoparietal Control System Revealed by Intrinsic Functional Connectivity / Justin L. Vincent, Itamar Kahn, Abraham Z. Snyder, Marcus E. Raichle, and Randy L. Buckner // *J. Neurophysiol.* – 2008. – Vol. 100 (6). – P. 3328–3342.
33. Voss P. Occipital Cortical Thickness Predicts Performance on Pitch and Musical Tasks in Blind Individuals / Patrice Voss, Robert J. Zatorre // *Cerebral Cortex.* – 2012. – Vol. 22. – P. 2455–2465.
34. Wolf A. Determining Lyapunov exponents from a time series / Wolf A., Swift I.B., Swinney H.L., Vastano J.A. // *Physica.* – 1985. – Vol. D16. – P. 285–317.
35. Yokoyama O. Right frontopolar cortex activity correlates with reliability of retrospective rating of confidence in short-term recognition memory performance / Yokoyama O., Miura N., Watanabe J., Takemoto A., Uchida S., Sugiura M., Horie K., Sato S., Kawashima R., Nakamura K. // *Neurosci Res.* – 2010. – Vol. 68 (3). – P. 199–206.
36. Zhang Y. Auditory cortical responses evoked by pure tones in healthy and sensorineural hearing loss subjects: functional MRI and magnetoencephalography / Zhang Yun-ting, Geng Zuo-jun, Zhang Quan, Li Wei and Zhang Jing // *Chin Med J.* – 2006. – Vol. 119 (18). – P. 1548–1554.
37. Zatorre R.J. Role Of The Right Temporal Neocortex In Retention Of Pitch In Auditory Short-Term Memory / R. J. Zatorre, S. Samson // *Brain.* – 1991. – Vol. 114 (Pt. 6). – P. 2403–2417.

Аннотация. Редька И.В. Оценка нейродинамических систем головного мозга юношей с врожденными зрительными дисфункциями в условиях сенсорно-моторной интеграции. Методами нелинейного анализа осуществлена оценка нейродинамических систем головного мозга юношей с врожденными зрительными дисфункциями и нормальнозрящих юношей в условиях спокойного бодрствования и сенсорно-моторной интеграции. Изучались показатели размерности вложений, корреляционной размерности, максимальной экспоненты Ляпунова и энтропии Колмогорова-Синяя.

Установлено, что врожденные зрительные дисфункции приводят к функциональной реорганизации головного мозга. В условиях спокойного бодрствования юношам с врожденными зрительными дисфункциями присуще состояние напряженного слухового внимания и постоянное протекание мультисенсорных информационных процессов в правом полушарии.

Сенсорно-моторная интеграция вызывала значительные изменения нейродинамических систем головного мозга юношей с врожденными зрительными дисфункциями, тогда как среди нормальнозрящих юношей нелинейная динамика электрической активности головного мозга существенно не изменялась.

В условиях сенсорно-моторной интеграции у юношей с врожденными зрительными дисфункциями наряду с адекватными изменениями нейродинамики, направленными на улучшение дискриминации тонов, мы наблюдали недостаточность контролирующих и исполнительных церебральных систем, что усложняло процесс сличения звукового сигнала с эталоном в рабочей памяти и /или принятие решение относительно типа моторного ответа.

Показано, что у юношей с врожденными зрительными дисфункциями в процессе сенсорно-моторной интеграции зрительная кора может принимать участие в дискриминации звуковых раздражителей.

Ключевые слова: ЭЭГ, нелинейная динамика, сенсорно-моторная интеграция, зрительные дисфункции, юношеский возраст

Summary. Redka I.V. Evaluation systems of the brain neurodynamic in the young men with congenital visual dysfunction in a sensory-motor integration. An assessment of neural systems of the brain of young men with congenital visual dysfunction and sighted young men was examined by methods of nonlinear analysis in resting state and sensory-motor integration. We studied embedding dimension, correlation dimension, the maximum Lyapunov exponent and Kolmogorov-Sinai entropy.

It has been found that the congenital visual dysfunction lead to brain functionality reorganization. In resting state increase of auditory attention and constant flow of information multisensory processes in the right hemisphere have been found in young men with congenital visual dysfunction.

Significant changes of brain systems have been caused in young men with congenital visual dysfunction during sensory-motor integration. Nonlinear dynamics of the brain electrical activity sighted young men did not has been changed significantly.

In young men with congenital visual dysfunction during sensory-motor integration there have been the adequate changes neurodynamics aimed at improving the pitch discrimination and the inadequacy of executive cerebral systems. Apparently, this indicated on difficulty to compare a goal-sound with the standard sound in the working memory and / or on the difficulty to adoption of a decision on the type of motor response.

It has been showed that visual cortex may be involved in the discrimination of sound stimuli during sensory-motor integration in young men with congenital visual dysfunction.

Keywords: *EEG, nonlinear dynamics, sensory-motor integration, visual dysfunction, young men*

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Одержано редакцією 24.11.2014

Прийнято до публікації 07.12.2014