

УДК 612.825.1:[577.35+616.8-073.97]
DOI <https://doi.org/10.32782/2077-6594/2023.2/14>

Комаровський М.С., Подгорна А.Д., Ковальчук О.В.,
Гавришчук Б.Г., Золоторьов П.В.

Komarovskyi M.S., Podhorna A.D., Kovalchuk O.V.,
Navryshchuk B.H., Zolotorov P.V.

Електрична активність головного мозку: нейробіофізичні характеристики та їх клінічна інтерпретація

Cerebral bioelectrical activity: neurobiophysical characteristics and their clinical interpretation

Старокостянтинівський військовий госпіталь,
м. Старокостянтинів, Хмельницька область, Україна

Starokostiantyniv Military Hospital,
Starokostiantyniv, Khmelnytskyi region, Ukraine

m.komarovskyi@gmail.com, zhd_4@ukr.net, oleg19890904@gmail.com, b.gavryshchuk@gmail.com,
zolotorev.paul89@gmail.com

Вступ

Дослідження біоелектричної активності (БЕА) головного мозку з допомогою електроенцефалографії (ЕЕГ) дає змогу проаналізувати з високою часовою роздільною здатністю особливості його функціонування та реакцій на подразники, тому такий метод винятково цінний для клініки [1; 2]. Клініко-електроенцефалографічний висновок – основний документ стосовно ЕЕГ повинен бути повним, об'єктивним, складеним згідно зі встановленими вимогами та з урахуванням електроенцефалографічної семіотики. Остання встановлює відповідність між параметрами БЕА, які спостерігаються на ЕЕГ, і термінами, що їх визначають, а також цими термінами й анатомічними, фізіологічними та клінічними уявленнями. Тлумачення ЕЕГ потребує від клініцистів знань на межі біофізики та клінічної діагностики [3–6].

Мета дослідження – висвітлити та систематизувати теоретичні біофізичні характеристики БЕА головного мозку, які важливі у клініко-діагностичному аспекті, для їх подальшого застосування на практиці.

Матеріали і методи

Матеріали дослідження: біофізичні характеристики церебральної БЕА. Методи дослідження: бібліосемантичний, структурно-логічного аналізу.

Результати дослідження та їх обговорення

БЕА мозку – результат часової та просторової сумарної електрогенезу нейронів, пов'язаного зі збудженням. Під час їх функціонування виникають електричні поля, однією з характеристик яких є різниця біоелектричних потенціалів, зумовлена нерівномірним розподілом іонів зовні та всередині клітини. У стані спокою клітинна мембрана (нейролема) всередині заряджена більш негативно, ніж ззовні. У відповідь на подразник виникає збудження,

в основі якого лежить потенціал дії (ПД) – швидка короткотривала зміна потенціалу на невеликій ділянці мембрани. Зовнішня поверхня цих областей нейролеми стає негативно зарядженою стосовно сусідніх, внутрішня – позитивно. Виникає електричний нервовий імпульс, та хвиля збудження поширюється по мембрані [7]. Ідеалізований ПД виглядає як гострий пік (рис. 1). Таким чином, хвиля на записі ЕЕГ – це відображення зміни різниці ПД між двома електродами. Активність у контексті ЕЕГ – окрема хвиля або їх послідовність. Термін є описовим, тобто характеризується лише кількісними та якісними властивостями. Найявне вужче поняття – ритм: регулярний (постійної частоти) тип БЕА, що відповідає визначеному стану мозку та пов'язаний з певними церебральними механізмами. Ритм – завжди інтерпретаційний термін, позаяк йому надається нейрофізіологічне значення.

БЕА – складний коливальний хвильовий процес, близький до сукупності гармонійних коливань. Тому основні її властивості, на які опирається опис ЕЕГ, – частота, фаза й амплітуда, та похідні від них [3].

