

Нелінійні електроенцефалографічні кореляти слухово-моторної інтеграції у хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями

І.В.Редька¹, О.Ю. Майоров^{1, 2, 3}

¹Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна; ²Харківська медична академія післядипломної освіти; ³ДУ «Інститут охорони здоров'я дітей та підлітків НАМНУ», Харків; E-mail: iredka@yandex.ru

Вивчено нелінійну динаміку електричної активності головного мозку хлопчиків віком від 8 до 12 років з набутими зоровими дисфункціями (n=27, vis. OS 0,70±0,04, vis. OD 0,56±0,05 з корекцією) порівняно з нормальнозорими (n=27) при виконанні складної слухово-моторної реакції вибору. Використано показники розмірності внеску, кореляційної розмірності, максимальної експоненти Ляпунова та ентропії Колмогорова–Сіная. При зорових дисфункціях в умовах слухово-моторної інтеграції виявлено активацію правої потиличної та дезактивацію лівої потиличної ділянки, що не притаманно нормальнозорим. Результати обговорюються в контексті крос-модальної пластичності та надмодальної організації головного мозку.

Ключові слова: зорові дисфункції; електроенцефалограма; нелінійна динаміка; слухово-моторна інтеграція; крос-модальність; над модальність.

ВСТУП

За умов нормального розвитку зорова аферентація – основне джерело інформації про навколишнє середовище, тому логічно передбачати, що її обмеження повинно викликати структурно-функціональну реорганізацію головного мозку. Це знаходить підтвердження в результатах позитронно-емісійної та магнітно-резонансної томографії (ПЕТ і МРТ) досліджень сліпих [1, 2]. Ці методи ґрунтуються на опосередкованому висновку про активність структур на підставі коливання гемодинамічних і метаболічних показників. Водночас прямим показником активності головного мозку є його електрична активність, що може бути досліджена у людини неінвазивним електроенцефалографічним методом. Утім нами знайдено поодинокі роботи, які висвітлюють електрофізіологічні кореляти когнітивних процесів у дітей з зоровими дисфункціями, переважно зорового сприйняття

© І.В.Редька, О.Ю. Майоров

та уваги [3]. Відзначимо, що дослідження феномену зорової депривації у людини орієнтовані на дорослих і розглядають крайній варіант атипового розвитку – повна відсутність зорової аферентації (сліпота). Однак в офтальмологічній практиці найчастіше спостерігається часткове обмеження зорової аферентації, а одним із факторів, що впливає на ефективність лікування є вік пацієнтів на момент виявлення патології та тривалість останньої.

Зазначене дає змогу стверджувати, що вивчення електроенцефалографічних (ЕЕГ-корелятів) когнітивних процесів на різних етапах онтогенезу при зорових дисфункціях з урахуванням таких факторів, як час початку, ступінь і тривалість обмеження зорової аферентації, сприятимуть поглибленню знань щодо функціональної реорганізації головного мозку під впливом зорових дисфункцій і можуть стати підґрунтям нових нейрофізіологічних методів офтальмореконструкції.

Мета нашої роботи – виявлення нелінійних ЕЕГ-корелятивів слухово-моторної інтеграції у хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями.

МЕТОДИКА

Обстежено 54 хлопчики віком від 8 до 12 років, яких розділили на дві однакові групи. До 1-ї групи увійшли нормальнозорі хлопчики (контроль), до 2-ї – хлопчики з зоровими дисфункціями. Загальним критерієм для включення в обстеження була відсутність органічної патології ЦНС та черепно-мозкової травми в анамнезі, неврологічних чи психічних розладів, фармакологічної терапії на момент обстеження. Зорові дисфункції обох очей набуті в перші роки життя та зумовлені порушеннями рефракції та/або акомодатції, косоокістю та/або ністагмом (Н52, Н50, Н55 згідно МКХ-10). Некоригована гострота зору для лівого та правого ока становила $0,55 \pm 0,05$ і $0,44 \pm 0,06$, а коригована – $0,70 \pm 0,04$ і $0,56 \pm 0,05$ відповідно.

Обстеження проводили з дотриманням національних норм біоетики та положень Гельсінської декларації 1975 р. (у редакції 2013 р.) за попередньою згодою самих дітей та письмовою згодою батьків після інформування про цілі, тривалість та процедуру дослідження.

ЕЕГ-потенціали відводили монополярно у 23-х відведеннях відповідно до міжнародної системи «10-20» з усередненим референтним електродом за D. Goldman. ЕЕГ реєстрували при закритих очах за двох станів (по 2,5 хв. кожний): 1) спокійне неспання; 2) виконання складної слухово-моторної реакції вибору. Для цього через колонки бінаурально пред'являлися звуки двох тональностей (500 Гц, 1 кГц), у відповідь на які обстежуваному необхідно було натискати великим пальцем правої руки на праву (для 500 Гц), а лівої руки на ліву (для 1кГц) кнопку на пульті. Тривалість експозиції тональних сигналів становила 700 мс, а міжстимульний інтервал

– від 500 до 1500 мс. Колонки розташовували на 30° праворуч від центру поля зору. Запису ЕЕГ передувала тренувальна вправа.

