

УДК 612.176:612.014

# ВПЛИВ НЧ-МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА КЛІТНИ, ТКАНИНИ ТА ОРГАНИ ЛЮДИНИ

Шликов Владислав Валентинович  
[v.shlykov@kpi.ua](mailto:v.shlykov@kpi.ua)

Вовянюк Світлана Ігорівна  
[sivovianko@gmail.com](mailto:sivovianko@gmail.com)

Кафедра біомедичної інженерії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
м. Київ, Україна

*Реферат* – У роботі розглянуто основні підходи ряду авторів до аналізу електромагнітних процесів, що відбуваються в організмі людини на молекулярному та клітинному рівнях. Описано особливості впливу магнітного поля на органічні сполуки та біологічні системи. Сформульовано фундаментальні положення механізмів дії магнітного поля та їх теоретичні обґрунтування. Представлені резонансні ефекти поглинання в біологічних середовищах та перехідні процеси в них, що супроводжуються дисперсією діелектричних властивостей та провідності тканин. Наведено кілька магнітних включень у тканинах, що зумовлюють різну залишкову намагніченість ділянок тіла та різні електромагнітні спектри поглинання.

*Ключові слова* магнітне поле, резонансні ефекти, залишкова намагніченість, біологічні системи.

## I. ВСТУП

З опублікованих досліджень [1 – 3] відомо, що на усіх рівнях функціонування організму людини відбуваються різноманітні електромагнітні процеси. Вивчення коливальної організації на молекулярному і клітинному рівнях призводить до встановлення механізмів синхронізації коливань у біологічних системах при об'єднанні їх у структури, які послідовно ускладнюються [1].

Ефект впливу магнітного поля (МП) на органічні сполуки та біологічні системи можна оцінити через первинні молекулярні механізми, які залежать від параметрів поля, що на них впливає. Для пояснення впливу магнітного поля на біохімічні процеси можна підсумовувати такі теоретичні обґрунтування [2]:

1. Розрахунки, наведені Дорфманом, показують вибудовування розчинених макромолекул під дією магнітного поля напруженістю 120 - 1200 А/м та появу значних градієнтів концентрацій у неоднорідному магнітному полі, що відбивається на кінетиці фізико-хімічних та біологічних процесів.
2. Припущення Валентинузі, що броунівська ротація молекул (ротаційна дифузія) може бути відповідальна за кількість хімічно ефективних зіткнень, яке ґрунтується на впливі постійного магнітного поля напруженістю 10 А/м на швидкість біохімічних реакцій, що проходять за участю парамагнітних молекул.
3. Гіпотеза Гроссе, яка заснована на припущенні, що у постійному магнітному

полі може відбуватися пригнічення ферментативної активності, спричинене зміною кута зв'язку (орбіталі) парамагнітних молекул.

4. Квантово-механічна теорія, яка розвинена Кобелевим і заснована на припущенні управляючого впливу магнітного поля на параметри об'ємної колективної взаємодії простих високомолекулярних сполук при утворенні макромолекулярних структур, що обумовлено квантовими силами обмінної природи.

Наведені теорії та гіпотези у підсумку дають змогу сформулювати основні фундаментальні положення щодо механізмів дії магнітного поля та їх теоретичне обґрунтування.

Для пояснення біологічної дії МП на основі цих гіпотез необхідно враховувати також факт впливу постійного магнітного поля на фізико-хімічні властивості води (поверхневий натяг, електропровідність, діелектричну проникність, поглинання випромінювання), оскільки зміна властивостей води тягне за собою зміни в структурі системи води з молекулами білків, нуклеїнових кислот та ліпідів.

## II. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є аналіз основних підходів ряду авторів до пояснення механізмів впливу магнітних полів на клітини, тканини і органи людини, та дослідження електромагнітних процесів, що відбуваються в організмі людини на молекулярному та клітинному рівнях.

## III. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ВПЛИВУ МП

Серед магнітобіологічних ефектів, що описують фізико-хімічні механізми дії магнітного поля, можна виділити такі фундаментальні положення [3]:

1. Існування вільних радикалів, які, взаємодіючи з магнітним полем, змінюють ймовірність перебігу елементарних актів взаємодії в біологічних реакціях завдяки впливу магнітного поля на стан електронної структури;
2. Зміна швидкості або механізму процесу дифузії (зокрема, через клітинну мембрану) та орієнтації біологічних макромолекул, що мають магнітну сприйнятливості;
3. Зміна валентних кутів зв'язку у парамагнітних молекулах;
4. Зміна ротаційної поляризації молекул, які мають активний центр;
5. Напівпровідникові ефекти в молекулах ДНК та білків у магнітному полі.

Під дією магнітного поля, в біологічних середовищах, що містять білкові молекули і нуклеїнові кислоти, які мають електричну полярність, виражену діамагнітну анізотропію та парамагнітну сприйнятливості, завдяки наявності системи електронів, виникає орієнтація молекул води, макромолекул білків і нуклеїнових кислот залежно від стану їх  $\pi$ -систем [3]. Орієнтація біомолекул у магнітному полі відбувається на броунівському русі білкових молекул у середовищі, а для біомолекул, які просторово обмежені у своєму русі, взаємодіями з сусідніми молекулами та структурними утвореннями в клітинах, крім анізотропії руху в середовищі спостерігається осциляція або зміна параметрів.

