

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

С. М. Куліш, В. П. Олійник, Ю. А. Волошин

**РАДІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ХВИЛЬОВИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ У БІОМЕДІНЖЕНЕРІЇ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2018

УДК 621.371.37.029.65:577.3(075.8)  
К90

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. І. Ш. Невлюдов,  
канд. техн. наук, доц. В. І. Огар

**Куліш, С. М.**

К90 Радіофізичні основи інформаційно-хвильових технологій у біомедіаженерії [Текст] : навч. посіб. / С. М. Куліш, В. П. Олійник, Ю. А. Волошин. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 68 с.

ISBN 978-966-662-645-8

Розглянуто параметри електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону, від яких залежать механізми нетеплової інформаційної дії на біологічні об'єкти. Особливу увагу приділено впливу випромінювання міліметрового діапазону хвиль на біологічні структури й фізичному поясненню їх дії, що є основою інформаційно-хвильових технологій у медицині.

Для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія».

Іл. 13. Табл. 6. Бібліогр.: 15 назв

**УДК 621.371.37.029.65:577.3(075.8)**

© Куліш С. М., Олійник В. П.,  
Волошин Ю. А., 2018

© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2018

ISBN 978-966-662-645-8

## ВСТУП

**Біомедична інженерія** виникла на перетині точних і медико-біологічних наук. Це міждисциплінарна галузь, яка поєднує інженерію і науки про життя, охоплює діяльність широкого спектра: від безпосереднього клінічного застосування до довгострокових фундаментальних досліджень природних і штучних біомедичних об'єктів. Прикладом такого поєднання є інформаційно-хвильові технології, у яких використовуються штучно створені електромагнітні поля (ЕМП) наднизької інтенсивності як діючий лікувальний фізичний чинник, а медико-біологічною основою для них є східна методика акупунктури й сучасна клінічна медицина й діагностика.

В останні десятиліття ХХ-го сторіччя з'явилися перші повідомлення про лікувальну дію низькоінтенсивних електромагнітних полів надто високих частот (НВЧ), для яких густина потоку потужності становила менше  $10 \text{ мВт/см}^2$ . Такі слабкі ЕМП впливають на зони тіла або точки акупунктури, не викликаючи розігрівання тканин, але при цьому мають виражений лікувальний ефект.

Висока лікувальна ефективність низькоінтенсивних ЕМП, фізичні характеристики яких наближаються до електромагнітних параметрів структур живого організму, стала поштовхом до вивчення механізмів дії випромінювання надслабких енергій на організм.

Вихідним пунктом для аналізу механізмів взаємодії між організмом людини і ЕМП є уявлення про живий організм як про складну електромагнітну ієрархічну структурну систему, усі рівні якої містять електричні заряди і, відповідно, генерують ЕМП. Так, клітини нервової системи генерують електричні імпульси, які здійснюють адаптивне управління функціями окремих органів і всього організму в цілому. Клітини крові, тканин і органів також містять електричні заряди й генерують ЕМП, які складним чином об'єднуються в загальне електромагнітне поле організму. Це поле, поширюючись у навколишній простір, включаючи внутрішнє середовище організму й шкіру, може прийматися сучасними радіоелектронними пристроями, оброблюватися й інтерпретуватися. Зовнішні й внутрішні, природні й штучні фактори й хвороби впливають на роботу різних органів і систем і призводять до зміни їх електромагнітних параметрів і, відповідно, функціональних властивостей. Тому електромагнітні характеристики використовуються одночасно для діагностики й лікування захворювань.

Очевидно, що для створення апаратних засобів реалізації інформаційно-хвильових технологій необхідна методологічна основа. Як таку основу пропонується розглянути радіофізичні аспекти взаємодії ЕМП і біологічних структур.

# 1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ І ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

## 1.1. Кількісні характеристики електромагнітного поля

Електромагнітні поля (ЕМП) є фізичним чинником довкілля, який впливає на речовину й живі організми різних рівнів організації. Життя на Землі сформувалося під впливом електромагнітного й корпускулярного випромінювання Галактики, Сонця й планет Сонячної системи – найпотужніших природних джерел фізичних полів. У ноосфері постійно відбуваються безперервні й імпульсні електромагнітні, корпускулярні та пов'язані з ними біохімічні й біофізичні процеси, розподілені в широкому спектрі часових і просторових частот. Логічно припустити, що будь-яка ділянка цього спектра набула відображення в еволюції живих організмів і процесів їх життєдіяльності.

Розвиток людської цивілізації додав до природних ЕМП і радіації нові фізичні фактори антропогенного походження, загальні рівні яких тільки за останні роки підвищилися в десятки й сотні тисяч разів. При розширенні областей прикладних застосувань ЕМП і освоєнні нових частотних діапазонів в антропогенній (техногенній) складовій ЕМП збільшилася інтенсивність випромінювання на окремих частотах і в окремих частотних діапазонах, насамперед на промислових частотах 50, 60 і 400 Гц, на потужних електростанціях і розгалужених мережах випромінювання ліній електропередач. Висока інтенсивність випромінювання спостерігається і в діапазонах, виділених для зв'язку й телебачення, промислового й технологічного застосування, радіолокації, навігації, стільникового зв'язку і т. д. У зв'язку з розвитком органічної хімії і технології полімерів, широким застосуванням у побуті й на виробництві синтетичних матеріалів підвищилися також рівні електростатичних і наднизькочастотних електричних полів. Кожен з перелічених діапазонів має свої особливості, які пов'язані з глибиною їх проникнення в речовину, дальністю дії і траєкторією поширення, здатністю огинати перешкоди і взаємодіяти з довкіллям і об'єктами біосфери.

Для практичного застосування штучні ЕМП почали інтенсивно використовуватися у технологіях зв'язку. Сучасну цивілізацію важко уявити без радіозв'язку, комп'ютерної техніки, телекомунікацій, радіолокації і радіонавігації – досягнень цивілізації XX–XXI століть.

Разом з традиційними сферами застосування ЕМП сьогодні істотно розширюється сфера й нетрадиційного застосування: широке використання ЕМП в дистанційному зондуванні (моніторингу) довкілля, Землі й Космосу, сільському й лісовому господарстві, біології й медицині, у тому числі нетрадиційній. Свідченням величезного значення ЕМП для біологічних систем є стрімкий розвиток за останні два десятиліття таких галузей науки, як електромагнітна біологія, що вивчає функції ендо- і екзогенних ЕМП у процесах життєдіяльності організмів, а також

електромагнітна медицина і ветеринарія, у яких використовують ЕМП для діагностики й лікування людей і тварин.

Розглянемо стисло основні кількісні співвідношення, що характеризують фізичний фактор дії – електромагнітну хвилю, середовище, у якому вона поширюється (вакуум, межа розділу, діелектрик, жива тканина), і фізичні ефекти, які при цьому виникають. Скористаємося рекомендованою Міжнародним Комітетом шкалою діапазонів довжин хвиль і частот (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Шкала електромагнітних хвиль і частот

Назва діапазону хвиль	Довжина хвилі $\lambda$	Частота $\nu$
Низькочастотні хвилі	Понад 100 км	$\sim 0 \dots 3$ кГц
Радіохвилі		
Міріаметрові (дуже низькі частоти)	100...10 км	0,3...3 кГц
Кілометрові (низькі частоти)	10...1 км	30...300 кГц
Гектометрові (середні частоти)	1 км...100 м	300 кГц...3 МГц
Декаметрові (високі частоти), ДКМ	100...10 м	3...30 МГц
Метрові (дуже високі частоти)	10...1 м	30...300 МГц
Дециметрові (ультрависокі)	1 м...10 см	300МГц...3ГГц
Сантиметрові (надвисокі)	10...1 см	3...30 ГГц
Миліметрові (надто високі) НВЧ	1 см...1 мм	30...300 ГГц
Дециміліметрові (гіпервисокі)	1...0,1 мм	300 ГГц...3 ТГц
Оптичне (світлове) випромінювання		
Інфрачервоне проміння, ІЧ	2 мм...760 нм	150 ГГц...400 ТГц
Видиме проміння (оптичний спектр)	760...380 нм	400...800 ТГц
Ультрафіолетове проміння, УФ	380...3 нм	800 ТГц...100ПГц
Іонізувальне випромінювання		
Рентгенівське проміння	10 нм...1пм	30 ПГц...300 ПГц
Гамма-проміння	Менше 10 пм	Понад 30 ПГц

## 1.2. Поширення електромагнітних полів у речовині

Електромагнітне випромінювання, яке використовують у сучасних технологіях, у тому числі ІХТ, можна описати кількісно і якісно з допомогою хвилевої теорії. У межах цієї теорії пояснюється велика кількість явищ взаємодії проміння з довкіллям, включаючи людей і все живе. Проте існують явища, які можна пояснити тільки корпускулярною природою випромінювання. Припускається, що випромінювання передається з допомогою квантів, які поширюються зі швидкістю світла й мають енергію  $Q$ , пропорційну частоті коливань:

$$Q = h\nu, \quad (1.1)$$

де  $h$  – постійна Планка;  $\nu$  – частота коливань.

У сучасних фізиці, біології і медицині накопичилося багато фактів, що не укладаються в перелічені вище моделі. Це не означає, що нинішні знання є неправильними і ними не можна користуватися. Кризові явища в розвитку фундаментальних наук свідчать про те, що виникла необхідність розроблення нових моделей явищ і фізичних закономірностей. Це може привести до іншого осмислення спостережуваних явищ, їх причин і наслідків, про що буде сказано нижче. У цьому розділі, як і в більшості наступних цього посібника, розглядається переважно хвилева природа електромагнітного випромінювання, тобто класичний підхід.

Розглянемо стисло основні властивості хвилевого процесу. Хвиля взагалі є коливальним процесом зі змінними величинами (напруженість електричного й магнітного полів в електромагнітних хвилях, тиск газу й швидкість часток у звукових хвилях), поширюється в просторі і взаємодіє з природним середовищем і об'єктами, розташованими на шляху цієї хвилі. Частота, тобто кількість коливань за секунду, вимірюється в герцах (Гц, Hz).

Розглянемо спочатку коливання, фіксоване в просторі. Просте незгасальне коливання напруженості електричного поля  $E$ , що не поширюється, можна описати математично простим диференціальним рівнянням

$$d^2E/dt^2 + \omega^2 E = 0, \quad (1.2)$$

у якому перший член є другою похідною від  $E$  за часом  $t$ , а  $\omega$  – константою, що має значення кругової частоти  $\omega = 2\pi\nu$ . Можливим розв'язком цього рівняння є

$$E = E_0 \cos \omega t, \quad (1.3)$$

де  $E_0$  – максимальна напруженість поля, тобто амплітуда коливань, а її залежність від часу описується тригонометричною функцією  $\cos \omega t$ .

Цей розв'язок можна геометрично проілюструвати з допомогою вектора  $E_0$ , який обертається навколо початку декартової системи координат з постійною кутовою швидкістю  $\omega$ . Змінення проекції вектора  $E_0$  на вісь  $y$  у часі показано на рис. 1.1 лінією «а».

Іншим можливим розв'язком рівняння (1.2) (лінія «б» на рис. 1.1) є

$$E = E_0 \sin \omega t. \quad (1.4)$$

Обидва розв'язки відображаються як функція кута повороту, пропорційного часу  $t$ .

Зображені криві  $\sin \omega t$  і  $\cos \omega t$  є ідентичними за формою і різняться тільки на величину зміщення фази  $\varphi = \omega t$  на  $\pi/2$ .

Між  $\omega t = 0$  і  $\omega t = 2\pi$  здійснюється один повний цикл, тобто один повний період коливань.

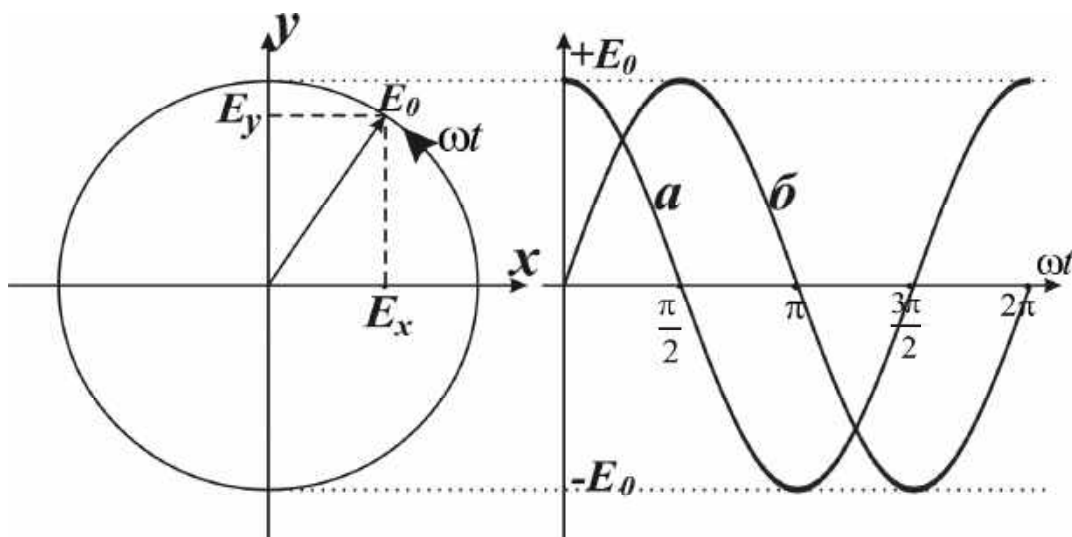


Рис. 1.1. Геометрична інтерпретація коливального процесу

Якщо позначити тривалість одного періоду  $T$ , то

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu. \quad (1.5)$$

Об'єднуючи розв'язки (1.3) і (1.4) в один, можна записати

$$E = E_0(\cos \omega t + i \sin \omega t) = E_0 \exp(i\omega t), \quad (1.6)$$

де  $i = \sqrt{-1}$  – уявна одиниця.

Вираз (1.6) дає змогу враховувати фазу або середню фазу коливань  $\varphi = \omega t$  під час аналізу вузькосмугових детермінованих і випадкових (стохастичних, шумових) сигналів.

Якщо коливання зосереджені не лише в одній точці ( $x = 0; y = 0$ ), але й поширюються у просторі, то диференціальне рівняння (1.2) має складніший вигляд:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = \mathbf{0}, \quad (1.7)$$

де  $c$  – константа, величину якої необхідно визначити, а похідні є частинними.

У рівнянні (1.7) є дві змінні  $t$  і  $z$ , від яких залежить напруженість поля. Тепер при будь-якому можливому розв'язанні потрібно виявити залежність, що описує процес коливань уздовж осі  $z$ . Одне з найпростіших розв'язків рівняння (1.7) можна записати так:

$$\mathbf{E}(z, t) = E_0 (\sin/\cos)\{\omega t - kz\}, \quad (1.8)$$

де  $k$  – константа, що залежить від коливань уздовж осі  $z$ .

Неважко показати, що

$$\omega^2 E = k^2 c^2 E, \quad (1.9)$$

звідки отримуємо

$$|\omega/k| = c. \quad (1.10)$$

Для знаходження швидкості поширення хвилі, необхідно простежити розташування максимумів, починаючи з  $t = 0$  і  $z = 0$ .

Унаслідок цього отримаємо

$$z/t = \omega/k.$$

З порівняння цього виразу з рівнянням (1.10) випливає, що константа  $c$  є швидкістю світла у вакуумі,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

З рівняння  $\omega t - kz = 0$  випливає, що за період  $T$  хвиля має пройти шлях, який дорівнює довжині хвилі:

$$k\lambda = \omega T = 2\pi. \quad (1.11)$$

Звідси отримуємо взаємозв'язок між частотою хвиль і їх довжиною:

$$k = 2\pi/\lambda, \quad \text{або} \quad c/\lambda = \nu.$$



Розв'язок рівняння (1.7), яке описує процес поширення не лише хвилі до об'єкта, але й хвилі, відбитої від нього, має й інший вигляд. При цьому абсолютні значення величин  $\omega$  і  $k$  залишаються незмінними, але при зміні напрямку поширення хвильовий процес може набути іншого знака. З цього випливає, що просторова змінна при розв'язанні рівняння (1.7) має розглядатися як вектор, і тому його загальний розв'язок має вигляд

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \exp i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}), \quad (1.12)$$

де  $\mathbf{r}$  – вектор (відстань і напрямок) просторової координати;  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$  – скаляр, або еквівалент виразу  $|\mathbf{k}| \cdot |\mathbf{r}| \cdot \cos \alpha$ , тобто результат множення абсолютних величин  $k$  і  $r$  на косинус кута між ними.

За наявності електромагнітних хвиль величинами, що коливаються, є напруженість електричного  $\mathbf{E}$  і магнітного  $\mathbf{H}$  полів. Ці поля також є векторами, які при поширенні хвилі в ізотропному середовищі будуть перпендикулярними один до одного й до напрямку поширення хвилі, тобто до хвильового вектора  $\mathbf{k}$ .

Таким чином, коливання  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{H}$  поширюються уздовж вектора  $\mathbf{k}$  і є перпендикулярними один до одного.

У загальному випадку можуть бути й інші напрямки коливань. Напрямок коливань вектора напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$  зазвичай називають напрямком поляризації.

При поширенні у вакуумі і в ізотропному середовищі напрямок поляризації хвилі не змінюється, а швидкість поширення залежить від констант середовища – діелектричної  $\epsilon$  і магнітної  $\mu$  проникності. Ця залежність має вигляд

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon \mu}. \quad (1.13)$$

Під час дії ЕМП на живі тканини значна їх частина має діелектричну проникність  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ , відносно значення якої  $\epsilon_r$  змінюється в межах  $1 < \epsilon_r < 100$ , тоді як магнітна проникність зазвичай близька до  $\mu_0$ . Наслідком цієї властивості є те, що в таких середовищах швидкість поширення хвилі зменшується до значення, яке обчислюється за формулою

$$U^2 = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0} = \frac{c^2}{\epsilon_r}, \quad (1.14)$$

де  $c$  – швидкість хвилі у вакуумі, тому для вакууму

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}.$$

Довжина хвилі в діелектричному середовищі зменшується внаслідок зменшення швидкості поширення й обчислюється за формулою

$$\lambda = U/v = c/(v\sqrt{\epsilon_r}). \quad (1.15)$$

Швидкість  $U$  і довжина хвилі  $\lambda$  зменшуються на величину коефіцієнта:

$$1/\sqrt{\epsilon_r} = 1/n, \quad (1.16)$$

де  $n$  – абсолютний коефіцієнт заломлення.

Досі розглядалося тільки одне певне значення частоти  $\nu$ . Однак щоб хвиля була монохроматичною, коливання мають бути нескінченними в часі, тобто не мати ні початку, ні кінця. Крім того, монохроматичне коливання в принципі не може нести ні енергію, ні інформацію, а є лише зручною математичною абстракцією, яку отримують зі спрощених моделей коливань.

Для реальних сигналів завжди існують моменти початку й закінчення, нестабільність генерування коливань, а також численні параметри їх змінення (модуляції). Це призводить до того, що біля частоти  $\nu_0$  є й інші частоти коливань, які складають деяку кінцеву смугу  $\Delta\nu$ , що може бути безперервною або дискретною. Для змінення параметрів цих коливань, наприклад амплітуди або частоти, знадобиться час  $\Delta t$ , обернено пропорційний до смуги частот. Для сигналів, якими зазвичай оперують у прикладних технологіях, зв'язок між смугою частот і часом реакції встановлюється за відомим принципом невизначеності Вудворда – Зібберта

$$\Delta\nu \Delta t = \text{const} \approx 1, \quad (1.17)$$

з якого випливає, що не можна одночасно збільшувати обидва параметри: при збільшенні одного з них обов'язково зменшується інший.

На рис. 1.2 показано спектри сигналів різних класів, які використовуються в прикладних технологіях.