Для подальшого нелінійного аналізу відбирали 35–45-секундні безартефактні фрагменти запису для кожного стану. Для дослідження нелінійної динаміки в нейродинамічних системах мозку на основі методів детермінованого хаосу використовувався модуль NeuroResearcher Chaos® системи NeuroResearcher® Innovation Suite (Інститут медичної інформатики і телемедицини, Харків). Відновлення аттрактора у фазовому просторі здійснено методом затримки. Визначення часу затримки проводилося на основі оцінки його «форми», що реконструюється: час затримки обирали таким чином, щоб розміри реконструйованого аттрактора за всіма осями були максимально наближеними до 1 [4].

Після реконструкції аттрактора у фазовому просторі визначали такі ключові нелінійні показники: розмірність внеску (РВ, ум. од.), що дає змогу зробити припущення про те, як багато компонентів формують цю динамічну систему; кореляційна розмірність (D2, ум. од.) – міра складності (число ступенів свободи) системи, що відображає кількість періодичних режимів; ентропія Колмогорова–Сіная (метрична, динамічна ентропія, eКС, біт·с⁻¹) – міра регулярності або впорядкованості системи; максимальна експонента (показник) Ляпунова (мЕЛ, ум.од.·с⁻¹) – міра хаотичності, складності та гнучкості динамічної системи [5].

Електрофізіологічні результати обробляли загальноприйнятими методами варіаційної статистики та представлені у вигляді $\bar{x} \pm m$. Для міжгрупових порівнянь використовувався критерій U, а для внутрішньогрупових порівнянь – критерій Т Вілкоксона-Манна-Уїтні. Кореляційний аналіз між показниками ефективності виконання слухово-моторної реакції вибору (латентний період, варіаційний розмах, кількість помилок) та нелінійними показниками ЕЕГ проводили за методом К. Пірсона. Вірогідними вважали відмінності при значеннях $P \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Проведене дослідження виявило особливості нелінійної динаміки електричної активності головного мозку хлопчиків з набутими двобічними зоровими дисфункціями порівняно з контролем як в умовах спокійного неспання, так і під час слухово-моторної інтеграції.

Міжгрупові відмінності в умовах спокійного неспання. При набутих зорових дисфункціях спостерігалися більш низькі порівняно з контролем значення мЕЛ та еКС у лівій передньо-скроневої ділянці (Т3 на 11,5 і 11,9 % відповідно, $P \leq 0,05$) (рис. 1, а). Це свідчить про збільшення регулярності та впорядкованості електричної активності лівої передньо-скроневої ділянки, що відображає зменшення кількості конкуруючих нервових процесів на фоні підвищення їх інформаційного змісту.

Оскільки у цих ділянках локалізовані проєкційні зони слухового аналізатора [6], то зниження значень мЕЛ і еКС, імовірно, відображає підвищену увагу хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями до слухових подразників. Зазначене разом з локалізацією змін у лівій півкулі, яка має переваги в аналізі не лише тональності звукових подразників, але й мови [6], дає змогу асоціювати їх з підвищеною готовністю головного мозку до сприйняття інструкції, яку чує людина з зоровими дисфункціями, що може відображати стан настороженості.

ЕЕГ-реакція на слухово-моторну реакцію вибору. У нормальнозорих хлопчиків слухово-моторна інтеграція супроводжувалася зниженням значень РВ у лівій центральній (С3 на 7,1 %, $P \leq 0,05$) та еКС у лівій задньо-скроневої зоні (Т5 на 9,0 %, $P \leq 0,05$; рис. 2). Тобто, слухово-моторна інтеграція у

