INJ
МІЖНАРОДНИЙ НЕВРОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ
INTERNATIONAL NEUROLOGICAL JOURNAL
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НЕВРОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРИГІНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
/ORIGINAL RESEARCHES/

УДК 616-073.7:616.8-009.831:616.831-001-036.17 *DOI: 10.22141/2224-0713.6.100.2018.146457*

Кулик О.В.
Науково-практичний центр нейрореабілітації «Нодус», м. Бровари, Україна

Кількісні лінійні ЕЕГ-властивості біоелектричної активності головного мозку у хворих із синдромами посткоматозного порушення свідомості після тяжкої ЧМТ

Резюме. *В основу роботи покладено аналіз 220 хворих із посткоматозними розладами свідомості після тяжкої черепно-мозкової травми (ЧМТ). Дослідження присвячене питанням кількісного лінійного аналізу біоелектричної активності головного мозку, зареєстрованої за допомогою комп'ютерної електроенцефалографії (ЕЕГ), залежно від стадій посткоматозної свідомості за Т.А. Доброхотовою під час відновного лікування та реабілітації. У ній розкриваються особливості ключових кількісних лінійних властивостей ЕЕГ та проводиться аналіз маловивчених і спірних донині питань щодо високоінформативних показників, що найбільше корелюють з динамікою переходу на вищі стадії синдромів порушеної свідомості. На основі отриманих даних робиться висновок про значне переважання діагностичної інформативності кількісного лінійного аналізу ЕЕГ порівняно з рутинним (візуальним) аналізом, і тому для підвищення результативності електроенцефалографічної діагностики, а також посилення вірогідності отриманих ЕЕГ-показників у хворих із посткоматозними порушеннями свідомості після тяжкої ЧМТ, незалежно від стадії відновлення свідомості в процесі відновного лікування та реабілітації, рекомендується рутинний аналіз комп'ютерної ЕЕГ завжди доповнювати кількісним лінійним аналізом.*

Ключові слова: *електроенцефалографія; черепно-мозкова травма; посткоматозні порушення свідомості; патерни ЕЕГ; кількісний аналіз ЕЕГ*

Вступ

Поява нових кількісних лінійних методів аналізу електроенцефалографії (ЕЕГ) і обнадійливих експериментальних результатів дозволила поглибити не тільки науково ємкі дослідження в цій галузі, а перш за все підвищити інформативність ЕЕГ в практиці ведення тяжкої черепно-мозкової травми (ЧМТ) [13, 21, 28].

На сьогодні згадана методологія включає такі широко відомі інструменти, як просторова фільтрація при корекції артефактів очних рухів, аналіз незалежних компонент для виділення складових спонтанної ЕЕГ, спектральний, кореляційний, когерентний, періодметричний, порівняльний аналізи, вейвлет-аналіз, аналіз трендів та ін. [12, 13, 19]. Активне їх використання простежено у багатьох роботах, присвячених оцінці стану мозкових функцій у проміжному та віддаленому періодах ЧМТ [2, 23, 27, 29]. Зокрема, це стосується визначення кількісних ЕЕГ-критеріїв наявності інтегративної діяльності головного мозку та нейрофункціональних предикторів неврологічного дефіциту у хворих з посткоматозним синдромом пригнічення свідомості; розроблення критеріїв прогнозування динаміки посткоматозних станів на основі даних кількісного лінійного аналізу комп'ютерної ЕЕГ (крос-кореляційної та автокореляційної функцій), інтегрального показника відновлення, результатів клініко-інструментального зіставлення за допомогою медико-статистичних методів.

Ще в минулому сторіччі, на піку популярності рутинного аналізу ЕЕГ, у численних публікаціях

© «Міжнародний неврологічний журнал» / «Международный неврологический журнал» / «International Neurological Journal» («Meždunarodnyj nevrologičeskij žurnal»), 2018
© Видавець Заславський О.Ю. / Издатель Заславский А.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2018

Для кореспонденції: Кулик Олександр Васильович, кандидат медичних наук, ТОВ «Науково-практичний центр нейрореабілітації «Нодус», вул. Героїв УПА (Кирпоноса), 7а, м. Бровари, Київська обл., 07400, Україна; e-mail: a.kulyk@nodus.ua
For correspondence: O. Kulyk, PhD, Scientific and practical center of neuro-rehabilitation "Nodus", Heroyiv UPA str., 7a, Brovary, Kyiv region, 07400, Ukraine; e-mail: a.kulyk@nodus.ua

йшлося про когерентні закономірності в основних частотних діапазонах ЕЕГ, що описували зниження тонусу кори і в той же час посилення окремих зв'язків [2, 25]. Автори вказують, що при дослідженнях в онтогенезі ці зв'язки забезпечуються довгими асоціативними волокнами, значення яких полягає не стільки в реалізації сформованих функцій, скільки в забезпеченні можливостей їх становлення. Або це міжпівкульні діагональні зв'язки, що обумовлені, можливо, полісинаптичними комісуральними взаємодіями півкуль. Крім того, продемонстровано високу інформативність дослідження реактивних змін ЕЕГ у відповідь на індиферентні і функціонально значимі стимули для оцінки функціональних можливостей центральної нервової системи, патогенезу посттравматичних несвідомих станів.

Описані в рутинних дослідженнях ЕЕГ три основні типи патернів синдромів пригніченої свідомості: низькоамплітудної активності, генералізованої повільнохвильової активності, поліморфної дезорганізованої активності, стійкої до фотостимуляції [11], не мали специфічності та прогностичної сили виходу на вищі стадії відновленої свідомості. Більше того, не було виявлено переконливого зв'язку патернів ЕЕГ з особливостями вогнищевої неврологічної симптоматики, показниками мозкового кровотоку, вираженістю структурних змін головного мозку на магнітно-резонансній томографії (МРТ), комп'ютерній (КТ) і позитронно-емісійній томографії. Характерної скальпової ЕЕГ для таких хворих не існує.

