

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

В. П. Олійник

**ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ З БІОЛОГІЧНИМИ  
ОБ'ЄКТАМИ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2020

УДК 577.3(075.8)  
О-54

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

**Олійник, В. П.**

О-54 Основи взаємодії фізичних полів з біологічними об'єктами [Текст] : навч. посіб. / В. П. Олійник. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. – 72 с.

ISBN 978-966-662-730-1

Розглянуто біофізичні механізми дії електромагнітного, акустичного, теплового і гравітаційного полів на біологічні об'єкти, які використовуються для створення технічних засобів медичної діагностики і терапії. Особливу увагу приділено дії електромагнітних полів на біосередовища і зокрема на людину. Подано короткі відомості про методи досліджень і лікування із застосуванням окремих компонентів цього виду поля. Матеріали викладено у такій послідовності: фізичне явище дії поля, якісні або кількісні співвідношення, приклади використання в медицині, природні й техногенні джерела полів.

Для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія».

Іл. 31. Табл. 1. Бібліогр.: 19 назв

**УДК 577.3(075.8)**

© Олійник В. П., 2020  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2020

ISBN 978-966-662-730-1

## ВСТУП

З природничо-наукових позицій всі зміни, що відбуваються в навколишньому просторі, є результатом дії та взаємодії фізичних полів. Зміни можуть мати як макроскопічний характер (які не впливають в основному на будову речовини), так і мікроскопічний. Загальною причиною для цих змін можна вважати зміну енергетичного стану розглядуваного об'єкта. Тому будемо виходити з цих принципів у визначенні фізичного поля. *Фізичне поле - це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється енергетична або силова взаємодія матеріальних об'єктів.*

У сучасній фізиці виділяють два види фундаментальних фізичних полів - *електромагнітне і гравітаційне*. Особливістю цих полів є властивість обміну енергією між об'єктами незалежно від наявності речовини між ними. Для зручності розгляду явищ енергообміну в речовині вводять поняття акустичного і теплового полів. За походженням фізичні поля можна розділити на природні та антропогенні (що виникають у результаті діяльності людської спільноти).

У цьому навчальному посібнику об'єктом розгляду є живі організми, які в процесі життєдіяльності і еволюції підпадають під вплив як зовнішніх джерел фізичних полів, так і самі є їх джерелами. Тому найбільш загальні питання взаємодії фізичних полів з біологічними об'єктами раціонально розглядати з позицій фізики, екології та біофізики.

Для опису конкретних явищ застосовані методи, які поширені в розділах біофізики. Початок розвитку таких підходів відносять до розроблення теорії кольорового зору, висунутої ще у вісімнадцятому столітті М. В. Ломоносовим. Подальшим внеском у біофізику були дослідження Л. Гальвані з вивчення «тваринної електрики», дослідження французького фізіолога і фізика, засновника першої кафедри біофізики Д'Арсонваля в області впливу змінних струмів на біологічні об'єкти (що поклало початок методу дарсонвалізації – лікування імпульсним струмом високої частоти, високої напруги і малої сили).

Серед видатних досягнень біофізики та біоінженерії ХХ століття слід виділити розшифровку просторових структур білка і подвійної спіралі ДНК. Початок ХХІ століття біоінженерія відзначила створенням штучних біоматеріалів і окремих органів як на основі органічних сполук, так і технічних засобів.

*Тому, предметом вивчення буде сукупність явищ, що виникають при впливі фізичних полів на біологічні об'єкти, а метою вивчення - використання виникаючих явищ в якості методологічної основи біоінженерії для створення діагностичних медичних приладів, конструювання терапевтичних апаратів і систем, визначення допустимих доз впливу фізичних полів на біологічні об'єкти, включаючи людину.*

## 1. ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ЯК ЕКОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ

Нагадаємо, що екологія – це наука про закономірності формування і функціонування біологічних систем при їх взаємодії з навколишнім середовищем. Тому явища, що розглядаються (які по суті є біофізичними), є складовою частиною екології та деталізують її окремі розділи.