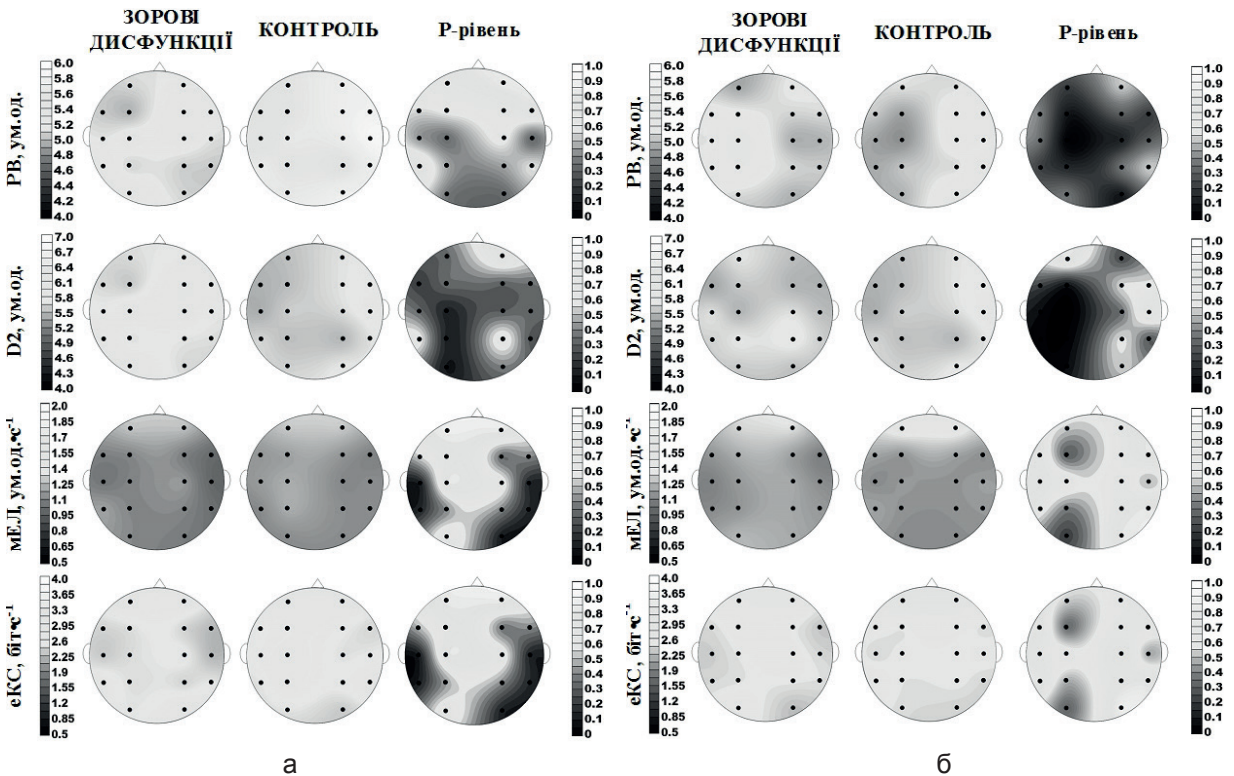


Рис. 1. Усереднені топограми значень показників нелінійної динаміки електроенцефалограми (ЕЕГ) хлопчиків з різним станом зорової функції в умовах спокійного неспання (а) та під час слухово-моторної реакції (б). РВ – розмірність внеску, D2 – кореляційна розмірність, еКС – ентропія Колмогорова–Сіная, мЕЛ – максимальна експонента Ляпунова; точками на топограмах позначені досліджувані ЕЕГ-відведення

нормальнозорих пов'язана зі зниженням рівня хаотичності в динаміці електричної активності та збільшенням інформаційного змісту нервових процесів у лівій задньо-скроневій зоні. Зважаючи на важливість цієї ділянки в інтеграції слухової та сомато-сенсорної інформації [7] виявлені зміни еКС можуть бути відображенням активізації зазначених інтеграційних процесів. Поряд із цим спостерігалось зменшення кількості компонентів нейродинамічної системи у сенсорно-моторній корі, що може відображати формування домінанти для реалізації адекватної рухової відповіді на звуковий подразник. Отже, складна слухово-моторна інтеграція викликала мінімальні зміни нелінійної динаміки електричної активності головного мозку нормальнозорих хлопчиків, що відображають формування нейродинамічної системи відповідальної за підготовку та реалізацію

моторної програми в залежності від характеристик звукового подразника.

Водночас слухово-моторна інтеграція при набутих зорових дисфункціях знижувала D2 у лівій потиличній (O1 на 5,8 % $P \leq 0,05$) та еКС у правій потиличній ділянці (O2 на 20,5 % $P \leq 0,05$) порівняно з фоном (див. рис. 2). Це свідчить про зменшення складності обробки й інтеграції інформації у лівій потиличній ділянці та збільшення регулярності електричної активності й інформаційного змісту нервових процесів у правій. Зазначене може вказувати на дезактивацію лівої потиличної та активацію правої потиличної зони в процесах слухово-моторної інтеграції при набутих зорових дисфункціях.