Хоча ці висновки зроблені не так давно, проте донині ці питання залишаються спірними та маловивченими, а сучасні наукові повідомлення — часто суперечливими. Тому продовження досліджень в цьому напрямку зберігає свою актуальність та практичну цінність.

Мета дослідження: вивчити особливості показників кількісного лінійного аналізу комп'ютерної електроенцефалографії у хворих з постравматичними посткоматозними станами залежно від стадій порушеної свідомості за класифікацією Т.А. Доброхотової (1985) та з'ясувати наявність практичних об'єктивних діагностичних переваг даного виду дослідження перед рутинною ЕЕГ в обстеженні пацієнтів з даною патологією.

Матеріали та методи

В основу роботи покладено аналіз 220 хворих із травматичними посткоматозними розладами свідомості, які обстежувалися і проходили курси нейрореабілітаційного лікування в ДУ «Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України» та в ТОВ «Науково-практичний центр нейрореабілітації «Нодус» з січня 2007 по липень 2018 року включно.

Комп'ютерні електроенцефалографічні дослідження (КЕЕГ) виконувалися в усіх без винятку хворих (100 %, n = 220), визначені контрольні точки реабілітаційного маршруту, а також під час окремих занять, таких як, наприклад, вертикалізаційні заняття, чи спеціалізованих процедур зорової та слухової стимуляції головного мозку. Проте у випадках, коли пацієнт достроково досягав того чи іншого рівня посткоматозного синдрому відновлення свідомості або затримувався на якомусь етапі більше, ніж прогнозувалося, виникала необхідність додаткових ЕЕГ-обстежень. Найчастіше (36,8 %, n = 81) для цього використовували холтер-ЕЕГ-моніторинг протягом 24 годин.

Усього виконано 896 КЕЕГ, що становить в середньому 4 дослідження на одного хворого. Праворукими були 91,3 % (n = 201) досліджуваних хворих (11 — переучені на праворуких), а 18,7 % (n = 19) — ліворукими.

В кожному випадку рутинна КЕЕГ доповнювалася кількісною електроенцефалографією з її лінійними та нелінійними методами аналізу. Сценарій хоч включав два послідовні обстеження, аналізувався цілісно і для синдромів посткоматозного порушення свідомості (СППС) (прояви синдрому, його стадії вважалися клінічними корелятами в кореляційній парі ознак [24, 26]), допоміг виявити найбільш характерні кількісні лінійні ЕЕГ-властивості у досліджуваних хворих.

У межах групи синдромів за Т.А. Доброхотовою (1985) такі постадійні ЕЕГ-властивості хоча і зафіксовані з різною вираженістю, однак проявляли схожі кореляції не тільки з конкретною стадією, але й з найближчими сусідніми стадіями одного і того ж синдрому (від $r \geq 0{,}75$ до $r < 0{,}85$). Через це сформувалася численна низка кореляційних пар ознак ($\Sigma (n_1....n_n) = 847$).

З метою максимальної об'єктивізації результатів кількісного лінійного аналізу ЕЕГ і подальшої систематизації, а також виділення найбільш значимих ЕЕГ-характеристик [7], з яких чимало вже детально описані в літературі [3, 10], розрахували інформативність (чутливість, специфічність) та інтегральний індекс відтворюваності (ІІВ; відношення кількості повторів окремих ЕЕГ-властивостей, виявлених у числа вибірки *n* в кількості досліджень *N* за час $t \times 100$ %) [1].

Якщо зареєстровані у цих хворих ЕЕГ-властивості мали високу кореляцію ($r \geq 0{,}75$) з клінічною картиною синдрому і інформативність: чутливість, специфічність не нижчу за 70 % [1], вони претендували бути віднесеними до синдромних властивостей ЕЕГ. Проте виявилося, що вирішальне значення для остаточного відбору таких особливостей серед кореляційних пар ознак з високою кореляцією мав саме ІІВ [13] тих чи інших ЕЕГ-властивостей у різних пацієнтів, які проходять одні і ті ж стадії відновлення свідомості. Нижня межа ІІВ, що мала кореляційний зв'язок з синдромом $r \geq 0{,}75$, становила 10,3 %. Ознаки, ІІВ яких був меншим за 10,3 %, відхилялися. У зв'язку з цим кінцевий перелік найбільш властивих лінійних ознак суттєво зменшився.

Лінійні кількісні ЕЕГ-властивості формувалися з результатів спектрального та кореляційного ана-

лізу і, аналогічно до візуальних, вивчалися в межах кожної стадії синдрому посткоматозного порушення свідомості.

Для дослідження взаємодії різних утворень головного мозку парний когерентний аналіз не використовувавсяз огляду на велику кількість обґрунтованих зауважень, що стосуються його похибок [15].

Топографію і вираженість ушкодження мозку визначали на основі методів нейровізуалізації КТ і МРТ при надходженні пацієнтів на відновне лікування та реабілітацію, а також в динаміці. У всіх хворих неодноразово виконані лабораторні біохімічні дослідження, проведені консультації суміжних спеціалістів.