У межах Землі біологічні об'єкти зосереджені в біосфері. Біосфера – це оболонка Землі, що містить як просторову область поширення живої речовини, так і саму цю речовину. Межі біосфери Землі умовно зображено на рис. 1.1. Загальна біомаса Землі становить близько  $2,4 \cdot 10^{12}$  т, однак розподілена в біосфері нерівномірно. До 95 % біомаси зосереджено в поверхневому шарі, у так званій плівці життя.

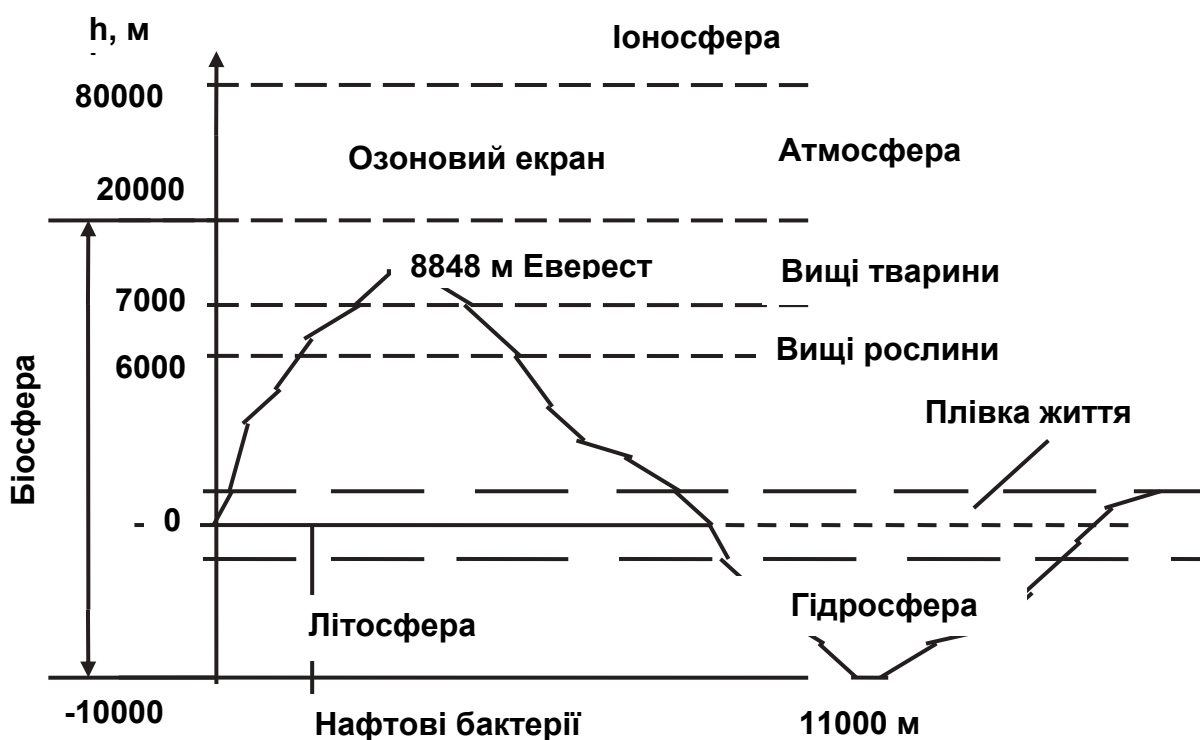


Рис. 1.1. Структурні елементи біосфери Землі

Причиною нерівномірного розподілу живої речовини в межах біосфери є екологічні чинники. *Екологічні фактори* – це будь-які умови, які створюють прямий або опосередкований вплив на біологічний об'єкт. Виділяють абіотичні і біотичні фактори.

*Абіотичні фактори* зумовлюють дію на біологічні об'єкти неживої природи. До них належать *кліматичні* (тепловий режим, вологість, освітленість), *едафогенні* (грунт), *орографічні* (рельєф, висота, глибина), хімічні (хімічний склад ґрунту, води, повітря) фактори.

*Біотичні фактори* – це сукупність впливу життєдіяльності одних біологічних об'єктів на інші. Серед них розрізняють фітогенні, зоогенні; мікробогенні, антропогенні фактори.

Ці дві групи екологічних факторів у явній, а в більшості випадків в опосередкованій формах пов'язані з якісними і кількісними характеристиками фізичних полів.