Отримані результати узгоджуються з даними функціональної МРТ і ПЕТ досліджень, що виявили активацію кіркових зорових структур (переважно правих) при вирішенні

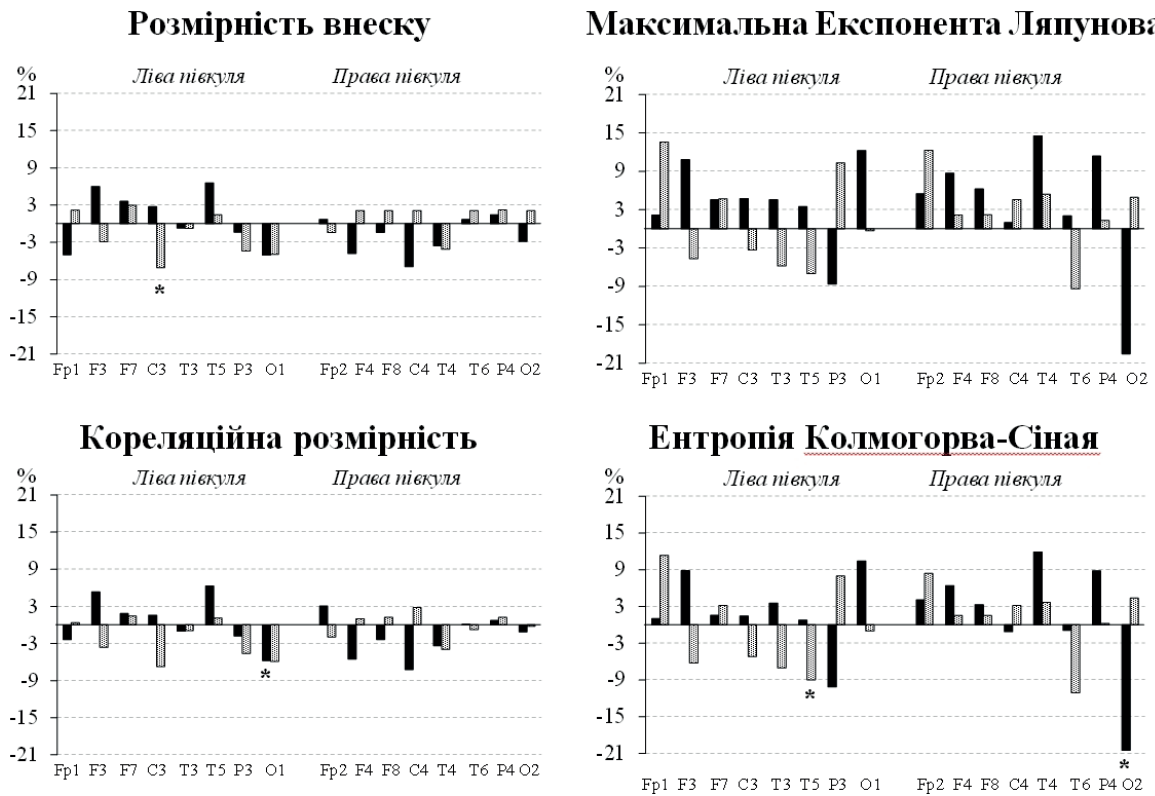


Рис. 2. Зміни показників нелінійної динаміки електроенцефалограми (ЕЕГ) хлопчиків з різним станом зорової функції під час слухово-моторної інтеграції. За віссю абсцис – відведення ЕЕГ; чорні стовпчики – зорові дисфункції, заштриховані – контроль, * $P \leq 0,05$ порівняно з умовами спокійного неспання

різних слухових завдань сліпими людьми [8, 9, 10].

Отже, результати дослідження вимагають пошуку відповідей на два питання: 1) можливі механізми активації потиличної кори під час слухово-моторної інтеграції; 2) причини різноспрямованої зміни нейродинаміки симетричних ділянок зорової кори.

Одне з пояснень феномена активації зорової кори під час вирішення слухових задач при зорових дисфункціях може полягати у процесах візуалізації звукового подразника та/або майбутньої рухової дії подумки. У такому разі у хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями мало б спостерігатися збільшення тривалості реакції вибору. Всупереч цьому наші результати виявили значно коротший латентний період слухово-моторної реакції вибору серед хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями порівняно з контролем ($622,9 \pm 41,6$ мс і $622,8 \pm 11,4$ мс відповідно, $P=0,14$). Це дає підстави для спростування висунутого припущення, що узгоджується з повідомленням [11] про неможливість пояснення активації зорової кори сліпих людей лише уявленням форми звука.

Інше пояснення згаданого феномена пов'язують з явищами крос-модальної пластичності, коли деаферентована кора залучається до оперування інформацією нетипової для себе модальності. Реалізація крос-модальної пластичності теоретично можлива внаслідок демаскування існуючих та/або реорганізації (утворення нових) кірково-кіркових шляхів між первинною слуховою й зоровою корою та таламо-кортикальних шляхів [1, 12].

Відзначимо, що наявність у хлопчиків 2-ї групи зниженого притоку зорової аферентації до первинної зорової кори, на нашу думку, може бути лімітуючим чинником активації механізмів крос-модальної реорганізації кірково-кіркових та/або підкірково-кіркових шляхів. Тому крос-модальна пластичність при частковому обмеженні притоку зорової аферентації до мозку, імовірно, зумовлена демаскуванням існуючих церебральних шляхів.