Статистичну обробку отриманих даних проводили з використанням пакета прикладних програм Statistica 6, пакета комп'ютерного аналізу Office Excel 2016, вибіркового методу: вибіркової середньої, похибки середньої; для визначення вірогідності різниці між групами — непараметричні метод: критерій χ^2 для порівняння якісних показників та t-критерій для порівняння кількісних параметрів; для порівняння двох незалежних груп — метод Манна — Уїтні

Результати

Порівняно з візуальними властивостями лінійні кількісні об'єктивні ЕЕГ-показники з огляду на критерії математичного аналізу і сучасні передові алгоритми перетворення [8, 9] виявилися менш численними за своїми комбінаціями, але в той час значно інформативнішими (min показник I ≥ 82 % проти min показника I ≥ 72 %), маючи вищі прохідні ІІВ (min показник ІІВ ≥ 34 % проти min показника ІІВ ≥ 11 %) для кожної зі стадій посткоматозних синдромів.

Як відомо [20], стабільність частотних показників хоч і не прив'язана до структурних змін в речовині мозку, має найбільше прогностичне значення для оцінки змін біоелектричної активності (БЕА) у хворих з тяжкою ЧМТ. Саме спектральний аналіз надав об'єктивну детальну оцінку частотного складу ЕЕГ в кількісних величинах: потужність та амплітуда за час t.

Оцінка спектральної потужності (СП) для δ, θ, α_1, α_2, β_1, β_2 частотних діапазонів на різних стадіях посткоматозного періоду травматичної хвороби на базі відносних канонограм показала малу інформативність і індивідуальний характер цих індексів.

Таблиця 1. Градієнтний розподіл найбільш інформативних показників спектрограм залежно від стадії синдрому посткоматозного порушення свідомості та ІІВ

Стадія синдромів		Показник, характеристика спектрограми	ІІВ, %
1		2	3
Динаміка відновлення свідомості, стадія з максимально вираженими ЕЕГ-властивостями	1-ВС (n = 220)	Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра перевищує 30 %, але не вища за 51 %, особливо в передньоцентральних відділах	81
		Виявлено градієнт амплітудного асинхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (1 і 3 Гц), магнітуда спектра — лобово-центральні відділи	78
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні, максимальна потужність в лобово-центральних відділах	76
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні та додаткового піку в тета-діапазоні, переважно в задніх відділах	62
		Спектральний індекс дельта-ритму ≥ 37 %, зміщення середньої частоти в сторону повільних ритмів (fсер = 2,3 Гц)	51
		Варіабельність потужних характеристик спектрограм в одного хворого в межах трьох послідовних досліджень протягом 3 місяців	37
		Шумовий характер спектрограми в усіх відділах при наявності чіткого піку в дельта-діапазоні в передніх відділах	35
	2А-АКМ (n = 196)	Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра перевищує 30 %, але не вища за 51 %, особливо в передніх відділах	76
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні, максимальна потужність в лобово-центральних відділах	75
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні та додаткового піку в тета-діапазоні, переважно в задніх відділах	68
		Зберігається градієнт амплітудного асинхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (1 і 3 Гц), магнітуда спектра — лобово-центральні відділи	55
		Спектральний індекс дельта-ритму ≥ 37 %, зміщення середньої частоти в сторону повільних ритмів (fсер = 2,3 Гц)	49
		Шумовий характер спектрограми в усіх відділах при наявності чіткого піку в дельта-діапазоні в передніх відділах	34

Продовження табл. 1

1		2	3
	2Б-ГКМ (n = 181)	Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні та додаткового піку в тета-діапазоні, переважно в задніх відділах	79
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра перевищує 30 %, але не вища за 51 %, особливо в передніх відділах	70
		Зберігається градієнт амплітудного асинхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (1 і 3 Гц), магнітуда спектра — лобово-центральні відділи	53
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні, максимальна потужність в лобово-центральних відділах	50
		Спектральний індекс дельта-ритму ≥ 37 % в передніх відділах, зміщення середньої частоти в сторону повільних ритмів (fсер = 2,3 Гц)	46
		Шумовий характер спектрограми в усіх відділах (особливо скроневі) при наявності чіткого піку в дельта-діапазоні в передніх відділах	37
	3А-АКМ з ЕР (n = 175)	Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні та додаткового піку в тета-діапазоні, переважно в задніх відділах	81
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра перевищує 30 %, але не вища за 40 %, особливо в передніх відділах	62
		Зберігається градієнт амплітудного асинхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (1 і 3 Гц), магнітуда спектра — лобово-центральні відділи	50
		Спектральний індекс дельта-ритму ≥ 37 %, зміщення середньої частоти в сторону повільних ритмів (fср = 2,3 Гц)	43
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні, максимальна потужність в лобово-центральних відділах	42
		Шумовий характер спектрограми в усіх відділах (особливо скроневі) при наявності чіткого піку в дельта-діапазоні в передніх відділах	35
	3Б-ГКМ з ЕР (n = 170)	Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні та додаткового піку в тета-діапазоні, переважно в задніх відділах	84
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 35 %, особливо в передніх відділах	65
		З'являється градієнт амплітудного синхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (3 Гц), магнітуда спектра — лобові відділи	58
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 35 %, тенденція до зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fср = 4,5 Гц)	42
		Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні, максимальна потужність в лобово-центральних відділах	38
		Шумовий характер спектрограми в усіх відділах (особливо скроневі) при наявності чіткого піку в дельта-діапазоні в передніх відділах	34
	4-М з РМ (N=167)	Присутність основного піку активності в дельта-діапазоні та додаткового піку в тета-діапазоні, переважно в задньоцентральних відділах	75
		Розширення частотного складу спектра до тета- і альфа-діапазону	67
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 30 %, особливо в передніх відділах	61
		Утримується градієнт амплітудного синхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (3 Гц), магнітуда спектра — лобові відділи	59
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 30 %, тенденція до зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fср = 5,7 Гц)	37
		Наявність основного піку активності в тета-діапазоні, (max мкВ/√Гц : задньоцентральні ділянки) та додаткових піків в дельта-, альфа-діапазонах	63
	5-ДМ (n = 161)	Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 20 %	61
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 25 %, особливо в передніх відділах	53