Для хвильового пакета, що складається з дискретних смуг спектра коливань, загальне поле хвилі в момент часу  $t$  на відстані  $z$  можна обчислити шляхом підсумовування усіх значень  $E_i$ , тобто

$$E(z, t) = \sum_{i=1}^N E_i \cos 2\pi\nu_i \left( t - \frac{z}{c} \right). \quad (1.18)$$

У більш загальному випадку, коли спектр є безперервним (рис. 1.2, в, г, е), замість підсумовування дискретних величин слід обчислити інтеграл за спектром  $E(\nu)$ :

$$E(z, t) = \int_0^{\infty} E(\nu) \cos \left[ 2\pi\nu \left( t - \frac{z}{c} \right) \right] d\nu. \quad (1.19)$$

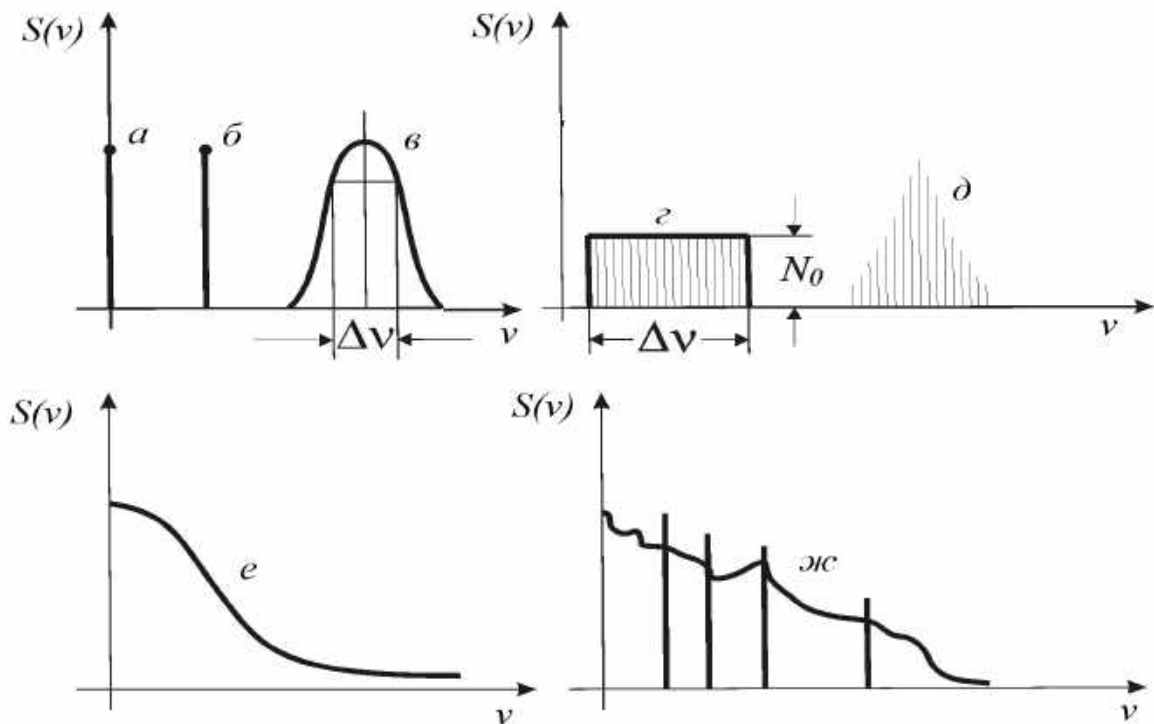


Рис. 1.2. Енергетичні спектри сигналів, що використовуються в прикладних технологіях:  
 а – статичні поля, або такі, що повільно змінюються; б – монохроматична хвиля;  
 в – модульований вузькосмуговий ( $\Delta\nu \ll \nu_0$ ) процес; г – білий шум, обмежений у смузі  $\Delta\nu$ ;  
 д – спектр з дискретними смугами; е – безперервний фрактальний спектр;  
 ж – фрактальний спектр, збагачений дискретними смугами

Множник  $(t - z/c)$  в аргументі функції **cos** означає, що в момент часу

$$t = z/c \pm m/\nu_0 \quad (1.20)$$

максимальна напруженість поля спостерігається на відстані  $z$ , оскільки усі спектральні компоненти підсумовуються як векторні величини ( $m$  – ціле число). Еквівалентним змістом цього множника є те, що хвиля зі спектром  $E(\nu)$ , яка випромінюється при  $z = 0$ , матиме максимальне значення напруженості поля на всіх відстанях:

$$z = ct + m\lambda_0, \quad (1.21)$$

тобто при множенні довжини хвилі  $\lambda_0 = c/\nu_0$  на ціле число. Проте при кінцевій ширині спектра  $E(\nu)$  довжину хвилі не можна обчислити однозначно.

Наслідок цього факту можна показати, проінтегрувавши рівняння (1.19) в інтервалі частот

$$\nu_0 - \Delta\nu/2 \leq \nu \leq \nu_0 + \Delta\nu/2 . \quad (1.22)$$

Тоді хвилевий пакет матиме вигляд

$$E(z, t) = E_0 \cos\left[2\pi\nu_0 \left(t - \frac{z}{c}\right)\right] \frac{\sin\left[2\pi\frac{\Delta\nu}{2} \left(t - \frac{z}{c}\right)\right]}{\left[2\pi\frac{\Delta\nu}{2} \left(t - \frac{z}{c}\right)\right]} . \quad (1.23)$$

Якщо множник  $(t - z/c)$  не дорівнює точним значенням, що обчислюються за формулою (1.20), то амплітуда хвилі зменшуватиметься в межах коротких відстаней унаслідок взаємної компенсації різних спектральних компонент.

При значенні  $(t - z/c) \approx 1/\Delta\nu$  напруженість поля прямує до нуля навіть на відстанях, кратних величині  $\lambda_0$ . На відстанях, більших за  $z = c/\Delta\nu$ , або після проходження часу, більшого, ніж  $t \approx 1/\Delta\nu$ , зникає здатність хвилі векторно підсумовувати усі спектральні компоненти. Ця властивість визначає її когерентність. Тому величини

$$\Delta t_0 = 1/\Delta\nu; \Delta z_0 = c\Delta t_0 = c/\Delta\nu \quad (1.24)$$

називають відповідно часовою когерентністю і когерентністю хвилі, яка має ширину спектра  $\Delta\nu$ . При невеликій ширині спектра ( $\Delta\nu < \nu_0$ ) взаємозв'язок

$$\frac{d\lambda}{d\nu} = \frac{d\left(\frac{c}{\nu}\right)}{d\nu} = -\frac{c}{\nu^2} = -\frac{\lambda^2}{c} \quad (1.25)$$

дає змогу виразити когерентність хвилі через її довжину:

$$\Delta z_0 = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} . \quad (1.26)$$

Співвідношення (1.26) має важливе значення для аналізу відмінностей в дії вузько- і широкосмугових ЕМ-сигналів на біологічні

об'єкти. Такі об'єкти характеризуються станами, які можна описати моделлю квазікогерентності.

Когерентні хвилі можуть взаємодіяти між собою, векторно додаватися або відніматися, а в загальному випадку – інтерферувати. Наприклад, якщо в просторі поширюються когерентні хвилі, то їх амплітуди в окремих напрямках додаються (якщо їх фази  $\varphi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi$  збігаються), або віднімаються (якщо їх фази  $\varphi = \pm\pi, \pm 3\pi \dots$  є протилежними). В усіх інших випадках амплітуда є результатом векторної суми хвиль, що мають проміжні фазові кути й амплітуди. Вплив інтерференції є важливим при поширенні ЕМП у середовищах, що мають різну діелектричну проникність, а також у тканинах, що утворюють замкнуті порожнини, наприклад у черепній коробці, трубчастих кістках та інших подібних біоструктурах.

Некогерентні хвилі, у тому числі й широкопasmові шумові коливання, можуть інтерферувати шляхом накладання тільки в тому випадку, якщо окремі центри розсіяння розташовуються на відстанях, менших за інтервал когерентності.

Для всіх типів випромінювання важливим показником є його інтенсивність, яка для гармонійних коливань та ізотропних середовищ визначається через вектори напруженості електричного  $\mathbf{E}$  і магнітного  $\mathbf{H}$  полів:

$$\mathbf{J} = 1/2 \mathbf{E} \times \mathbf{H}^*, \quad (1.27)$$

де знак « $\times$ » означає множення векторів (векторний добуток), а знак « $*$ » – складний зв'язок.

Вектор  $\mathbf{J}$  є перпендикулярним площині поширення двох взаємно ортогональних векторів  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{H}$  і вимірюється у ватах, поділених на квадратний метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

Іншою важливою величиною є відношення електричного й магнітного полів, або хвильовий опір, що виражається формулою

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}. \quad (1.28)$$

Хвильовий опір вимірюють в омах. Проте в середовищі з характеристиками  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  і  $\mu = \mu_0$  хвильовий опір визначається формулою

$$\mathbf{Z}_0 / \sqrt{\epsilon_r} = \mathbf{Z}_0 / n,$$

тобто зменшується на величину абсолютного показника заломлення.

Інтенсивність випромінювання в ізотропному середовищі можна також виразити через напруженість електричного поля:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \frac{\mathbf{E}^2}{z} = \frac{n\epsilon_0}{2} c \mathbf{E}^2. \quad (1.29)$$

Якщо хвиля є когерентною, то вона завжди поляризується і її можна подати через дві ортогональні компоненти, пов'язані між собою різницею фаз:

$$\mathbf{E}_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz); \quad (1.30)$$

$$\mathbf{E}_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz), \quad (1.31)$$

де загальна миттєва напруженість поля виражається формулою  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$ , де  $E_{0x}$  і  $E_{0y}$  відповідно є амплітудами ортогональних компонент.

Залежно від фазових співвідношень між складовими  $\mathbf{E}_x$  і  $\mathbf{E}_y$  розрізняють лінійну, кругову й еліптичну поляризацію хвилі. Усі накладення поляризованих хвиль однієї частоти завжди дають поляризовану хвилю.

Для некогерентних хвиль (теплове проміння, сонячне світло, шумові коливання і т. д.) поняття фази в широкій смузі частот утрачає сенс (фаза є випадковою величиною), тому й концепція амплітуди поля також змінюється.

Для кількісного оцінювання таких полів обчислюють середні квадратичні значення компонент  $\langle \mathbf{E}_x^2 \rangle$  і  $\langle \mathbf{E}_y^2 \rangle$ , усереднені за часом. Їх сума

$$\langle \mathbf{E}_x^2 \rangle + \langle \mathbf{E}_y^2 \rangle = 2ZJ \quad (1.32)$$

є пропорційною загальній інтенсивності випромінювання.

Якщо проміння не поляризується, то при будь-яких координатах  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  маємо  $\langle \mathbf{E}_x^2 \rangle = \langle \mathbf{E}_y^2 \rangle$ .

Якщо проміння є частково поляризованим, то різниця  $\langle \mathbf{E}_x^2 \rangle - \langle \mathbf{E}_y^2 \rangle$  не дорівнює нулю, а є пропорційною збільшенню інтенсивності лінійно поляризованої впродовж осі  $\mathbf{x}$  хвилі порівняно з такою ж хвилею осі  $\mathbf{y}$ .

Для повного опису усіх можливих випадків поляризації некогерентного випромінювання необхідно знати чотири незалежні параметри, що зазвичай називають параметрами Стокса.

На межі поділу двох середовищ, що мають різні коефіцієнти заломлення, відбувається відбиття й заломлення хвилі.

На рис. 1.3 показано межу розділу двох середовищ, на яку падає хвиля ЕМП. Наприклад, це можуть бути поверхня шкіри, на яку спрямовано проміння, і підшкірні м'які тканини. Обидва середовища характеризуються абсолютними показниками заломлення  $n_1$  і  $n_2$ . За законом Снеліуса напрям поширення хвилі знаходиться із співвідношення

$$\frac{\sin\Theta_1}{\sin\Theta_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.33)$$

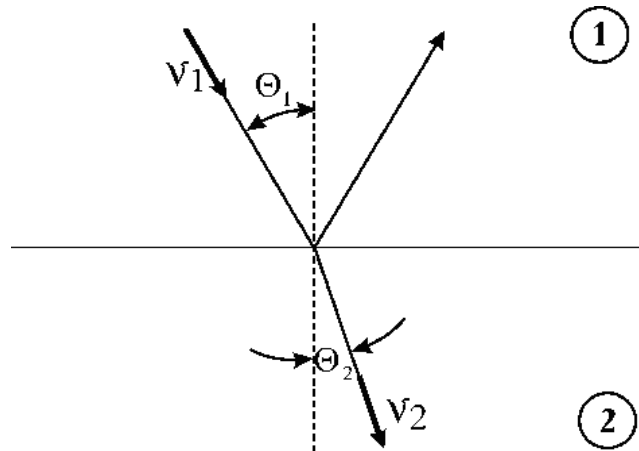


Рис. 1.3. Рефракція хвиль на межі поділу середовищ при  $n_2 > n_1$  (закон Снеліуса)

Швидкість хвиль у двох середовищах визначається за формулами

$$U_1 = c/n_1 \text{ і } U_2 = c/n_2.$$

Відстань між сусідніми фронтами фаз уздовж відповідних напрямків поширення знаходиться за формулою

$$kr = 2\pi. \quad (1.34)$$

Таким чином, відстань між фронтами фаз у двох середовищах обернено пропорційна до абсолютних показників заломлення. Для середовища з більш високим показником заломлення існує граничний кут  $\Theta_2$ , який обмежує напрям поширення заломленого променя:

$$\Theta_2 = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1.35)$$

Після заломлення в середовище 2 проникає тільки частина хвильової енергії, що падає на межу розділу. Інша частина відбивається назад в середовище 1, причому відбита частина хвилі, що падає, також визначається показником заломлення середовищ по обидві сторони від межі поділу.

Якщо хвиля не перпендикулярна до площини поділу середовищ, то необхідно розглядати також різницю між різними компонентами

поляризації вектора електричного поля (поляризація магнітного поля не має істотного значення), оскільки в цьому випадку обидва середовища мають однакову магнітну проникність:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ .

Якщо в середовищі виникають утрати енергії ЕМП, то необхідно враховувати комплексний характер діелектричної проникності. Складність рівнянь для коефіцієнта відбиття в загальному випадку властивостей площини поділу середовищ є наслідком законів Френеля.

Для середовищ з поглинанням глибина проникнення хвилі є обмеженою. Здатність середовища поглинати або розсіювати хвилю залежить від частоти випромінювання. Існує багато різних механізмів на молекулярному й макроскопічному рівнях, що зумовлюють послаблення хвиль.

При повному описі процесу поширення хвилі рівнянням (1.7) діелектрик із утратами характеризується комплексною діелектричною проникністю

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r'', \quad (1.36)$$

у якій дійсна частина відповідає звичайній діелектричній проникності, а послаблення хвилі визначається уявною частиною.

Використовуючи цей комплексний вираз відносно діелектричної проникності в рівнянні (1.7), визначимо хвилеве число:

$$k = \frac{\omega}{U} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_r' - i\epsilon_r''} = k' - ik'' = k_0 (n' - in''), \quad (1.37)$$

яке, як і абсолютний коефіцієнт заломлення, залишається також комплексною величиною.

Тепер рівняння поширення поля хвилі для вертикального падіння має вигляд

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - k'z)} e^{(-k''z)}, \quad (1.38)$$

де  $\mathbf{z}$  – напрям поширення поля хвилі, перпендикулярний поверхні, на якій  $\mathbf{z} = \mathbf{0}$  (рис. 1.4).

Енергія, що досягає перерізу  $\chi$ , зменшується на величину

$$\Delta P = P(1 - e^{-2\alpha\chi}).$$

У цьому рівнянні  $\alpha$  є постійною згасання, яка визначається формулою



$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu' \varepsilon'}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{X^2}{\omega^2 \varepsilon'^2}} - 1 \right)}. \quad (1.39)$$

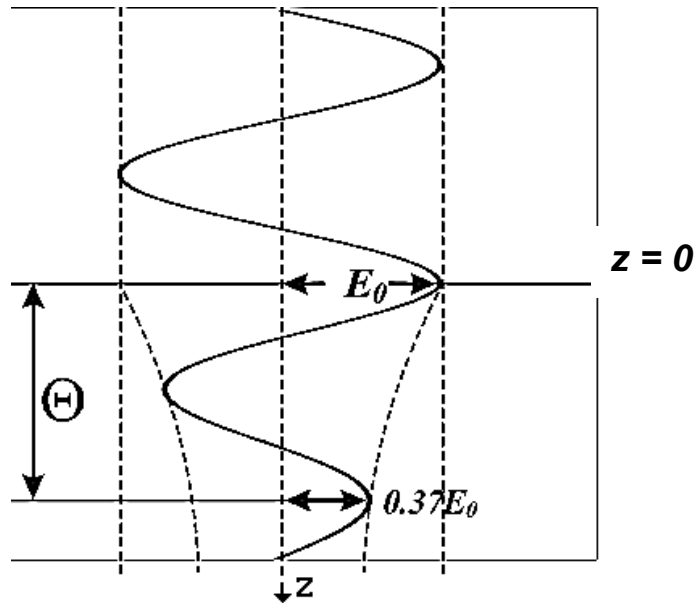


Рис. 1.4. Послаблення хвилі при проникненні в середовище із поглинанням

Для діелектрика з малими втратами  $\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \ll 1$  рівняння (1.39) можна записати так:

$$\alpha \cong \frac{\pi \varepsilon''}{\lambda \varepsilon'} = \frac{\pi \varepsilon_r''}{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_r'}}. \quad (1.40)$$

Позначивши глибину проникнення  $\Theta$ , на якій енергія зменшується в  $e$  разів, отримаємо

$$\Theta \cong \frac{1}{2\alpha} = \frac{\lambda \varepsilon'}{2\pi \varepsilon''} = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_r'}}{2\pi \varepsilon_r''} = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{\varepsilon_r'} \operatorname{tg} \delta}. \quad (1.41)$$

Отже, величина  $\Theta$  зменшується зі збільшенням частоти, а довжина хвилі  $\lambda$  у діелектрику є меншою за довжину хвилі  $\lambda_0$  у вакуумі в  $\sqrt{\varepsilon_r'}$  разів.

Деяка частина енергії хвилі, як видно з рис. 1.4, відбивається від поверхні діелектрика. Якщо  $Z_e$  – хвильовий опір діелектрика біля поверхні і  $Z_0$  – хвильовий опір вільного простору, то величина відбиття

$$Z = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0} \quad (1.42)$$

Наведені тут рівняння мають наближений характер, але є достатніми для якісного оцінювання складних процесів взаємодії ЕМП з діелектриком.

У табл. 1.2 і 1.3 наведено експериментальні дані, що характеризують електрофізичні параметри окремих біотканин організму людини, а на рис. 1.5 показано глибину проникнення в них електромагнітного проміння. Наприклад, при  $\lambda = 10$  см (частота коливань  $\nu = 3$  ГГц) глибина проникнення в біотканину може становити 15 см, а при  $\lambda = 8$  мм (частота  $\nu = 37,4$  ГГц) – усього 0,3 мм. Тенденція зменшення глибини проникнення спостерігається доти, доки довжина хвилі в середовищі істотно перевищує розміри клітин або органел, що містяться в них. На дуже високих частотах проникність тканин для ЕМП знову починає підвищуватися. Наприклад, жорсткі рентгенівське і гамма-проміння пронизують м'які тканини майже без послаблення.

Криві, зображені на рис.1.5, є типовими для тканин з великим і малим умістом води відповідно. Значення параметра проникнення для тканин із середнім умістом води потрапляють у заштриховану область.

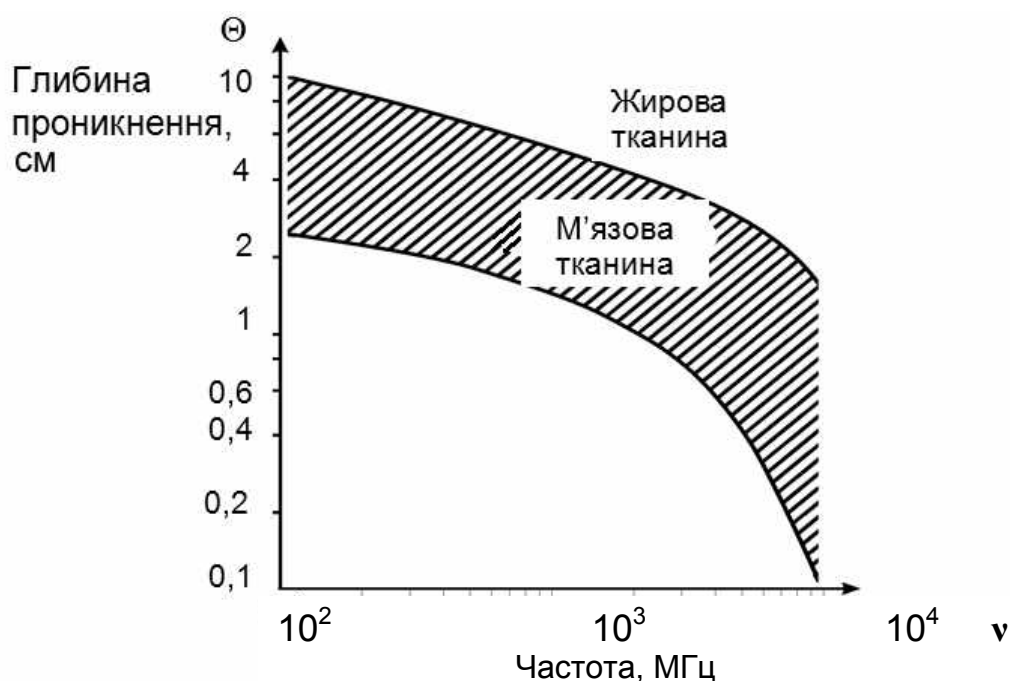


Рис. 1.5. Глибина проникнення ЕМП у м'язову й жирову тканини залежно від частоти

Таблиця 1.2

## Залежність питомого опору біотканин від частоти ЕМП

Біотканина	Частота ЕМП, МГц								
	25	50	100	200	400	700	1000	3000	8500
	Питомий опір, Ом·см								
М'язова тканина	103... ...115	85...97 113... ...147	71...76	56 95...115	52...54 85...90	52...53 73...79	49...52 75...79	45...48 43...46	40... ...42
Серцевий м'яз	–	–	–	59...63 95...115	52...56 85...100	50...55 78...95	46...47 98... ...106	–	–
Печінка	136... ...138 185... ...210	88...93 173... ...195	76...79 154... ...179	50...56 110... ...150	44...51 105... ...130	42...51 85...115	–	42...32 49...50	34... ...38 15... ...17
Головний мозок	більше 160... ...220	110... ...114 190... ...2110	81...83 180... ...195	–	–	–	5,3... ...7,5 670... ...1200	–	–
Жирова тканина	–	1113 1700... ...2500	–	4,5...7,5 1050... ...3500	47 900... ...2800	–	4,3...7,3 1000... ...2300	3,9... ...7,2 440... ...900	3,5... ...4,5 240... ...370
Кістковий мозок	–	6,8...7,7 2800... ...5000	–	–	–	–	–	4,2... ...5,8 445... ...860	4,4... ...5,4 210... ...600
Селезінка	>200	135... ...140 128... ...151	100... ...101	–	–	–	–	–	–
Легені	–	260... ...450	–	35... ...160	35... ...140	34... ...130	–	–	–

## Відносна діелектрична проникність тканин тіла при 37 °С

Біотканина	Частота ЕМП, МГц					
	100	200	400	1000	3000	8500
М'язи	71...76	56	52...54	49...52	45...48	40...42
Серцевий м'яз	—	59...63	52...56	—	—	—
Печінка	76...79	50...56	44...51	46...47	42...43	34...38
Селезінка	100...101	—	—	—	—	—
Легені	—	35	35	—	—	—
Шкіра	65	—	46...48	43...46	40...45	36
Мозок	81...83	—	—	—	—	—
Жирова тканина	—	4,5...7,5	47	5,3...7,5	3,9...7,2	3,5...4,5
Кістковий мозок	—	—	—	4,3...7,3	4,2...5,8	4,4...5,4

### 1.3. Поводження речовини в електромагнітних полях

У загальному випадку будь-яка речовина, у тому числі й жива тканина, може розглядатися на молекулярному й макроскопічному рівнях у термінах класичної і квантової електродинаміки.

