

БІОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ

(Представлено д.т.н., проф. Б.Б. Самотокіним)

Описано механізми впливу електромагнітних полів різних типів на організм людини та режими лікувального впливу низькочастотного магнітного поля. Аналізується вплив частоти й амплітуди електромагнітного поля на лікувальний ефект.

Вступ

Використання в медичній практиці низькочастотних магнітних полів (НМП) призвело до створення принципово нових методів лікування. При допомозі НМП можна посилювати або пригнічувати різні функції біологічних об'єктів або людського організму, успішно лікувати запальні процеси та травматичні пошкодження, видаляти наслідки оперативних втручань та проводити магнітохірургічну корекцію вроджених або набутих деформацій.

1. Механізм впливу електромагнітних полів на організм людини

Велика кількість робіт присвячена дослідженням впливу магнітного поля (МП) на біологічні об'єкти [4, 5, 6, 12, 13] та пошуку методів лікувального впливу магнітного поля на людину. Наприклад, у [8] було розглянуто вплив геомагнітного поля Землі на організм людини.

Існують чисельні докази лікувальної дії МП [2, 3, 5, 15]. Найважливішим біотропним параметром магнітного поля є частота його зміни. У медичній практиці широко використовуються низькочастотні магнітні поля (НЧМП). Вони мають знеболюючу, протизапальну дію та знімають набрякання. Найбільших успіхів досягнуто в області клінічної магнітної терапії, які були отримані при лікуванні кровеносних судин кінцівок та в хірургічній практиці. У результаті магнітотерапевтичного впливу в процесі лікування беруть участь системи загальної регуляції життєдіяльності [12]. Відповідно до цього, при аналізі реакцій організму на загальний вплив НЧМП необхідно враховувати, що кожна підсистема по-своєму реагує на зазначений чинник. Перше місце посідають нервова та ендокринна системи, органи чуттів, потім йдуть імунна, серцево-судинна, кровоносна системи, органи травлення, м'язова, видільна, дихальна та кісткова системи.

Високу чутливість організму до електромагнітних полів (ЕМП), специфічну залежність біологічних ефектів ЕМП від їх інтенсивності та модуляційно-часових параметрів, а також їх спроможність створювати в організмі кумулятивний ефект можна пояснити тим, що в біологічних процесах суттєву роль відіграють так звані інформаційні взаємовідносини [6]. Такі взаємовідносини характеризуються перетворенням інформації, її передачею, кодуванням і декодуванням, розумінням змісту та значенням повідомлення, що переноситься сигналом, збереженням інформації. Інакше кажучи, біологічні ефекти, які зумовлені інформаційними процесами, виникають під впливом інформаційних сигналів, що викликають не тільки перерозподіл енергій в організмі, але і керування процесами, що відбуваються в ньому. Якщо чутливість систем, що сприймають, досить висока, а це саме так, то передача інформації може здійснюватися за допомогою надзвичайно слабких сигналів. Дослідження останніх десятиліть переконливо підтвердили інформаційну роль і значення для біологічних систем дуже слабких ЕМП, у тому числі в діапазоні надзвичайно низьких частот, при певних законах їх модуляції.

Інформація зберігається та видозмінюється не тільки всередині клітини, але й у міжклітинній речовині, у позаклітинних матрицях (ПКМ) з їх суперечливою функцією інтеграції та диференціації клітин. ПКМ – це необхідний субстрат для збереження інформації про майбутній розвиток клітини, тканини та організму в цілому, поряд із хромосомними кодами; нею визначається диференціювання тканин, їх формування, стабільний стан, забезпечується тканинна специфічність [11].