Частота – кількість періодичних процесів (хвиль), що повторюються за 1 секунду. Позначається f або ν (ню), вимірюється в герцах (Гц, Hz), іноді для зручності – коливаннях за секунду. Як правило, вказується із градацією не менше 0,5 Гц. На кожній ділянці ЕЕГ трапляються хвилі різних частот, тому вибирають кілька відрізків тривалістю в 1 секунду та розраховують середнє значення. Історично на основі нецифрового аналізу ЕЕГ вибрано 4 основних фізіологічних частотних діапазони (ритми), зображені на рисунку 2: δ -ритм (дельта-ритм) від 0,3 до < 4 Гц, θ -ритм (тета-) від 4 до < 8 Гц, α -ритм (альфа-) від 8 до < 13 Гц, β -ритм (бета-) від 13 до < 30 Гц (за різними авторами верхня межа 30–40 Гц) [4]. Перші 2 ритми – повільні, наступні – швидкі. Поділ значною мірою умовний: можлива активність у межах кількох діапазонів (3–5 Гц тощо). Існує також γ -ритм (гамма-) – за різними авторами нижня межа від 30–40 Гц, верхня – до 70–500 Гц, та інші, що виникають за особливих фізіологічних станів, хоча їх частота перекриває наведені вище діапазони: κ -ритм (каппа-), λ -ритм (лямбда-), μ -ритм (мю-), σ -ритм (сігма-), τ -ритм (тау-), V-хвилі (вертексні гострі хвилі) та нюховий ритм.



Рис. 1. Схематичне зображення ідеалізованого ПД

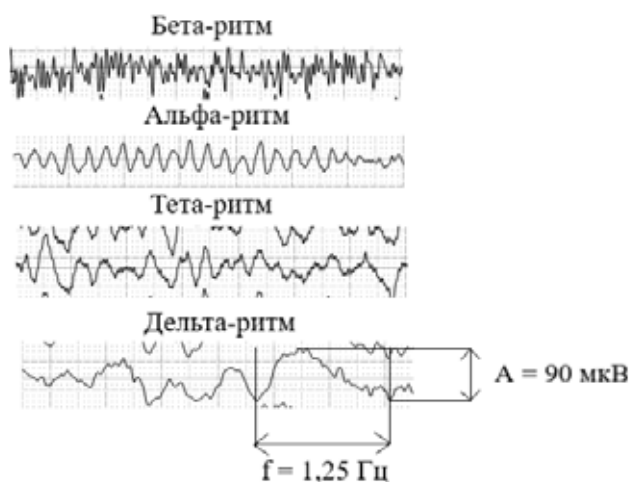


Рис. 2. Основні частотні ритми:
f – частота, A – амплітуда

Амплітуда – величина напруги хвиль БЕА, максимальна відстань коливань ПД. Виражається в мікрвольтах (мкВ, μV): $1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$. Вимірюють вертикально від піка попередньої хвилі до піка наступної в іншій фазі, без урахування ізоелектричної лінії (рис. 2). Для опису ЕЕГ вибирають найхарактерніші максимальні її значення за монополярного відведення, крім поодиноких різких підвищень, які описують як особливі транзиторні події. Можна виділити такі ступені вираженості амплітуди БЕА: 1) $< 10 \text{ мкВ}$ – різко знижена; 2) $10\text{--}19 \text{ мкВ}$ – помірно знижена; 3) $20\text{--}39 \text{ мкВ}$ – легко знижена; 4) $40\text{--}49 \text{ мкВ}$ – середня (нормальна); 5) $50\text{--}69 \text{ мкВ}$ – легко підвищена; $70\text{--}79 \text{ мкВ}$ – помірно підвищена; $> 80 \text{ мкВ}$ – різко підвищена.

Форму (морфологію форми сигналу або конфігурацію), тобто зовнішній вигляд електромагнітних хвиль БЕА, візуально побачити неможливо, але її можна уявити абстрактно як графік, що змінюється в часі і просторі. Якщо активність з двох або більше хвиль певної форми зберігає її у разі повторення, явище називають хвильовим комплексом.