Просторові межі перебування того чи іншого біологічного об'єкта визначає *закон лімітуючого (обмежувального) фактора*, з якого випливає, що нестача або надлишок одного фактора не можна компенсувати зміною інших. Сукупність обмежуючих факторів для даного живого організму формує *екологічну нішу*.

*Екологічна ніша* – це безліч обмежувальних екологічних факторів, що визначають існування біологічного об'єкта і його функціональні характеристики. Модель екологічної ніші можна уявити як частину багатовимірного простору, положення якого визначається сукупністю координат факторів. Модель екологічної ніші для тривимірного випадку в координатах атмосферного тиску, температури навколишнього середовища і прискорення вільного падіння показано на рис. 1.2.

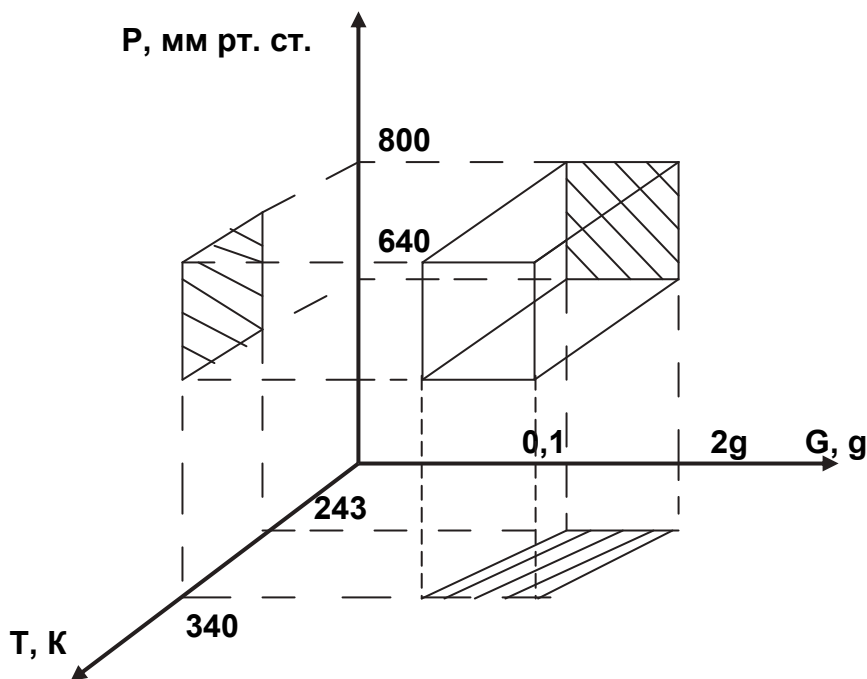


Рис. 1.2. Модель тривимірної екологічної ніші

Здатність біооб'єктів адаптуватися до зміни меж екологічної ніші (зміни екологічних факторів) називають екологічною валентністю, або пластичністю.

Існують такі форми адаптації:

- морфологічні – зміна будови організму;
- фізіологічні – пристосування до складу їжі, газового складу повітря або складу води;
- поведінкові – кочування, перельоти птахів, міграції.

Під час еволюційного процесу живих об'єктів безпосередньою причиною запуску адаптаційних механізмів були зміни характеристик діючих фі-

зичних полів – електромагнітного (спектральний склад сонячного випромінювання), теплового (температурний режим), акустичного та гравітаційного (щільність речовини середовища проживання живих об'єктів).

Усі живі організми в межах біосфери існують у вигляді популяцій. Популяція – це сукупність особин одного виду, що населяють певний простір. Нехай початкова кількість особин у популяції  $N(t_0)=N_0$ , а  $r$  – приріст особин популяції. Тоді зміна кількості особин у популяції може бути подано у вигляді рівняння

$$dN/dt = r \cdot N, \text{ або } dN/N = r dt .$$

Рішення цього рівняння має вигляд  $\ln N = r(t-t_0)$ ,  $N = e^{rt_0} \cdot e^{rt}$ , але, оскільки  $e^{rt_0} = N(t_0) = N_0$ , то  $N(t) = N_0 \cdot e^{rt}$  – ідеальний закон зростання популяції (j - крива). Однак у реальності приріст популяції є складною функцією часу і кількості особин ( $r = r(N,t)$ ) і може бути як позитивною, так і негативною величиною. Характерні графічні залежності  $N(t)$  показано на рис. 1.3.