Передача сигналів між клітинами здійснюється через позаклітинний простір. Одним із різновидів таких сигналів є природні та штучні ЕМП. Канали позаклітинного простору є добрими провідниками ЕМП. У цьому просторі знаходяться скручені білкові молекули, зовнішні закінчення спіральних протеїнів, що пронизують плазматичні мембрани, які сприймають електромагнітні сигнали. Вони є тим морфологічним субстратом, що призначений для первинного виявлення найслабших електромагнітних коливань у міжклітинному просторі, 2000

Струмові потоки у позаклітинному просторі можуть бути вкрай низьких інтенсивностей, але їх регулюючий вплив очевидний. Низькочастотні імпульсні магнітні поля, що індукують у тканинах градієнти порядку 3 мВ/см модифікують активність і секрецію ферментів. Це відповідь на мільйонну частку граничних трансмембранних струмів. При початкових слабких збудженнях спостерігаються посилені на

декілька порядків результуючі відгуки. Клітинні системи виявилися дуже чутливими до дій низькочастотних осцилюючих ЕМП. При цьому клітинні поверхні діють як дуже вузькополосні фільтри пропускання низьких частот.

Механізми впливу зміни напруженості ЕМП на біологічні об'єкти пояснюються фізичною природою явища спінового резонансу в зовнішньому магнітному полі (спін – момент імпульсу елементарної частинки або системи частинок – ядра атома, не пов'язаний з рухом у просторі).

Академіком Н.Д. Девятковим [1] була запропонована концепція когерентної взаємодії зовнішніх і внутрішніх ЕМП. Згідно з цією концепцією, мікроструктура клітинних мембран (сукупність мембран мітохондрій) забезпечує виникнення дипольної компоненти клітини. Такий електричний диполь $\bar{p} = p_0 \sin t$, що пов'язаний з акустичним коливанням мембрани, є клітинним генератором ЕМП клітини. У здоровій клітині електромагнітні коливання носять стохастичний характер (особливо з урахуванням взаємодії ЕМП групи клітин), а спектральна характеристика є шумовою. При порушенні метаболізму в результаті тієї або іншої патології зростає генерація у вузькому діапазоні спектра. Це пов'язано з корегуючим притоком вільної енергії до ділянок спектра збурення (простий аналог на макрорівні – підвищення температури тіла при запальних захворюваннях).

При накладанні на ЕМП клітини зовнішнього когерентного ЕМП із частотами f_1, f_2 ймовірний резонанс, що збільшує за типом ланцюгової реакції приток додаткової енергії з резонансним ростом інтенсивності коливань клітин, активацією біохімічних процесів, спрямованих на ліквідацію патології. При цьому визначальне значення мають частота, модуляція, поляризація та інші властивості ЕМП, а не величина його напруженості. Така взаємодія є біоінформаційною.

На основі експериментальних даних та моделей сприйняття [5], заснованих на синхронізації нейронних груп, можна запропонувати можливий фізіологічний механізм резонансної дії низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання на організм людини, який не залежить від конкретних фізико-хімічних процесів. Колективна поведінка більшості нейронних систем може бути досить різноманітною та складною. У таких системах виникають та еволюціонують групи синхронізованих один з одним нейронів, які мають складну просторову форму. Наприклад, в нервових тканинах спостерігаються такі нетривіальні структури, як спіральні хвилі, що біжать. Зовнішні електромагнітні коливання викликають появу ділянок синхронної активності та перебувають просторово-часової організації діяльності нервової системи. Коли параметри електромагнітного поля випадкові, дія носить характер завади і викликає неспецифічну адаптивну реакцію організму. На резонансних частотах зовнішнє стимулювання призводить до появи просторово-часових груп, частоти синхронної активності яких співпадають з уже існуючими в організмі. Здорові органи не реагують на випромінювання, тому сенсорна зворотна реакція виникає тільки в хворому органі. Причому її інтенсивність залежить від ступеня патології. Тобто, зовнішнє низькоінтенсивне поле з резонансною частотою викликає синхронізуючу дію тільки на патологічно змінену колективну динаміку нейронів – викликає так званий терапевтичний режим дії [5].