Регулярність – властивість, що притаманна хвилі або комплексу, що з'являються з приблизно постійним періодом та мають наближено однакову форму. Повторюваність коливального процесу, крім частоти, характеризують періодом (циклом) – тривалістю інтервалу між початком і кінцем поодинокі хвилі або комплексу. Період позначається буквою T, вимірюється у секундах та обернений до частоти: $T = 1/\nu$. Ритмічні (періодично повторювані) хвилі з однаковою простою геометричною формою називають регулярними; рідше – моноритмічними, або мономорфними. Основні для біофізики види таких форм зображені на рисунку 3: синусоїдальна, прямокутна (меандр), трикутна, пілкоподібна. В контексті БЕА перша має особливе клінічне значення. Наприклад, до неї близький α -ритм з поправкою на модуляцію – поступове збільшення, а потім зменшення амплітуди (рис. 2). Групи ритмічних повторюваних хвиль із такою властивістю називають веретенами (веретена α -ритму, сонні веретена). Можливі інші регулярні форми: трапецієподібні, дугоподібні (аркоподібні) тощо. Хвилі, що повторюються неперіодично зі змінними нерегулярними інтервалами (хід постійно змінюється) та мають різні складні асиметричні окремі форми, називають нерегулярними, рідше – поліритмічними, або поліморфними (рис. 2, δ -ритм). Напівритмічні повторювані хвилі складаються як із морфологічно однакових повторюваних форм, так і із суміші складних по формі та нерегулярних. Щодо характеру появи, ЕЕГ активність може спостерігатися постійно, періодично повторюватися, виникати епізодично, у разі стимуляції тощо. Нерегулярне та нечасте явище називається спорадичним.

Стійкість ЕЕГ активності: як часто виникає певний її патерн, можна оцінити за допомогою індексу, відносного показника. Найчастіше мають на увазі індекс за часом (представленість), що вимірюється у відсотках (%) часу, протягом якого виражена така активність на певному відрізку кривої, стосовно всього часу реєстрації ЕЕГ. Можливий варіант розрахунку індексу за потужністю спектра (перетворення

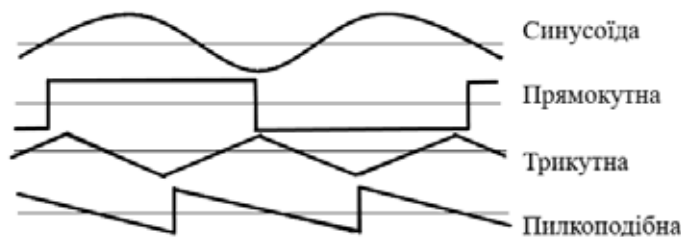


Рис. 3. Синусоїда, прямокутна, трикутна та пилкоподібна хвилі

Фур'є) – відношення площі під графіком потужності спектра заданого частотного діапазону до загальної площі всього графіка спектра смуги пропускання. Також індекс розраховують, як відношення кількості хвиль заданого діапазону до їх загальної кількості. Наприклад, фрагмент опису ЕЕГ по індексу за часом можна представити так: « α -ритм – у потиличній ділянці, індекс 83 %. β -ритм – у передніх відділах мозку, індекс 91 %. δ -ритм – у потиличній ділянці, індекс 5,2 %». Ця ж ЕЕГ за відношенням кількості хвиль заданого діапазону до загальної виглядатиме так: «Виявлено поліритмічну активність зі складниками α -ритму 39,0 %, δ -ритму 34,0 %, θ -ритму 18,0 %, β -ритму 8,5 %».

Розподіл (локалізація) – особливості появи одиниць феноменів БЕА, зареєстрованих електродами, розташованими на різних частинах голови. Також клінічне значення має стабільна асиметрія амплітуди. Згідно з адаптованою класифікацією локалізації патернів ЕЕГ Ганса Людерса виділяють такі види розподілу (рис. 4): 1. Фокальний – фокус або вогнище, де представлена певна активність, обмежена 1-ю невеликою за площею ділянкою скальпу, кори головного мозку або його глибинних структур. Якщо сусідні електроди реєструють аналогічну активність, але її амплітуда менша, такий розподіл диференціюють із більш поширеним. Зокрема, фокальні повільні хвилі у ділянці максимальної амплітуди матимуть нижчу частоту, та у ній буде