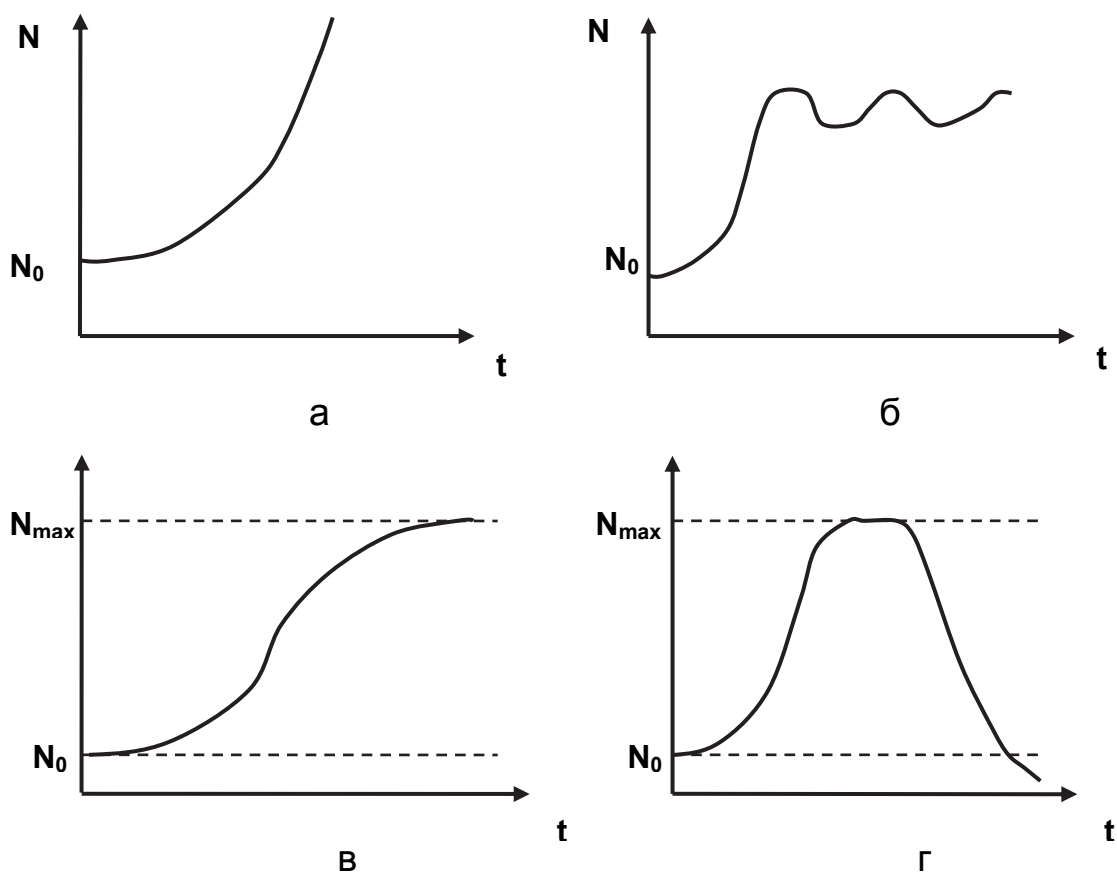


Рис. 1.3. Часові залежності зміни кількості особин популяцій:  
 а – ідеальний закон зростання (j-крива); б – циклічні коливання;  
 в – стабілізація кількості особин (S-крива);  
 г – крива зникнення популяції

Специфіку існування популяції у взаємодії з іншими популяціями в конкретній області біосфери відображає *поняття біогеоценозу* (біос – життя, гео – Земля, ценоз – спільнота), сформульоване академіком В. М. Сукачовим у 1972 році.

*Біогеоценоз* – це сукупність на відомій протяжності земної поверхні однорідних природних явищ живої і неживої природи, що має свою особливу специфіку взаємодії і певний тип обміну речовиною і енергією між собою та іншими явищами природи, що знаходиться в постійному русі й розвитку.