Так, наприклад, щільність молекул у газі при атмосферному тиску становить приблизно  $10^{-3}$  від щільності молекул у рідині або твердому тілі, а відстань між молекулами перевищує їх розміри, тому їх взаємодія є слабкою. Будь-яке коливання молекули, наприклад вібрація, може тривати як автономний процес протягом багатьох періодів, поки його не буде перервано, наприклад, зіткненням з іншою молекулою. Стан молекул може порушуватися під впливом ЕМП. Проте внаслідок слабого енергетичного зв'язку між молекулами, взаємодію окремої молекули з фоновим ЕМП можна вважати такою, що незалежить від стану інших молекул.

Слід зазначити, що динамічні властивості ізольованих атомів і молекул, наприклад їх обертання, коливання й рухи електронів, можна вважати дискретними величинами (станами) тільки приблизно.

Кількість енергії, яка змінює дискретний елементарний стан, називають квантом енергії. Тому динамічний стан окремих атомів і молекул квантується за дискретними енергетичними рівнями. Взаємодія молекули з ЕМП, що зумовлює змінення її енергетичного стану, може мати місце тільки в тому випадку, якщо довжина хвилі проміння є близькою до величини, характерної для цієї молекули і для відповідної пари значень енергетичних рівнів, між якими відбуваються зміни. Цей вираз у квантовій механіці має вигляд

$$W_n - W_m = h\nu, \quad (1.43)$$

де  $W_n - W_m$  – різниця двох енергетичних рівнів,  $\nu$  – частота коливань,  $h$  – постійна Планка ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Вт·с<sup>2</sup>, або  $4,1 \cdot 10^{-15}$  еВ·с).

Випромінювання ЕМП може спричиняти резонанс, якщо задовольняє рівнянню (1.43). Якщо молекула переходить з нижчого енергетичного рівня на більш високий, то вона поглинає квант енергії (фотон) з поля випромінювання. Перехід з більш високого на нижчий енергетичний рівень супроводжується випромінюванням фотона.

Молекули складних речовин мають велику кількість енергетичних рівнів, що зумовлено великою кількістю режимів руху (коливання, обертання тощо).

Якщо на речовину діє проміння ЕМП, то процес їх взаємодії може відбуватися в таких напрямках:

- поглинання енергії ЕМП, при якому його інтенсивність є пропорційною кількості молекул  $N_m$  з нижчим енергетичним станом в одиниці об'єму речовини, спектральній енергетичній густині проміння  $U_\nu$  на частоті  $\nu$  і коефіцієнту поглинання  $B_{mn}$  (імовірності змінення енергетичного стану);

- власне когерентне випромінювання, яке стимулюється промінням, що падає; імовірність цього процесу є пропорційною кількості молекул  $N_n$ , що знаходиться на верхньому енергетичному рівні, спектральній енергетичній густині проміння  $U_\nu$ , що падає, і коефіцієнту емісії  $B_{nm}$ ;

- спонтанне випромінювання, зумовлене взаємодією між зовнішнім опроміненням і енергетичними станами молекул, визначеними їх тепловим рухом.

Електромагнітне випромінювання можна описувати і як потік квазічастинок-фотонів, енергія  $W$  яких є пропорційною частоті коливань. Спін фотона дорівнює одиниці, маса спокою – нулю. Фотони є квантами електромагнітного поля, при поширенні виявляють хвильові властивості, у разі взаємодії з речовиною – корпускулярні.

Імовірність спонтанної емісії є пропорційною щільності молекул  $N_n$ , що знаходяться на верхньому енергетичному рівні, і коефіцієнту  $A_{nm}$  для спонтанної емісії.

Під час взаємодії проміння і речовини слід розрізняти типи рухів. Так, переміщуючись по орбітах навколо ядра атома і між атомами молекули, електрони одночасно обертаються навколо осей, що мають дискретні напрямки. Атоми й молекули можуть здійснювати коливання вздовж осей, що з'єднуються, перпендикулярно до них або в будь-якому поєднанні цих напрямків. Уся молекула може обертатися навколо будь-якої осі.

Загальна енергія молекули є пропорційною сумі енергій усіх її складових стану

$$W_t = W_e + W_v + W_r + \dots, \quad (1.44)$$

де  $W_e$  – енергія руху електронів;  $W_v$  – енергія коливань;  $W_r$  – енергія обертання.

Найбільш значущими для взаємодії з випромінюванням ЕМП є енергетичні різниці між сусідніми рівнями відповідних типів рухів.

У табл. 1.4 наведено типові діапазони енергій і частот випромінювання, які відповідають умовам переходів з одного рівня на інший.

Таблиця 1.4

Характерні діапазони взаємодії ЕМП з речовиною

Тип переходу	$\Delta W$ , еВ	$\nu = \Delta W/h$ , Гц	Діапазон частот
Електронний	10	$2,4 \cdot 10^{15}$	УФ, видимий
Коливання	$10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	Інфрачервоний
Обертання	$10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{11}$	НВЧ

Як видно з цієї таблиці, мінімальній збурювальній енергії відповідає обертальний рух молекул у діапазоні надвисоких частот (НВЧ). Для обертальної взаємодії з ЕМП молекула повинна мати дипольний момент, який вимірюється в дебаях ( $1 \text{ дебай} = 3,33564 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$ ).

Дипольний момент виникає внаслідок асиметричного розподілу електричних зарядів між атомами в молекулі.

Електричний дипольний момент залежить від просторового розподілу зарядів у молекулі й може змінюватися від нуля (симетричні молекули типу  $O_2$ ) до декількох дебаїв.

У першому наближенні дипольний момент не впливає на частоту переходу, проте визначає інтенсивність поглинання й емісії. Більшість полярних речовин, що трапляються в природі, складаються більш ніж із двох атомів, і процеси, що виникають в них, мають складніший характер, ніж було розглянуто вище.

Так, усі відомі в природі речовини відповідно до їх здатності проводити електричний струм можна поділити на три основні класи: діелектрики, напівпровідники й провідники. Питома провідність провідників становить  $10^5 \dots 10^6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , напівпровідників –  $10^5 \dots 10^{10} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , а діелектриків –  $10^{-10} \dots 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Якщо помістити речовину в постійне електричне поле, то в ньому виникне електричний струм. У діелектриках величина цього струму буде мінімальною. Це не лише відрізняє діелектрики від провідників і напівпровідників, але й надає їм властивості діелектриків – здатності поляризуватися в електричному полі.

Електричне поле зміщує пов'язані заряджені частки, що входять до складу діелектрика, відносно тих положень, які вони займали, коли поля не було. Так, наприклад, якщо діелектрик складається з нейтральних атомів, то за наявності електричного поля їх електронні оболонки зміщуються відносно позитивно заряджених ядер.

Якщо кристалічна решітка твердого тіла складається з позитивно й негативно заряджених іонів, як, наприклад, грати солі NaCl, то в електричному полі йони різних знаків зміщуються один відносно одного в протилежному напрямку. Унаслідок зміщення кожної пари зарядів утворюється система, що має деякий дипольний момент, або так званий елементарний диполь, а весь діелектрик поляризується, як показано на рис. 1.6.

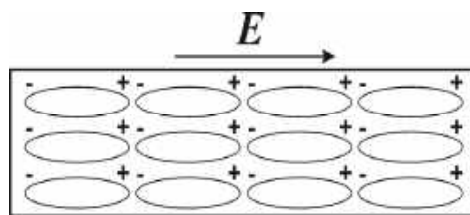


Рис. 1.6. Елементарні диполі при поляризації

Поляризація діелектрика чисельно характеризується дипольним моментом одиниці об'єму, який дорівнює добутку  $N$  елементарних диполів, що містяться в одиниці об'єму речовини, на момент  $p$  елементарного диполя:  $P = Np$ . Унаслідок поляризації на зовнішній поверхні діелектрика, що прилягає до електродів, з'являються заряди, протилежні за знаком зарядам на електродах, а заряди диполів, розташовані усередині діелектрика, взаємно компенсуються, тому

$$P = \sigma, \quad (1.45)$$

де  $\sigma$  – поверхнева щільність зарядів діелектрика.

Якщо заряджені частинки діелектрика пружно пов'язані одна з одною, то величина зміщення  $L$  під дією електричного поля буде пропорційною зміщувальній силі (закон Гука), яка дорівнює  $qE$ , де  $E$  – напруженість електричного поля всередині діелектрика.

Отже, величини елементарного диполя й поляризації є пропорційними  $E$ , тобто

$$p = \alpha E; P = \sigma = pN = N\alpha E = \chi E. \quad (1.46)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\chi$  називають діелектричною сприйнятливістю,  $\alpha$  – поляризованістю. Напруженість електричного поля всередині діелектрика не дорівнює напруженості  $E_0$  зовнішнього поля:

$$E = E_0 - E_\sigma = E_0 - 4\pi\sigma. \quad (1.47)$$

Чим більше поляризація  $P$  і поверхнева щільність  $\sigma$  зарядів діелектрика, що дорівнює їй, тим менше поле  $E$ . Відношення  $E_0/E = \varepsilon$  характеризує здатність речовини до діелектричної поляризації. Величину  $\varepsilon$  називають відносною діелектричною проникністю, яка є важливою характеристикою кожного діелектрика.

#### 1.4. Поляризація діелектриків

Поляризацію діелектриків умовно підрозділяють на класи залежно від того, які частинки і на які відстані зміщуються. Заряджені частинки діелектрика, які здатні зміщуватися або орієнтуватися під дією зовнішнього електричного поля, можна поділити на два класи: пружно (сильно) і слабо пов'язані. Зміщенню пружно зв'язаних частинок перешкоджає пружна сила.

На рис. 1.7, а заряджена частинка  $\oplus$  умовно закріплена на пружині, а вся система знаходиться в потенційній ямі, що не дає змоги частинці вийти з неї. Пружно зв'язана частинка  $\oplus$  перебуває в одному положенні рівноваги, у якому здійснює теплові коливання. Під дією зовнішнього електричного поля  $E$  частинка може зміщуватися від точки рівноваги на кут  $2\beta$  або невеликі відстані, проте при знятті напруги вона повертається в початковий стан. Чинниками, що повертають частку в початковий стан, є сили, що зв'язують відповідні електронні оболонки з ядром в атомах; сили взаємодії позитивно й негативно заряджених іонів у кристалах (у тому числі й рідких), дипольних молекул у речовинах.

На відміну від пружно зв'язаних слабо зв'язані частинки (рис. 1.7, б) мають декілька положень рівноваги, у яких вони можуть знаходитися з певною ймовірністю, якщо немає зовнішнього електричного поля, теплових флуктуацій або інших чинників. Перехід з одного положення рівноваги в інше здійснюється під дією флуктуацій енергії теплового руху або зовнішніх фізичних, хімічних та інших чинників.

На рис. 1.7, б частинка знаходиться в одному з можливих положень рівноваги, потім через деякий час стрибком змінює своє положення на інше. У новому положенні вона також має теплові коливання до поки під впливом нового чинника (теплового, механічного, хімічного тощо) повернеться в початковий стан або не займе наступне ймовірне положення. Час перебування частинки в певному положенні рівноваги залежить від висоти потенційного бар'єра  $h$ , властивостей частинки й температури діелектрика. У зовнішньому електричному полі енергія частинки і ймовірність перебування її у рівноважних станах змінюється, порівняно з випадком коли поле відсутнє. Унаслідок цього позитивно заряджені частинки зміщуються відносно негативно заряджених (зазвичай



на більшій відстані, ніж при пружному зміщенні). Виникає асиметрія в розподілі заряджених частинок, тобто поляризація.

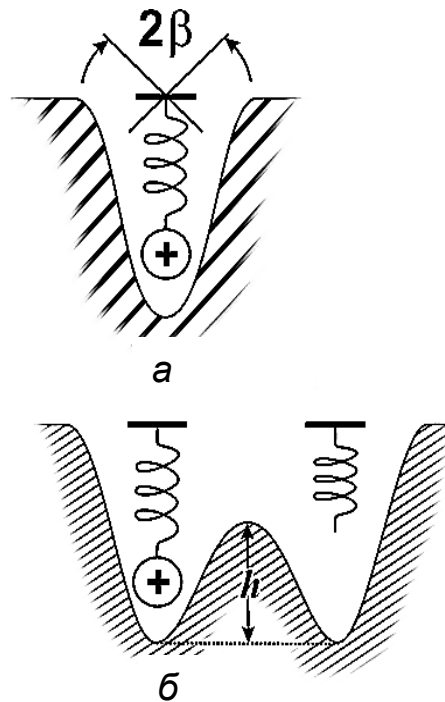


Рис. 1.7. Рівноважні стани в глибокій потенційній ямі: а – пружно зв'язані частинки; б – слабо зв'язані частинки

Таким чином, поляризацію можна поділити на чотири види (рис. 1.8): електронна пружна й релаксаційна поляризація; атомна поляризація; орієнтаційна поляризація; об'ємно-зарядова поляризація.

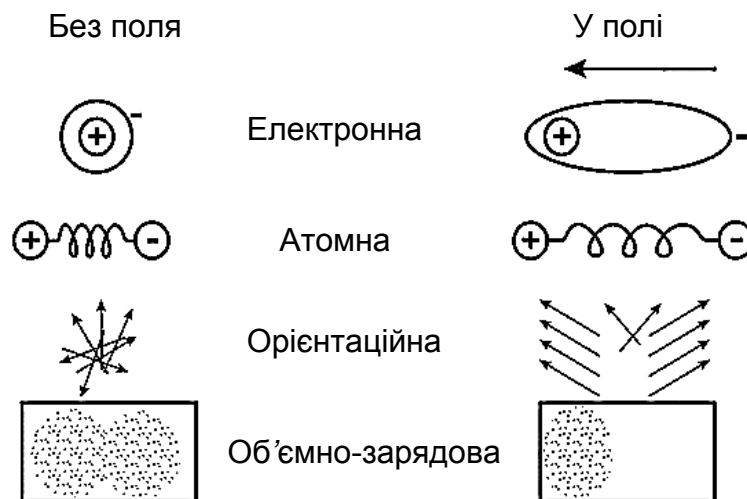


Рис. 1.8. Механізми поляризації діелектриків

*Електронна пружна поляризація* є найбільш поширеною. При електронній поляризації відбувається зміщення електронних оболонок атомів (іонів) відносно важких, «нерухомих» ядер. Оскільки усі речовини складаються з атомів (іонів) або молекул, то електронна поляризація спостерігається в усіх діелектриках у будь-якому агрегатному стані. Її встановлення відбувається за  $10^{-14} \dots 10^{-15}$  с.

При *атомній поляризації* в електричному полі атоми, що складають молекулу, зміщуються один відносно одного. Це можливо тому, що при утворенні будь-якої молекули з окремих атомів відбувається зазвичай перерозподіл електронів між атомами. Електрони переходять від одних атомів до інших. Тому в молекулі виникає міжатомарний перерозподіл заряду. Зрозуміло, що в електричному полі всередині такої молекули атоми зміщуються один відносно одного, тобто виникає індукований дипольний момент. Окремим випадком атомної поляризації є повна пружна поляризація молекул. Час установаження атомної поляризації є більшим, ніж електронної, оскільки в цьому випадку зміщуються важчі частинки. Зміщення атомів (іонів), а отже, і встановлення атомної поляризації відбувається за  $10^{-11} \dots 10^{-13}$  с.

Нарешті, іноді в молекулярних кристалах і композитних речовинах, що складаються з дипольних молекул, спостерігається пружне обертання дипольних молекул у випадках, коли вони не можуть змінювати свої первинні рівноважні орієнтації під дією флуктуацій теплового руху. Якщо уявити, що молекула-диполь пружно пов'язана в кристалічних ґратах, то в електричному полі на неї діятиме момент сил, і молекула пружно обертатиметься, змінюючи свою первинну орієнтацію. Таким чином виникає *орієнтаційна поляризація*.

*Релаксаційна поляризація* також поділяється на кілька видів залежно від того, яка частинка релаксує і на якій відстані. Якщо слабо зв'язаними частинками, які релаксують, є дипольні молекули газів, рідин і твердих тіл, що здатні орієнтуватися під дією зовнішнього електричного поля, то релаксаційну поляризацію називають *дипольною*, або *орієнтаційною*. Якщо релаксують слабо зв'язані йони, то релаксаційну поляризацію називають *іонно-тепловою* (на відміну від іонної пружної поляризації).

Виникнення слабо зв'язаних іонів і електронів, може бути зумовлене дефектами кристалічних ґрат або іншими властивостями речовини, у тому числі живої. Аналогічно йонам слабо пов'язаними частинками можуть бути електрони. У цьому випадку релаксаційну поляризацію називають *електронною*.

Для орієнтаційної, або дипольної, поляризації характерним є діапазон частот від  $10^{11}$  Гц (частоти обертальних режимів молекул) і нижче, тобто до діапазонів міліметрових і сантиметрових радіохвиль.

Якщо в речовині, на яку впливає електричне поле, у тому числі й статичне, є вільні носії заряду (електрони, йони), які можуть мігрувати в межах деяких відстаней, то в ній відбувається *об'ємно-зарядова*

поляризація. Її суть полягає в тому, що в електричному полі, наприклад, між електродами (катодом і анодом) не всі вільні заряди утворюють струм. Тоді в діелектрику або в його окремих частинах утворюються об'ємні заряди: позитивний біля катода і негативний біля анода. Накопиченню об'ємних зарядів в електричному полі перешкоджає тепловий рух, який намагається хаотично розкидати заряди. Тому об'ємно-зарядову поляризацію можна вважати різновидом релаксаційної.

На поверхні розділу неоднорідних діелектриків в електричному полі можуть накопичуватися заряди й викликати їх поляризацію. Поляризація цього виду є низькочастотною (квасістатичні, звукові, ультразвукові й радіочастотні діапазони). Це особливо важливо при аналізуванні ІХ-технологій, які реалізуються в низькочастотних діапазонах ЕМП, включаючи статистичні поля й такі, що повільно змінюються (наприклад, під час метеотропних реакцій організму).

Зазначимо, що через міграційний характер руху й розподіл зарядів у речовині різнойменні заряди можуть рухатись у межах усієї геометричної структури об'єкта, відображаючи зв'язок між геометрією структури і її ЕМП. Величина відповідного наведеного дипольного моменту значно збільшується у зв'язку зі збільшенням величини заряду і, головним чином, відстані між різнойменно зарядженими частинками.

Таким чином, є можливість пояснення впливу статичних і наднизькочастотних ЕМП на структурні елементи біооб'єкта, а також походження метеотропних реакцій організму людини й обґрунтування ефективності технологій ІХТ у відносно низькочастотних діапазонах ЕМП.

Уважаючи, що розглянуті вище поляризації відбуваються незалежно одна від одної, можна виразити загальну поляризованість  $\alpha_{\Sigma}$  як їх суму (рис. 1.9).

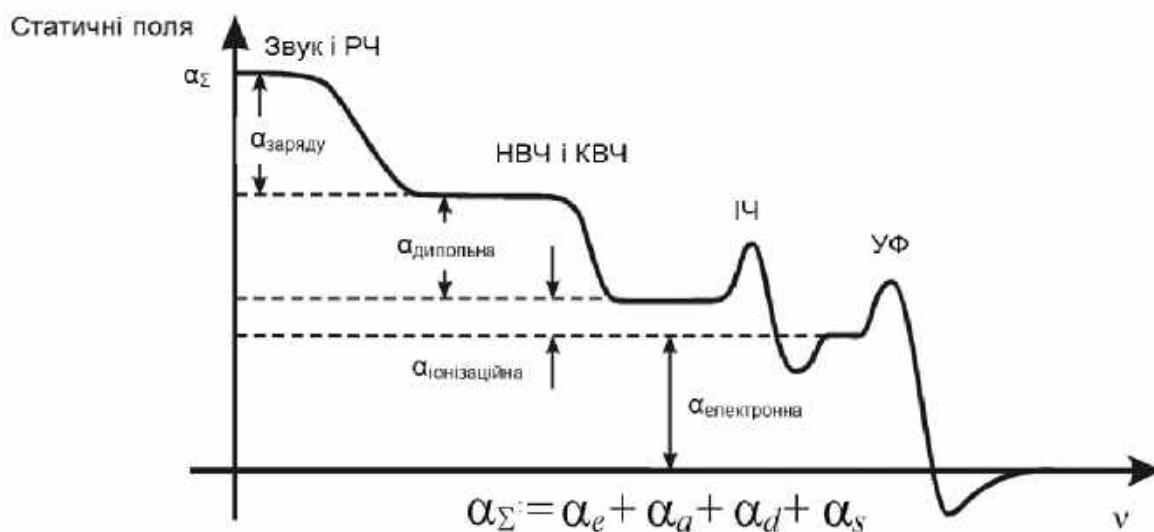


Рис. 1.9. Залежність поляризованості від частоти для різних типів поляризації

Як видно з рисунка, поляризаційний механізм впливу ЕМП на діелектрики будь-яких класів існує майже в усіх діапазонах. При цьому його кількісні характеристики залежать від динамічних властивостей носіїв зарядів і речовин, що поляризуються.