Встановлено [13], що більшість нейронів первинної зорової кори мишей з частковою зоровою депривацією (блокування функції паличок) відповідають на звукову стимуляцію. Анатомічним підґрунтям цього можуть бути нещодавно виявлені у зрячих приматів прямі гетеромодальні зв'язки між первинною слуховою та зоровою зонами кори [14, 15]. Вони через бімодальні (мультисенсорні) та унімодальні підпорогові мультисенсорні (модуляторні) нейрони проєкційних зон кори забезпечують адитивну (підсилювальну) крос-модальну взаємодію слухової та зорової проєкційної кори, особливо за умов низької інтенсивності зорових подразників [16].

Зазначене дає змогу розглядати виявлену при набутих зорових дисфункціях активацію зорової кори під час слухово-моторної реакції вибору як наслідок синаптичної пластичності, зумовленої особливостями аудіо-візуальної взаємодії в повсякденному житті, тобто як прояв активності усталених крос-модальних (слухово-зорових) адитивних взаємодій. У такому разі під час складної слухово-моторної реакції вибору слухова аферентація активує нейрони зорової кори прямими кірково-кірковими шляхами, сприяючи їх підпороговій деполаризації. Однак за цим не слідує покращення ані зорового сприйняття, оскільки використана нами слухово-моторна координація не пов'язана з безпосереднім впливом зорового подразника, ані дискримінації звукових тонів, оскільки унімодальна зорова кора, згідно традиційних уявлень, не бере участі в цьому процесі. Проте така активація зорової кори за відсутності зорових подразників могла б сприяти додатковій модуляції слухової кори через зворотні кірково-кіркові (зорово-слухові) зв'язки [14, 15], полегшуючи процеси перцепції (зокрема, детекції) наступних звукових подразників.

Ще одними з потенційних шляхів активації зорової кори слуховими подразниками при зорових дисфункціях можуть бути прямі висхідні таламо-кортикальні та/або тектальні шляхи. Такий шлях активації призвів би до

одночасного залучення проекційної слухової та частини нейронів проекційної зорової кори до аналізу звукових подразників. Паралельно могли б відбуватися розглянуті вище кірково-кіркові адитивні крос-модальні взаємодії.

Підґрунтям такого припущення стали результати дослідження [17], в якому показано, що реакція на слуховий подразник частини нейронів первинної зорової кори шурів з двобічною енкулеацією може бути зумовлена активуючими впливами таламуса.

У літературі обговорюється можливість таламо-кортикальної активації зорової кори за умов зорової депривації внаслідок «перемонтування» слухових проекцій. Так, на тваринних моделях зорової депривації виявлено збільшення кількості слухових проекцій у латеральному колінчастому тілі від нижніх горбиків чотирогорбикового [18] та медіального колінчастого тіла [12], що далі проєктуються на первинну зорову кору [19]. На нашу думку, зазначене може бути справедливим для сліпоті. Однак у хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями потік зорової аферентації лише суттєво знижений, тобто продовжував активувати нейрони зорової кори. Такі умови, очевидно, є недостатніми для запуску механізмів крос-модальної пластичності з явищами структурної реорганізації.

Водночас альтернативний механізм активуючих впливів таламуса на зорову кору слуховим подразником при набутих зорових дисфункціях може реалізовуватися через ретикулярне ядро таламуса. Це припущення ґрунтується на нещодавньому дослідженні [20], що встановило можливість взаємної модуляції унісенсорних ядер таламуса (у нашому випадку колінчастих тіл) через ретикулярне ядро у зрячих тварин.

Ще один із можливих механізмів аудіо-візуальної таламо-кортикальної взаємодії при набутих зорових дисфункціях може реалізовуватися через матрицю кальбіндинімумореактивних нейронів таламуса, що мають дифузні кіркові проєкції, які накладаються на сенсорні топографічні проєкції парвальбумі-

німумореактивних нейронів таламуса [21].

Очевидно, що обмеження зорової аферентації у хлопчиків 2-ї групи створює передумови для більш вираженого прояву активності наявних у контролі слухових таламо-кортикальних проєкцій на зорову кору.

Така одночасна активація проекційної слухової та зорової кори звуковим подразником через прямі висхідні проекційні шляхи таламуса при набутих зорових дисфункціях, напевно, повинна надавати поведінкові переваги у слухово-моторній інтеграції порівняно з контролем. Дійсно, нами виявлено значне вкорочення латентного періоду слухово-моторної реакції вибору серед хлопчиків з 2-ї групи порівняно з контролем.

Якщо ж таламо-кортикальні та кірково-кортикальні шляхи активації зорової кори слуховим подразником мають адаптивно-компенсаторне значення у хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями, то логічно було б очікувати наявності кореляції між ступенем активації зорової кори та поведінковим результатом слухово-моторної реакції вибору. Утім, проведений нами кореляційний аналіз свідчить про відсутність таких кореляцій. Це узгоджується з даними Voss та співавт. [10] про наявність явищ крос-модальної пластичності у людей, які осліпли у дорослому віці, але вони не супроводжуються поведінковими перевагами.