Продовження табл. 1

1		2	3
		Утримується градієнт амплітудного синхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (3 Гц), магнітуда спектра — лобові відділи	37
		Зростання ≥ 23 % потужності альфа-діапазону в лобово-центральних відділах з тенденцією до градієнта ↑ в потиличних відділах	36
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 35 %, тенденція до зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fсер = 7,9 Гц)	35
	6А-СПС з А (n = 138)	Розширення частотного складу спектра до альфа- і бета-діапазону	74
		Наявність основного піку активності в тета-діапазоні, (max мкВ/√Гц : задньоцентральні ділянки) та додаткових піків в дельта-, альфа-, бета-діапазонах	65
		Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 20 %	59
		Міжпівкульна асиметрія потужності альфа-спектра в центрально-тім'яних відділах не перевищує 25 %	49
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 21 %, особливо в лобово-центрально-тім'яних відділах	43
		Зростання ≥ 11 % потужності спектра альфа-діапазону в лобово-потиличному напрямку, поява чіткого градієнта	41
		Утримується градієнт амплітудного синхронного спектра домінуючого дельта-діапазону (3 Гц), магнітуда спектра — лобово-центральні відділи	35
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 30 %, зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fсер = 7,10 Гц)	35
	6Б-МРСС (n = 112)	Зростання потужності спектра асинхронної активності бета-діапазону ≥ 13 %	34
		Наявність основного піку активності в тета-діапазоні, (max мкВ/√Гц : задньоцентральні ділянки) та додаткових піків в дельта-, альфа-, бета-діапазонах	73
		Асинхронний спектр частот бета-діапазону з піками 15, 20, 23 Гц з тенденцією до зсуву у діапазон високих частот на фоні зниження амплітуди спектра	58
		Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 20 %	51
		Міжпівкульна асиметрія потужності альфа-спектра в центрально-тім'яних відділах не перевищує 20 %	48
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 17 %, особливо в лобово-центрально-тім'яних відділах	44
		Зростання ≥ 7 % потужності спектра альфа-діапазону в лобово-потиличному напрямку, поява чіткого градієнта	41
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 26 %, зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fсер = 7,10 Гц)	38
		Зростання потужності спектра асинхронної активності бета-діапазону ≥ 7 %	36
	6В-АСС (n = 93)	Наявність основного піку активності в тета-діапазоні, (max мкВ/√Гц : задньоцентральні ділянки) та додаткових піків в дельта-, альфа-, бета-діапазонах	77
		Зменшення асинхронності спектра частот бета-діапазону з тенденцією до зсуву у діапазон низьких частот на фоні наростання амплітуди спектра	63
		Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 20 %	59
		Міжпівкульна асиметрія потужності альфа-спектра в центрально-тім'яних відділах не перевищує 20 %	51
		Зростання ≥ 5 % потужності спектра альфа-діапазону, чіткий каудальний градієнт потужності спектра	50
		Зростання потужності спектра синхронної активності бета-діапазону ≥ 4 %, поява асинхронної активності альфа-спектра на ахромат. фотостимуляцію	46
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 17 %, особливо в лобово-центрально-тім'яних відділах	39

Закінчення табл. 1

1		2	3
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 25 %, зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fсер = 10–13 Гц)	34
	7А-ДС (n = 72)	Синхронний спектр частот бета-діапазону з піками 15, 20 Гц з тенденцією до зсуву у діапазон низьких частот на фоні зростання амплітуди спектра	73
		Наявність основного піку активності в тета-діапазоні, (max мкВ/√Гц : задньоцентральні ділянки) та додаткових піків в дельта-, альфа-, бета-діапазонах	71
		Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 20 %	66
		Міжпівкульна асиметрія потужності альфа-спектра в центрально-тім'яних відділах не перевищує 20 %	57
		Зростання ≥ 3 % потужності спектра альфа-діапазону, чіткий каудальний градієнт потужності спектра	54
		Зменшення асинхронності активності альфа-діапазону, зменшення вираженості і спектральної потужності тета-діапазону (у т.ч. на гіпервентиляцію)	48
		Відновлення насиченості спектра в передніх відділах ГМ порівняно з задніми відділами	47
		Зростання потужності спектра синхронної активності бета-діапазону ≥ 7 %	43
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 20 %, особливо в лобово-центрально-тім'яних відділах	36
		Спектральний індекс дельта-ритму ≤ 25 %, зміщення середньої частоти в сторону більш швидких ритмів (fсер = 10–13 Гц)	34
	7Б-КС (n = 56)	Наявність основного піку активності в альфа-діапазоні, (max мкВ/√Гц : задньоцентральні ділянки) та додаткових піків, тета-, бета-діапазонах	76
		Міжпівкульна асиметрія потужності альфа-спектра в центрально-тім'яних відділах не перевищує 15 %	73
		Стабілізація потужності спектра альфа-діапазону, чіткий каудальний градієнт потужності спектра	69
		Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 10 %	64
		Зростання синхронності активності альфа-діапазону і спектральної потужності тета-діапазону на гіпервентиляцію	57
		Зростання потужності спектра синхронної активності бета-діапазону ≥ 3 %	45
		Синхронний спектр частот бета-діапазону з піками 15, 20 Гц з тенденцією до зсуву у діапазон низьких частот на фоні зростання амплітуди спектра	41
		Насиченість спектра в передніх відділах більша, ніж у задніх відділах	40
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 15 %, особливо в лобово-центрально-тім'яних відділах	37
		Відношення сумарної спектральної потужності в передніх відділах до задніх СМ FpT/СМ СО 3/4,5	36
	8-ЯС з КЕР (n = 46)	Наявність синхронної активності альфа-діапазону та основного піку активності в альфа-діапазоні та додаткових піків, тета- і, рідко, бета-діапазонах	83
		Зменшення спектральної потужності β-активності, особливо в потилично-тім'яних відведеннях	73
		Підвищення потужності синхронної активності тета-діапазону по всіх відділах	72
		Зниження потужності альфа-діапазону в потилично-тім'яних відділах, зростання потужності активності бета-діапазону в лобних відділах	69
		Локальне зниження спектральної потужності над потилично-тім'яними відділами на фоні синхронізованого альфа-ритму	63
		Інверсія градієнта спектра активності альфа-діапазону на рівні тім'яних відділів	56
		Насиченість спектра в передніх відділах більша, ніж у задніх відділах	51
		Міжпівкульна асиметрія потужності альфа-спектра в центрально-тім'яних відділах не перевищує 15 %	47
		Міжпівкульна асиметрія потужності тета-спектра в лобово-центральних відділах не перевищує 10 %	38
		Міжпівкульна асиметрія потужності дельта-спектра не перевищує 15 %, особливо в лобово-центрально-тім'яних відділах	34