Унаслідок відмінностей динамічних і часових масштабів ці поляризації можуть «відстежувати» поведінку речовин у змінному ЕМП і, отже, робити внесок у загальну поляризацію тільки при частотах, менших за відповідні характеристичні частоти.

У разі електронної (і частково атомної) поляризації коливання електронів (і йонів відповідно), викликані змінним електричним полем, лише впливають на структуру однієї молекули або їх сукупності. Тому частотну характеристику для цього діапазону можна описати простою моделлю точкових мас з квазіпружним зв'язком, що реагують на змінення поля як лінійний гармонійний осцилятор. Якщо цей осцилятор збуджується з допомогою сили  $F = eE'$ , де  $E' = E + P/3\epsilon_0$ , то поле, що діє локально, буде таким:

$$E' = E + \frac{P}{3\epsilon_0} = \frac{E}{3} (\epsilon_r + 2), \quad (1.48)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \quad n = \sqrt{\epsilon_r},$$

де  $e$  – одиниця електричного заряду, на який діє це поле.

Унаслідок миттєвого відхилення заряду на величину  $z$  від свого положення рівноваги виникає дипольний момент

$$\mu = ez.$$

За наявності  $N$  вібраторів, які породжують когерентні коливання, поляризація на одиницю об'єму буде такою:

$$p = Nez.$$

Динамічний режим ізольованого диполя, що коливається, можна описати диференціальним рівнянням, до якого необхідно додати демпфівальну силу, пропорційну швидкості  $dz/dt$  частинки, і зовнішню впливну силу, пропорційну діючому електричному полю:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + 2\nu_i m \frac{dz}{dt} + \nu_0^2 m z = eE', \quad (1.49)$$

де  $2\nu_i''$  – швидкісний коефіцієнт опору;  $m$  – маса частинки (електрона), що коливається, або зведена маса, якщо коливаються йони;  $\nu_0 = \sqrt{\frac{f}{m}}$  – резонансна частота;  $f$  – постійна внутрішня обертальна сила.

Тоді рівняння

$$z = z_0 \exp[i(\nu_0' + i\nu'')t] \quad (1.50)$$

описує вільні, але згасальні коливання з резонансною частотою диполя

$$\nu_0' = \sqrt{\nu_0^2 - \nu_i''^2}. \quad (1.51)$$

Ця частота зменшується відносно незгасальних коливань. При частотах, значно менших і значно більших за резонансну частоту, уявна частина діелектричної проникності стає суттєво малою. Граничними значеннями відносної діелектричної проникності при частотах  $\nu \rightarrow 0$  і  $\nu \rightarrow \infty$  є такі:

$$\epsilon_r(\nu \rightarrow 0) = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \nu_i'^2}; \quad (1.52)$$

$$\epsilon_r(\nu \rightarrow \infty) = 1. \quad (1.53)$$

За загальних фізичних умов слід уважати, що в молекулі є декілька типів вібраторів, кожний з яких має власну резонансну частоту  $\nu_i'$ . У цьому випадку відносна діелектрична проникність є сумою усіх типів вібраторів  $N$ , що мають ефективні маси  $m_i$  і швидкісні коефіцієнти опору для кожного незалежного  $i$ -го типу вібратора:

$$\epsilon_r = 1 + \sum_i \frac{Ne / \epsilon_0 m_i}{\nu_i'^2 - \nu^2 + i2\nu_i''\nu}. \quad (1.54)$$

При частотах, набагато менших за найнижчу резонансну частоту, усі типи вібраторів додатково впливають на статичну діелектричну проникність, що відображено в методиках медичного застосування електричних полів і хвиль.

Щоб досліджувати процес взаємодії хвилевих полів з динамічними властивостями диполів, які сильно збурюються через рух сусідніх диполів (це має місце при орієнтаційній поляризації), необхідно врахувати, що внаслідок дуже коротких проміжків часу між зіткненнями ( $\Delta t_c \leq \nu^{-1}$ ) формування дискретних квантових відстаней стає неможливим.

Невизначений взаємозв'язок між квантовими станами при енергетичній різниці  $\Delta W = h\nu$  має місце, коли умова

$$\Delta W \Delta t \geq \hbar \quad (1.55)$$

не може виконуватись. Це можливо, якщо час між зіткненнями є меншим за величину зворотної частоти переходу:

$$\Delta t_c \leq \nu_i^{-1}. \quad (1.56)$$

Стан резонансу при цьому не настає, спектр є безперервним, а сам процес аперіодичним. Фізично це означає, що полярні молекули обертаються в середовищі з переважальними в'язкістю й тертям, тому резонансні явища не виникають.

При квантово-механічному підході всі електричні властивості молекул пов'язані з рухом електронів і визначаються складом і типом хімічних зв'язків у молекулі. Основними характеристиками електрона при цьому є енергія, момент імпульсу  $M_l$  (орбітальний момент кількості руху), спин  $S$  і спіновий магнітний момент  $\mu_{сп}$ .

Окремі атоми в молекулі зв'язані між собою також з допомогою хімічних зв'язків, які утворюються з участю електронів зовнішнього й передзовнішнього шарів і є результатом перерозподілу електронної щільності валентних електронів у межах молекули.

Відомо чотири основні типи хімічного зв'язку: іоний, ковалентний, координаційний і металевий. Поширений у природі водневий зв'язок є різновидом координаційного зв'язку. Розрізняють полярні й неполярні ковалентні зв'язки. При утворенні неполярного зв'язку щільність валентних електронів розподіляється між двома атомами симетрично. Якщо центр ваги електронної хмари є зміщеним у бік одного з атомів, то утворюється полярний зв'язок. При цьому обидва атоми мають однакові за величиною різнойменні точкові заряди  $+e$  і  $-e$ , які утворюють електричний диполь за типом координаційного зв'язку, що є аналогічним полярному ковалентному зв'язку й утворюється шляхом передачі електронної пари з цілком заповненої орбіталі атома ліганда на вакантну орбіталь центрального атома, який є комплексоутворювачем. У цьому випадку перший атом називають донором, другий – акцептором, а сам зв'язок – донорно-акцепторним.

У загальному випадку система електричних зарядів утворює мультиполь. Залежно від кількості зарядів розрізняють мультиполі нульового (одичиний ефект), першого (диполь), другого (квадруполь) і більш високих порядків.

Іонний зв'язок можна розглядати як граничний випадок полярного ковалентного зв'язку, коли хмара валентних електронів повністю

переходить до одного з атомів. Дипольний момент у цьому випадку має більш суттєве значення.

З позицій квантової механіки в різновидах хімічних зв'язків виокремлюють локалізовані двоцентрові зв'язки (C-C, C-H та ін.) і делокалізовані багатоцентрові зв'язки. Водневий зв'язок розглядають як особливий вид трицентрового зв'язку, а металевий – як граничний випадок делокалізованого хімічного зв'язку.

Якщо між двома атомами виникає декілька зв'язків, то враховують їх кратність, яка має важливе значення при визначенні фізикохімічних властивостей молекул. Наприклад, одним із основних компонентів біологічних мембран є фосфоліпіди, які містять залишки високомолекулярних жирних кислот.

При аналізі механізмів дії ЕМП на біологічні об'єкти з урахуванням хімічних зв'язків важливого значення набувають енергетичні оцінки, пов'язані з глибиною потенційної ями (ям) і енергією, необхідною для їх подолання у разі зовнішніх дій. У загальному випадку ці параметри залежать від сил електростатичного тяжіння ядер і електронів і сил міжелектронного й міжядерного відштовхування. При зближенні атомів на рівноважну відстань така система набуває найбільш стійкого стану.

### **1.5. Носії струму в гетерофазних електрохімічних системах**

Істотною складовою науки про живий організм є електрохімія. Процеси в живих гетерофазних системах містять безліч електрохімічних перетворень, що супроводжуються перенесенням протонів і йонів, переданням і перенесенням енергії і, як наслідок, виникненням активних середовищ.

У рідких розчинах, які тривалий час вивчають електрохіміки, існують відповідні умови для ефективного спрямованого перенесення не лише йонів, але й електронів. Водночас в електрохімії упродовж понад століття панує й активно підтримується твердження, відповідно до якого основними носіями струму в рідких розчинах є йони. Про це, зокрема, свідчить той факт, що при описі електрохімічних процесів у гетерофазних системах міжфазові переходи електронів у розчини й навпаки переважно не враховуються. Між тим, враховувати такі процеси необхідно згідно із законом збереження електричного заряду.

За сучасними уявленнями, у хімічних джерелах струму (ХДС) енергія хімічних реакцій перетворюється на електричну енергію. Згідно з цією концепцією на позитивному електроді ХДС (рис. 1.10) відбувається відновлення окисника з утворенням негативно заряджених іонів. На негативному електроді з допомогою цих іонів здійснюється окиснення відновника з утворенням вільних електронів.

Якщо з'єднати електроди ХДС між собою з допомогою зовнішнього ланцюга, то вільні електрони «перетікають» від негативного електрода до

позитивного внаслідок різниці електричних потенціалів між електродами. Окисниками – активними матеріалами (реагентами) позитивних електродів ХДС – є оксиди металів. Тверді солі й інші речовини відновлюються під час реакцій, зокрема, до нижчих оксидів. Відновниками є чисті метали, які під час електрохімічних реакцій окислюються.

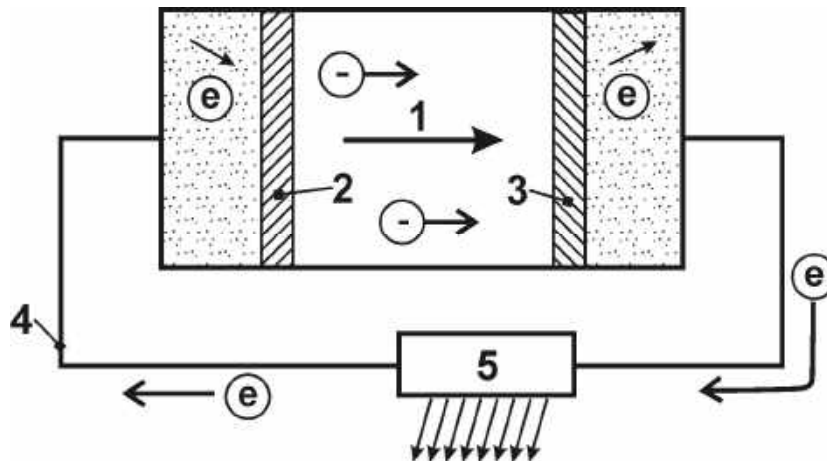


Рис. 1.10. Схема генерації ХДС: 1 – електролітна система; 2 – окисник; 3 – робоча поверхня відновника; 4 – зовнішній ланцюг; 5 – споживач електроенергії;  $\ominus \rightarrow$  – напрям руху негативних іонів, що утворюються на позитивному електроді;  $\oplus e$  – напрям перенесення електронів

На жаль, і сьогодні теорію ХДС у завершеному вигляді ще не створено. Зокрема, не зрозуміло, чому негативні заряди по зовнішньому ланцюгу переносяться, як їм і належить, від негативного електрода до позитивного, а по внутрішньому – навпаки.

Зараз навряд чи в кого можуть виникнути сумніви з приводу фактів міжфазних переходів електронів під дією градієнтів ЕМП, які широко застосовуються в технології ІХТ. Відомо, що електрони можуть здійснювати такі переходи в середовищах, що містять позитивні іони. Якщо немає електролізу, то міжфазові переходи й перенесення електронів через електроліт є результатом прикладеної напруги. Електрони через рідкі розчини й композиційні системи на їх основі можуть переноситися шляхом послідовних окислювально-відновних реакцій з участю йонів. Таким чином, з наведеного вище стислого аналізу випливає, що під дією прикладеної напруги в рідких розчинах і композитних системах на їх основі, у тому числі біосистемах, що контактують з електродами або знаходяться в ЕМП, основними носіями струму є електрони.

Тому будь-яке змінення різниці потенціалів у ланцюзі, що містить водні розчини електролітів і композиційні системи на їх основі, пов'язане з перенесенням вільних електронів. Не лише поляризація електролітів, але й перенесення вільних електронів може бути важливим фактором у життєдіяльності й розвитку рослин і живих організмів. Про це свідчить



наведений аналіз і практика застосування ІХТ, технологій біоелектростимуляції і електропунктури, включаючи виражені ефекти лікувальної дії при певній поляризації ЕМП або полярності під'єднаних електродів. У зв'язку з викладеним можна зробити висновок, що в сучасній квантовомеханічній теорії при описі ефектів, пов'язаних з перенесенням електронів в композитних системах, поки не враховується визначальний вплив кулонівських сил на величину й дискретність потенціального бар'єра, включаючи його електродинамічні властивості. У ній розглядається потенціальний бар'єр як незмінна величина, що не змінюється при перенесенні електронів до бар'єра й від нього. Однак результати лікування методом ІХТ відображають виражену динаміку «потенціальних ям», що свідчить про ефективну взаємодію квантових частинок з ЕМП і зарядами, які визначають величину потенціального бар'єра, а також можливість його змінення під час лікування.

## 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ В НАВКОЛИШНЬОМУ ПРОСТОРИ

### 2.1. Електромагнітні поля природного походження і їх вплив на живі організми

У навколишньому просторі можна виокремити два основні класи ЕМП: природні й антропогенні. ЕМП природного походження існують незалежно від життя й діяльності людини і є еволюційним чинником дії на біосферу. Такі поля генерують і випромінюють Космос, Земля, вода, атмосфера, рослинність і живий світ. Інтенсивність цих полів надзвичайно різноманітна. Її прийнято характеризувати еквівалентною температурою. Для абсолютно чорного тіла цей зв'язок має лінійний характер:

$$S(\nu) = 2\pi kT/\lambda^2,$$

де  $S(\nu)$  – спектральна густина проміння ЕМП [Вт/м<sup>2</sup>·Гц];  $\lambda$  – довжина хвилі;  $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постійна Больцмана;  $T$  – температура, К.

Для трав'яних покривів, орних полів, лісів, асфальту та інших ця температура коливається в межах 260...285 К, будівель – 230...250 К, річок та озер – 170...200 К, а метали й гладка водна поверхня випромінюють переважно відбите світло.

Найбільш характерною рисою космічного випромінювання є його відносно висока інтенсивність на низьких частотах. Так, у метровому діапазоні еквівалентна температура космічних джерел становить сотні й тисячі градусів, а на частотах понад 3 ГГц температура Галактики не перевищує 2–4 К.

У межах нашої планетної системи Сонце є найпотужнішим джерелом природного радіовипромінювання, що складається з двох компонентів, перший з яких є постійним у часі (з діапазоном хвиль 1...10 см) відповідає температурі  $(6...60) \cdot 10^3$  К, другий компонент пов'язаний з нестаціонарним випромінюванням, зумовленим виникненням сонячних плям. Приріст еквівалентної температури на сантиметрових хвилях становить 100 % від випромінювання спокійного Сонця, що на тлі високої загальної стабільності (коливання в межах 0,3 %) може свідчити про важливе значення ЕМП в еволюції всього живого на Землі. Місяць випромінює переважно відбите від Сонця світло, його температура в радіодіапазоні коливається в межах 100...400 К.

Досягаючи магнітосфери, іоносфери й атмосфери Землі, космічне проміння й елементарні частинки залежно від частоти й енергії випромінювання викликають специфічні хвилеві ефекти, у тому числі пружні й непружні зіткнення з атомами й молекулами газів атмосфери.

Серед електромагнітних процесів, що впливають на живі організми на Землі в діапазоні 0,1 Гц...100 кГц, є такі:

- виникнення магнітодинамічних хвиль у верхніх шарах атмосфери через пориви «сонячного вітру», що взаємодіє з магнітосферою Землі;
- варіації геомагнітного поля;
- циклотронні коливання іонів у радіаційному поясі Землі й гальмівне випромінювання електронів у зоні полярних сяїв;
- гальмування потоків космічних частинок і метеорів;
- рух електричних зарядів в атмосфері (атмосферна електрика);

Найбільші за абсолютним значенням рівні таких ЕМП виникають на частотах приблизно 3...30 кГц і нижче 3 кГц та пов'язані з атмосферною електрикою – грозовими розрядами, що генерують імпульси і флуктуаційні сигнали (атмосферіки) великої інтенсивності.

Атмосферне фонове ЕМП домінує аж до частот приблизно 30 МГц, а його рівень змінюється в межах  $\pm 20$  дБ. На частотах понад 30 МГц переважають джерела ЕМП космічного походження: Сонце (80 % усієї енергії ЕМП випромінює на частотах понад 3 ГГц), планети Сонячної системи, зірки, галактики й позагалактичний простір.

Природні електричні й магнітні поля, утворені під час процесів, що відбуваються на Сонці й навколо нього, унаслідок взаємодії з полями Землі істотно впливають на фізіологічні й біохімічні процеси й функціональні параметри живих організмів. Одним із таких чинників є геомагнітне поле, яке має складну структуру й властивості, загальний частотний спектр періодичних змін якого становить від  $10^{-5}$  Гц до сотень герц і напруженість від 0,3 Е на екваторі до сотих часток ерстеда біля полюсів.

У тканинах організму людини, наприклад у серці й мозку, також існують дуже слабкі магнітні поля, у мільйони разів слабкіші ( $10^{-8}$  Е), ніж геомагнітне. Висловлюється припущення, що між цими магнітними полями

і магнітними полями таких внутрішньоклітинних структур як гени і пептиди існує резонансний зв'язок. Запропоновано модель, у якій живий організм подано сумою резонансних термодинамічно відкритих систем, де необхідною умовою їх існування й динамічної стабільності є геомагнітне поле. З допомогою такого механізму можна пояснити структуру біологічної системи як результат динамічної стабільності.

Про важливість для живого організму неіонізувальних ЕМП низької інтенсивності, до яких належить і геомагнітне поле, свідчать численні дослідження. Виявлено зв'язки між варіаціями показників геомагнітного поля й сонячної активності, з одного боку, і фізіологічними параметрами людини – з іншого (частота серцевих скорочень, швидкість сенсомоторних реакцій, артеріальний тиск) у період весняного рівнодення. Уважається, що геомагнітне поле синхронізує добові коливання серцевого ритму, при цьому механізм його саморегуляції залежно від хронотипу індивідуума може виявляти різну міру чутливості до екзогенних синхронізувальних ефектів геомагнітного поля.

Установлено, що люди, які тривалий час знаходяться у незмінному за динамікою геомагнітному полі, стають у край агресивними. Із симетричного аналізу ( $\pm 6$  років) щорічної глобальної геомагнітної активності, загальної сонячної активності й сумарного вивільнення сейсмічної енергії випливає, що кілька воєн у першій половині ХХ століття могли бути відносно пов'язаними з глобальною геомагнітною активністю тих років. Припускається, що чинник геомагнітної активності може модулювати зміни в тих надзвичайних процесах, які пов'язані із взаємодією великих мас людей. Війни можуть бути виявленням цих змін.

Установлено, що магнітні бурі, які відображають зміни магнітної активності, є істотним чинником стресу для організму здорових і хворих людей і призводять до розвитку неспецифічної адаптивної стрес-реакції і коливань продукції гормонів стресу. Для магнітних бурь характерними є порушення в організмі співвідношення глюкокортикоїдів і мінералокортикоїдів, збільшення в крові концентрації кортизону (гормону кори надниркових залоз), тенденція до активації симпатoadреналової системи й пригнічення вироблення мелатоніну.

У пацієнтів, що страждають на епілепсію, штучне послаблення геомагнітного поля призводило до зростання синхронізації альфаритму електроенцефалограми (ЕЕГ) і виникнення генералізованих повільнохвильових розрядів, які були схожі за деякими ознаками на ЕЕГ після гіпервентиляції. Виявилось, що головною в реакції мозку на штучне послаблення геомагнітного поля є парієтальна область правої півкулі кори мозку. Подібні зміни в ЕЕГ спостерігались у здорових людей, добре корелювали з коливаннями геомагнітного поля й показниками сонячної активності.

В експериментах на щурах з високою схильністю до епілептичних судом штучне збільшення індукції змінного магнітного поля частотою 7 Гц

у межах 10...70 нТ значно збільшувало пропорцію нічних приступів. У морських свинок, які знаходились у камері зі зниженою в 10 разів напруженістю геомагнітного поля, підвищувався рівень адреналіну і гістаміну в крові, але при поверненні тварин у камеру з нормальними умовами спостерігалось зниження концентрацій гістаміну й серотоніну. Такі коливання рівня нейрорегуляторних з'єднань свідчать про пряму залежність функцій нейроендокринної системи від зовнішніх ЕМП.