Анізотропія броунівського руху макромолекул у магнітному полі проявляється у діапазоні частот 100 Гц – 100 ГГц. До біохімічних процесів, чутливих до магнітного поля, відносять також вільнорадикальні реакції, реакції з перенесенням електронів у цитохромній системі, реакції, що йдуть за участю іонів металів перехідної групи, і ряд інших [4].

Оскільки ці біохімічні реакції протікають із чергуванням парамагнітно-діамагнітних станів, магнітне поле може викликати зміну швидкості як прямих, так і зворотних реакцій, що можна розглядати як результат некомпенсованих деформацій у молекулах [5].

Розглядаючи вплив магнітного поля на систему макромолекул білка, що включає в своє оточення крім органічних сполук іони та молекули води, необхідно також враховувати виникнення анізотропії трансляційного руху молекул води та локальні градієнти об'ємного заряду. Магнітна енергія (з розрахунку на молекулу), необхідна при цьому набагато менше, ніж енергія розриву слабких водневих зв'язків у молекулі.

У молекулярній системі, яка складається з молекули білка, оточеної молекулами води та органічних речовин, органічними та неорганічними іонами, може реалізуватися безліч коливальних станів. Молекули можуть перебувати в декількох різних станах (конформаціях), що практично не відрізняються один від одного [3]. Отже, переходи між двома станами біомолекули повинні характеризуватись дуже невеликою власною частотою, а величина енергії такого переходу може бути набагато меншою за теплову енергію  $kT$ , що становить при 300 K величину 0.026 eV. Хоча самі переходи можуть мати характер флуктуацій з випадковим розподілом за часом дуже малих величин параметрів станів, ймовірність їх реалізації значною мірою залежить від параметрів впливів (температури, параметрів магнітного поля). У слабких магнітних полях із щільністю потоку потужності порядку  $10^{-6} - 10^{-4}$  мкВт/см<sup>2</sup> при енергії поля, порівнянної з тепловою енергією  $kT$ , визначальну роль мають просторово-часові параметри

магнітного поля, які при комплексній взаємодії з власними електромагнітними полями білкових молекул змінюють їх внутрішню енергію [6]. У однорідному магнітному полі спостерігається помітне вибудовування макромолекул, а у разі градієнтного неоднорідного поля – значний градієнт концентрації [7]. Виявлена конфірмаційна нестійкість макромолекул у багатьох білках міозинового комплексу, які беруть участь у трансформації енергії при м'язовому скороченні, поєднана з окислювально-відновними реакціями та процесами транспорту іонів і синтезу АТФ у мембранах [8].

Однак не слід вважати, що первинний механізм реакції макромолекул білка на магнітне поле полягає лише у зміні властивостей води. Впливаючи на електронні системи біомолекул, магнітне поле здатне орієнтувати атомні групи та молекули, змінювати процес дифузійного поляризаційного руху та, відповідно, змінювати ймовірність елементарних актів молекулярної взаємодії, що призводить до зміни ймовірності перебігу елементарних біохімічних реакцій і, отже, до зміни швидкості та спрямованості біохімічних процесів. Очевидно, що індукуючи додаткові комбінаційні переходи між електронними станами з різною спіновою мультиплетністю, магнітне поле змінює ймовірність цих переходів і таким чином впливає на ймовірність перебігу хімічних реакцій. Наприклад, реакціями, що протікають через стани з різною спіновою мультиплетністю, є реакції рекомбінації двох радикалів.

У магнітному полі за рахунок різниці зесманівських енергій радикалів за час життя пари відбуваються переходи між триплетним та синглетним станом пари (синглет-триплетні переходи), і таким

чином виникає додатковий шлях рекомбінаційної реакції [3]. Перехід з одного стаціонарного стану до іншого супроводжується зміною дипольного моменту, поляризованості, розподілу електронної щільності, властивості симетрії та релаксаційної здатності. Крім того, за рахунок орієнтації магнітних моментів не спарених електронів у вільних радикалах, незважаючи на дію теплового руху, можливі спотворення валентних кутів у парамагнітних молекулах [2]. Отже, вплив магнітного поля змінює швидкість переходів між синглетними (реакційноздатними) та триплетними (нереакційноздатними) станами пар радикалів. Залежно від спінового стану радикальної пари зовнішнє магнітне поле з різною глибиною проникнення полегшує, або навпаки, ускладнює переходи між спіновими станами, що призводить до зміни співвідношення між продуктами, що утворюються через дію на різні спінові канали [9].

Енергія, що виділяється під час енергетичних переходів при поглинанні електромагнітного випромінювання, визначає власне електромагнітне поле макромолекули, яке здатне поширюватись і впливати на сусідні макромолекули. Критерієм протяжності взаємодії осциляторів може бути довжина хвилі випромінювання, що випромінюється при переходах в атомних угрупованнях. Оскільки в русі молекул білків беруть участь більші атомні групи (кілька поліпептидних ланок), при осциляції яких виникають осциляції частково не скомпенсованого заряду на поверхні біомолекули, в макромолекулярній системі матиме місце відмінність за щільністю заряду та частотою коливань. Магнітне поле, що змінюється з деякою частотою,

може не тільки викликає локальні конформаційні перебудови в макромолекулярній системі, але й синхронізує ці перебудови по всій макромолекулярній системі [3]. Виразність ефекту синхронізації молекул може посилюватися або послаблюватися залежно від ступеню узгодженості та односпрямованості змін коливальних станів компонентів системи під час взаємодії з магнітним полем.