Активність нейронів реєструється в доволі широкому діапазоні частот, але, як правило, цей інтервал знаходиться в межах 10–60 Гц. Припускаючи, що всьому спектральному діапазону електромагнітних коливань відповідає обмежений частотний набір осциляцій в нейронних групах, можна пояснити, чому різноманітні методи низькоінтенсивної електромагнітної терапії, такі як лазерна терапія, мікрохвильова резонансна терапія, магнітотерапія подібні за зворотними реакціями організму [13] та за великим набором рекомендацій для лікування.

Для пояснення біологічної дії слабких (<1 мТ) наднизькочастотних (0,01–100 Гц) магнітних полів за останні роки запропоновано теорії іонного циклотронного резонансу та ядерного параметричного резонансу, відповідно до яких фізіологічні зміни в клітинах можуть бути зумовлені резонансним впливом комбінованого магнітного поля (КМП), що є суперпозицією колінарних постійного (ним може бути геомагнітне поле з індукцією 50 мкТл) та змінного магнітних полів (ЗМП і ІНЕМП), на рух катіонів, у першу чергу Ca^{2+} , по іонних каналах або на зв'язування Ca^{2+} такими внутрішньоклітинними регуляторами, як кальмодулін або протеїнкіназа С.

Обчислені значення резонансних частот біохімічних іонів (органічних кислот, амінокислот, нуклеїнових кислот, макроергів, фосфоліпідів, деяких білків тощо) потрапляють у діапазон 0,7–17 Гц, а їх 2-а і 3-я гармоніки – 0,2–8,5 Гц [10].

Електрони та ЕМП більш лабільні, ніж молекули. Вони несуть енергію, заряди та інформацію і є свого роду пальним для життєвих процесів. Це наштовхнуло багатьох авторів на думку про існування в організмі системи підтримки біоелектричного гомеостазу, що забезпечує нормальний фізіологічний стан клітин. Припущення про те, що в організмі існує механізм центральної регуляції фізіологічних процесів, який узгоджений з параметрами електромагнітних полів Землі і призначений для захисту організму від перешкод з боку інтенсивних космічних ЕМП усіх частотних діапазонів, наштовхує на думку про наявність в організмі людини сенсорної системи, що сприймає зміни ЕМП зовнішнього середовища [7].

Часто автори висловлюють думку, що такою сенсорною системою можуть бути зони точок акупунктури (ТА) та меридіанів. Зазначена система електромагнітної чутливості за характером сенсорних від-

чуттів та особливостей фізіологічних реакцій на стимуляцію аферентних входів, якими можуть бути ТА, багато в чому співпадають із реакціями організму на зміну параметрів внутрішнього середовища. Таким чином, ця система є особливим аферентним входом, через який організм постійно контролює якісні та кількісні параметри деяких факторів зовнішнього середовища, наприклад, ЕМП Землі, які у випадках відхилень можуть змінювати діяльність його життєво важливих функціональних систем. Ця інформація інтегрується в мозку з аналогічною інформацією, отриманою через систему вісцеросенсорної чутливості від внутрішніх органів, і використовується ним для запуску адаптивних механізмів, спрямованих на послаблення або повну компенсацію негативних змін у функціональних системах організму.

Меридіани, що з'єднують ТА, можна розглядати як систему електричних провідників, прокладених у тканині, що існує поблизу м'язів, судин, нервів, та по яких можуть передаватись електричні заряди (електроліти, молекули) від однієї області до іншої. Ця область, напевне, бере участь в електромагнітних взаємозв'язках усередині організму та у рецепції зовнішніх ЕМП.

Варто розглянути властивості одного з найважливіших складових людського організму – води під дією зовнішнього магнітного поля. Вода відіграє особливу інформаційну роль в організмі [9]. Всередині клітини вода існує не як відособлена речовина, вона пов'язана з усіма іншими компонентами. Вода в клітині – це квазікристал, четверта фаза води, підпорядкована особливим законам термодинаміки клітини.