Виявлено статистично достовірне збільшення кількості інфарктів міокарду у 15543 жителів Петербургу під час великих геомагнітних бурь. Виявлено, що у немовлят з аномаліями функцій епіфізу й лімбічної системи під час магнітних бурь з коливаннями від 11 до 20 нТ і від 31 до 40 нТ спостерігається збільшення кількості випадків раптової смерті. Проте серед дітей з такою патологією під час магнітних бурь з коливаннями від 21 до 30 нТ, навпаки, зафіксовано зниження частоти смертності. Припускають, що нелінійна чутливість пов'язана зі специфічним накладенням (інтерференцією) частот у геомагнітному полі, що призводить до рапових коливань продукції мелатоніну епіфізом, який, як експериментально доведено, є структурою, чутливою до ЕМП.

Висловлюється припущення про існування в мозку людини спеціалізованої фоторецептивної системи, локалізованої в епіфізі, яка посилює слабку взаємодію її фоторецепторів з геомагнітним полем на рівні спінів фотонів, що виявляється в модуляції реакцій організму на дію світла.

Живі організми постійно піддаються дії інших природних ЕМП, що охоплюють широкий діапазон частот і амплітуд. Одним із таких природних чинників є атмосферіки (зірніці) – дуже слабкі електромагнітні імпульси, генеровані атмосферними розрядами. З допомогою приладу, що імітує зірніці, було проведено дослідження ЕЕГ у 52 добровольців, яке показало, що при повторній аплікації таких слабких електромагнітних стимулів упродовж 10 хвилин виникає істотне зниження інтенсивності альфа-ритму в тім'яних і потиличних областях мозку. Таким чином, Сонце впливає на живі організми електромагнітним випромінюванням і потоками заряджених частинок.

Ще однією істотною компонентою сонячного випромінювання є *магнітне поле*. Взаємодіючи з електричними й магнітними полями Землі й атмосфери, сонячна активність відіграє провідну роль у різноманітних біологічних ефектах (рис. 2.1).

Через атмосферу Землі проходить світло, що відповідає двом областям спектра (рис. 2.2). Це – видиме світло й сусідні з ним області, а також радіохвилі в діапазоні  $1 \text{ см} < \lambda < 10 \text{ м}$ .

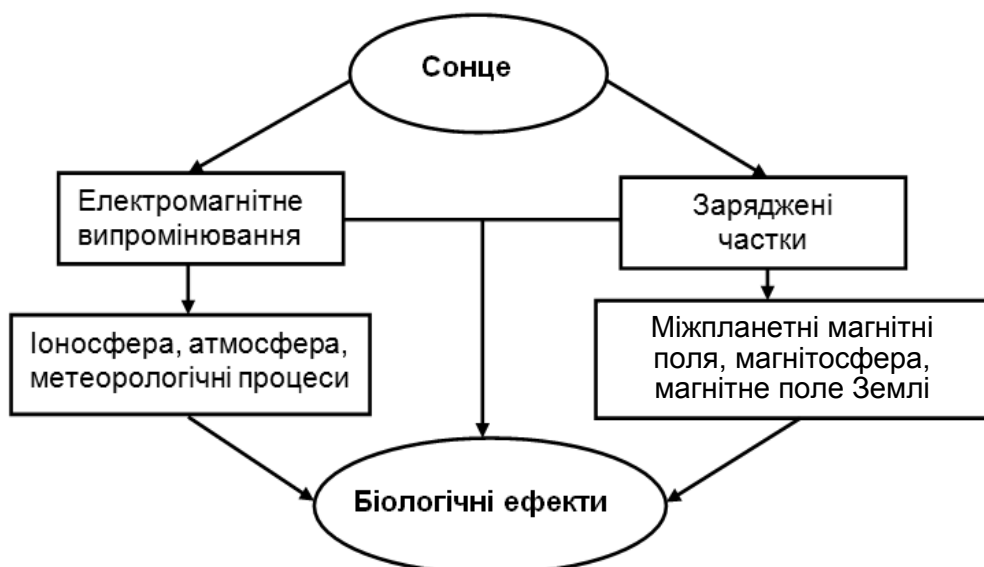


Рис. 2.1. Шляхи дії сонячного випромінювання на живі організми

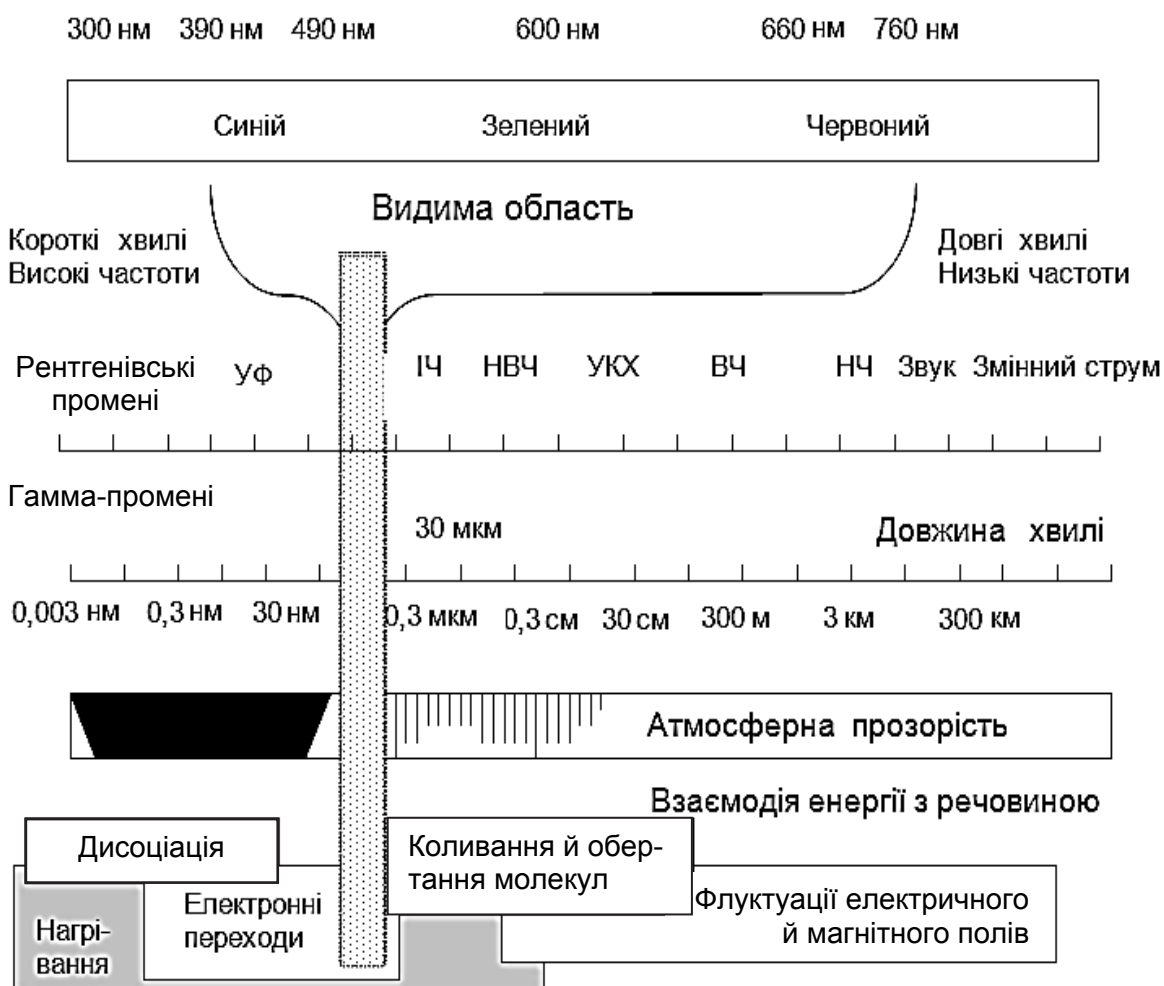


Рис. 2.2. Характеристики спектра ЕМП і його взаємодія з речовиною

Невідомо, чи мають екологічне значення довгі радіохвилі, хоча, на думку деяких дослідників, ці хвилі впливають на перелітних птахів та інші організми. Сонячне проміння, що проходить через верхні шари атмосфери й досягає поверхні Землі, складають електромагнітні хвилі довжиною приблизно від 0,3 до 10 мкм. На рис. 2.2 показано взаємодію випромінювання з речовиною для різних діапазонів.

Відомо, що кожний фізіологічний процес в організмі проходить у часі й має свою структуру, яка, у свою чергу, є функцією інших фізіологічних процесів зі своїми часовими й просторовими структурами. В організмі виявлено кількісні структури – часові хрономи для найважливіших фізіологічних процесів, таких, наприклад, як частота серцевих скорочень, артеріальний тиск та ін. Практична цінність дослідження хрономів полягає в тому, що з допомогою їх довготривалого моніторингу й аналізу відхилення характеристик фізіологічних процесів від оптимальних меж можна визначити міру ризику розвитку певного захворювання.

Сьогодні з допомогою систематичного моніторингу зовнішніх космічних ритмів паралельно з фізіологічними функціями встановлено збіг хрономів з патологічними процесами, що проходять в організмі людини. Так, доведено, що міжпланетна магнітна буря з її циклами як компонентами зовнішнього хронома спричиняє збільшення кількості інфарктів міокарда, інсультів, дорожніх подій, авіакатастроф.

Що стосується позаземних впливів на здоров'я людей, то досі відомо тільки про впливи Сонця і Місяця. З параметрами підвищеної сонячної активності (кількістю плям на Сонці й сонячними флуктуаціями) корелюють частота смерті від інсульту й інфаркту міокарда, гіпертонічного кризу й деяких інших патологічних станів і фізіологічних процесів.

Крім того, залишається важливим питання про міру впливу гравітаційних полів, наприклад про вплив положення Місяця відносно лінії, що з'єднує Сонце й Землю. Під час синодичного місяця (від нового місяця до наступного нового місяця) має значення півмісяцева періодичність медичних і геомагнітних, а також метеорологічних впливів. Уважають, що позаземні й земні впливи є взаємозв'язаними і взаємодіють між собою, тому не можна виокремити вплив кожного з них.

Напруженість геомагнітного поля зазнає періодичних річних, сезонних і добових змін, на які накладаються локальні метеорологічні процеси, пов'язані зі зміненням параметрів атмосфери (вологості, температури, барометричного тиску, швидкості вітру). При цьому в деяких осіб, яких називають метеочутливими, погіршується самопочуття або загострюються хронічні хвороби.

Найбільш частими метеорологічними чинниками, що спричиняють виникнення болів або їх загострення, є температура (87 %) і вологість повітря (77 %), а найбільш частими скаргами при змінненні погоди є суглобові й м'язові болі (82 і 79 % відповідно). Зазвичай такі метеочутливі пацієнти є особами з довготривалими хронічними захворюваннями.

Ревматичний біль виникає головним чином при виникненні холодних або грозових фронтів, нестійких полярних потоків, тоді як біль ампутації і біль у рубцях загострюються під час змінення погоди. Головний біль і мігрень є типовими ознаками подальших змін погоди.

У більшості пацієнтів, серед яких 62 % жінок і 37 % чоловіків, змінення погоди посилює симптоми артриту. У пацієнтів з ревматичним артритом больовий синдром змінюється при змінненні барометричного тиску й температури повітря, тоді як у осіб з остеоартритом больові відчуття змінюються під час дощової погоди, змінення барометричного тиску й температури повітря; хворі на фіброміалгію найбільш чутливі до змінення барометричного тиску. Зазначають також, що в пацієнтів з артритом при зниженні температури повітря й підвищенні вологості збільшуються біль і ригідність суглобів. Зміни погоди часто впливають на настрій людини, можуть спричиняти депресію, субклінічні болі.

Що стосується механізмів перелічених вище впливів, можна висловити лише кілька припущень, що базуються на аналізі статистичних зв'язків між показниками захворюваності й інтенсивністю сонячних варіацій. Важливо також зазначити, що підвищення активності Сонця приводить як до збільшення кількості захворюваності, так і навпаки: екрановані від ЕМП Сонця клітини спочатку перероджуються, а потім і гинуть. Подібною до метеотропних є також реакція людини, яку екрановано від дії фонових ЕМП. Окрім дискомфортичних станів у неї розвивається реакція стресу, втома, головний біль тощо. Отже, досягнення стану «норма» є можливою тільки в еволюційно збалансованих електромагнітних умовах.

## **2.2. Антропогенні електромагнітні поля і їх нормування**

Антропогенні ЕМП – це широкий клас випромінювань, що є наслідком людської діяльності, переважно техногенного характеру. Їх рівні підлягають санітарно-гігієнічному нормуванню, яке базується на двох принципах: «пороговий» і «дозовий». Відповідно до нього, в законодавчому порядку обмежуються гранично допустимі рівні (ГДР), або порогові дози енергетичної експозиції, що їм відповідають.

Відомо декілька способів вибору ГДР, що ґрунтуються, наприклад, на теплових ефектах, які викликаються поглинанням ЕМП у біологічних об'єктах.

Теплова концепція, яку було прийнято після другої світової війни, спричинила численні захворювання операторів радіолокаційних станцій, що привело до необхідності перегляду ГДР.

Стандарти в цій області розробляються з урахуванням основних складових техногенного фону:

– джерелами індустриального фону є генератори промислових частот, гідро-, електро-, атомні станції (50, 60, 400 Гц), а також силові лінії

електропередач (ЛЕП), що покривають майже всю сушу Землі і є випромінювачами цих частот;

- виробниче устаткування (зварювальні й нагрівальні апарати, силове устаткування, верстати й інструменти, електромеханічні пристрої, вуличне освітлення);

- транспортні засоби (двигуни, системи електрозапалення, конвеєри, контактні дроти);

- засоби електронно-обчислювальної техніки, технологічна, медична й побутова апаратура;

- технологічні виробництва, пов'язані із синтезом полімерів.

Промисловий фон розглядають зазвичай як «додачу» до природного фону. Під час розроблення нормативної документації в межах «порогової» і «дозової» концепцій складають санітарні паспорти об'єктів, відповідність яких закону контролюють санітарно-епідеміологічні служби разом з контролем здоров'я осіб, що працюють з цими об'єктами.

Для промислових ЕМП є характерними:

- здатність промислових фонових полів, що переважно є локальними, створювати сигнали, які поширюються на значні відстані, наприклад, електромагнітне випромінювання ЛЕП;

- істотне перевищення за рівнем природних ЕМП, а також (що є більш важливим) створення нерівномірності в енергетичному спектрі, якої не було в попередній еволюції живого.

Промисловий фон також перешкоджає роботі численних технічних пристроїв і знижує метрологічну точність вимірів.

Практичний інтерес до промислового фону зумовлений тим, що сьогодні вже накопичено резерв фактів, які підтверджують недооцінення шкідливих впливів середніх і малих доз ЕМП. Про це свідчить аналіз безпеки комп'ютерних робочих місць, для яких використовується тільки нормативна промислова частота 50 Гц:  $E_{\text{гдр}} = 5000 \text{ В/м}$  і  $H_{\text{гдр}} = 1400 \text{ А/м}$ . Оскільки рівні ЕМП, які виробляють відеотермінали комп'ютерів, є мізерно малими порівняно з наведеними ГДР, будь-який аналіз безпеки ЕОМ втрачає сенс. Проте в міжнародному стандарті MPR-2 за основу взято порівняння ЕМП, що вироблює відеотермінал з природним фоном. Це дало змогу диференціювати їх залежно від застосованих в них пристроях захисту.

Практика експлуатації відеотерміналів тривалий час насамперед серед молоді, школярів і дітей показала, що декілька факторів, наприклад ЕМП, акустичний шум, колір екрана, динаміка напруженості зорової системи, зміст програми тощо, при поєднанні шкідливо впливають на здоров'я людини, що не впливає з аналізу ні за одним із перелічених факторів.

Для прикладу в табл. 2.1 наведено порівняльні характеристики відеотермінальних ЕМП порівняно з природним фоном.



Таблиця 2.1

## Порівняльні характеристики ЕМП

Характеристики ЕМП	Смуга частот, кГц	
	0,005 ... 2,0	2,0 ... 400,0
Напруженість електричного поля, В/м		
Гранично допустимий рівень	25,0	2,5
Природний фон	0,037	0,010
Перевищення природного фону, кількість разів	675	250
Напруженість магнітного поля, нТл		
Гранично допустимий рівень	250,0	25,0
Природний фон	0,0385	0,075
Перевищення природного фону, кількість разів	650	333

З аналізу табл. 2.1 випливає, що роботу зі зниження локальних рівнів ЕМП, створюваних ЕОМ, не можна вважати завершеною. Аналогічний висновок дає й оцінювання безпеки за чинником ЕМП сучасних засобів оргтехніки (ксерокси, факси, модеми), а також багатьох видів виробничої, технологічної, побутової і медичної апаратури, нормативної документації на яку сьогодні немає.

Крім промислового до антропогенного фону належить такий, що створюється радіоелектронними засобами зв'язку, мовлення, телебачення, радіолокації і т. д.

Відповідно до прийнятих норм міра дії ЕМП на біологічний об'єкт визначається кількістю енергії, поглиненої цим об'єктом (хоча його реакція на ЕМП може бути найрізноманітнішою). Якщо обмежитись типовими й найбільш простими моделями об'єктів, то міру безпеки радіоелектронних засобів (РЕЗ) можна оцінити технічними (електродинамічними) методами без моделювання особливостей поглинання енергії ЕМП об'єктом. При цьому результати медикобіологічних досліджень безумовно мають велику цінність, оскільки без них неможливо точно встановити ГДР для початкових ЕМП. Експертиза безпеки РЕЗ у цьому випадку стає ефективнішою, оскільки може проводитися як розрахунковим, так і експериментальним шляхом, абсолютним і відносним методами з використанням точних електродинамічних методів розрахунків, високоточних вимірювальних засобів.

Найбільш актуальним сьогодні є порівняння результатів, отриманих для однотипних РЕЗ різними методами. Зокрема, у діапазонах частот 0,03...4 МГц, 30...50 МГц і 50...300 МГц нормуються рівні електричної і

магнітної складових ЕМП, а в діапазоні 0,3...300 ГГц – густина потоку потужності. На основі даних ГДР було обчислено величини допустимих спектральних густин  $S_E$ ,  $S_H$ ,  $S_M$  техногенного фону, створюваного РЕЗ перелічених класів.

У табл. 2.2 наведено основні кількісні дані гранично допустимих рівнів спектральних густин  $S_E$ ,  $S_H$ ,  $S_M$  для РЕЗ і природного фону ЕМП для різних діапазонів частот.

Як видно з табл. 2.2, установлені значення ГДР техногенного фону в  $3 \cdot 10^3 \dots 4,1 \cdot 10^5$  разів перевищують максимально можливі значення природного фону ЕМП. При всіх спрощеннях такого аналізу його кінцевий результат, по-перше, базується на кількісних даних, по-друге, переконливо доводить істотне підвищення ЕМП антропогенного походження порівняно з природним фоном, що викликає обґрунтоване занепокоєння екологів і медиків. Таким чином, сьогодні в усьому світі склалася ситуація, коли реальні рівні ЕМП антропогенного походження, що відповідають нормативним документам і ГДР, у сотні, тисячі, десятки й сотні тисяч разів перевищують рівні природного фону, під впливом якого сформувалися складні біологічні системи на Землі. Щоб відновити екологічну рівновагу, необхідно якщо не зупинити, то хоча б уповільнити підвищення рівня техногенного фону в усіх ділянках радіочастотного спектра. Для цього в практичній діяльності при аналізі наслідків дії ЕМП на людей доцільно відмовитися від «порогової» і «дозової» концепцій, покладених в основу санітарно-гігієнічного нормування.

Таблиця 2.2

Порівняльні характеристики ГДР ЕМП РЕЗ та природного фону

Діапазон частот	0,03...3 МГц	0,03...3 МГц	3...30 МГц	30...50 МГц	3...50 МГц	50...300 МГц	300МГц... ...300 ГГц
Характеристика фону за ЕМП	$S_E$ , В/МГц <sup>0,5</sup>	$S_H$ , А/МГц <sup>0,5</sup>	$S_E$ , В/МГц <sup>0,5</sup>	$S_E$ , В/МГц <sup>0,5</sup>	$S_H$ , А/МГц <sup>0,5</sup>	$S_E$ , В/МГц <sup>0,5</sup>	$S_M$ , Вт/м <sup>2</sup> ·Гц
ГДР за ЕМП	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-13}$
Максимальний природний фон	$10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$10^{-17}$
Перевищення природного фону	$3 \cdot 10^3$	$10^5$	$9,3 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^5$	$10^4$	$8,3 \cdot 10^4$

Основну увагу при розробленні нових нормативних документів слід приділити дослідженню непорогових рівнів ЕМП, зокрема, зіставивши їх з

показниками природного фону, що може бути основою для екологічного нормування ЕМП.

Водночас, «скуштувавши одного разу принади цивілізації», навряд чи можна сьогодні добитися відмови від радіо і телебачення, стільникового телефону, комп'ютерів і т. д. У зв'язку з цим виникає два принципові запитання:

– чи існують максимально допустима інтенсивність і швидкість змінення ЕМП антропогенного походження, при яких біологічний об'єкт зможе адаптуватися до змінених умов довкілля без погіршення свого функціонального стану, включаючи стани норми майбутніх поколінь;

– чи існують фізичні дії, здатні зменшити або компенсувати шкідливий вплив ЕМП антропогенного походження?