Для реакцій радикалів довжина хвилі випромінювання, що випромінюється при синглет-триплетних переходах, які можуть відбуватися при малій напруженості зовнішнього магнітного поля, відповідає різниці енергетичних рівнів земаановських радикалів. Для осцилюючих систем, подібних до структурних утворень у клітині, характерною є резонансно-накопичувальна взаємодія з магнітним полем при незначній дисипації поглиненої енергії [3].

Механізм синхронізації ансамблів макромолекул пов'язаний із захоплення частоти коливань одних молекул частотою коливань інших молекул. Такого роду синхронізовані коливання макромолекул призводять у об'ємі клітини до коливань розмірів і форми органел, які утворюватимуть ансамблі органел, що синхронно коливаються в середині клітини. Ці ансамблі, що синхронно коливаються, повинні призводити до синхронно коливальних ансамблів макромолекул на поверхні клітин, викликаючи коливання ансамблів клітин і синхронізацію коливань на клітинному рівні [1]. У макромолекулах ці коливання завжди пов'язані з флуктуаціями електричного та магнітних моментів розподілу поверхневого електричного заряду, а у органелах та клітинах – з флуктуаціями розподілу

мембранного потенціалу та варіаціями постійного дипольного моменту.

Вплив магнітного поля на рухливість іонів викликає коливання іонів з частотою поля, що впливає у тій чи іншій мірі на їх здатність проникати через мембрану нервової клітини і, як наслідок, на її здатність до збудження. Наявність ліпідних доменних областей у біологічних мембранах молекул є умовою, яка забезпечує вплив магнітного поля на проникність мембран [5].

Ефект орієнтації ліпідних доменних областей у напрямку магнітного поля обумовлений анізотропією діаманітної сприйнятливості та поворотом молекул, здатним призвести до їх ранжування в одному з напрямків та створення нового міжмолекулярного порядку в біологічній структурі [5].

Вплив магнітного поля на проникність мембрани нервової клітини також викликає коливання молекул води, що гідратують білкові молекули поверхневого шару мембрани, які призводять або до порушення нервової клітини, або до зміни її збудливості. Крім того, вплив слабого змінного магнітного поля призводить до зниження резистивності мембрани, що обумовлює модифікацією структури та функції клітинних мембран [10].

Механізми впливу магнітного поля на біохімічні реакції трансформуються у макро-ефекти на клітинному рівні чи на рівні організму людини. Однак ці механізми пов'язані не зі зміною енергетики реакцій. Резонансні ефекти поглинання в біологічних середовищах виявляються у широкій області частот – від низьких до надвисоких. Механізми резонансного поглинання на молекулярному рівні являють собою макроскопічні процеси, в яких беруть участь ансамблі молекул, подібно до того,

як при конформаційних коливаннях молекул білка відбуваються зміни гідрофільно-гідрофобних властивостей поверхні молекул і зміщення електричних зарядів на їх поверхні, що означає можливість взаємодії цих коливань з відповідними частотами. [10]. Можливість резонансного поглинання білковими молекулами пов'язана з дисперсійними силами взаємодії в білках, що містять ряд нейтральних та негативно заряджених (поляризованих) основних бічних груп. Поглинання кванта енергії, що відповідає частоті резонансного поглинання, відбувається за рахунок флуктацій розподілу протонів і може призводити до зміни швидкості утворення фермент-субстратного комплексу. Можливість резонансного поглинання енергії поля макромолекулами пов'язана з внутрішньо-молекулярними процесами, такими як трансляційні переходи гідроксильних груп з одного положення з водневим зв'язком до іншого положення у просторі, завдяки обертанню внутрішніх молекулярних структур відносно С-С-зв'язків для метастабільних станів.

#### IV. ЧАСТОТНІ ТА ДИСПЕРСІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ

Безпосередньо резонансне поглинання було виявлено у макромолекулах білків, пептидів і амінокислот при зміні діелектричної проникності в широкому діапазоні частот – від 50 Гц до 30 ГГц. Ефект виникає як за рахунок резонансного поглинання енергії магнітного поля, так й у зв'язку з процесами релаксаційної поляризації [10]. Існує також можливість резонансного поглинання магнітного поля у всьому тілі людини або в окремих частинах тіла.

Оскільки процеси заряду та розряду відбуваються не миттєво, а за деякий кінцевий час релаксації  $\tau$ , який залежить від структури елементів та в'язкості середовища, будь-яка поляризація пов'язана з перехідними процесами та супроводжується дисперсією комплексної діелектричної поляризації  $\varepsilon^*$ .