Структура біогеоценозу, за В. М. Сукачовим, яку показано на рис. 1.4, містить також такі поняття: *екотоп* – сукупність абіотичних факторів в біогеоценозах; *біоценоз* – сукупність біологічних факторів у біогеоценозах; *сукцесія* – послідовна зміна одного біоценозу іншим.

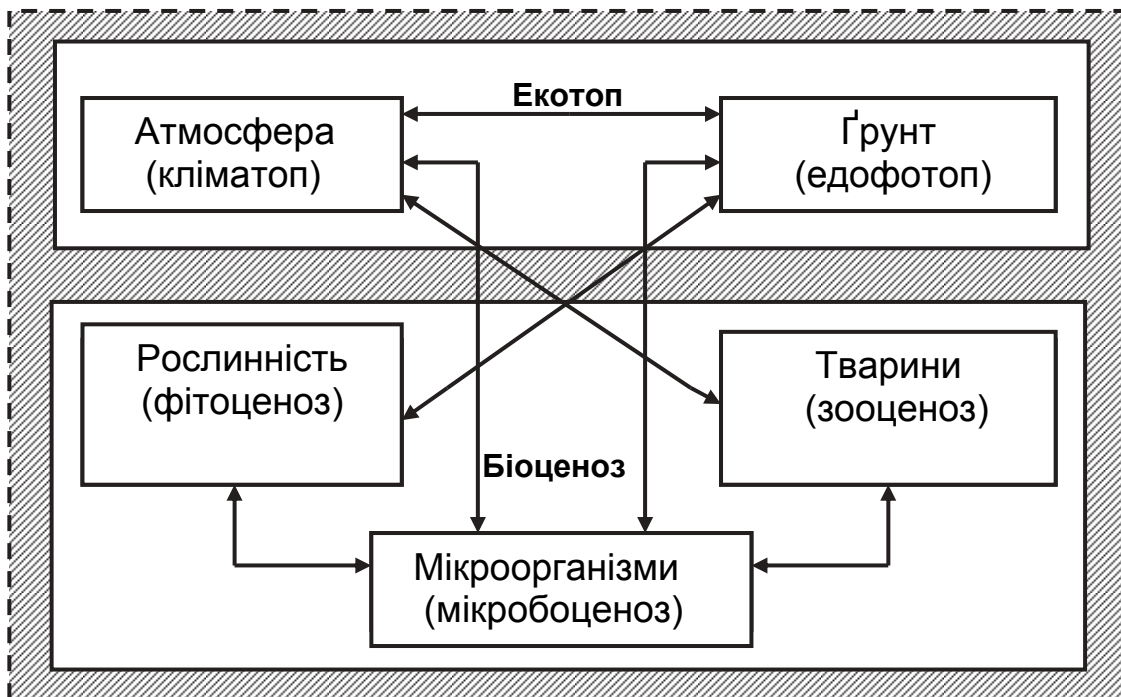


Рис. 1.4. Структура біогеоценозу

Характерною властивістю біогеоценозу є його гомеостаз. *Гомеостаз* – це стан рухливо-стабільної рівноваги біогеоценозу або екосистеми, який забезпечується механізмами зворотного зв'язку. Якщо виділити деякий обмежувальний фактор, як фактор стресу, то поведінку гомеостатичної системи можна подати у вигляді схеми, зображеної на рис. 1.5.

Наведений тут термін «екосистема» («екологічна система») зачіпає усі можливі взаємодії в системі «живий об'єкт – навколишнє середовище». Дано визначення для цього терміна.

*Екосистема* – це стійкі безрозмірні системи живих і неживих компонентів, в яких відбуваються зовнішній і внутрішній кругообіги речовини і

енергії. Очевидно, що безпосередній механізм енергообміну базується на властивостях фізичних полів.