За рахунок невеликої зміни структурних і фізичних параметрів клітинної води підтримується функціональна стабільність процесів життєдіяльності. Для цього необхідний значний енергетичний та інформаційний ресурс, завдяки якому розгортаються, спрацьовують та згортаються фізіологічні програми. Квазікристал є акумулятором енергії та інформації (збереженої в кристалічній структурі) з великим динамічним діапазоном та високою оперативністю використання ресурсу. Квазікристал структурно-метастабільний, далекий від стану рівноваги. Це надає йому необхідної динамічності. Однією з найважливіших електродинамічних властивостей квазікристалу є його нелінійність стосовно ЕМП і збуджуваних ними змінних струмів. Квазікристал є детектором. Це суттєво, оскільки дозволяє регулювати топологію ЕМП усередині клітини, поширення зарядів, струмів і сил електромагнітної взаємодії, що здійснюють електромеханічні процеси. У природному ЕМП ці процеси відбуваються стабільно, одночасно й у цілому сприятливо у фізіологічному відношенні. Зовсім інша ситуація може виникати в штучно створеному ЕМП. Клітина та її поля за мільярди років еволюції пристосувались до природних ЕМП, що стимулюють позитивні реакції, адаптивність, раціональний мутагенез і функціональну стійкість. Штучні ж ЕМП можуть бути як корисні для організму, так і небезпечні. Причому ступінь їх впливу меншою мірою залежить від їх інтенсивності, ніж від просторово-часової структури або, інакше кажучи, від закону їхньої модуляції. Слабкі ЕМП низької частоти змінюють метастабільні структури у воді, що різко знижує концентрацію іонів калію та веде до утворення активних вільних радикалів.

2. Роль частоти й амплітуди електромагнітного поля в магнітотерапії

Як вже зазначалося, частота є найважливішим біотропним параметром магнітного поля. До теперішнього часу відсутня узагальнена система вибору частотних характеристик НЧЕМП в магнітній терапії при вирішенні тих або інших конкретних задач, зокрема, при проектуванні магнітотерапевтичної апаратури. Важливою відмінністю НЧЕМП від високочастотних полів є те, що ці поля пронизують біологічну тканину будь-якого типу без викривлення. Для ілюстрації цієї відмінності можна зробити оцінку розміру скін-шару (*d*), тобто шару, у якому напруженість поля слабшає в 2,7 раза, при різних частотах [9]. У випадку солонної води (аналога живої тканини)

$$d = \frac{290}{f^{0.5}}, \tag{1}$$

де *d* – вимірюється в м, а частота *f* – в Гц.

З формули (1) випливає, що при $f \ll 10 \text{ кГц} - d \gg 2,9 \text{ м}$, а при $f \gg 100 \text{ МГц} - d \ll 2,9 \text{ м}$. Таке поле можна визначити як специфічне.

Під специфічним мається на увазі поле, дія якого в конкретних відносно вузьких інтервалах параметрів ЕМП виявляється значно сильнішою, ніж поза цими інтервалами. Група Ю.А. Холодова [12] у своїх дослідженнях реакції центральної нервової системи на дію ЕМП різних частот визначила таку специфічну їх дію у діапазоні 7–10 Гц. У цьому діапазоні спостерігається підвищена чутливість клітинних і тканинних структур.

Режими лікувального впливу низькочастотним магнітним полем, що найчастіше використовуються, можна поділити на три типи: робота з застосуванням однієї частоти, робота з одночасним застосуванням декількох дискретних значень частот і робота з складними (синтезованими) частотними спектрами.

Перший режим – робота на одній частоті – завдяки своїй простоті одержав найбільшого поширення в практиці фізіотерапевтичних кабінетів.

Більш результативним режимом є використання наборів дискретних значень частоти.

Проміжним режимом між першим і другим є робота з періодичною послідовністю прямокутних і пилоподібних імпульсів.