При проведенні дослідів на культурах бактерій з додаванням у поживне середовище «важкої» води було встановлено, що має змінитися п'ять поколінь, щоб бактерії адаптувалися до нових умов. При заміні «важкої» води на нормальну протієву адаптовані покоління також гинули, як і при заміні протієвої на дейтерієву. З цих дослідів випливає, що така адаптація є можливою у випадку, коли фізичним чинником дій є радіація. Для складніших біологічних систем, у тому числі для людей і тварин, може виявитися, що ці показники будуть іншими, або що антропогенні ЕМП зачіпають глибинні й важливі функції організму, унаслідок чого адаптація до них без збитку для його функціонального стану буде неможливою.

Якщо погодитися з тим, що під час керування гомеостазом ЕМП активізує первинні функції рецепції і зв'язку з навколишнім світом, то функції антропогенного ЕМП можна уподібнити гарматній канонаді або розряду блискавки в залі, де під керівництвом диригента виконується симфонія. У такій ситуації важко чекати ефективного керування оркестром. Про глибину порушень, що виникають унаслідок дії антропогенного ЕМП НВЧ, свідчать генетичні ефекти й морфофункціональні зміни в центральній нервовій системі, які виявлено експериментально. Так, при дослідженні генетичних ефектів, що виникли внаслідок дії ЕМП, встановлено дві групи патогенних впливів: індукція генетичних порушень при одних режимах дій і модифікування генної експресії – при інших. Механізми й закономірності цих процесів доки не пізнано. Маловивченими залишаються генетичні ефекти дії ВЧ, НВЧ ЕМП на соматичні й генеративні клітини. Не слід також унеможлилювати окремі генетичні наслідки дії ЕМП на генетичний апарат генеративних клітин.

Висловлено припущення про те, що реєстроване останніми роками збільшення кількості онкологічних захворювань може залежати (окрім інших причин) і від антропогенного підвищення рівня електромагнітного поля біосфери. Тому проведення подальших фундаментальних досліджень біологічних ефектів ЕМП є надзвичайно актуальним, оскільки допомагає зрозуміти їх значення в еволюційному розвитку організмів,

індукції патологічних процесів, регуляції функціональних систем і генної експресії під час онтогенезу.

Існують ґрунтовні докази ЕМП патогенезу, зумовленого дією на людину випромінювання станцій радіолокації сантиметрового діапазону.

Установлено зокрема, що тривала дія імпульсного випромінювання РЛС з інтенсивністю, що перевищує ГДР на 20 дБ, призводить до збільшення (у 3–10 разів) онко-, ендокринних та інших захворювань. Особливо найуразливішими в цьому випадку є діти і підлітки, у яких відбуваються інтенсивні природні процеси. Установлено зокрема, що робота функціональних систем під дією ЕМП НВЧ може викликати як позитивні, так і негативні за біологічною значущістю реакції живого організму.

До позитивних реакцій належить стимуляція процесів регенерації на клітинному рівні. Указані зміни супроводжуються підвищенням активності мікроциркуляції і формуванням артеріальної гіперемії. Виявлені первинні реакції тимчасово призводять до формування позитивних біологічних ефектів, спрямованих на усунення ушкоджень. Водночас відомо результати дії ЕМП НВЧ про формування негативних реакцій, які виявляються у вигляді трофічних порушень і зниженні резистентності організму. Насамперед це стосується головної і слабо обґрунтованої концепції електромагнітної гігієни, суб'єктивізму у виборі ГДР, що істотно перевершують природний електромагнітний фон. Якщо виявиться, що адаптація біологічних систем «не встигає» за темпами збільшення ЕМП антропогенного походження, то в людства не залишиться вибору, окрім зниження темпів цього збільшення або пошуку інших фізичних, у тому числі електромагнітних, дій, які компенсують ці впливи. Тому в пошуку гармонії взаємовідносин між Людиною і Природою значення екологічно чистих технологій істотно збільшується.

### **3. КОЛИВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ В БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ**

#### **3.1. Загальні властивості коливань і ритмів**

Виняткове багатство коливальних процесів демонструє жива природа. Дихання, серцебиття, перистальтика, ЕЕГ, ЕКГ, ходьба – це лише найочевидніші прояви біологічних коливань, за якими прихована величезна кількість ритмів, тобто закономірних чергувань у просторі яких-небудь подій, що відбуваються з певною послідовністю або частотою. Будь які функції, будь які життєві прояви – ритмічні, і це є справедливим не лише стосовно людини, але й будь-якої живої істоти, на якій би стадії еволюції вона не знаходилась.

Ритм – організатор життєвої діяльності організму в цілому. Будь-які зміни, перебудови організму призводять до неузгодженості його ритмів і

хворобливо зносяться організмом. Чергування підйомів і спадів, напруги й ослаблення захищає організм, оберігає його від передчасного виснаження. Ритм – форма й джерело руху живої природи, боротьба життя і смерті. Можливо, усе в природі підпорядковано загальному ритму, який забезпечує взаємодію людей (предків і нащадків), матеріальну й духовну складові.

Важливими характеристиками біологічних ритмів є форма кривої ритму (спектральний склад), частота, фаза, амплітуда, рівень, а також акрофаза – «зона блукання фази». Форма кривої будь-якого ритмічного процесу залежить від його природи, зовнішніх і внутрішніх чинників, що впливають на все живе.

У літературі з ритмології в біологічних системах систематизовано дані щодо різновидів живої матерії й проведено обґрунтування одного з найбільш важливих концептуальних положень: «біологічний ритм є вираження єдності й боротьби взаємовиключних джерел життєвого процесу руйнування і творення, що забезпечують стабільність живої системи і її самовідтворення». Ритмічність є внутрішньою або ендогенною властивістю живої матерії, що відображає суть протиріч між творенням і руйнуванням, життям і смертю, інформацією й ентропією.

Спектр біологічних ритмів, властивих земним організмам, є виключно широким і складається з безперервних і дискретних смуг.

У технології ІХТ особливе значення приділяється ритмам, періоди яких порівнянні з часом дії ЕМП, за який досягається сенсорна або відповіда їй апаратна реакція. При цьому можливе накопичення послідовних дій, наприклад коли загальний курс лікування встановлюється близьким до циркадіанного ритму ( $T \sim 1$  міс.), а час одного сеансу дорівнює ультрадіанному ( $T \leq 0,5$  год). Такі «повільні» хвилі в ритмології живого неважко забезпечити технічними засобами, наприклад, в системах, що містять активні джерела напруги й струму, плазму або спеціальні полярні речовини. Ці самі ритми можна генерувати в системах з нелінійними перетвореннями сигналів довільних частот, спектри яких мають дискретний характер, а коливання є нестабільними за частотою за типом флікер-шуму.

Установлено, що всі біологічні системи, у яких процеси відбуваються у замкнутих циклах з періодами від часток секунди до місяців і років, є коливальними. Існують також біологічні коливання з періодами декількох днів, місяців, років і т. д. Розрізняють «циркадіанні» (однодобові), ультрадіанні ( $T < 24$  год), інфрадіанні ( $60 \text{ год.} > T > 24 \text{ год}$ ) ритми.

Як уважають, такий періодичний прояв процесів є відображенням нормальної роботи систем організму. Циклічні зміни в організмі дають йому деякі переваги: просторову й часову організацію, передбачення подій, що повторюються, ефективність і точність контролю. Біологічні

коливальні системи є прямим результатом функціонування біохімічних генераторів коливальних процесів, які називають також осциляторами. Величезний інтерес до ритмів пов'язаний з функціонуванням багатоступінчастих біологічних сукупностей молекул, клітин, синапсів і нейронів, що утворюють системи зв'язаних осциляторів.

Загальні механізми хвильових процесів у нервовій системі описано від рівня мембрани клітини до мозку. Так, виявлено нейрони, що мають внутрішні осциляторні властивості, які є основою їх ритмічної активності. На рівні нейронних мереж вивчено нейронні ланцюги між корою головного мозку й таламусом, при цьому інтернейрони кори завдяки їх складним взаємозв'язкам можуть генерувати потенціали дії в широких діапазонах частот (4...12, 40...100 і понад 200 Гц). Знайдено три типи режимів роботи осциляторних нейронних мереж: хаотичних і когерентних осциляцій, режим осциляцій, що накладаються, і часткової синхронізації. Імовірно, що в мозку осциляторні процеси виконують функцію фільтрів і потрібні для формування ансамблів нейронів, які несуть інформацію про специфіку стимулу.

Ендогенні (внутрішні) ЕМП різних ієрархічних рівнів поєднуються в єдину гармонійну коливальну систему, у якій синхронізовано ЕМП структурно-функціональних систем організму. Добре відомо ЕМП, які реєструються такими методами дослідження електричної активності людини, як електроенцефалографія, електрокардіографія, електроміографія. У фізичних параметрах цих локальних ЕМП закладено інформацію, з допомогою якої можна оцінити функціональний стан систем. Принципово можливим є також оцінювання функціонального стану всього організму за параметрами загального ЕМП.

Ці факти свідчать про те, що живі організми мають функціональні коливальні системи з відлагодженими часовими циклами, які є такими ж складними, як структура і організація їх роботи. Схожість у часі й просторі різних життєвих процесів сприяла створенню в організмі ансамблю осциляторів, які можна розрізнати за різними часовими шкалами.

Виходячи з того, що інформація є спільним показником для інтеграції часу, речовини й енергії, можна вважати, що періодичні процеси в живому організмі відображають механізм перероблення інформації. Періодичні процеси на всіх рівнях живого організму (молекулярному, генетичному, клітинному, органному, системному, нейроендокринному і поведінковому), можуть розглядатися як еволюція біологічних ритмів, які призначено для оптимізації цілісності, розвитку й виживання організму. Проте біологічна циклічність бере початок від хімічної й атомної періодичності. Цей принцип відображено в періодичній системі хімічних елементів Менделєєва.

## 3.2. Резонансні властивості біологічної системи

Серед механізмів взаємодії в живих системах виняткове значення має резонанс, коли наближення частоти зовнішніх коливань до частоти власних коливань біологічної системи призводить до різкого збільшення (або зменшення) амплітуди коливань цієї системи. З допомогою резонансу можна невеликою змушувальною силою викликати сильні коливання системи. У наукових кругах немає єдиної думки про те, що таке резонанс у біологічних системах, як він виникає і що власне резонує. Водночас з явищами біорезонансної взаємодії, у тому числі позитивної або негативної, кожен з нас стикається постійно, включаючи найбільш складні її прояви у вигляді симпатії і любові, ревнощів, біологічної несумісності, конфліктних і дисконформних станів і т. д.

Наведемо основні властивості резонансних явищ на прикладах з фізики. Для виникнення резонансу мають виконуватися такі умови:

- можливість здійснення системою коливальних рухів, що відповідають спектру її власних хвильових чисел;
- обов'язкове існування зовнішньої сили, що має складові у спектрі власних частот системи.

Резонанс може виникнути як на одній частоті, наприклад, простий коливальний контур, так і на багатьох частотах у системі зв'язаних контурів. У загальному випадку складна система має широкий спектр власних резонансних частот, який відображає дискретний характер її просторово-часової структури.

Розглянемо деякі структурні особливості біологічних об'єктів. Як відомо, більшість з них мають клітинну будову, тобто складаються з безлічі подібних елементів, що повторюють будову (а отже, і характеристики) один одного з високою точністю. Процеси життєдіяльності клітин на всіх рівнях (механічному, електричному, хімічному, інформаційному) можна розглядати як періодичні, тобто коливальні, або хвильові. Доведено, що клітини є джерелом електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот, тому можуть бути джерелами резонансних коливань і резонувальними системами. У біологічних системах автоколивальні процеси спостерігаються на всіх ієрархічних рівнях організації живої матерії і відіграють важливу роль у процесах кодування, передачі й перетворення інформації.

Більшість рецепторних клітин є автоколивальними системами, що кодують інформацію про зміни параметрів внутрішнього і зовнішнього середовищ у вигляді автоколивань мембранного потенціалу.

Усі види ауторегуляції виконують свої функції тільки в певному діапазоні параметрів стану, вихід за межі яких під впливом екзо- і ендогенних чинників може змінювати внутрішнє середовище, що не

компенсується гомеостатичними механізмами. При зміщенні системи ауторегуляції організм не може нормально функціонувати, що призводить до розвитку патологічного процесу.

Принциповою відмінністю резонувальних біологічних об'єктів від простих коливальних систем, що розглядаються у фізиці, є складність їх будови (складні хімічні сполуки, подвійна спіраль ДНК, фрактальний характер структур на усіх ієрархічних рівнях живих систем і т. д.).

Для резонувальних біологічних об'єктів правильніше казати не про збіг власних частот, які не можуть резонувати як єдине ціле, а про складний резонанс, коли близькими виявляються хвильові процеси, що складаються з безлічі елементарних коливань з різними частотами й амплітудами. Реальний біологічний об'єкт знаходиться в середовищі, що його оточує, у якому одночасно є наявними хвильові впливи з безперервним і дискретним спектрами. Залежно від того, які зовнішні хвильові процеси посилено в певний момент, відгукується відповідна структура біологічного об'єкта, яка має резонанс на цій частоті.

Це явище слабого хвильового відгуку в усьому спектрі частот можна назвати явищем фонового резонансу структурних елементів біологічного об'єкта, яке буде тим значніше, чим сильніше зовнішня дія наблизиться до повного набору власних частот усіх елементів системи. Під елементами в цьому випадку розуміють не лише елементарні складові біологічного об'єкта, але й будь-які їх поєднання, аж до об'єкта як єдиного цілого. Це визначається складністю хвильового процесу у будь-якому біологічному об'єкті порівняно з простими коливальними системами, що розглядаються у фізиці. Водночас надійність систем ауторегуляції в організмі забезпечується такими складовими:

- множина (дублювання) регульованих зв'язків, що контролюють одну й ту саму функцію;
- множина й відносна автономність елементів, які функціонують паралельно;
- багаторазове резервування джерел енергії;
- заміщення або відновлення елементів і зв'язків, що вийшли з ладу;
- здатність до самоочищення від сторонніх елементів;
- захист від критичних перевантажень і здатність адаптуватися до них за певних умов.

Реальний резонанс у біологічних системах, що мають складну внутрішню будову, є можливим тільки на тих частотах, які відповідають їх внутрішній будові, адже для резонансу потрібне посилення хвильового процесу (тобто посилення зовнішнього сигналу). Однак не можна отримати сигнал певної частоти, якщо в системі немає елемента, здатного його генерувати.



З наведеного вище можна зробити висновок про те, що біологічний об'єкт, який має власний набір внутрішніх частот і хвильових процесів, може брати участь у явищах біологічного резонансу на частотах резонансу його структурних елементів або на їх комбінаціях. Це дає змогу ввести поняття, аналогічне поняттю власної частоти простої фізичної коливальної системи, – *власний хвильовий процес*. У деяких випадках для біологічної системи цей процес ототожнюють з інформацією, підкреслюючи ті ланки керування біологічної системи, які відповідають за її зміст. Можна визнати, що в цьому випадку було б правильніше казати про резонансну проекцію інформації. Тому для узагальнення краще користуватися поняттям *інформаційно-хвильового процесу*, що відображає природний стан функціональних систем, який відповідає нормальній життєдіяльності біологічного об'єкта. Сам інформаційно-хвильовий процес може бути скільки завгодно складним. Його компоненти можуть згасати й знову посилюватися. Кількість станів, через які проходить біологічний об'єкт у цьому процесі, може бути скільки завгодно великою, тому ці стани можуть узагалі ніколи не повторюватися.

Резонансні властивості мають не лише клітинні структури. Аналогічно клітинам можна розглядати як резонансні структури й інші частини біологічних об'єктів. Це є можливим завдяки відомій властивості будови біологічних об'єктів – *самоподібності*, або *фрактальності*. Навіть за відсутності зовнішніх дій (що в реальному випадку, звичайно, неможливо) різні частини живого організму (органи, тканини, клітини, ДНК та інші з'єднання) взаємодіють між собою. Отже, біологічний резонанс є невід'ємною властивістю всіх живих організмів і постійно відбувається в них, забезпечуючи їх життєдіяльність.

У біологічному об'єкті існує явище *внутрішнього біологічного резонансу* (автобіорезонансу), але це не виключає виникнення резонансу, викликаного зовнішніми діями. Зазначимо, що в міру диференціації організмів на класи, види тощо, у низькочастотній частині просторового спектра більшою мірою виявляється дискретний характер спектра, що відображає геометричні особливості біологічної структури. Відповідні резонансні частоти також залежать від діелектричних та інших властивостей складових біологічної речовини. Таким чином, внутрішній біологічний резонанс визначає весь інформаційно-хвильовий процес живого організму і виявляється набагато частіше, ніж зовнішній резонанс, точніше він відбувається постійно й безперервно.

*Зовнішній резонанс*, у тому числі такий, який використовується в профілактичних і лікувальних цілях, визначається чинниками змінення довкілля й антропогенезу. Його можна використовувати як метод керування біологічним об'єктом. Біологічний об'єкт, керований власним інформаційно-хвильовим процесом, зазвичай налаштований на деяку

кількість різних динамічних станів, визначених як явище *часткового біологічного резонансу*.

Усі ці стани можна поділити на стани *норми* (біологічний об'єкт є «здоровим») і *патології* («хворим»). Станів як норми, так і патології для кожного об'єкта може бути багато, включаючи вікові змінення, впливи клімату, географічних умов, сезонів року і т. д. У цілому стан норми характеризується відповідними інформаційно-хвильовими процесами. Це є очевидним, оскільки стан норми підтримується завдяки явищу біорезонансу. Якщо всі частини організму перебувають у стані норми, то вони збалансовано взаємодіють тільки в межах цього стану.

Якщо величина зовнішньої дії не перевищує межі, тобто дія не переводить біологічну систему в стан патології, то це відповідає першому (адаптаційному) інформаційно-хвильовому рівню захисту. Після перевищення межі зовнішня дія призводить деяку структурну частину біологічної системи до фіксованого патологічного стану. У цьому випадку починає працювати другий рівень захисту, що базується на самолікуванні організму. При цьому частина організму, що перебуває в стані норми, впливає на вражені частини. Перефразовуючи слова давніх алхіміків про те, що «подібне породжує подібне», можна сказати, що в цьому процесі подібне відновлює і посилює подібне. І дійсно, на «лікувальну» зовнішню дію відгукуватимуться тільки налагоджені частини біологічної системи, і сам інформаційно-хвильовий процес підлаштовуватиметься під зовнішній фон, що відповідає нормальному стану організму, а отже, буде підтримуватися процес перебудування й повернення вражених частин до нормального стану.

Таким чином, на всіх рівнях організації для живих організмів властивим є *принцип розумності, або пріоритетності норми* перед усіма іншими станами. У сучасній медичній літературі цей принцип узагальнено для стану хвороби. Показано, що за заданих умов стан хвороби є найкращим з усіх можливих станів. У термінах квантової електродинаміки серед численних потенційних ям, у яких може перебувати інформаційно-структурована система, для живого організму переважним є стан, який відповідає максимальній інформації.

### **3.3. Принципи ауторегуляції організму**

Якщо жива система виходить зі стану норми за межі адаптації, то може так само й повернутися до нормального стану. Уражені частини впливають на нормальні частини живої системи «спотвореним» інформаційно-хвильовим процесом. Оскільки спочатку вражених частин мало, вони не можуть істотно вплинути на організм і перевести його в стан

патології. Такий стан живого організму не розглядається як захворювання, а визначається як захисна реакція регуляторних систем (нервова, ендокринна й імунна системи) біологічного об'єкта. У цій ситуації виявляються два основні принципи ауторегуляції організму – регуляція за відхиленням контрольованої величини від норми і регуляція за збуренням. Прямий і зворотний переходи живої системи з одного квазістійкого стаціонарного стану в інший здійснюються при різних збуреннях і різним шляхом, тому система може опинитися в одному з цих станів і зберегти пам'ять про такі зміни в середовищі, які здатні змінювати її стаціонарні стани. Цей факт добре відомий лікарям-клініцистам, коли після, здавалося б, успішного лікування захворювання медикаментозними засобами, наприклад антибіотиками, у хворого через деякий час спостерігається погіршення стану (бронхіальна астма, простатит, алергія та ін.).

Зі збільшенням кількості порушених контрольованих величин в організмі ситуація змінюється на гірше. По-перше, наявність великої кількості елементів зі схожою структурою призводить до явища біорезонансу між ними. При цьому виникають усе більш стійкі кластерні утворення, що перебувають у стані патології. Ці утворення не лише підтримують стан патології, але й починають переводити сусідні частини біологічного об'єкта в стан «хвороби». Ця дія є можливою у зв'язку з наявністю фрактального зв'язку всередині структури й взаємним впливом між її окремими елементами. У цей момент може виникнути реальне захворювання організму, лікування якого власними регуляторними системами вже буде неможливим.

Зазначимо також, що в разі патології, викликаній, наприклад, інфекцією, реактивність організму може підвищуватися плавно або імпульсивно залежно від виду патології і стану захисних систем організму. Особливе значення в конфлікті між «нормою» і «патологією» має стан «кризи» – нелінійної реакції регуляторних систем, передусім імунної системи, на чинник дії (крутість схилів потенційної ями). Для цього стану властивими є максимальні стреси (підвищення температури, артеріального тиску, пульсу і т. д.), що відображається й на інтенсивності інформаційно-хвильових полів.

Запропонована інформаційно-хвильова модель переходу від норми до патології і навпаки дає змогу пояснити, чому захворювання в різних стадіях проходять з різною швидкістю і чому в інформаційно-хвильовій технології досить часто спостерігається пороговий ефект: спочатку кілька перших сеансів проходить начебто безрезультатно, а потім настає швидке поліпшення.