У випадках, коли величина їх ІІВ ≥ 34 %, вони були віднесені до загальносиндромних кількісних властивостей. Однак їх прогностичне значення не підтвердилося.

Розподіл показників спектрального аналізу в динаміці відновлення свідомості подано в табл. 1.

Проаналізувавши наведені в табл. 1 спектральні показники, ми встановили, що для більшості стадій посткоматозного порушення свідомості виявилися одні і ті ж характеристики з різними значеннями ІІВ, які відображали тенденції та напрямок позитивної еволюції того чи іншого біоелектричного явища (коли ІІВ якоїсь ознаки в динаміці знижувався або наростав серед числа обстежених, вказуючи на зменшення або збільшення сили внеску в кількісну ЕЕГ-картину). Однак з переходом до вищих стадій відновленої свідомості спектральний поліморфізм наростав, з'являлися нові інформативні спектральні властивості (табл. 1), а ті, що мали найменший ІІВ, — зникали. Ця залежність підтверджена сильним зворотним кореляційним зв'язком (r = 83) і свідчить про те, що у цієї категорії хворих численна візуальна палітра графоелементів і патернів, які донині продовжують класифікувати за різними принципами [5, 6, 16, 18], в межах певної низки значень і послідовностей зрештою зводиться до одних і тих же кількісних закономірностей, що відображають їх спільні глибші властивості.

Оскільки з розвитком вегетативного статусу реєстрували ЕЕГ-спрощення БЕА (відсутність реактивного альфа-, бета-ритму та ін.), то цілком очікувано, що з відновленням свідомості, коли БЕА реалізується найскладнішим чином, кількість варіантів високоінформативних спектральних показників, що відтворюються у найбільшому числі досліджень, зросла, навіть тоді, коли поліморфізм візуальних властивостей зменшився (біоелектрика переходить на більш тонкі рівні, візуально не помітні). Саме через ці особливості кореляції з клінічними проявами рівня свідомості об'єктивність спектрального аналізу ЕЕГ в проведених дослідженнях не викликала сумнівів.

В результаті аналізу внесків кожного з вищенаведених кількісних спектральних показників встановлено, що частотне розширення спектра за рахунок спочатку тета-, потім альфа- і бета-діапазонів з міграцією основного піку частот від дельта- до альфа-діапазону (↑ мкВ/√Гц) індивідуальна стабільність потужних характеристик (середньої потужності) спектрів в межах конкретної стадії з варіативністю реагування на подразники, зростання індексу активності домінуючої гармоніки із зменшенням її асинхронності, зростання індексу бета-ритму, але наявністю в спектрі не більше двох піків з частотою < 20 Гц, зниження індексу дельта-ритму та його міжпівкульної асиметрії (≤ 20 %) в передніх, передньоцентральних відділах головного мозку, виявилися вирішальними кількісними корелятами та ранніми предикторами динаміки відновлення свідомості, які особливо в стадіях синдрому пригніченої свідомості та перехідних синдромах випереджали клінічні прояви в середньому на 10 діб (± 3).

Слід відмітити, що у 24,57 % (n = 43, загальна кількість — 175) пацієнтів на стадії акінетичного мутизму з емоційними реакціями та у 12,35 % (n = 21, загальна кількість — 175) на стадії гіперкінетичного мутизму, при візуальній відсутності домінування якогось ритму і наявності дезорганізованої активності, насиченої різноманітними патернами, саме спектральний аналіз визначав наявність чіткого піку з широкою основою в дельта- чи тета-діапазонах, вказуючи на нестабільний ритм з більш низькими складовими в суміжних діапазонах.

Варіабельність потужних характеристик спектрів з ареактивністю чи однотипністю реакцій на подразники в одного і того ж пацієнта в межах клінічної стадії посткоматозного синдрому порушеної свідомості мала високу пряму кореляцію (r = 79) з тривалим перебуванням пацієнта на даній стадії. Також ця особливість виявлена у 19 з 24 хворих, які так і залишилися в вегетативному стані протягом 1 року з моменту тяжкої ЧМТ, на фоні потужностної асиметрії з вираженою частотною, міжпівкульною асиметрією активності в дельта-діапазоні (≥ 37 %).

Після визначення вищеописаних спектральних властивостей ЕЕГ оборотних станів посткоматозної порушеної свідомості та випадків перманентного ВС важливо було з'ясувати еквівалентний рівень функціонального збереження/руйнування міжпівкульних, внутрішньопівкульних таламокортикальних, кортико-кортикальних зв'язків, що забезпечують інтегративну діяльність регуляторних систем під час відновлення свідомості [4, 23], особливо коли візуальні патерни та спектральні характеристики видаються вкрай різними чи надто схожими.