Отже, поведінкові результати слухово-моторної інтеграції не можуть бути повністю поясненні з позиції крос-модальної пластичності.

Відзначено [22, 23] можливість активації правої зорової кори під час активних слухових задач у нормальнозорих людей. Подібність активації зорової кори у людей з зоровими дисфункціями та нормальнозорими під час виконання слухових задач наводить на думку про надмодальні властивості зорової кори, тобто її здатність активуватися не тільки при дії подразника зорової модальності, а й залежно від виконуваного завдання. Саме тому виявлена нами активація потиличної ді-

лянки в процесі слухово-моторної інтеграції у хлопчиків 2-ї групи може бути розглянута з позицій теорії перцептивно-функціональної організації мозку [24], що передбачає участь зорової кори в перебігу прихованих (ендогенних) надмодальних процесах, таких як, наприклад, просторова увага.

Слід зазначити, що можливість активації системи ендогенної просторової уваги детермінована умовами подачі звукового подразника під час експерименту: джерело звуку зміщено вправо відносно центрального поля зору. Окрім цього, у хлопчиків 2-ї групи нами знайдено ЕЕГ-кореляти (зниження мЕЛ, еКС у Т3) стану підвищеної слухової уваги в умовах спокійного неспання, що знижує функціональні резерви для підвищення сенсорно-специфічної (екзогенної) уваги у разі потреби. Як відомо, слухово-моторна реакція вибору висуває підвищені вимоги до системи уваги, що могло сприяти активації додаткових (імовірно надмодальних) церебральних структур ендогенної просторової уваги, наприклад латеральної потиличної ділянки [24].

Припущення про надмодальну природу активації зорової кори слуховими подразниками, пов'язану з функціонуванням просторової уваги, висловлювалось деякими авторами [1, 17] відносно аналогічних явищ у сліпих і зрячих людей.

Якщо зазначене припущення є правильним, то незважаючи на опосередкований вплив ендогенної уваги на перебіг слухово-моторної інтеграції, ступінь активації потиличної зони навряд чи корелюватиме з поведінковими результатами виконання слухово-моторної реакції вибору. Однак ендогенна увага може прискорювати перцепцію звукового подразника. Поведінкові результати виконання складної слухово-моторної реакції вибору підтверджують це.

Отже, активація правої зорової кори під час виконання складної слухово-моторної реакції при зорових дисфункціях може бути зумовлена взаємодією крос-модальних (явища демаскування) і надмодальних процесів.

На користь цього свідчать дані фМРТ під час слухових задач [22, 23] щодо активації ретинотопічно організованої зорової кори, що відповідає за периферичну частину поля зору (ефект ендогенної просторової уваги, оскільки джерело звуку зміщено вправо), а прямі проєкції між первинної слуховою та зоровою корою (крос-модальні шляхи) локалізуються на периферії [14, 15].

У хлопчиків 2-ї групи також спостерігалися зміни у нелінійній динаміці електричної активності лівої потиличної ділянки, які, на нашу думку, вказують на її дезактивацію (зниження D2, $P \leq 0,05$). Імовірно, вони відображають антагоністичні взаємовідносини (крос-модальне гальмування) між проєкційними зонами модально-специфічних (слухових) та модально-неспецифічних (зорових) до діючого подразника структур іпсилатеральної півкулі, що полегшує процес сприйняття. Це узгоджується з інтерпретаціями дезактивації зорової кори при вирішенні слухових задач у нормальнозорих [25, 26].

Міжгрупові відмінності в умовах слухово-моторної інтеграції. При набутих зорових дисфункціях порівняно з контролем (див. рис. 1,б), спостерігалися більш високі значення розмірності внеску в лівій центральній ділянці (С3 на 13,7 %, $P \leq 0,01$), кореляційної розмірності – у верхньо-лобовій (F3 на 9,4 %, $P \leq 0,01$), центральній (С3 на 15,0 %, $P \leq 0,001$) та тим'яній (P3 на 8,2 %, $P \leq 0,05$) ділянках лівої півкулі, а також більш низькі значення розмірності внеску у правій потиличній ділянці (O2 на 8,2 %, $P \leq 0,05$).

Це віддзеркалює більшу складність обробки та інтеграції інформації у верхньо-лобовій, центральній і тим'яній зонах хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями. Зазначене може вказувати на більшу активність процесів, спрямованих на формування та/або реалізацію моторної програми дій у відповідь на слуховий подразник порівняно з контролем. Імовірно, цим і пояснюється більша швидкість складної слухово-моторної реакції вибору серед цих хлопчиків.

Також під час слухово-моторної реакції вибору ми спостерігали меншу кількість компонентів (більш низьке значення РВ), що формують нейродинамічну систему в правій потиличній ділянці хлопчиків 2-ї групи порівняно з контролем. У відповідності з обговореними вище явищами крос-модальної взаємодії це може бути відображенням активації лише тієї частини ретинотопічно організованої зорової кори, що відповідає периферичній частині поля зору.