Ведуться роботи з вивчення впливу слабкої інтенсивності імпульсного низькочастотного електромагнітного поля (ІНЕМП) на людину [4]. Ще в 1968 р. А.С. Пресман відзначив їх позитивний вплив на функціональний стан серцево-судинної системи і визначив біотропність організму до певних частот.

Патогенетична дія ІНЕМП зумовлена регулюючим впливом на нейро- і гемодинаміку, мікроциркуляцію і базується на діапазонно-частотних резонансних ефектах слабких електромагнітних полів, до яких організм людини проявляє особливо високу індивідуальну чутливість.

Головним об'єктом впливу ІНЕМП є мембрана, де відбувається багато фізіологічних процесів, які необхідні для функціонування клітини. Механізм біологічної дії ІНЕМП може бути пов'язаний з наведенням через мембранного потенціалу, що змінює функціонування клітин і тканин в силу впливу на фізико-хімічні процеси у мембранах.

Індукціонування зарядів на поверхні мембран викликає появу електрорушійної сили і зміну векторів диполів, внаслідок чого виникає різноманіття біологічних процесів: зміна активності ферментів білкових комплексів, що впливають на мікроциркуляцію, на звертання крові та проникності судин. Відбувається розширення судин мікроциркулярного русла, посилення капілярного кровотоку, зняття спазмів артерій.

Фізичною основою біологічних ефектів ІНЕМП є керування осциляцією білкових частинок, зміна об'ємних зарядів біля стінок судин, що змінюють реологію крові, мікроциркуляцію, швидкість обмінних процесів.

Дія ІНЕМП на заряджену частинку в біологічному об'єкті полягає в тому, що вона дає можливість і час для додаткового переміщення відносно свого початкового положення. Така дія поля на біологічні об'єкти є низькоенергетичною, нетепловою, специфічною та інформаційною (резонансною).

У літературі [16] наведені результати клінічних досліджень лікування хворих на остеоартрит колінного суглобу. У дослідженнях брали участь дві групи пацієнтів. Першу групу хворих лікували традиційним способом. Для лікування другої групи використовували імпульсне магнітне поле (параметри в табл. 1). Дослідження показали, що лікування за допомогою магнітного поля дає кращі результати, ніж при лікуванні звичайним способом. Припускається, що дія магнітного поля полягає в стримуванні запалювальних реакцій на мембранному рівні клітин.

Третій режим – робота з ЕМП, що характеризується широкополосним частотним спектром. До такого режиму відноситься одержання спектра ЕМП, близького до спектра геомагнітного поля в періоди його спокійного стану («екологічно чисте» ГМП). Відповідно до клінічних досліджень, найефективніший терапевтичний вплив спостерігається в третьому режимі. Але створення такого поля є дуже складним завданням, тому цей режим не отримав широкого розповсюдження. У своїй більшості для різних терапевтичних цілей використовується вищезгадане імпульсне низькочастотне поле.

13. *Холодов Ю.А., Лебедева Н.Н.* Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля. – М.: Наука, 1992.
14. *Челноков А.Н.* Применение импульсного сложномодулированного электромагнитного поля в лечении диафизарных переломов костей голени по Г.А. Илизарову// Российский научный центр "Восстановительная травматология и ортопедия" им. акад. Г.А. Илизарова. – Пермь, 1997.
15. *Энглези А.П., Кардаш А.М., Мухина В.И.* Застосування змінного магнітного поля в комплексному лікуванні хворих з важкою черепно-мозковою травмою // Бюлетень Української Асоціації Нейрохірургів. – 1999. – № 4. – С. 56–59.
16. *Trock D.H., Bollet A.J., Dyer R.H., Fielding Jr. L.P., Miner W.K. and Markoll R.* A double-blind trial of the clinical effects of pulsed electromagnetic fields in osteoarthritis // J. Rheumatol. – 1993. – № 20. – P. 456–460.

СВІСТЕЛЬНИК Сергій Сергійович – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютеризованих технологій Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– вивчення механізму впливу електромагнітних полів на організм людини.

Подано 29.08.2000