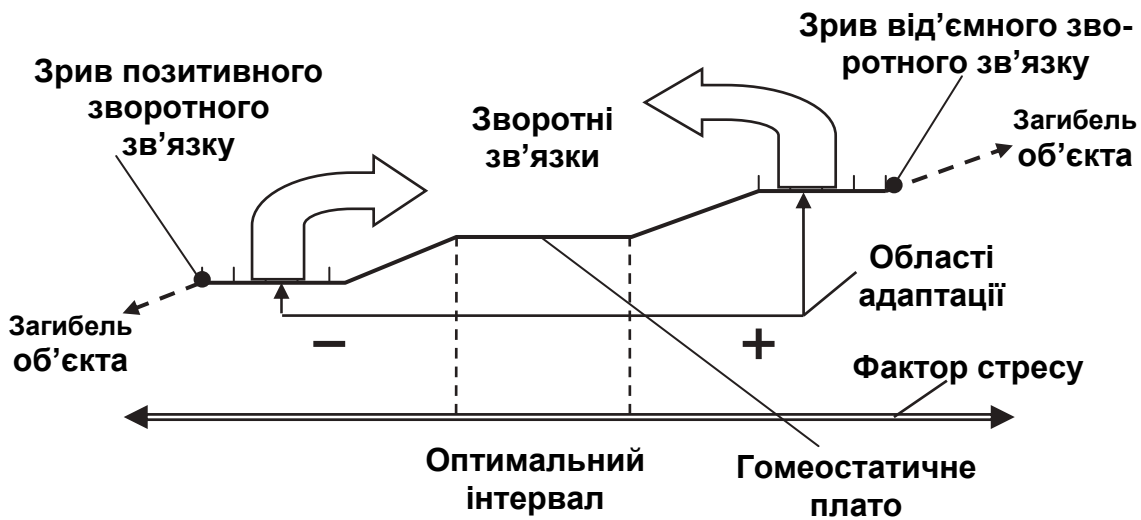


Рис. 1.5. Схема одновимірної гомеостатичної системи

Схему глобальної гомеостатичної системи, що враховує всі стадії енергообміну, зображено на рис. 1.6.

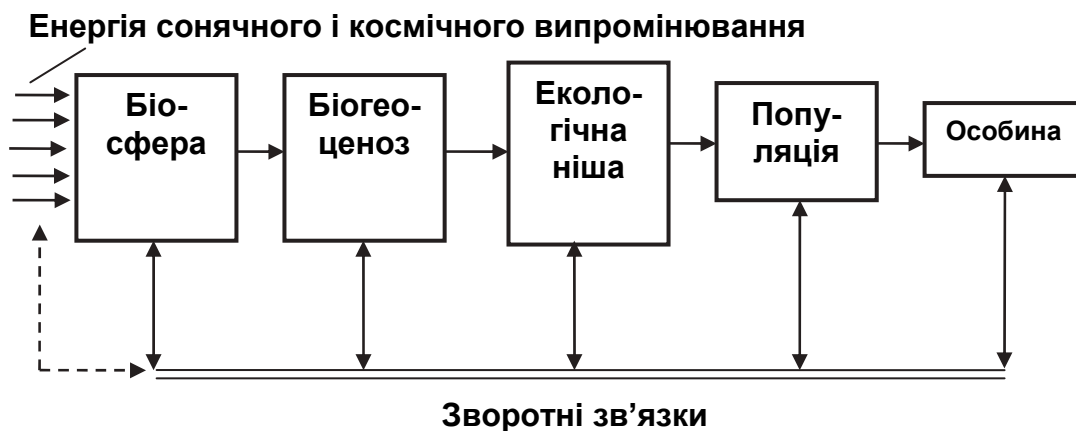


Рис. 1.6. Схема глобальної гомеостатичної системи

З енергетичної точки зору в глобальній гомеостатичній системі відбуваються передача енергії і її регуляція за так званим трофічним (живильним) ланцюгом, або зв'язком. *Трофічний зв'язок* – це ланцюг послідовної передачі речовини та еквівалентної їй енергії в біоценозі від одних організмів до інших.

Оскільки рослини та деякі види найпростіших мікроорганізмів здатні сприймати енергію сонячного електромагнітного випромінювання без посередників (шляхом фотосинтезу), їх називають автотрофами. Таким чином замикається процес передачі енергії в глобальній гомеостатичній системі.



## 1.1. Життя як термодинамічний процес

У фізиці існує два підходи при розгляді явищ:

- *феноменологічний*, оснований на вивченні найбільш загальних закономірностей, без розгляду детальної природи явищ;
- *атомно-молекулярний*, що дозволяє зрештою виявити елементарні основи явищ і визначити їх кількісні характеристики.