меншою мірою присутня α - і β -активність. У випадку дифузного розподілу частота буде вищою, та вони нерегулярно чергуватимуться з α - і β -хвилями. Фокальні гострі хвилі з тенденцією до генералізації можна відрізнити від власне генералізованих із локальним максимумом посилення за їх більшою представленістю у вогнищі. Фокальна активність майже завжди патологічна, крім активності із вогнища по середній лінії або із двох фокусів, розташованих симетрично у двох півкулях – тоді можливий варіант норми. 2. Мультифокальний – існує 3 (за О.Р. Зенковим – дві) або більше анатомічно різні ділянки, генеруючі певний патерн, симетрично або асиметрично. 3. Регіональний, або дольовий – активність у зоні анатомічної долі мозку (3 і більше відведень). 4. Мультирегіональний – активність в області більше 1-ї долі. 5. Латералізований: патерн представлений фокально (мультифокально), регіонально або півкульно з однобічним полюсом (моно- або уніполярно), іншими словами, на правому або лівому боці голови; або ж активність буде білатеральною (двобічною), але з вираженою асиметрією на одній половині голови. Латералізація – ознака патології, крім «вертексних хвиль» або σ -ритму із «сонними веретенами». 6. Нелатералізований, або біполярно незалежний – два незалежних асинхронних локуси (ділянки) активності в обох півкулях. 7. Генералізований – БЕА реєструється одночасно на більшій частині

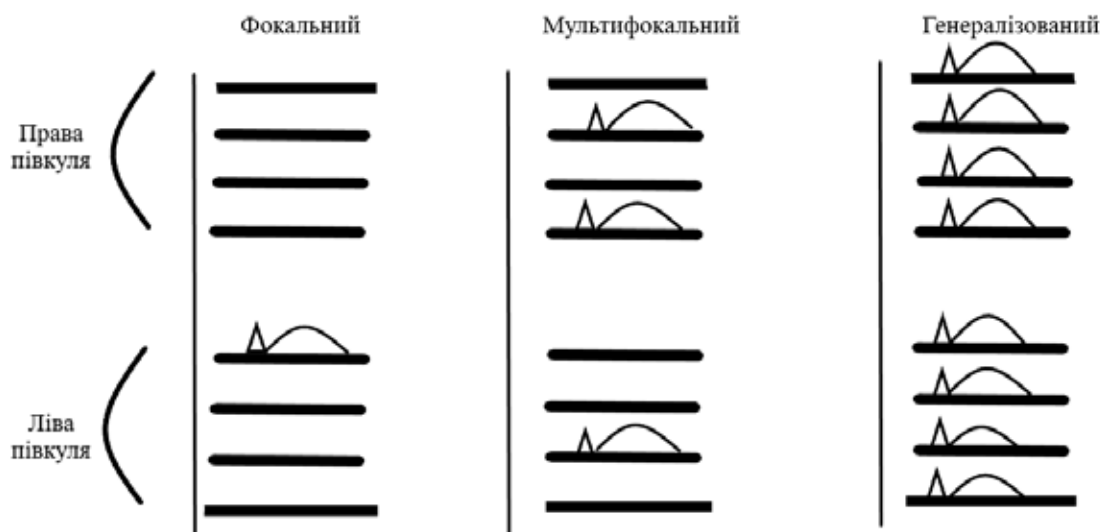


Рис. 4. Фокальний, мультифокальний та генералізований розподіл

або по всій площі у вигляді білатеральних (двобічних), бісинхронних та симетричних патернів [8]. 8. Неуточнений. Локалізацію описують за назвою електродів згідно з ЕЕГ-семіотикою, а не за анатомією ділянки. Фокальну активність не можна автоматично ототожнювати з фокальними судомними нападами: лише її реєстрація не може бути підставою для такого діагнозу без належного клінічного аналізу.

Фаза – кількісна характеристика коливання, що визначає відмінність між двома подібними

коливаннями, які починаються в різний час. Вона визначає поточний стан процесу і вказує напрям вектора його змін. Графічно для хвилі відображається залежно від її відношення до базової лінії: монофазні хвилі – одне відхилення вверх або вниз; двофазні – два складники на протилежних сторонах горизонталі; поліфазні (у тому числі трифазні) – більше двох різноспрямованих компонентів, у вужчому розумінні це послідовність α -хвилі і повільної хвилі, частіше δ -діапазону (рис. 5).