Використовуючи з цією метою кореляційний аналіз, виявили найбільш інформативні пари відведень: F_3-O_1, F_4-O_2, Fz-Oz; Fp_1-O_{13}, Fp_2-O_2; F_7-O_1, F_8-O_2; Fp_1-P_3, Fp_2-P_4, які до того ж мали інші спільні риси: а) максимальна дистанція один відносно одного; б) проекція над ділянками з вираженими таламокортикальними зв'язками; в) проекція на ділянки кори, які беруть найбільшу участь в інтегративній діяльності [17] і реакціях на зовнішній подразник — монохромний світловий спалах в пробах активації. Застосувавши до цих пар автокореляційну функцію (АКФ) для виділення гармонічних (з високою періодичністю/ритмічністю) коливань в випадковому процесі та крос-кореляційну функцію (ККФ), щоб кількісно оцінити ступінь схожості активності в двох різних точках мозку, її зв'язки, загальні компоненти, часові відношення різних ритмів, кількісні лінійні властивості ЕЕГ доповнили кореляційними показниками, наведеними в табл. 2.

Як свідчать дані табл. 2, показники корелограм, на відміну від попередніх методів аналізу ЕЕГ, в динаміці відновлення свідомості мали принципово нові закономірності розподілу. Виявлені значення після розрахунку інформативності та ІІВ (прохідно-

го ІІВ) сформували лише дві групи показників. Перша група стосувалася тільки синдрому пригніченої свідомості, а в другу ввійшли показники для решти синдромів.

Така особливість отриманих результатів пов'язана з установленою високою кореляцією ($r \geq 0,8$) цих показників саме з комунікативними можливостями пацієнтів в двох принципово різних періодах відновлення свідомості (періоду, коли посткоматозна свідомість еволюціонує, але залишається все одно за своєю формою пригніченою: пацієнт при цьому неконтактний чи вкрай обмежений в контакті, а також періоду, коли свідомість еволюціонує і відновлюється: пацієнт контактний і контактність тільки наростає).

Інтегративна діяльність мозку знаходить найбільше відображення у здатності до комунікації та адекватного реагування на зовнішні подразники, в тому числі на зміну середовища, тому подані в табл. 2 показники корелограм відповідним чином і характеризують досліджувані зв'язки, котрі впливають на таку інтегративну діяльність в динаміці відновлення свідомості [1]. Розмістившись у кожній з груп градієнтно відповідно до ІІВ, кореляційні показники демонструють дві основні прогностично важливі тенденції: наростання ритмічності процесів в тета- і альфа-діапазонах над ділянками, відповідальними за інтегративні функції [22], а також зростання сили цих зв'язків без часового зсуву між

Таблиця 2. Градієнтний розподіл показників корелограм з високою інформативністю на основі їх ІІВ залежно від стадії СППС

Стадія синдромів		Показник, характеристика корелограми	ІІВ, %
Динаміка відновлення свідомості, стадія з максимально вираженими ЕЕГ-властивостями	1-ВС (n = 220) 2А-АКМ (n = 196) 2Б-ГКМ (n = 181) 3А-АКМ з ЕР (n = 175) 3Б-ГКМ з ЕР (n = 170) 4-М з РМ (n = 167) 5-ДМ (n = 161)	АКФ в діапазоні 0,1–0,4 по всіх відведеннях, процеси не ритмічні, низький рівень подібності	82
		Середня частота АКФ < 4 Гц; дифузно — без зональних відмінностей	81
		Низька періодичність тета-ритму, найбільше виражений в лобових відділах	79
		Висока періодичність дельта-ритму над всіма відведеннями, без градієнта	74
		ККФ в діапазоні 0,1–0,4 в задніх відділах (зв'язок слабкий), часовий зсув > 20 мс	71
		ККФ в передніх відділах 0,4–0,6, середня частота ККФ < 7	68
		Висока періодичність тета-ритму, часовий зсув в межах півкуль відсутній, а між півкулями становить до 80 мс	64
		Варіабельність величин ККФ при часову зсуві > 40 мс, особливо в передніх відділах	58
		Низька періодична складова кореляційних зв'язків між лобовими та потиличними ділянками в межах півкулі	57
		На світлові подразники відсутнє/незначне наростання ККФ, утримуються часовий зсув, періодичність в передніх відділах утримується	55
		Різко знижені показники ККФ між скроневою та тім'яними ділянками як в середині півкулі, так і між півкулями	50
		Переважають негативні значення АКФ та різке зниження ККФ на ділянках вогнищевого ураження згідно з даними СКТ	49
		Швидке затухання АКФ над задніми відділами, інтервал < 150 мс	43
	6А-СПС з А (n = 138) 6Б-МРСС (n = 112) 6В-АСС (n = 93) 7А-ДС (n = 72) 7Б-КС (n = 56) 8-ЯС з КЕР (n = 46)	Висока періодичність альфа-ритму, низька періодичність інших ритмів на фоні відсутності часового зсуву між симетричними ділянками півкуль	80
		ККФ в передніх відділах 0,7–0,9, домінують неперіодичні коливання	77
		Середня частота АКФ > 8 Гц	69
		Переважання періодичної компоненти в задніх відділах, повна міжпівкульна синфазність коливань	65
		ККФ в задніх відділах 0,4–0,6, домінують періодичні коливання	60
		Сильні кореляційні зв'язки між центральними відділами в межах півкулі та між півкулями на середній частоті > 12 Гц	57
		Часовий зсув між тім'яними та потиличними відділами однієї півкулі залишається в діапазоні до 30 мс	52
		На світлові подразники наростає ККФ, зникає часовий зсув, зростає неперіодичність в передніх і задніх відділах	44
		Повільне затухання АКФ в передніх і задніх відділах, інтервал > 150 мс < 400 мс	41
		Середня частота ККФ > 10 Гц	40