Таким чином у хлопчиків з набутими зоровими дисфункціями вища швидкість слухово-моторної інтеграції зумовлена більшою активністю процесів мультисенсорної інтеграції (крос-модальне гальмування іпсилатеральної зорової кори та крос-модальна активація контралатеральної зорової кори) та активізацією надмодальних ендогенних процесів просторової уваги. Активація потиличної зони звуковим подразником при набутих зорових дисфункціях, імовірно, пов'язана зі зняттям «маскування» наявних прямих слухових таламо-кортикальних проєкцій на первинну зорову кору.

Кірково-кіркова крос-модальна пластичність, зумовлена мимовільним щоденним тренуванням одночасного аудіо-візуального сприйняття навколишнього середовища, забезпечує лише модуляцію крос-модальних взаємодій, переважно надмодального генезу.

Отримані результати також є експериментальним аргументом можливості мультисенсорної взаємодії на рівні первинних проєкційних полів.

И.В. Редька, О.Ю. Майоров

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ СЛУХОВО-МОТОРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ У МАЛЬЧИКОВ С ПРИОБРЕТЕННЫМИ ЗРИТЕЛЬНЫМИ ДИСФУНКЦИЯМИ

Изучена нелинейная динамика электрической активности головного мозга мальчиков 8-12 лет с приобретенными зрительными дисфункциями ($n = 27$, vis. OS $0,70 \pm 0,04$, vis. OD $0,56 \pm 0,05$ с коррекцией) по сравнению с нор-

мальновидящими мальчиками ($n = 27$) при выполнении сложной слухово-моторной реакции выбора. Использованы показатели размерности вложения, корреляционной размерности, максимальной экспоненты Ляпунова и энтропии Колмогорова–Синяя. При зрительных дисфункциях в условиях слухово-моторной интеграции обнаружено активацию правой затылочной и дезактивацию левой затылочной области, что не характерно для нормально-видящих. Результаты обсуждаются в контексте кросс-модальной пластичности и надмодальной организации головного мозга.

Ключевые слова: зрительные дисфункции; электроэнцефалограмма, нелинейная динамика; слухово-моторная интеграция; кросс-модальность; надмодальность

I.V. Redka, O.YU. Mayorov

NONLINEAR ELECTROENCEPHALOGRAPHIC CORRELATES OF AUDITORY-MOTOR INTEGRATION IN BOYS WITH OBTAINED VISUAL DYSFUNCTION

This research aims to study the nonlinear dynamics of the brain electrical activity in the performance of complex auditory-motor choice reaction. The boys with obtained visual dysfunction ($n = 27$, vis. OS $0,70 \pm 0,04$, vis. OD $0,56 \pm 0,05$ with correction) and normal sighted ($n = 27$) boys aged from 8 to 12 years were examined. Nonlinear parameters such as embedding dimension, correlation dimension, Lyapunov maximum exponent and Kolmogorov-Sinai entropy were determined. The auditory-motor integration are induced the activation of the right occipital area and the deactivation of the left occipital area in boys with obtained visual dysfunction. This is not typical for the sighted boys. The results are discussed in the context of cross-modal plasticity and supramodal brain organization.

Keywords: visual dysfunction, EEG, nonlinear dynamics, auditory-motor integration, cross-modality, supramodality.

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine; Kharkiv Medical Academy, Ukraine Postgraduate Education, Ukraine; Institute of Health of children and adolescents NAMS of Ukraine.

REFERENCES

1. Noppeney U, Friston KJ, Ashburner J., Frackowiak R, Price CJ. Early visual deprivation induces structural plasticity in gray and white matter. *Curr. Biol.* 2005 Jul; 15(13):488-90.
2. Veraart C, De Volder AG, Wanet-Defalque MC, Bol A, Michel C, Goffinet AM. Glucose utilization in human visual cortex is abnormally elevated in blindness of early onset but decreased in blindness of late onset. *Brain Res.* 1990 Feb; 510(1):115-21.
3. Rozhkova LA. The using EEG to assess the functional