Рис. 5. Моно-, дво-, трьох- та поліфазне коливання

В електротехніці фаза коливання – змінна величина синусоїдальної функції, що відраховується від точки переходу значення через нуль до додатного. Для опису ЕЕГ важливе поняття фазового співвідношення. Різницю між початковими фазами двох величин, що змінюються в часі з однаковою частотою та періодично, називають зсувом фаз. Його вимірюють в градусах ($^{\circ}$), радіанах (rad) або частках періоду, та можна виразити через фазовий кут: піки, що вказують у протилежних напрямках, зміщені на 180° (рис. 6). Якщо коливальні процеси відбуваються одночасно, наприклад хвилі виникають у різних відведеннях, та при цьому їх спади й піки досягають максимуму в один і той самий момент часу, вони перебувають у фазі (синфазні): зсув фази між ними відсутній. Якщо максимум одного коливання збігається з мінімумом іншого – коливання у протифазі (протифазні).

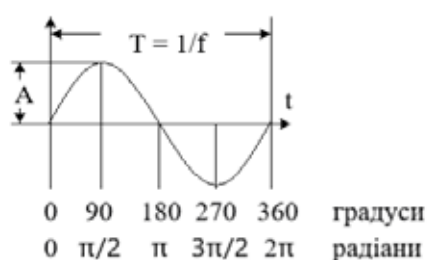


Рис. 6. Період (цикл) синусоїдальної функції:
T = період, f = частота, A = амплітуда, t = час

Щодо часу появи хвиль, якщо вони з'являються в різних ділянках практично в однаковий час, має місце синхронність: коливання синхронні або одночасні. Поняття дещо відрізняються: «синхронна» – фазова відповідність, близька до точної, належно оцінена цифровим методом. Якщо коливання «одночасні», відсутня лише видима очима затримка між подіями у разі

їх аналогової реєстрації зі значно меншою роздільною здатністю. Синхронна та синфазна у симетричних (гомотопних) відділах обох півкуль БЕА називається білатерально синхронною (бісинхронною). Протилежне поняття – асинхронність: неодноразове виникнення ЕЕГ активності в різних областях голови. У разі синхронності коливань хвиля поширюється за рахунок об'ємної провідності головного мозку, асинхронність – результат трансинаптичної передачі. Патерни ЕЕГ, що реєструються в одній ділянці в один час, а в інших областях – в інший, вважаються незалежними.

Реактивність БЕА – чутливість до активації різними фізіологічними впливами. Відстеження динаміки нормальної або патологічної ЕЕГ активності клінічно значиме, для цього проводять функціональні (навантажувальні, провокаційні) проби. Загальноприйнятою та однією з основних є реакція активації. Є багато інших її варіантів: ритмічна фотостимуляція, гіпервентиляція тощо. Наприклад, у пацієнтів у комі повна ареактивність – майже завжди злоякісна прогностична ознака для виживання.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з дослідженням впливу на БЕА головного мозку наслідків бойового легкого травматичного ушкодження у військовослужбовців.

Висновки

Важливі для ЕЕГ властивості БЕА можна представити так: частота; амплітуда; форма хвиль; регулярність; повторюваність; характер появи; стійкість; розподіл (локалізація); міжпівкульне порівняння в гомологічних ділянках: фазове співвідношення і час появи (синхронізація); реактивність. Поглиблення теоретичних знань щодо БЕА дасть змогу більш широко застосовувати ЕЕГ у клінічній медичній практиці.