Частотна залежність (дисперсія) виражається рівнянням:

$$\begin{aligned}\varepsilon^* &= (\varepsilon' - f\varepsilon'')\varepsilon_0, \text{ Ф/м,} \\ \varepsilon' &= \varepsilon'_{\text{нч}} + (\varepsilon'_{\text{нч}} - \varepsilon'_{\text{вч}}) / [1 + (\omega\tau)^2], \\ \varepsilon'' &= \varepsilon'_{\text{нч}} + \omega\tau(\varepsilon'_{\text{нч}} - \varepsilon'_{\text{вч}}) / [1 + (\omega\tau)^2],\end{aligned}$$

де  $\varepsilon'_{\text{нч}}$  – значення діелектричної проникності на НЧ;  $\varepsilon'_{\text{вч}}$  – значення діелектричної проникності на ВЧ;  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ , Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму;  $\varepsilon$  – абсолютна діелектрична проникність, Ф/м;  $\varepsilon' = \varepsilon / \varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність;  $\varepsilon''$  – коефіцієнт втрат;  $f = \omega / 2\pi$  – частота коливального процесу (електромагнітного поля), Гц.

Дисперсія активної провідності середовища:

$$\sigma = \sigma_{\text{нч}} + (\omega\tau)^2 (\sigma_{\text{нч}} - \sigma_{\text{вч}}) / [1 + (\omega\tau)^2], \text{ См,}$$

де  $\sigma_{\text{нч}}$  – провідність середовища на НЧ;  $\sigma_{\text{вч}}$  – провідність середовища на ВЧ.

Довжина хвилі коливального процесу, що розповсюджується в середовищі:

$$\lambda = c / (f\sqrt{\varepsilon'\mu'}), \text{ м,}$$

де  $\mu' = \mu / \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність, Гн/м;  $\mu$  – абсолютна магнітна

проникність вакууму;  $\mu_0 = 1.27 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – відносна магнітна проникність;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі.

На користь резонансного характеру поглинання свідчить наявність максимумів залежності тангенсу кута втрат  $tg(\delta)$  від частоти коливального процесу:

$$tg(\delta) = \sigma / (\omega\varepsilon'\varepsilon_0).$$

Так як для частот близько 10 МГц тканини тіла можна розглядати як провідники [10, 11],  $tg(\delta) > 1$ . Відповідно, для 10 Гц  $tg(\delta) = 1.8 \cdot 10^9 \cdot \sigma / \varepsilon'$  і для 10 кГц  $tg(\delta) = 1.8 \cdot 10^6 \cdot \sigma / \varepsilon'$ . У тканинах із найменшим ставленням,  $\sigma / \varepsilon'$  де питома провідність  $\sigma$  складає 0.10 - 0.20 См/м, а відносна діелектрична проникність  $\varepsilon'$  складає  $10^5 - 10^7$ , величина тангенсу кута втрат складає  $tg(\delta) = 18$  для 10 Гц і  $tg(\delta) = 3$  для 10 кГц. Монотонне зменшення  $tg(\delta)$  с зростанням частоти свідчить про зміну провідних властивостей біологічного середовища у бік прояву діелектричних властивостей [11], якщо кут втрат складає  $tg(\delta) > 1$ .

Достовірне визначення індивідуальних характеристичних частот можливе під час зміни нижнього абсолютного порогу чутливості шкірного аналізатора, заснованого на специфічних реакціях нервової системи, обумовлених її взаємодією з сигнальною системою, на рівні якої низькоінтенсивні електромагнітні сигнали впливають на метаболічні процеси клітини [12].

Наведені рівняння можна застосувати для трьох типів релаксаційних процесів [10]. Перший тип релаксації біомолекул, які мають постійний дипольний момент, коли

час релаксації  $\tau$  визначається в'язкістю середовища  $\eta$ , радіусом молекули  $a$  і абсолютною температурою реакції  $T$ :

$$\tau = \frac{4\pi}{\kappa} \cdot \frac{\eta a^2}{T}, \text{ сек,}$$

де  $\kappa = 1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Максимум діелектричних втрат (максимум тангенсу кута втрат)  $tg(\delta)$  настає, якщо частота коливального процесу збігається з характеристичною частотою:

$$\omega_\delta = 1 / \tau.$$

Другий тип відноситься до структури, яка містить частинки з діелектричною проникністю  $\varepsilon'_i$  і провідністю  $\sigma_i$ :

$$\tau = \varepsilon_o \cdot \frac{\varepsilon'_i + 2\varepsilon'_a}{\sigma_i + 2\sigma_a}, \text{ сек,}$$

де  $\varepsilon'_i$  – відносна діелектрична проникність середовища;  $\sigma_a$  – провідність середовища, См.

Третій тип релаксації пов'язаний з поляризацією на межах розділу за наявності середовищі, яке містить іони, частинок різного розміру з поверхневими електричними зарядами.

Якщо виконується умова квазістаціонарності, для довжини структури  $l \ll \lambda$ , вплив на об'єкт можна оцінити за законами постійного струму [10, 13]. Магнітне поле, що діє на таку структуру, індукватиме в ній вихрове електричне поле, яке викличе вихрові струми із щільністю:

$$i = E(\sigma_a - j\omega\varepsilon'_a\varepsilon_o), \text{ А/м}^2,$$

де  $E$  – напруженість індукваного електричного поля, В/м. При цьому щільність струму не рівномірно розподілена

за перерізом біоструктури і зменшується від поверхні до осі.