- state of the brain of children and adolescents with sensory impairments and their correction. In: Grigoryeva LP editor. Children with developmental problems (complex diagnostics and correction). Moscow: PCC "Akademkniga"; 2002. p. 158-207. [Russian].
4. Mayorov OYu, Glukhov AB., Fenchenko VN, Prognimak AB. Realization of delay method with help of estimation of attractor axes sizes by one-dimensional realization of the brain dynamic system. *Cybernetics and Computer Science*. 2007; 153:3-11. [Russian].
 5. Mayorov OYu, Fenchenko VN. Researching of the brain bioelectrical activity from positions of multidimensional linear and nonlinear EEG analysys. *Clin Inform Telemed*. 2008 Jun; 4(5):12-20. [Russian].
 6. Moerel M, De Martino F, Formisano E. An anatomical and functional topography of human auditory cortical areas. *Front Neurosci* [Internet]. 2014 Jul [cited 2014 Dec 15];8:225: [about 14 pp.]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4114190/>.
 7. Beauchamp MS, Yasar NE, Frye RE, Ro T. Touch, sound and vision in human superior temporal sulcus // *Neuroimage*. 2008 Jul; 41 (3):1011-20.
 8. Renier LA, Anurova I, De Volder AG, Carlson S, VanMeter J, Rauschecker JP. Preserved functional specialization for spatial processing in the middle occipital gyrus of the early blind. *Neuron*. 2010 Oct; 68(1):138-48.
 9. Van der Lubbe RH, Van Mierlo CM, Postma A. The involvement of occipital cortex in the early blind in auditory and tactile duration discrimination tasks. *J. Cogn Neurosci*. 2010 Jul; 22(7):1541-56.
 10. Voss P, Gougoux F, Zatorre RJ, Lassonde M, Lepore F. Differential occipital responses in early- and late-blind individuals during a sound-source discrimination task. *NeuroImage*. 2008 Apr; 40(2):746-58.
 11. Striem-Amit E, Dakwar O, Reich L, Amedi A. The large-scale organization of "visual" streams emerges without visual experience. *Cereb Cortex*. 2012 Jul; 22(7):1698-1709.
 12. Karlen SJ, Kahn DM, Krubitzer L. Early blindness results in abnormal corticocortical and thalamocortical connections. *Neuroscience*. 2006 Oct; 142(3):843-58.
 13. Larsen DD, Luu JD, Burns ME, Krubitzer L. What are the effects of severe visual impairment on the cortical organization and connectivity of primary visual cortex? *Front Neuroanat* [Internet]. 2009 Dec [cited 2014 Dec 15];3:30:[about 16 pp.]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2802552>.
 14. Cappe C, Barone P. Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey. *Eur. J. Neurosci*. 2005 Dec; 22(11):2886-902.
 15. Falchier A, Clavagnier S, Barone P, Kennedy H. Anatomical evidence of multimodal integration in primate striate cortex. *J. Neurosci*. 2002 Jul; 22(13):5749-5759.
 16. Allman BL, Keniston LP, Meredith MA. Not just for bimodal neurons anymore: The contribution of unimodal neurons to cortical multisensory processing. *Brain Topogr*. 2009 May; 21(3-4):157-67.
 17. Piché M, Chabot N, Bronchti G, Miceli D, Lepore F, Guillemot JP. Auditory responses in the visual cortex of neonatally enucleated rats. *Neurosci*. 2007 Mar; 145(3):1144-56.
 18. Chabot N, Charbonneau V, Laramée M, Tremblay R, Boire D, Bronchti G. Subcortical auditory input to the primary visual cortex in anophthalmic mice. *Neurosci Lett*. 2008 Mar; 433(2):129-34.
 19. Bronchti G, Rado R, Terkel J, Wollberg Z. Retinal projections in the blind mole rat: aWGA-HRP tracing study of a natural degeneration. *Brain Res Dev Brain Res*. 1991 Feb; 58(2):159-70.
 20. Crabtree JW, Isaac JT. New intrathalamic pathways allowing modality-related and cross-modality switching in the dorsal thalamus. *J. Neurosci*. 2002 Oct; 22(19):8754-61.
 21. Jones EG. The thalamic matrix and thalamocortical synchrony. *Trends Neurosci*. 2001 Oct;24(10):595-601.
 22. Cate AD, Herron TJ, Yund EW, Stecker GCh, Rinne T, Kang X, et al. Auditory attention activates peripheral visual cortex. *PLoS One* [Internet]. 2009 Feb [cited 2014 Dec 15];4(2):e46453:[about 12 pp.]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2644787/>.
 23. Feng W, Störmer VS, Martinez A, McDonald JJ, Hillyard SA. Sounds activate visual cortex and improve visual discrimination. *J. Neurosci*. 2014 Jul; 34(29):9817-24.
 24. James TW, Stevenson RA, Kim S, VanDerKlok RM, James KH. Shape from sound: evidence for a shape operator in the lateral occipital cortex. *Neuropsychologia*. 2011 Jun; 49(7):1807-15.
 25. Johnson JA, Zatorre RJ. Attention to simultaneous unrelated auditory and visual events: behavioral and neural correlates. *Cereb. Cortex*. 2005 Oct;15(10):1609-20.
 26. Laurienti PJ, Burdette JH, Wallace MT, Yen YF, Field AS, Stein BE. Deactivation of sensory-specific cortex by cross-modal stimuli. *J Cogn Neurosci*. 2002 Apr; 14(3):420-29.

Матеріал надійшов до редакції 11.12.2014