Література

1. Друзь ОВ, Стеблюк ВВ, Швець АВ, Проноза-Стеблюк КВ. Система медико-психологічної допомоги військовослужбовцям Збройних сил України. У: Цимбалюк ВІ, редактор. Охорона ментального здоров'я та медико-психологічна реабілітація військовослужбовців в умовах гібридної війни: теорія і практика. Київ: Медицина; 2021:56–62.
2. Стеблюк ВВ, Проноза-Стеблюк КВ. Мнестично-когнітивні та соматопсихічні наслідки бойового легкого травматичного ушкодження головного мозку (контузії). Постконтузійний синдром. У: Цимбалюк ВІ, редактор. Охорона ментального здоров'я та медико-психологічна реабілітація військовослужбовців в умовах гібридної війни: теорія і практика. Київ: Медицина; 2021:207–222.
3. Літовченко ТА, Сухоносова ОЮ. Електроенцефалографія при епілепсії та інших захворюваннях нервової системи у дорослих та дітей [Інтернет]. Харків: Харківська медична академія післядипломної освіти; 2019 [цитовано 19 серп. 2023]. 176 с. URL: <http://www.ulae.org.ua/index.php/uk/informatsiyni-materialy/metodychni-rekomendatsii-natsionalni>.
4. Чернінський АО, Крижановський СА, Зима ІГ. Електрофізіологія головного мозку людини. Мартинюк ВС, редактор. Київ: Видавець В.С. Мартинюк; 2011. 49 с.
5. Тодорів ІВ. Електроенцефалографія в психіатрії. Івано-Франківськ: [видавець невідомий]; 2004. 82 с.
6. Абакумов ВГ, Готра ЗЮ, Злепко СМ, Павлов СВ, Василенко ВБ, Рибін ОІ. Реєстрація, обробка та контроль біомедичних сигналів. Вінниця: ВНТУ; 2011. 352 с.
7. Іванушкіна НГ, Іванько КО, Прокопенко ЮВ. Прикладна біофізика. Біоелектричні процеси [Інтернет]. Тимофеев ВІ, редактор. Київ: [видавець невідомий]; 2016 [цитовано 18 серп. 2023]. 115 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41146/1/Prykladna_biofizyka_KL.pdf.
8. Бабкіна ЮА. ЕЕГ-особливості хворих на епілепсію з коморбідною судинною патологією. [Інтернет]. Український вісник психоневрології. 2014. [цитовано 28 серп. 2023]. Т. 22,2(79):19–21. URL: <https://uvnnp.com.ua/upload/iblock/35f/35fbb6b4339651ad1c66450b3d8e34da.pdf>.

References

1. Druz OV, Stebliuk VV, Shvets AV, Pronoza-Stebliuk KV. Okhorona mentalnoho zdorovia ta medyko-psykholohichna rehabilitatsiia viiskovosluzhbovtsiv v umovakh hibrydnoi viiny: teoriia i praktyka. Kyiv: Medytsyna; 2021. Systema medyko-psykholohichnoi dopomohy viiskovosluzhbovtsiam Zbroinykh syl Ukrainy; p. 56–62 [in Ukrainian].
2. Stebliuk VV, Pronoza-Stebliuk KV. Okhorona mentalnoho zdorovia ta medyko-psykholohichna rehabilitatsiia viiskovosluzhbovtsiv v umovakh hibrydnoi viiny: teoriia i praktyka. Kyiv: Medytsyna; 2021. Mnestychno-kohnityvni ta somatopsykhychni naslidky boiovoho lehkoho travmatychnoho ushkodzhennia holovnoho mozku (kontuzii). Postkontuziinyi syndrom; p. 207–222 [in Ukrainian].
3. Litovchenko TA, Sukhonosova OYu. Elektroentsefalohrafiia pry epilepsii ta inshykh zakhvoriuvanniakh nervovoi systemy u doroslykh ta ditei [Internet]. Kharkiv: Kharkivska medychna akademiia pisliadyplomnoi osvity; 2019 [cited 2023 Sep 19]. 176 p. Available from: <http://www.ulae.org.ua/index.php/uk/informatsiyni-materialy/metodychni-rekomendatsii-natsionalni> [in Ukrainian].
4. Martyniuk VS, editor. Elektrofiziolohiia holovnoho mozku liudyny. Kyiv: Vydavets V.S. Martyniuk; 2011. 49 p. [in Ukrainian].
5. Todoriv IV. Elektroentsefalohrafiia v psykhiiatrii. Ivano-Frankivsk: [publisher unknown]; 2004. 82 p. [in Ukrainian].
6. Abakumov VH, Hotra ZIU, Zlepko SM, Pavlov SV, Vasilenko VB, Rybin OI. Reiestratsiia, obrobka ta kontrol biomedychnykh sygnaliv. Vinnytsia: VNTU; 2011. 352 p. [in Ukrainian].
7. Tymofieiev VI, editor. Prykladna biofizyka. Bioelektrychni protsesy. Kyiv: [publisher unknown]; 2016 [cited 2023 Sep 18]. 115 p. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41146/1/Prykladna_biofizyka_KL.pdf [in Ukrainian].
8. Babkina YUA. EEN-osoblyvosti khvorykh na epilepsiiu z komorbidnoiu sudynnoiu patolohiieiu. Ukrainskyi visnyk psykhonevrolohii. [Internet]. 2014 [cited 2023 Sep 23]; 22(2):19–21. URL: <https://uvnnp.com.ua/upload/iblock/35f/35fbb6b4339651ad1c66450b3d8e34da.pdf> [in Ukrainian].