Глибина проникнення визначається:

$$d = \left( \frac{1}{2} \omega \sigma_a \mu \right)^{-1/2}, \text{ м,}$$

а коефіцієнт поглинання:

$$\gamma = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} (\sqrt{1 + tg(\delta)} - 1)}.$$

За умови, що лінійні розміри біоструктури  $l_x \approx \lambda$  проникнення потоку потужністю  $P_o$  вглиб і на відстань  $x$  від поверхні визначається:

$$P_x = P_o(1 - K)e^{-2\gamma \cdot x}, \text{ Вт,}$$

де  $K = (\sqrt{\varepsilon^*} - 1)^2 / (\sqrt{\varepsilon^*} + 1)^2$  – коефіцієнт відбиття потоку потужністю  $P_o$  від поверхні біоструктури.

При низькій частоті магнітного поля мембрани клітин поведуться як ізолюючі шари і можлива тільки іонна провідність. Низькочастотні струми можуть протікати лише у зовнішньому середовищі, що зумовлює низьку питому провідність тканин.

При взаємодії у тканинах магнітного поля з біострумами, частоти яких варіюються від 0.6 до 33.3 Гц, можуть виникати пульсуючі пондермоторні сили [9], які при напруженні поля 1 - 13 А/м чинять тиск порядку  $10^{-11} - 10^{-6}$  Н/см<sup>2</sup> (магнітомеханічний ефект). У цьому випадку можливі резонансні ефекти, якщо частота вимушених пульсацій на ділянці тканини органа, де протікають біоструми, збігається з частотою його вільних коливань  $f = \omega / 2\pi$ .

Зі збільшенням частоти відбувається зростання питомої провідності, що можливо за рахунок зменшення ємнісного опору мембрани, що веде до зростання впливу внутрішньоклітинного середовища в загальній провідності тканини. На можливість змін структури та функції клітинних мембран у слабкому магнітному полі вказують зміни осмотичної резистентності мембрани еритроцитів та ознаки деструктивних змін її ліпопротеїнової основи [14].

Крім того, на низьких частотах спостерігається відносно високе значення діелектричної проникності  $\varepsilon'$  та різке падіння цієї величини зі збільшенням частоти ( $\alpha$ -дисперсія), пов'язане з релаксацією процесів заряду і розряду на мембрані клітини або з релаксацією, обумовленої іонним оточенням електрично зарядженої поверхні клітини [10]. На низьких частотах, клітинні мембрани встигають зарядитися за рахунок іонів поза і всередині клітини протягом одного періоду, що обумовлює їх великий повний заряд і значну ємність тканини. Дисперсія комплексної діелектричної проникності обумовлена як релаксацією полярних груп макромолекул, так й резонансним поглинанням магнітного поля.

Залежність відносної діелектричної проникності  $\varepsilon'$  та питомого опору  $\sigma$  м'язової ( $\varepsilon'_M, \sigma_M$ ) та жирової тканини ( $\varepsilon'_\chi, \sigma_\chi$ ) від частоти в області низьких частот ( $\alpha$ -дисперсія) представлена на рис. 1а, і рис. 1б.

Діелектричні властивості водної оболонки виявляють дисперсію лише на частотах вище 100 МГц ( $\beta$ -дисперсія), а характеристичні частоти зв'язаної води лежать у діапазоні від 100 МГц до 2 ГГц ( $\gamma$ -дисперсія). Для кісткових тканин

дисперсія спостерігається в діапазоні вище 100 МГц, тоді як для жирових тканин дисперсія не спостерігається, оскільки параметри таких тканин практично не залежать від частоти в цьому частотному діапазоні [10].

Залежно від вмісту у тканинах води їх можна розділити за електричними властивостями на три групи:

1. Суспензію клітин та білкових молекул рідкої консистенції – кров та лімфа;
2. Суспензію клітин і білкових молекул, які знаходяться у ущільненому стані – м'язи, шкіра, печінка, серце;
3. Тканини з малим вмістом води – кістки та жир.

Численними дослідженнями [15, 16, 17, 18] доведено наявність тісного зв'язку між обміном речовин та функціональною діяльністю нервових клітин. Вплив низькочастотного імпульсного магнітного поля викликає зниження вмісту глікогену та кератинфосфату в нервовій тканині, серці, м'язовій тканині та підвищення вмісту молочної та піровиноградної кислот у печінці, серці, м'язовій тканині, а також пригнічення процесів окисного фосфорилування, що є одним з основних процесів обміну речовин в організмі людини [17, 19].

Реакції нервової тканини на магнітне поле мають у основі зміни властивостей генерації імпульсів нейронами. Зміни функціональної діяльності нейронів є відображенням зміни характеру їхнього внутрішньоклітинного метаболізму [20]. В процес активізації нейронів під час впливу магнітним полем можуть бути залучені не тільки малоактивні та не функціональні системи, а й контакти несинаптичної природи (нейронно-нейронні, дендритно-дендритні, дендрогінальні), що вказує на можливість електротонічної взаємодії між



нейронами та структурними елементами кори головного мозку [9]. Цей механізм взаємодії свідчить про вплив магнітного поля на вищу нервову діяльність [16, 18].

Реакції центральних та периферичних систем на електромагнітне поле різні за швидкістю відгуку на подразнення. Реакції центральних систем на короточасний (одноразовий) вплив є інерційними, а реакції периферичних систем мають двофазну залежність від інтенсивності і тривалості впливу [10].