симетричними ділянками різних півкуль і нормалізацію часового зсуву між передніми і задніми відділами півкуль мозку під час зростання контактності пацієнтів і переходу на вищі рівні посткоматозної свідомості. Примітно, що у пацієнтів, які упродовж 1 року залишалися у ВС, з часом (після 9-го місяця з моменту тяжкої ЧМТ) також зареєстровані сильні зв'язки між лобово-тім'яними відділами однієї півкулі, але значення показника крос-кореляції були негативними (зі знаком «–»). Ці зв'язки вважалися патологічними. Крім того, АКФ у таких пацієнтів стійкі ритмічні процеси не виявляла, хоча візуальні патерни свідчили за наявність ритму. Навіть проведення фотостимуляції 1–30 Гц до наростання показника крос-кореляції не призводило: часовий зсув двох симетричних ділянок обох півкуль не зникав (ЧС > 0), що свідчило про асинфазність активності потиличної і лобової ділянок. Крос-кореляційні зв'язки зони безпосереднього ураження мозку (СКТ зіставлення) з віддаленими ділянками кори різко знижувалися.

В той час у хворих, які перейшли до стадії 6А за Т.А. Доброхотовою (1985) (друга група показників згідно з табл. 2), АКФ фіксувала стійкість альфаритму в пробах активації на ритмічний спалах, коли візуальні патерни відображали його депресію над потиличними ділянками кори і появу загальної десинхронізації ритміки, особливо над центральними ділянками, де рівень зниження амплітуди був такий же, як і над потиличними.

Висновки

1. АКФ і ККФ демонстрували клінічно значиму різницю лінійних властивостей ЕЕГ між різними групами синдромів, навіть у випадках з прихованими відмінностями частотного аналізу та візуальної оцінки ЕЕГ, і виявляли об'єктивні ознаки перебудови ЕЕГ, коли вона візуально здавалася слабкою чи маскувалася якимось іншим, переважаючим за амплітудою ритмом фонових коливань, чим підтвердили значне переважання діагностичної інформативності порівняно з рутинною ЕЕГ.

2. Для підвищення результативності електроенцефалографічної діагностики, а також посилення вірогідності отриманих ЕЕГ-показників у хворих із посткоматозними порушеннями свідомості після тяжкої ЧМТ, незалежно від стадії відновлення свідомості в процесі відновного лікування та реабілітації, рекомендовано рутинний аналіз КЕЕГ завжди доповнювати кількісним лінійним аналізом.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). — М.: МЕДпресс-информ, 2004. — С. 349-420.

2. Гурская О.Е. Электрофизиологический мониторинг центральной нервной системы / Под ред. В.Н. Цыгана. — СПб.: ООО «ОНФД», 2015. — С. 115-118.

3. Добронравова И.С. Реорганизация электрической деятельности мозга человека при угнетении и восстановлении сознания (церебральная кома): Дис... д-ра биол. наук: 03.00.13 / Ирина Сергеевна Добронравова. — М., 1996. — 76 с.

4. Евтушенко С.К., Омельяненко А.А. Клиническая электроэнцефалография у детей. — Донецк: Изд-во «Донеччина», 2006. — 850 с.

5. Жирмунская Е.А. Клиническая электроэнцефалография. — М.: МЭЙБИ, 2005. — 118 с.

6. Захаров С.М., Скоромохов А.А. Практическое применение компьютерной электроэнцефалографии. — Таганрог: НПКФ «Медиком МТБ», 2009. — С. 16-25.

7. Иванов Л.Б. Прикладная компьютерная электроэнцефалография / Л.Б. Иванов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М., 2004. — 352 с.

8. Иванов Л.Б. Распознавание артефактов и некоторые сложности практического анализа компьютерной ЭЭГ / Л.Б. Иванов, В.С. Шалыгин. — М., 2007. — С. 4-10.

9. Котляр Б.И. Пластичность нервной системы. — М., 2010. — 226 с.

10. Королева Н.В., Колесников С.И., Воробьев С.В. Феноменологический атлас по клинической электроэнцефалографии. — Иркутск: ГУ НЦ МЭ ВСНЦ СО РАМН, 2013. — 102 с.

11. Кропотов Ю.Д. Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия: Пер. с англ. под. ред. В.А. Пономарева. — Донецк: Издатель Заславский А.Ю., 2010. — С. 125-129.

12. Кулаичев А.П. Об информативности когерентного анализа // Журнал высшей нервной деятельности. — 2009. — Т. 59. — С. 766-775.

13. Кулаичев А.П. Погрешности когерентного анализа ЭЭГ / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Количественная ЭЭГ и нейротерапия». — СПб., 2009. — С. 31.

14. Сальваторе Маджино. Клиническая диагностика комы // Секреты клинической диагностики. — М.: Бином, 2006. — С. 500-525.

15. Сайко О.В. Неврологічні симптоми в гострому періоді струсу головного мозку на стані медичної евакуації // Международный неврологический журнал. — 2018. — № 2. — С. 19-28.

16. Малахов В.Н., Личка В.С. Сучасні аспекти діагностики та лікування хронічної травматичної енцефалопатії (огляд літератури) // Международный неврологический журнал. — 2017. — № 9. — С. 21-26.

17. Матяш М.Н., Худенін Л.І. Мультімедійний підхід в лікуванні віддалених наслідків закритої черепно-мозкової травми // Международный неврологический журнал. — 2018. — № 3(97). — С. 28-32.