Мета – висвітлити та систематизувати теоретичні біофізичні характеристики БЕА головного мозку, які важливі у клініко-діагностичному аспекті, для їх подальшого застосування на практиці.

Матеріали і методи. Матеріали дослідження: біофізичні характеристики біоелектричної активності головного мозку. Методи дослідження: бібліосемантичний, структурно-логічного аналізу.

Результати. Важливі для ЕЕГ властивості БЕА: частота; амплітуда; форма хвиль; регулярність; повторюваність (періодичність); характер появи; стійкість; розподіл (локалізація); міжпівкульне порівняння в гомологічних ділянках: фазове співвідношення і час появи (синхронізація); реактивність.

Висновки. Поглиблення теоретичних знань щодо БЕА дасть змогу більш широко застосовувати ЕЕГ у клінічній медичній практиці.

Ключові слова: біоелектрична активність, електроенцефалографія, нейробіофізика.

Purpose – highlight and systematize the theoretical biophysical characteristics of cerebral BEA important in the clinical and diagnostic aspect for their further application in practice.

Materials and methods. Research materials: biophysical characteristics of cerebral BEA. Research methods: bibliosemantic, structural and logical analysis.

Results. Properties of cerebral BEA important for EEG are: frequency; amplitude; waveform; regularity; repeatability (periodicity); nature of appearance; stability; distribution (localization); transhemispheric comparison in homologous areas: phasic coincidence and time of appearance (synchronization); reactivity.

Conclusions. Deepening of theoretical knowledge about BEA will make it possible to use EEG more widely in clinical practice.

Key words: bioelectrical activity, electroencephalography, neurobiophysics.

Конфлікт інтересів: відсутній.

Conflict of interest: absent.

Відомості про авторів

Комаровський Максим Сергійович – майор медичної служби, заступник начальника госпіталю з медичної частини – начальник медичної частини Старокостянтинівського військового госпіталю; вул. Героїв Крут, 8, м. Старокостянтинів, Хмельницька область, Україна, 31101.

m.komarovskyi@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-6667-9042

Подгорна Анастасія Дмитрівна – капітан медичної служби, начальник психіатричного відділення Старокостянтинівського військового госпіталю; вул. Героїв Крут, 8, м. Старокостянтинів, Хмельницька область, Україна, 31101.

zhd_4@ukr.net, ORCID ID 0009-0004-0828-3292

Ковальчук Олег Васильович – капітан медичної служби, старший ординатор психіатричного відділення Старокостянтинівського військового госпіталю; вул. Героїв Крут, 8, м. Старокостянтинів, Хмельницька область, Україна, 31101.

oleg19890904@gmail.com, ORCID ID 0009-0007-1375-4759

Гавришук Богдан Григорович – лейтенант медичної служби, лікар-невролог терапевтичного відділення Старокостянтинівського військового госпіталю; вул. Героїв Крут, 8, м. Старокостянтинів, Хмельницька область, Україна, 31101.

b.gavryshchuk@gmail.com, ORCID ID 0009-0002-4455-8121

Золоторьов Павло Валерійович – службовець Збройних сил України, лікар-психіатр психіатричного відділення Старокостянтинівського військового госпіталю; вул. Героїв Крут, 8, м. Старокостянтинів, Хмельницька область, Україна, 31101.

zolotorev.paul89@gmail.com, ORCID ID 0009-0004-4669-4973