Чутливість нервових клітин до індукованого магнітним полем градієнта електричного поля становить 10 мВ/см. Крім того, магнітне поле діє на нервову систему як слабкий електричний струм, здійснюючи спонтанне периферичне роздратування [13]. Отже, нервова система може реагувати на магнітне поле як прямо, так і рефлекторним шляхом.  $1 \cdot 10^{-13}$

У біологічних тканинах відбувається безперервна генерація електричних струмів, обумовлених генерацією електричних зарядів поблизу поверхні мембран за рахунок енергії метаболізму та безперервних потоків крові та біологічних рідин зі швидкостями від 5-8 м/с до 0,5-1,2 мм/с [21]. Сумарний змінний потенціал дії багатьох волокон індукує сигнал магнітного поля, що має як постійну, так і змінну складову. Спектральний аналіз цього сигналу показав наявність піку 40 Гц при

вимірі вище ліктя та пік 80 Гц при вимірі біля долоні руки [13]. При розширеній смузі реєстрації (ширина лінії пропускання 4 кГц) спостерігався пік близько 400 Гц при рівні білого фоновому шуму  $1 \cdot 10^{-13}$  Тл. Глибина розташування джерела магнітних сигналів від поверхні шкіри становила 1 см.

Волокна серцевого м'яза під час деполяризації генерують електромагнітне поле в діапазоні частот від 30 Гц до 700 Гц, при цьому флюктуюче поле має максимум трохи менше  $1 \cdot 10^{-10}$  Тл. Спектр електромагнітних коливань, які генеруються тканинами печінки, становить 30 – 160 Гц. Електромагнітна активність мозку виявлена в діапазоні 200 – 500 Гц, а спектр електромагнітних коливань тягнеться до 100 кГц [1].

Змінне низькочастотне магнітне поле частотою 50 Гц по-різному змінює показники вуглеводного обміну, зокрема ферменту гексогінази в цитоплазмі та мітохондріях скелетного та серцевого м'язів, знижує її активність у печінці, нирках та особливо у серці. Під дією змінного магнітного поля малої індукції в кровоносних судинах в результаті дегрануляції утворюється гістамін, який, потім вивільняючись в органах, викликає зміни процесів окислення ліпідів, які значною мірою впливають на процес конформації та функції мембранозв'язаних білків та ферментів у тканинах органів.

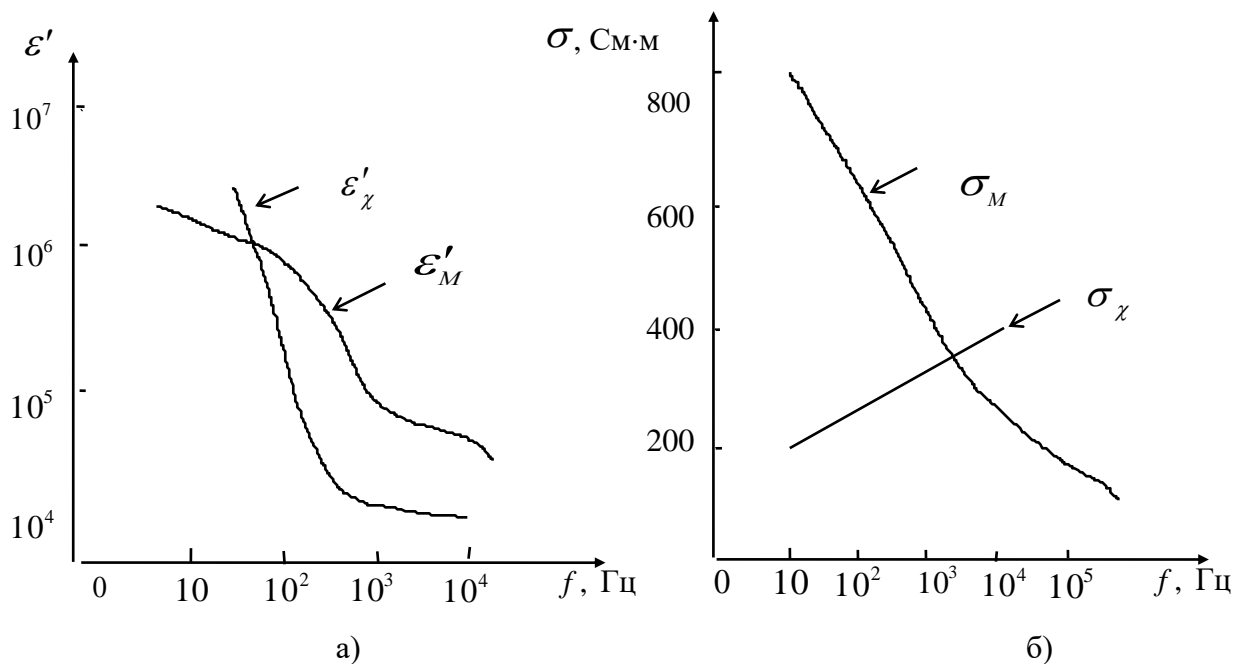


рис. 1. Залежності відносної діелектричної проникності  $\epsilon'$  та питомого опору  $\sigma$  від частоти  $f$  під час впливу на живі тканини низькочастотним МП: а) діелектрична проникності м'язової  $\epsilon'_M$  та жирової тканини  $\epsilon'_\chi$ , б) питомий опір м'язової  $\sigma_M$  та жирової тканини  $\sigma_\chi$ .