Біологічний резонанс як інформаційно-хвильове явище може також бути поясненням ІХТ на інформаційному рівні. Частково некогерентний характер випромінювання клітинних структур у стані норми забезпечує

високий рівень функціонального резервування й майже необмежену можливість його вдосконалення, а фрактальність внутрішньо-системних зв'язків дає змогу впливати на весь організм шляхом дії на будь-яку з ланок.

Центри функціональних систем організму знаходяться в зонах інформаційно-хвильового впливу (ІХВ), які багато в чому повторюють топологію китайських меридіанів і розташованих на них точок акупунктури. Зони ІХВ, проте, мають загальніший характер і на відміну від суміжних морфологічних структур виражені диференціальні електродинамічні характеристики (імпеданс, біохемілюмінесценцію, радіометричну температуру в НВЧ-діапазоні і т. д.). Важливою особливістю зон ІХВ є також їх велика (порівняно з площею точок акупунктури) просторова протяжність, що методично спрощує ІХТ, оскільки конструктивні особливості випромінювача і дифракційний поріг випромінювання не потребують точного знання топології зони ІХВ.

Установлено також, що електродинамічна модель точок акупунктури дає змогу розглядати їх як антени НВЧ-діапазону, а сукупність точок акупунктури на відповідному меридіані – як фазовані ґрати у більш низькочастотних діапазонах, оскільки відстані між окремими точками ґрат вимірюються в пропорційних відрізках, кратних довжині фаланги середнього пальця руки.

На жаль, сьогодні порівняно задовільно розвиненими є тільки електродинамічні моделі точок акупунктури і живих клітин, а досліджень випромінювальних властивостей ґрат, що складаються із сукупності точок акупунктури і зон ІХВ, розташованих уздовж одного або декількох меридіанів, не проводилося. Здається виправданим вивчення випромінювальних (включаючи роботу на приймання) властивостей таких ґрат на базі теорії фрактальних антен.

### **3.4. Параметри біотропів електромагнітних полів**

Живі організми чутливі до усього спектра електромагнітного проміння: від статичних і інфранизькочастотних коливань до гамма-проміння і вище. Основними параметрами ЕМП є амплітуда (інтенсивність), частота і поляризація проміння (рис. 3.1). При цьому, починаючи з деякого порогу, амплітуда (інтенсивність) ЕМП визначає переважно кількісні (енергетичні) параметри дії – гіпертермію тканин, їх механічну, термічну, звукову й інші деструкції, а частота й поляризація – якісні показники взаємодії. На функції організму впливають напруженість поля (електрична й магнітна), градієнт, вектор, експозиція і локалізація ЕМП, а також здатність ЕМП до іонізації. Деякі дослідники до параметрів біотропів ЕМП відносять і форму сигналу

(синусоїдальний, амплітудно-, фазо-, частотно-модульований, імпульсний та ін.), поєднання моноmodalьних коливань із шумом.

Інтенсивність ЕМП у діапазонах частот від 0,3 до 3000 ГГц (дециметрові, сантиметрові, міліметрові, дециміліметрові) оцінюється густиною потоку енергії, одиницею виміру якої є ват на квадратний метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) або його кратні частки ( $\text{мкВт}/\text{см}^2$ ). У діапазонах від 3 Гц до 300 МГц ЕМП оцінюється окремо за електричною складовою  $E$  у вольтах, поділених на метр ( $\text{В}/\text{м}$ ) і магнітною складовою  $H$  в амперах, поділених на метр ( $\text{А}/\text{м}$ ).

Дозиметрія біологічних об'єктів у ЕМП зводиться до двох питань: яку кількість енергії було поглиненої і де її зосереджено. Як енергетичну характеристику дії ЕМП, використовують параметр SAR (Specific Absorbed Rate), або ППП (питома поглинена потужність). SAR (або ППП) є частиною енергії ЕМП, поглиненої одиницею маси об'єкта і вимірюється у ватах на кілограм ( $\text{Вт}/\text{кг}$ ) або міліватах на грам маси ( $\text{мВт}/\text{г}$ ). Відомо, наприклад, що проникність живих тканин (зокрема, шкіри людини) для ЕМП змінюється в діапазоні від інфрачервоних до надвисоких частот на 5–6 порядків, тому ППП однієї і тієї самої частини тіла залежить від частоти ЕМП.

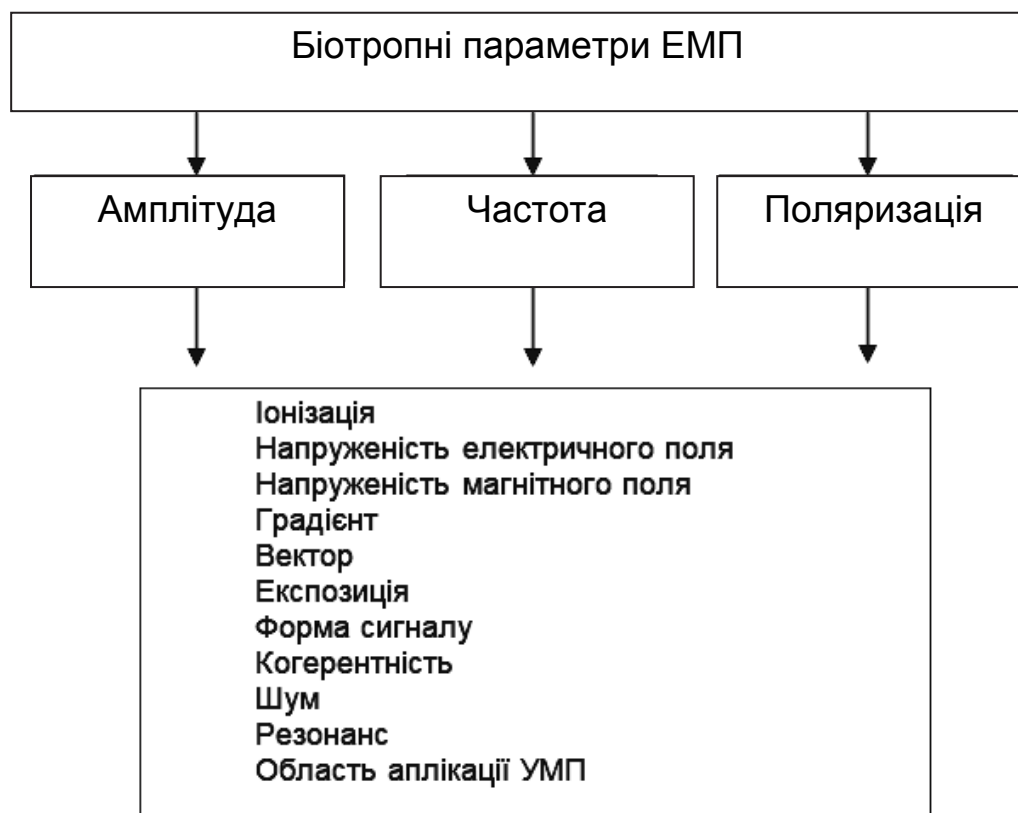


Рис. 3.1. Параметри біотропів ЕМП

Проміння, що взаємодіє з об'єктами, поділяють на іонізувальні й неіонізувальні. До іонізувальних належать такі коливання (УФ,

рентгенівське, гамма-проміння), квант енергії яких є настільки великим, що можуть виникнути розриви міжмолекулярних зв'язків або іонізація атомів. Енергія, яку необхідно витратити для відриву електрона від атома або молекули, має назву потенціалу іонізації. Потенціал іонізації – характеристика потенційної ями, у якій знаходиться електрон в атомі, іоні або молекулі в незбудженому стані. Для відриву електрона від атома або молекули потрібна мінімальна енергія  $E_{min} = Ue$ , де  $U$  – потенціал іонізації, а  $e$  – заряд електрона. Енергію електронних переходів (так само, як і фотонів або частинок іонізуючого проміння) виражають в електрон-вольтах (eВ). Це – позасистемна одиниця енергії, один електрон-вольт дорівнює кількості енергії, якої набуває електрон, що рухається в прискорювальному полі з різницею потенціалів 1 В ( $1 \text{ eВ} = 1,60215 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Від нього утворюються кратні одиниці – кілоелектрон-вольт, мегаелектрон-вольт і т. д. Потенціал іонізації визначають за спектроскопічними даними і характеристиками ударної іонізації. Відрив одного електрона від нейтрального незбудженого атома характеризується першим потенціалом іонізації, відрив другого електрона – другим потенціалом іонізації і т. д. Черговий потенціал іонізації різко збільшується за величиною порівняно з попереднім. Зі збільшенням порядкового номера атомів, коли збільшується екранізація ядра глибинними електронами, перший потенціал іонізації зменшується, що може викликати мимовільну іонізацію атому.

Енергія, яка не перевищує потенціалу іонізації, також може поглинатися атомом або молекулою, переводячи їх у стан збудження. Цей стан характеризується енергією, що перевищує їх основні стани. Підвищення енергії в системі атомів або молекул відбувається шляхом електронних переходів з основного стану у збуджений.

Таким чином, до іонізуювальних належать ультрафіолетові ( $\lambda = 400 \dots 50 \text{ нм}$ ), рентгенівські ( $\lambda = 50 \dots 0,01 \text{ нм}$ ) і гамма-проміння ( $\lambda < 0,01 \text{ нм}$ ). Більш низькочастотні ЕМП з довжиною хвилі  $\lambda = 1 \text{ мм}$  і більше є неіонізуювальним, оскільки в них енергія кванта  $h\nu = 1,7 \cdot 10^3 \text{ eВ}$  є меншою за енергію теплового руху при кімнатній температурі.

Усе живе на Землі завжди зазнавало вплив природних ЕМП, проте за останнє століття цей фон істотно змінився через створення штучних джерел ЕМП, що збільшило кількість захворювань. З досліджень на моделях, що базуються на законах рівноважної термодинаміки, випливає, що ці ЕМП є занадто слабкими, щоб взаємодіяти з біомолекулярними системами і тому не можуть впливати на фізіологічні функції. Однак в дослідженнях біоефектів на клітинному й молекулярному рівнях, де увагу було сфокусовано на енергіях, які не спричиняють нагрівання тканин, виявлено, що слабкі ЕМП значно посилюють дію слабких сигналів, які виникають при зв'язуванні гормонів, антитіл і нейротрансмітерів з

рецепторними зонами на мембранах клітин. Виявилось, що ключову роль у цьому процесі відіграють іони кальцію. З цих досліджень випливає, що польова організація живої матерії знаходиться на тоншому рівні, ніж структурна й функціональна організація її молекул.

*Амплітуда* ЕМП оцінюється з позиції ефекту взаємодії енергії з функціональними системами живого організму. Дія високоамплітудних (високоінтенсивних) ЕМП, незважаючи на протидію механізмів терморегуляції, призводить до підвищення температури тіла, тому домінують реакції організму, пов'язані з порушенням терморегуляції. Дія середньоамплітудних (середньоінтенсивних) ЕМП продукує в організмі надмірну кількість тепла, яка компенсується роботою систем терморегуляції. Низькоамплітудні (низькоінтенсивні) ЕМП майже не впливають на роботу системи терморегуляції й істотно не змінюють температуру тіла організму.

Якщо загальне, або локальне підвищення температури організму під дією випромінювання ЕМП не перевищує величини  $0,1^{\circ}\text{C}$  (фізіологічні флуктуації температури), то такі ЕМП відносять до нетеплових. За кількісну межу нетеплових ЕМП узято густину потоку ЕМП  $10\text{ мВт/см}^2$ , при якій підвищення температури шкіри людини не перевищує  $0,1^{\circ}\text{C}$  (що не вважається фізично значущою величиною). Слід зазначити, що ця величина є значно вищою за гранично допустимий гігієнічний рівень густини потоку ЕМП ( $10\text{ мкВт/см}^2$ ) у діапазоні частот 300 МГц...300 ГГц, установлених законодавствами багатьох країн.

*При взаємодії неіонізуювальних ЕМП з організмом теплові ефекти залежать від амплітуди й частоти випромінювання, а також від діелектричної проникності тканин.* Порогові інтенсивності ЕМП для теплових ефектів у тканинах зменшуються з підвищенням частоти й коливаються від  $10\text{ мВт/см}^2$  у кілогерцовому діапазоні до  $7\text{ мВт/см}^2$  у НВЧ-діапазоні. За іншими даними, межа чутливості шкіри спини людини до теплової дії ЕМП істотно різниться при дії мікрохвиль різних частот:  $4,5 \pm 0,6\text{ мВт/см}^2$  на частоті 94 ГГц і  $63,1 \pm 6,7\text{ мВт/см}^2$  на частоті 2,45 ГГц. Очевидно, що метод НВЧ-терапії, у якому використовується інтенсивність ЕМП  $1...7\text{ мВт/см}^2$ , застосовується на межі теплової і нетеплової дії міліметрових хвиль.

Експериментальні дослідження дії низькоінтенсивних (менше  $10\text{ мВт/см}^2$ ) міліметрових хвиль інтенсивно проводилися на двох напрямках. На першому з них використовувалися вузькосмугові генератори, настроєні на певні частоти НВЧ-діапазону, а на другому застосовувалися шумові джерела, що генерують широкий спектр частот. До групи спеціальних генераторів також належать прилади інформаційно-хвильової терапії, які генерують широкосмугові сигнали наднизької інтенсивності ( $10^{-17}...10^{-21}\text{ Вт/см}^2\cdot\text{Гц}$ ), що набуває особливого значення у зв'язку з

виявленню віддалених негативних наслідків випромінювання в діапазоні НВЧ.

Уважають, що ЕМП нетеплової інтенсивності можуть здійснювати регульовану дію на функції живих організмів у широкому діапазоні частот, включаючи УКХ і довші хвилі при густині потоку потужності, яка не перевищує межу допустимого рівня.

При низьких частотах (нижче 50 Гц, а також від 50 до 200 Гц) ЕМП взаємодіють з біологічними тканинами не лише електромагнітним, але й механічним шляхом, створюючи вібраційний ефект. Амплітуда вібраційних відгуків тканини мозку є постійною при частотах вібрації нижче 50 Гц, але при частотах від 50 до 200 Гц у тканині мозку спостерігається резонансний відгук, який зникає на частотах понад 200 Гц. Екзогенні низькочастотні ЕМП, діючи на живу тканину, спричиняють порушення мембранних потенціалів клітин; змінення руху іонних струмів і перерозподіл іонів та виникнення механічних сил на поверхні клітин.

Під впливом зовнішніх наднизькочастотних ЕМП дотеплових інтенсивностей або дотеплових ЕМП мікрохвильового діапазону, модульованих низькочастотними коливаннями, можуть істотно змінюватися функції клітин, органів і систем, включаючи передання інформації і продукування ендогенних ЕМП. Виявлено, що основою реакцій організму на дію таких ЕМП є нелінійні нерівноважні процеси в критичних точках проходження сигналів через мембрани клітин. Ці ефекти пов'язані з квантовими станами й резонансними відгуками в біомолекулярних системах. Так, взаємодія квазічастинок – *фононів* і *екситонів* – уздовж довгих молекул продукує нелінійні молекулярні вібрації у вигляді *хвиль солітонів*. Уважають, що солітони перебувають у мінімальному енергетичному стані і є відносно довговічними порівняно з лінійними осциляціями, які можуть передавати з одного місця в інше енергію, що вивільняється під час біохімічних реакцій. Ці нелінійні хвилі дають змогу також об'єднувати реакційно-дифузійні процеси у внутрішньо-клітинних і міжклітинних областях. У молекулах з довгими ланцюгами мембранні молекулярні солітони мають важливе значення при перенесенні зарядів і можуть існувати як нелінійні хвилі, що передають енергію вздовж гелі-ліпідних областей протеїнів від однієї точки до іншої. При цьому передача енергії в солітонах відбувається з дозвуковими швидкостями.

У клінічній практиці деякі діапазони ЕМП, наприклад інфрачервоний, видимий оптичний, ультрафіолетовий, ультрависокочастотний, надвисокочастотний, є добре відомими і давно використовуються. Інші діапазони ЕМП застосовують у практичній медицині порівняно недавно.

Згідно із загально прийнятою класифікацією до мікрохвиль належать ЕМП з частотами від  $3 \cdot 10^8$  до  $3 \cdot 10^{12}$  Гц. Мікрохвилі об'єднують



ультрависокочастотне (дециметрове) випромінювання з частотою від  $3 \cdot 10^8$  до  $3 \cdot 10^9$  Гц, надвисокочастотне (сантиметрове) з частотою від  $3 \cdot 10^9$  до  $3 \cdot 10^{10}$  Гц, надтовисокочастотне (міліметрове) з частотою від  $3 \cdot 10^{10}$  до  $3 \cdot 10^{11}$  Гц і дециміліметрове з частотою від  $3 \cdot 10^{11}$  до  $3 \cdot 10^{12}$  Гц.

Велику лікувальну дію мають міліметрові хвилі з довжиною 10...1 мм. Було виявлено незвичайну ефективність дії міліметрових хвиль на функції живих організмів. Уперше взаємозв'язок між міліметровими хвилями й біологічними структурами теоретично обґрунтував Г. Фреліх (1983 р.). Згідно з його гіпотезою мембрани живих клітин мають дипольні коливання в міліметровому діапазоні частот (100...1000 ГГц). Відомо, що енергія кванта міліметрових хвиль ( $\lambda = 1...10$  мм,  $\nu = 30...300$  ГГц) є меншою від енергії електронних переходів, але здатна активувати коливання молекул і впливати на їх слабкі хімічні зв'язки. Г. Фреліх припустив, що завдяки енергії метаболізму в полярних молекулах виникають локальні нелінійні осередки коливань, які об'єднуються в довгий ланцюг резонансно зв'язаних когерентних коливань і виявляються на всіх системних рівнях організму.

Біоефекти дії міліметрових хвиль одними з перших досліджували наукові групи в Росії, Україні, Канаді, Німеччині й у деяких інших країнах. Під час експериментальних досліджень і практичного застосування було виявлено терапевтичний, протибольовий, імуностимулювальний, радіопротекторний, протівірусний та антибактеріальний ефекти цієї області ЕМП.

**Когерентність і шум.** Важливими параметрами *біотропа* ЕМП є *когерентність* і *шум*. *Когерентністю* називають погоджений у часі й просторі перебіг декількох хвильових процесів. Якщо різниця фаз ЕМП залишається постійною в часі або змінюється за лінійним законом, то ЕМП називають когерентними. ЕМП, у яких різниця фаз змінюється випадково (стохастично) називають *некогерентними*. Під *шумом* у теорії інформації, розуміють випадкові, небажані й непередбачувані сигнали, які маскують зміст інформації.

Явище когерентності виявлено в багатьох фізіологічних і патологічних процесах, що відбуваються в живому організмі. Згідно з гіпотезою Г. Фреліха, когерентні ЕМП, генеровані живими клітинами, знаходяться в діапазоні частот від 0,1 до 10 ТГц (Т, тера =  $10^{12}$  Гц). Водневі зв'язки в білках і нуклеїнових кислотах коливаються з частотою  $10^{11}...10^{12}$  Гц, породжуючи міліметрові хвилі й інфрачервоне випромінювання. Оскільки водневі зв'язки піддаються розтягуванню й стисканню, то їх частота коливань змінюється. Запропоновано елементарну модель «водневих арф», у якій водневі зв'язки порівняно зі струнами арфи. Уважають, що залежно від довжини, кількості й взаємодії струн (маленькі й великі водневі арфи) залежатиме частота, інтенсивність і якість «звуку» (тобто

електромагнітного випромінювання). Така модель може використовуватися для пояснення деяких істотних моментів у функції протеїнів і ДНК на основі її логічного зв'язку з теорією когерентних збуджень Г. Фреліха.

Уважають, що основою біологічної організації живої матерії є когерентне передання енергії, яка дає змогу макромолекулам працювати з високою ефективністю. Так, наприклад, ЕМП можуть викликати в крові обертання або коливання полярних молекул рідкого середовища й притягувати їх до клітин крові. Притягнуті молекули рухаються разом з клітинами крові, через що коефіцієнт тертя під час руху клітин повністю залежить від ЕМП. Когерентні потоки енергії ЕМП, що продукуються клітинами, можуть взаємодіяти з поверхневими зарядами інших клітин, а також перерозподілятися по внутрішньоклітинних і міжклітинних системах комунікації (мікротрубочки, екстраклітинний матрикс). При цьому когерентні ЕМП можуть перерозподіляти роботу вбудованих у мембрану ферментів між їх активними й неактивними конформаціями і таким чином регулювати метаболізм у клітинах.

На рівні нейронів кори виявлено низькочастотний (1...2 Гц) резонанс, який є відображенням рівня ендогенної ритміки цих нейронів. Зовнішні ЕМП здатні змінювати течію таких біохімічних реакцій, як активність орнітиндекарбоксилази, ключового ферменту синтезу нуклеїнових кислот і протеїнів, модулювати роботу іонних каналів, механізмів синаптичної передачі й нейронних об'єднань нервової системи ендогенних осциляторів. Існує гіпотеза про те, що основою ультраслабкої люмінесценції живих клітин також є когерентні ЕМП.

Живі клітини перебувають в електричному шумовому оточенні. Це створює проблему сигнал – шум, оскільки показано, що клітини реагують на екзогенні ЕМП, які є на декілька порядків слабкішими, ніж локальні ендогенні ЕМП. Є припущення про те, що живі клітини реагують тільки на такі ЕМП, які є просторово когерентними на їх поверхні. Мається на увазі, що для виникнення фізіологічної відповіді клітина повинна мати значну кількість одночасно й когерентно активованих рецепторів. Проте подібно до всіх детекторних фізичних систем роботі клітин заважає шум. Припускається, що просторово когерентні, але рідкісні в часі шумові ЕМП, накладаючись на когерентні сигнали, здатні захистити механізм розрізнення дії сигналу від дії шуму. Водночас існують «вікна», що обмежують амплітуди ефективних ЕМП, за якими втрачається їх фізіологічна дія.