18. Медицинская реабилитация / Под ред. В.М. Боголюбова. — М., 2010. — С. 22-25.

19. Редька І.В., Майоров О.Ю. Спектральні характеристики фонової електроенцефалограми дітей із зоровою дисфункцією // Нейрофізіологія. — 2014. — Т. 46, № 2. — С. 170-173.

20. Турдубаева Г.Т. Классификация электроэнцефалограмм (обзор литературы) // Вестник КРСУ. — 2015. — Т. 15, № 7. — С. 156-158.

21. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей / Л.Р. Зенков, М.А. Ронкин. — 4-е изд. — М.: МЕДпресс-информ, 2011. — С. 44-46.

22. Черний В.И. Исследование ЭЭГ-предикторов нейромедиаторной и нейроглиальной активности, особенностей перестройки межцентральных отношений мозга у пациентов с тяжелой ЧМТ // Международный неврологический журнал. — 2016. — № 5(83). — С. 41-54.

23. Шарова Е.В. Асимметрия когерентности ЭЭГ при посткоматозных бессознательных состояниях после тяжелой черепно-мозговой травмы. — М.: Научный мир, 2004. — С. 558-578.

24. Шарова Е.В. Современные возможности ЭЭГ в анализе функциональных нарушений при тяжелых повреждениях головного мозга / Е.В. Шарова // Нейронауки: теоретические и клинические аспекты. — 2009. — Т. 5, № 1–2. — С. 49-58.

25. Шарова Е.В., Челяпина М.В., Коробкова Е.В. и др. ЭЭГ-корреляты восстановления сознания после тяжелой черепно-мозговой травмы // Журн. вопр. нейрохир. — 2014. — № 1. — С. 14-15.

26. Шкалы в общей и детской неврологии / Под ред. С.К. Евтушенко. — К., 2015. — 104 с.

27. Automated EEG entropy measurements in coma, vegetative state/unresponsive wakefulness syndrome and minimally conscious state / O. Gosseries, C. Schnakers, D. Ledoux et al. // Funct. Neurol. — 2011. — Vol. 36. — P. 25-30.

28. Bagnato S. Common criteria for electroencephalographic evaluation in patients with disorders of consciousness / S. Bagnato, C. Boccagni, G. Galardi // Ann. Neurol. — 2015. — Vol. 77, № 1. — P. 184-185.

29. Mer. J. Stern R. Chonic Traumalic Encephalopebry // Curr. Neurol. Neurosei. Rep. — 2013. — № 13. — P. 407-417.

Отримано 14.07.2018

Кулик А.В.
Научно-практический центр нейрореабилитации «Нодус», г. Бровары, Украина

Количественные линейные ЭЭГ-свойства биоэлектрической активности головного мозга у больных с синдромами посткоматозного нарушения сознания после тяжелой ЧМТ

Резюме. В основу работы положен анализ 220 больных с посткоматозными расстройствами сознания после тяжелой черепно-мозговой травмы (ЧМТ). Исследование посвящено вопросам количественного линейного анализа биоэлектрической активности головного мозга, зарегистрированной с помощью компьютерной электроэнцефалографии (ЭЭГ), в зависимости от стадий посткоматозного сознания по Т.А. Доброхотовой в ходе восстановительного лечения и реабилитации. В ней раскрываются особенности ключевых количественных линейных свойств ЭЭГ и проводится анализ малоизученных и спорных до сих пор вопросов относительно высокоинформативных показателей, которые наиболее коррелируют с динамикой перехода на более высокие стадии синдромов нарушенного сознания. На основе полученных данных делается вывод о значительном преобладании диагностической информативности количественного линейного анализа ЭЭГ по сравнению с рутинным (визуальным) анализом, и поэтому для повышения результативности электроэнцефалографической диагностики, а также усиления достоверности полученных ЭЭГ-показателей у больных с посткоматозными нарушениями сознания после тяжелой ЧМТ, независимо от стадии восстановления сознания в процессе восстановительного лечения и реабилитации, рекомендуется рутинный анализ компьютерной ЭЭГ всегда дополнять количественным линейным анализом.

Ключевые слова: электроэнцефалография; черепно-мозговая травма; посткоматозные нарушения сознания; паттерны ЭЭГ; количественный анализ ЭЭГ

O.V. Kulyk
Scientific and Practical Center of Neurorehabilitation "Nodus", Kyiv, Ukraine

Quantitative linear EEG-properties of brain bioelectric activity in patients with syndromes of post-coma disorders of consciousness after severe traumatic brain injury

Abstract. The work is based on the analysis of 220 patients with post-coma disorders of consciousness after severe traumatic brain injury. The research deals with the questions of quantitative linear analysis of brain bioelectrical activity recorded with the help of computed electroencephalography (EEG), depending on the stages of post-coma consciousness, according to T.A. Dobrokhotova, during restorative treatment and rehabilitation. It reveals the features of the key quantitative linear properties of EEG, and the analysis is performed of poorly-researched and controversial issues concerning highly informative indicators fully correlated with the dynamics of transition to higher stages of syndromes of impaired consciousness. On the basis of the obtained data, the conclusion is made about a significant predominance of diagnostic informativity of quantitative linear EEG analysis in comparison with routine (visual) analysis. Therefore, in order to increase the effectiveness of electroencephalographic diagnosis and enhance the reliability of the obtained EEG indices in patients with post-coma disorders of consciousness after severe traumatic brain injury, regardless of the stage of recovery of consciousness during restorative treatment and rehabilitation, it is always advisable to supplement the routine computed EEG analysis with quantitative linear analysis.

Keywords: electroencephalography; traumatic brain injury; post-coma disorders of consciousness; electroencephalographic patterns; quantitative electroencephalography analysis