При цьому під дією низькочастотного змінного магнітного поля частотою 9 - 12 Гц будь-яких суттєвих змін у вмісті загального білка та білкових фракцій у крові, крім зниження кількості еритроцитів, не відбувається. Вплив змінного магнітного поля на вміст загальних ліпідів у крові, міокарді та печінці призводить до зниження рівня загальних ліпідів та підвищення рівня жирних кислот [20]. Оскільки рівень вільнорадикальної активності в різних тканинах неоднаковий, активність реакцій, які йдуть за цим механізмом, найбільша в печінці і значно менша в м'язах, нирках, серці, селезінці та легенях.

Під впливом магнітного поля у кровоносних судинах виникає знаний градієнт електричного потенціалу (магнітоелектричний ефект). Наприклад, при швидкості кровотоку 100 см/с під дією магнітного поля напруженістю 6.3 А/м індукуються електричне поле з градієнтом

0.14 мВ/см; при напруженості 6300 А/м – електричне поле з градієнтом 5 мВ/см (Neurath, 1964). Під час впливу низькочастотним імпульсним магнітним полем частотою 10, 20 і 30 Гц з індукцією 80 мТл збільшувалася резистивність та підвищувалася кислотостійкість найбільшого числа еритроцитів. На цих частотах підвищувався за абсолютним значенням електрокінетичний потенціал клітин на 3 - 4 мВ, що є показником колоїдно-фізичного стану поверхні еритроцитів. Зміна заряду еритроцитів та в'язкості крові показує, що низькочастотне магнітне поле змінює фізико-хімічні властивості плазми та вміст лейкоцитів та гемоглобіну в крові [9]. Під дією низькочастотного магнітного поля з інтенсивністю 1 - 2 А/м спостерігається підвищення глобуліну та зниження альбумінів у крові [17].

Механізм взаємодії магнітних полів з живими тканинами передбачає також перетворення поглиненої в тканинах енергії на теплову. Цей ефект особливо значний під час впливу магнітного поля досить високих інтенсивностей [10].

Характер поглинання визначається головним чином товщиною підшкірного жирового шару. Оскільки підшкірний шар має нижчі значення  $\varepsilon'_x$  і  $\sigma_x$ , ніж для глибше розташованих м'язових тканин ( $\varepsilon'_M, \sigma_M$ ), потужність, що поглинається, буде вище в підшкірному шарі і нижче в м'язових тканинах [10]. Цей ефект залежить від товщини жирового шару та частоти магнітного поля.

Відносний розподіл енергії, яка поглинається в тому чи іншому шарі тканин, може значно зрости у порівнянні з випадком поширення хвиль у цій тканині при поглинанні енергії, якщо на межі розділу тканин, що мають різні електричні параметри, виникають стоячі хвилі. Виникнення стоячих хвиль можливе у випадках, якщо товщину шару тканин можна порівняти з довжиною хвилі, величина якої залежить від електричних параметрів тканини ( $\sigma_M, \sigma_x$ ).

Для статичного магнітного поля потужність поглинається в одиниці об'єму тіла людини [10] визначається:

$$P_M = i_H \rho_{CP}, \text{ Вт/см}^3,$$

де  $i_H = 1.3 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot H$  – щільність струму, індукованого магнітним полем, А/см<sup>2</sup>;  $\rho_{CP}$  – середня питома гомогенна провідність тканин тіла людини, См/см;  $H$  – напруженість магнітного поля, А/см.

Розвиток досліджень призвів до виявлення у тканинах магнітних включень (магнетиків), що відображено у різній залишковій намагніченості ділянок тіла.

Включення магнетиків представляють комплексні мікрочастинки з дво-, тривалентним іоном якогось металу ( $\text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$ ) і є джерелами магнітних полів організму [13, 22]. Магнітні моменти таких комплексних іонів зумовлюють різні електромагнітні спектри поглинання органічних сполук у тканинах та рідких середовищах організму [23].

## V. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в організмі людини на молекулярному та клітинному рівнях дає змогу в загальному підсумку зробити наступні висновки:

1. Перетворення енергії магнітного поля у теплову пов'язане з діелектричними втратами та з втратами на провідність.

2. У низькочастотному діапазоні перетворення енергії в основному пов'язане з втратами на провідність, що виникають за рахунок виділення в тканинах джоулевого тепла, індукованого в них іонними струмами.

3. Резонансне поглинання енергії поля макромолекулами пов'язано з внутрішньо-молекулярними процесами, такими як трансляційні переходи гідроксильних груп.

4. Під впливом магнітного поля у кровоносних судинах виникає знаний градієнт електричного потенціалу (магнітоелектричний ефект).

5. Реакції центральних систем на короткочасний вплив магнітним полем є інерційними, а реакції периферичних систем мають двофазну залежність від інтенсивності і тривалості впливу.

Слід зазначити, що активність реакцій на вплив магнітного поля найбільша в печінці і значно менша в м'язах, нирках, серці, селезінці та легенях. Проте вивчення механізмів впливу МП на тканини та огра

людини має стан наукових гіпотез і потребує додаткових досліджень.