Розглянемо *інформаційно-резонансні властивості неіонізуювальних електромагнітних полів*. Як уже зазначалося раніше, *резонансом* у загальному вигляді називають збіг періоду власних вільних коливань системи з періодом коливань зовнішньої сили, що діє на цю систему, або

кратність періодів сили і вільних коливань системи. Резонансні явища, що виникають при цьому, призводять до відгуку резонансної системи, а в живому організмі – до багатократного посилення впливу зовнішнього збуджувального сигналу.

**Стохастичний резонанс** – підсилення слабких сигналів шумом у нелінійних системах – є відомим давно. Живі клітини існують в оточенні електромагнітного шуму, що створюють локальні теплові й обмінні процеси. Відповідно до законів фізики шум обмежує здатність лінійних сенсорних систем сприймати слабкі сигнали внаслідок низького співвідношення рівнів сигнал / шум. Проте в певних нелінійних системах, якими є живі організми, шум може сприяти підсиленню слабких сигналів.

Для нелінійних систем, що знаходяться поблизу фазових переходів, показано, що малі інтенсивності сигналу, додані до сильнішого шуму, можуть значно посилювати відгук живої системи на сигнал, але інтенсивний шум, доданий до значно слабкішого сигналу, не викликає істотного посилення відгуку цієї системи на шум. За певних умов надмірний шум приводить до збільшення відношення сигнал / шум, на кшталт процесу стохастичного резонансу. Такі пояснення є основою для висновку про те, що стохастичний резонанс не дає змоги шуму, значно сильнішому за сигнал, заважати перебігу нормальних фізіологічних процесів.

Уважають, що стохастичний резонанс, основою якого є принцип підсилення низькоінтенсивних сигналів шляхом постачання енергії в систему зі широкосмугового шуму під впливом резонансних флуктуацій мембранного потенціалу, є одним із важливих концептуальних підходів розуміння енергоінформаційних взаємодій у живому організмі. При цьому впливи зовнішнього середовища можуть істотно змінювати стабільність резонансу в живому організмі, породжуючи патологічні стани. Так, якщо організм перебуває в рівноважному стані, то він реагує на будь-які небажані подразнення слабо, якщо ж поза станом рівноваги (наприклад, при тривалому стресі) – то набагато сильніше, і людина захворює.

Явище стохастичного резонансу виявлено в різних живих системах: іонних каналах, мембрані нейронів, сенсорних системах, просторовочасових нейронних ланцюгах. Установлено також, що завдяки «стохастичному резонансу» сигнали ЕМП можна значно (до 1000 разів) посилити.

Припускають також, що *стохастичний резонанс є основою механізму активізації власних ЕМП клітин*. Як впливає з означення, стохастичний резонанс створює умови для зміни функціонального стану в нелінійних системах, що одночасно збуджуються інформаційним (низькоенергетичним) сигналом і шумом. Біосистема є вираженою нелінійною, дисперсійною, синергетичною структурою, тобто ідеальним

середовищем для реакцій на стохастичний резонанс. У контексті взаємодії власних ЕМП клітин із зовнішніми ЕМП діапазону НВЧ, а також інших ієрархічних структур організму з хвилями більш низькочастотних діапазонів стохастичний резонанс виявляється на дію зовнішнього ЕМП, що модулюється сигналами з частотами основних біоритмів організму. Це впливає на клітинні й інші дипольні структури, у яких було порушено режим синхронізму через різні патологічні стани, унаслідок чого ці структури набувають стабільного енергетичного стану.

**Кіральність.** *Ще однією важливою властивістю біологічних систем є кіральність – реакція на ліво- і правобічне обертання вектора ЕМП.* Як встановлено нещодавно, кіральність також є важливим параметром біотропа при опроміненні біологічного об'єкта високочастотним низькоінтенсивним ЕМП. Це стосується й впливу низькочастотних магнітних полів на біологічний об'єкт. Експериментально виявлено раніше невідомий ефект принципової відмінності поведження пепсину в організмі людини при зміні напрямку руху вихрової магнітної компоненти поля при його право- і лівобічному обертанні. Цей самий ефект є добре відомим з досвіду медичної практики лікарів ІХТ, що оперують спрямованими рухами в зонах ІХВ з допомогою рук, магнітів або «матриці ІХТ» за годинниковою стрілкою або проти неї.

Концептуально таке поведження біологічного об'єкта під час впливу полів, що обертаються, відповідає геліокосмобіологічній моделі ноосфери, що базується на фундаментальних основах симетрії, з яких випливає, що при ускладненні структурної організації матерії спостерігається десиметризація правих і лівих форм життя (у неживій речовині ці форми перемішані на макрорівні, тобто в макроскопічних об'єктах «усереднюються»). Тому під час впливу фізичних сил, у тому числі ЕМП, на живий організм спостерігається явище, яке умовно можна назвати «кіральним резонансом» – збігом напрямку обертання вектора ЕМП або вихрової компоненти змінного поля з відповідною характеристикою кіральності біологічної молекули або біологічної структури. Існують і інші експериментальні докази ефектів кіральності, наприклад ефект активації води під час дії на неї магнітним полем з правим обертанням.

Звернемо увагу, що молекула ДНК має унікальну структуру, оскільки складається з двох право- і лівобічних спіралей, які є антипаралельними. В аспекті антипаралельності це можна трактувати як свого роду еквівалент важливого варіанта еволюції усього живого, тобто виникнення життя на основі молекул ДНК, що складаються з двох спіралей, одна з яких обертається вправо, а друга – вліво.

Окрім стохастичного й кірального у біоб'єктах виокремлюють ще кілька видів резонансу: *електричний* (селективна хвиля), який спостерігається в дециметровому діапазоні, наприклад, резонансна

частота еліпсоїдальної електричної моделі людини, що стоїть, становить близько 70 МГц; іонний циклотронний резонанс, частота якого становить 10...100 Гц; ядерний магнітний резонанс у геомагнітному полі, дисипативний та інші види резонансів.

Таким чином, *майже всі параметри біотропів ЕМП є частотнозалежними*, і ці залежності виявляються насамперед поблизу резонансних частот, що відповідають структурним особливостям організму.

### **3.5. Гіпотези про взаємодію низькоінтенсивних електромагнітних полів і організму людини**

Проблема первинної взаємодії ЕМП і організму людини є принципово важливою, оскільки відомо, що різні за частотою ЕМП можуть проникати в організм на різну глибину. Так, проникна здатність у шкіру низькоенергетичного лазерного проміння в діапазоні від ультрафіолетового до помаранчевого поступово збільшується від 120 мкм до 2,5 мм. Найбільша проникна здатність відповідає низькочастотному ЕМП і ближньому інфрачервоному діапазону, тоді як у дальньому інфрачервоному діапазоні проникність різко зменшується. Таким чином, максимум пропускання шкірою ЕМП знаходиться в червоному й ближньому інфрачервоному діапазоні, а існування двох піків поглинання ЕМП (в ультрафіолетовому й дальньому інфрачервоному діапазонах) пояснюється абсорбцією води.

Відомою властивістю ЕМП мікрохвильового діапазону під час опромінення біологічних об'єктів є перетворення електромагнітної енергії на теплову, яке пов'язане переважно з діелектричними втратами. Їх основою є нагрів тканини через повороти диполів молекул у в'язкому середовищі. При цьому у зв'язку зі значними втратами енергії мікрохвилями (50 % – на частоті 1 ГГц, 90 % – на частоті 10 ГГц, 98 % – на частоті 30 ГГц) ЕМП мікрохвильового діапазону проникає в шкіру на незначну глибину (від 1,5 мм на частоті 2,45 ГГц до 600 мкм на частоті 48 ГГц). Це дає змогу вважати, що енергія мікрохвиль не виходить за межі шкірного покриву. Виявлено також, що під впливом випромінювання ЕМП мікрохвильового діапазону порогова чутливість людини, що виникає при локальному підвищенні температури шкіри на 0,07 °С, знаходиться на глибині близько 0,3 мм при частоті 94 ГГц. У зв'язку з цим питання про механізми взаємодії ЕМП з біологічним об'єктом набуває особливої актуальності. Так, *згідно з гіпотезою, при первинній рецепції ЕМП мікрохвильового діапазону у верхніх шарах шкіри виникають реакції*

*синтезу біологічно активних речовин, які пізніше ініціюють процеси в усьому організмі з участю нервової і гуморальної систем.*

*За іншою гіпотезою, зовнішні ЕМП мікрохвильового діапазону викликають критичну гідратацію рецепторних білків і переводять їх у функціонально активний стан. Активні білки, знаходячись на поверхні клітин, регулюють фізико-хімічні процеси метаболізму й нормалізують життєво важливі функції клітин, стимулюючи синтез АТФ та інших речовин.*

Важливим джерелом трансформації зовнішніх ЕМП мікрохвильового діапазону в доступний для організму вид енергії є подвійні електричні шари, що виникають на межі розділу фаз (повітря, шкіра). Ці шари мають дуже низькі пороги чутливості й змінюють електричні заряди структури під дією ЕМП у діапазонах мікрохвильового діапазону, ультразвуку, механічних коливань.

*Значного поширення набула гіпотеза, згідно з якою енергія ЕМП мікрохвильового діапазону поглинається молекулами води живих організмів. Відомо, що частка води становить від 60 до 90 % маси організму. Її молекули мають малі розміри і з'єднуються водневими зв'язками завдяки дипольним властивостям молекул. Вода є хорошим розчинником і активним реагентом, має багато унікальних фізикохімічних властивостей.*

Під час взаємодії з водою енергія ЕМП мікрохвильового діапазону збільшує кінетичну енергію обертання молекул, після чого відбувається швидка ( $10^{-10}$  с) дисипація (розсіювання) енергії завдяки міжмолекулярній взаємодії (ця енергія перетворюється на теплоту). Енергія ЕМП мікрохвильового діапазону збільшує кінетичну енергію обертання молекул води і спричиняє резонансні зміни в конфігурації груп її молекул. На фіксованій частоті енергію поглинає найбільша кількість молекул води, частота обертання яких збігається з частотою ЕМП. Під час змінення частоти інші групи молекул також поглинають енергію відповідно до функції розподілу молекул води за частотами обертання.

*Існує також гіпотеза, відповідно до якої клітини регулюють свої функції, усуваючи порушення і пристосовуючись до нестабільних умов існування з допомогою когерентних акустоелектричних хвиль. Змінне електричне поле випромінювання цих хвиль забезпечує взаємодію сусідніх клітин. Поширюючись по організмі, ці хвилі сприяють організації взаємозв'язку й керування внутрішньоклітинними процесами в цілому.*

У різних дослідженнях наводиться експериментально підтверджене існування електромагнітних і геомагнітних сенсорних систем, що сприймають і розрізняють ЕМП мікрохвильового діапазону.

І. В. Родштат, автор «*фізіологічної*» моделі, уважав, що під дією ЕМП мікрохвильового діапазону змінюється структура шкірного колагену, який має п'єзоелектричні властивості й запускає рецептори сенсорних нейронів.

За концепцією Д. С. Чернавського, дія ЕМП мікрохвильового діапазону спричиняє мікромасаж рецепторів шкіри, збудження яких передається в ЦНС, стимулює гуморальну систему й систему захисту організму.

Згідно з гіпотезою Дж. Кіршвінка в організмі існують специфічні магніторецепторні структури із вмістом біогенного заліза (магнетиту), які трансформують енергію ЕМП і доставляють її в пошкоджені органи для відновлення функцій.

Деякі автори пропонують розглядати організм як цілісну систему, що має когерентні стани й синхронізується ЕМП на певних частотах. При цьому когерентність в міліметровому діапазоні забезпечується метаболізмом клітин. Це дало змогу запропонувати електромагнітну теорію життя, або теорію резонансу – загального механізму, що пояснює біологічні ефекти ЕМП, такі як посилення надслабких сигналів, надтонка вибірковість біологічних реакцій, вібраційні й електромагнітні частоти молекул та ін. Згідно з теорією резонансу ЕМП є основою всіх біологічних реакцій і забезпечують їх взаємодію, а організм є комплексом електромагнітних осциляторів, настроєних на певні резонансні частоти. Ці резонанси забезпечують нормальний перебіг усіх життєвих процесів з допомогою системи електромагнітного гомеостазу, яким керує гіпоталамус.

Будь-які погіршення метаболізму змінюють параметри біохімічних реакцій і порушують оптимальні електромагнітні характеристики структур організму. Це, у свою чергу, призводить до розузгодження внутрішніх ритмів і дезорганізації гармонійної коливальної системи електромагнітного гомеостазу.

За гіпотезою М. Д. Девяткова і співавторів, зовнішні ЕМП мікрохвильового діапазону, імітуючи власне мікрохвильове випромінювання організму, синхронізують, використовуючи принцип резонансу, «здорову» ритміку, що втрачається при захворюванні, і відновлюють електромагнітний гомеостаз. При цьому первинні процеси відбуваються в клітинних мембранах, а інформація на органи передається по нервових волокнах.

Згідно з гіпотезою Г. Фреліха вплив ЕМП мікрохвильового діапазону на функціонування біологічних структур базується на дипольних коливаннях мембран клітин у діапазоні частот 100...1000 ГГц (довжина хвилі 3...0,3 мм).

Існує гіпотеза про те, що основою лікувального ефекту ЕМП мікрохвильового діапазону є їх резонансна взаємодія з власними коливаннями молекулярних осциляторів хворого організму. Завдяки цьому відбувається відновлення «нормальних» резонансних частот і фазової синхронізації молекулярних коливань під дією ЕМП. Таким чином,

«інформаційна» дія ЕМП мікрохвильового діапазону полягає в цілеспрямованому переданні «деформованим» молекулярним осциляторам організму квантів енергії мікрохвиль.

Деякі автори запропонували *гіпотезу про те, що в живих організмах існує сенсорна система, яка керує процесами метаболізму й відновлює їх після дезінтеграційних дій певних частот електромагнітного спектра Сонця*. Ця гіпотеза багато в чому збігається з *гіпотезою А. С. Пресмана про існування в організмі дворівневої сенсорної системи, що вибірково реагує на коливання зовнішніх електромагнітних полів*.

*Таким чином, сьогодні немає єдиної думки про механізми взаємодії ЕМП з живим організмом. Велика кількість гіпотез свідчить про те, що дія ЕМП здійснюється кількома шляхами, але, з іншого боку, очевидно, що ці механізми ще повністю не розкрито*. Однак не слід відкидати альтернативні підходи, у тому числі й концептуальні основи психофізики, які найбільш повно відображено у семи основних принципах.

*Принцип найменшого збурення (дії),* наслідком якого є закони як фізики макроефіру, так і класичної фізики. По суті цей принцип є тотожним принципу розумності в організації всього живого.

*Принцип фрактальності,* у якому затверджено подібність форм і властивостей квантованих вихорів ефіру незалежно від їх просторового масштабу й визначено Всесвіт як об'ємну й динамічну багатовимірну ієрархічну синергетичну систему у вигляді вихору хвильових структур єдиного ефіру (фрактальної «матрьошки»). Тут знову виникає поняття ефіру, що наслідує весь арсенал давніх езотеричних знань, до яких сучасні дослідники вимушені звертатися у зв'язку з незадовільним поясненням реальних явищ і фактів у межах прийнятих моделей.

*Принцип фізичної автономності,* за яким усяка відособлена маса (наприклад, людина, тварина тощо) утворює ефірну систему, до якої можна застосувати особливий принцип відносності. Згідно з цим принципом таку систему можна уподібнити міні-Всесвіту з усіма своїми ефірними підпросторами, що повторюють основні фази просторово-часового спектра Всесвіту у вужчій (залежно від величини маси) смузі просторово-часових частот.

*Принцип взаємодії між речовиною і вихрохвильовими формами,* що не належать до спектральної ділянки мікросвіту, тобто квазіречовини. Це – принцип нової взаємодії в Природі. Величина енергетичної взаємодії в кожному досліді убуває в часі за експонентою, що пояснюється формуванням енергоінформаційного бар'єра, який роз'єднує паралельні світи, відображаючи властивості вихрової в'язкості ефіру як надтечкового середовища («закон тріади»).

*Принцип багатовимірного автобалансу сил.* Усі вихрові й лінійні рухи макроскопічного ефіру самоорганізуються так, що в смузі



просторово-часового спектра місцевої системи виявляються збалансованими.

*Принцип життєздатності ефірних динамічних систем.* Життєздатною може бути тільки стереодинамічно-багатовимірною системою, що має можливість протягом певного проміжку часу (життєвого циклу) реалізувати взаємоузгоджені автоколивальні процеси вихрохвильової природи одночасно в різних фазових станах (підпросторах, шарах) ефіру.

*Принцип всесвітнього енергообміну, згідно з яким термодинамічні й антигравітаційні потенціали, тобто антиподи другого початку термодинаміки й всесвітнього тяжіння, утворюються мимовільно.*

Таким чином, неважко помітити, що в наведених принципах є багато чого з того, що названо «темною коміркою». Одночасно слід зазначити, що на відміну від ортодоксальних наук, у яких ігноруються нез'ясовні факти, у наведеній концепції є місце для всього, що поки є нез'ясовним, і водночас немає протиріч там, де факти й відповідні їм моделі точно доведено.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бецкий, О. В. Стохастический резонанс и проблема воздействия слабых сигналов на биологические системы / О. В. Бецкий, Н. Н. Лебедева, Т. И. Котровская // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2002. – № 3 (27). – С. 3–11.
2. Влияние миллиметровых волн на ферментативную активность коринебактерий, продуцирующих экзотоксин / Ю. Л. Волянский и др. // Экспериментальна і клінічна медицина. – 2004. – № 2. – С. 36–39.
3. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Радиочастоты и микроволны. – Женева : ВОЗ, 1984. – 145 с.
4. Девятков, Н. Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, О. М. Бецкий. – М. : Радио и связь, 1991. – 168 с.
5. Девятков, Н. Д. Особенности медико-биологического применения миллиметровых волн / Н. Д. Девятков, М. В. Голант, О. В. Бецкий. – М. : ИРЭ РАН, 1994. – 231 с.
6. Казначеев, В. П. Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей / В. П. Казначеев, Л. П. Михайлова. – Новосибирск : Наука, 1985. – 170 с.
7. Информационно-волновая терапия : науч.-практ. рук. / Н. Д. Колбун и др. – Киев : Укр. энциклопедия, 1993. – С. 304.
8. Колбун, Н. Д. Атлас зон информационно-волновой терапии / Н. Д. Колбун, Ю. П. Лиманский. – Киев : Биополис, 2000. – 115 с.
9. Биотропные эффекты геомагнитных бурь и их сезонные закономерности / В. П. Кулешова, А. В. Пуленец, Е. А. Сазанова, А. М. Харченко // Биофизика. – 2001. – Т. 46, вып. 5. – С. 930–934.
10. Кучин, Л. Ф. Биологические объекты во внешних и внутренних электромагнитных полях. В 2 кн. Кн. 2. Возникновение, формирование и функционирование жизни с позиций биоэлектромагнитологии / Л. Ф. Кучин. – Харьков : Харьк. гос. техн. ун-т сельск. хоз-ва. им. Петра Василенко, 2004. – 191 с.
11. Применение миллиметрового диапазона радиоволн в медицине / Н. Д. Колбун и др. – Харьков : ХИМБ, 1999. – 231 с.
12. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика / А. Н. Ремизов. – М. : Высш. шк., 1987. – 656 с.
13. Тиманюк, В. А. Биофизика : учебник / В. А. Тиманюк, Е. Н. Животнова. – 2-е изд. – Киев : Изд. дом «Профессионал», 2004. – 704 с.
14. Хабарова, О. В. Влияние космофизических факторов на биосферу / О. В. Хабарова // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. – № 2. – С. 25–39.
15. Чижевский, А. Л. Земное эхо солнечных бурь / А. Л. Чижевский. – М. : Мысль, 1973. – 349 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Електромагнітні поля і їх властивості .....	4
1.1. Кількісні характеристики електромагнітного поля .....	4
1.2. Поширення електромагнітних полів у речовині .....	6
1.3. Поводження речовини в електромагнітних полях .....	20
1.4. Поляризація діелектриків .....	24
1.5. Носії струму в гетерофазних електрохімічних системах.....	31
2. Електромагнітні поля в навколишньому просторі .....	33
2.1. Електромагнітні поля природного походження і їх вплив на живі організми.....	33
2.2. Антропогенні електромагнітні поля і їх нормування .....	39
3. Коливальні процеси в біологічних системах.....	44
3.1. Загальні властивості коливань і ритмів .....	44
3.2. Резонансні властивості біологічної системи .....	47
3.3. Принципи ауторегуляції організму.....	50
3.4. Параметри біотропів електромагнітних полів .....	52
3.5. Гіпотези про взаємодію низькоінтенсивних електромагнітних полів і організму людини .....	61
Бібліографічний список .....	66

Навчальне видання

**Куліш Сергій Миколайович  
Олійник Володимир Петрович  
Волошин Юлія Андріївна**

## **РАДІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ХВИЛЬОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БІОМЕДІНЖЕНЕРІЇ**

Редактор О. Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2018

Підписано до друку 27.11.2018

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 3,8. Обл.- вид. арк. 4,25. Наклад 50 пр.

Замовлення 358. Ціна вільна

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@ khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001