**Фінансування.** Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

**ORCID ID та внесок авторів:**

0000-0001-8836-4658 (A, D, F) Vladyslav Shlykov

0000-0002-6889-3197 (B, C, E) Svitlana Vovianko

A – Концепція роботи та дизайн, B – аналіз стандартів надання медичної допомоги та протоколів лікування, C – Проектування алгоритмів, D - Написання статті, E - Критичний огляд, F - Остаточне схвалення статті.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Пресман А.С. Электромагнитная сигнализация в живой природе. М.: "Сов. радио", 1974. - 64 с.
2. Холодов Ю.А. Магнетизм в биологии. М.: Наука, 1970. - 97 с.
3. Аристархов В.М., Цыбышев В.П. Физико-химические основы первичных механизмов биологического действия магнитного поля. - В сб.: Влияние магнитных полей на биологические объекты. М.: Наука, 1971, с. 6-18
4. Демецкий А.М. Введение в медицинскую магнитологию. - Ростов на Дону: изд-во Ростовск. ун-та, 1991. - 94 с.
5. Демецкий А.М. Искусственные магнитные поля в медицине. - Минск: Беларусь, 1981. - 94 с.
6. Мурзалевская Н.И., Шушков Г.Д. Исследование биотропности параметров слабого магнитного поля для диапазона сверхнизких частот. - В сб.: Влияние магнитных полей на биологические объекты. М.: Наука, 1971, с. 199-207
7. Дорфман Я.Г. Физические явления, происходящие в живых объектах под действием постоянных магнитных полей. - В сб.: Влияние магнитных полей на биологические объекты. М.: Наука, 1971, с. 15-23
8. Шноль С.Е. Конформационные колебания макромолекул. - В сб.: Колебательные процессы в

биологических и химических системах. М.: Наука, 1967, с. 22-41

9. Механизмы лечебного действия магнитных полей: сб. науч. тр. /отв. ред. А.М. Демецкий, В.Н. Чернов.- Витебск: изд-во Витеб. мед. ин-та, 1987.- 186 с.

10. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. - М.: Наука, 1968. - 288 с.

11. Соловьева Г.Р. Магнитотерапевтическая аппаратура. - М.: Медицина, 1991. - 176 с.

12. Геращенко С.И. Основы лечебного применения электромагнитных полей микроволнового диапазона.- К.: "Радуга", 1997. - 223 с.

13. Холодов Ю.А. Магнитные поля биологических объектов. - М.: Наука, 1987. - 143 с.

14. Темурьянц Н.И. Влияние магнитных полей сверхнизкой частоты и малой напряженности на лейкоциты периферической крови. - В сб.: Реакции биологических систем на слабые магнитные поля. М.: Наука, 1971

15. Холодов Ю.А. Влияние магнитного поля на нервную систему. - В сб.: Влияние магнитных полей на биологические объекты. М.: Наука, 1971, с. 124

16. Холодов Ю.А. Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему. - М., 1966. - 283 с.

17. Лазарович В.Г. Влияние электромагнитных полей на обмен веществ в организме. - Львов: "Вища школа", 1978. - 113 с.

18. Холодов Ю.А. Мозг и электромагнитные поля. - М.: Наука, 1982. - 120 с.

19. Холодов Ю.А. Реакции организма человека на магнитные поля. - В сб.: Проблемы космической биологии, т. 18. М.: Наука, 1978, с. 143-163

20. Холодов Ю.А. Реакции биологических систем на магнитные поля. - М.: Наука, 1978.- 213 с.

21. Берлин Ю.В., Белькевич В.И., Гак Е.З. Некоторые особенности действия импульсных магнитных полей на электропроводные жидкости и биологические системы. - В сб.: Влияние магнитных полей на биологические объекты. М.: Наука, 1971, с. 39-47

22. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. - К.: "Наукова думка", 1990. - 224 с.

23. Сафутдинов Р.Г. Парамагнитные центры в плазме крови. - В сб.: Магнитный резонанс в биологии и медицине: симпозиум, тезисы, май. М., 1989, с. 82-89

UDC 612.176:612.014

# INFLUENCE OF LOW MAGNETIC FIELDS ON HUMAN CELLS, TISSUES AND ORGANS

Vladyslav Shlykov

[v.shlykov@kpi.ua](mailto:v.shlykov@kpi.ua)

Svitlana Vovianko

[sivovianko@gmail.com](mailto:sivovianko@gmail.com)

Department of Biomedical Engineering  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
Kyiv, Ukraine

*Abstract* – In a paper the main approaches of a number of the authors to the analysis of electromagnetic processes happening in an organism of the man at molecular and cell-like levels are discussed. The features of effect of a magnetic field on organic connections and biological systems are circumscribed. The fundamental positions of mechanisms of operation of a magnetic field and their theoretical substantiations are formulated. The resonance effects of an absorption in the biological environments and transients in them accompanying by a dispersion of dielectric properties and conductivity of fabrics are represented. Some magnetic inclusions in fabrics of sites and various electromagnetic spectra of an absorption causing a various residual magnetization of a body are reduced.

**Key words** – magnetic field, resonance effects, residual magnetization, biological systems.