*Термодинаміка* – це наука про закономірності перетворення енергії при її перенесенні між тілами в формі тепла і роботи. Термодинаміка дозволяє з феноменологічних позицій (перший і другий закони термодинаміки) оцінити енергетичні процеси в біосистемі і процеси енергообміну з навколишнім середовищем.

Відповідно до першого закону термодинаміки поглинена системою теплота з навколишнього середовища йде на збільшення внутрішньої енергії і здійснення роботи цією системою:  $dQ = dU + dA$ , де  $dU$  – внутрішня енергія,  $dA$  – виконана робота. Експериментальні дослідження підтвердили справедливість цього закону для біологічних систем.

З другого закону термодинаміки випливає, що ізольована фізична система мимовільно і незворотно прагне до стану рівноваги, тобто до максимуму ентропії (*ентропія* – міра невизначеності стану системи). Аналітично цей закон має такий вигляд:

$$dQ = dS \cdot T,$$

де  $dS$  – зміна ентропії;  $T$  – абсолютна температура системи.

Тому зміна ентропії ізольованої системи завжди буде позитивною величиною:

$$dS = dQ/T \geq 0.$$

Однак біологічна еволюція (згідно з ученням Дарвіна) відбувалася в напрямку зростання складності біологічних систем, тобто впорядкованості, від одноклітинних до багатоклітинних організмів, аж до людини. Це можна пояснити, якщо вважати живий організм відкритою термодинамічною системою, що знаходиться в стані динамічної рівноваги з навколишнім середовищем. Тоді в інтервалі часу, значно меншому за тривалість життя окремої особини, можна вважати ентропію біологічного об'єкта незмінною, тобто  $S = \text{const}$ , а отже,  $dS = 0$ . Уявімо зміну ентропії як суму доданків:

$$dS = d_i S + d_e S,$$

де  $d_i S$  – зміна внутрішньої ентропії;  $d_e S$  – приплив або відплив зовнішньої ентропії.

Оскільки перший доданок завжди позитивний:  $d_i S > 0$  для будь-якого об'єкта, що поглинає енергію, то для підтримки незмінної ентропії другий доданок має бути негативним:  $d_e S < 0$ .

Таким чином, живі організми виконують роботу проти врівноваження з навколишнім середовищем за рахунок утворення складних молекулярних структур, отримуючи негативну ентропію з навколишнього середовища. Енергію для виконання цієї роботи біоб'єкти отримують ззовні авто-трофно (від Сонця шляхом фотосинтезу) або шляхом трофічних зв'язків, як було сказано вище.

## 1.2. Зв'язок ентропії та інформації для біологічних систем

Якщо вважати ентропію мірою невизначеності або недостатності інформації про систему, а інформацію – навпаки, то для будь-якої системи справедливий закон збереження інформації  $S + I = \text{const}$ , де  $S$  – ентропія;  $I$  – інформація.

Ентропія також може бути подана виразом  $S = K \cdot \ln \Gamma$ , де  $K$  – стала Больцмана;  $\Gamma$  – статистична вага системи.

*Статистична вага* характеризує кількість способів реалізації системи (величина зворотна ймовірності події).

З іншого боку, інформація про систему пов'язана зі статистичною вагою виразом  $I = C \cdot \log \Gamma$ , де  $C$  – деяка постійна. Припустимо, що  $C = 1$ , а підставу логарифма виберемо такою, що дорівнює двом (відповідно мінімальній статистичній вазі системи з інформацією в один біт ( $[I] = \text{bit}$ )), тоді  $I = \log_2 \Gamma = (\log_2 e) \ln \Gamma$ ,  $\ln \Gamma = I / \log_2 e$ .

Тепер вираз, що зв'язує ентропію та інформацію, можна подати як  $S = (KI) / \log_2 e = 2,3 \cdot 10^{24} I$ , а розмірність  $[S]$  взяти в ентропійних одиницях ( $[S] = [K] = \text{кал} / \text{град}$ ).

Оцінімо впорядкованість побудови багатоклітинного організму на прикладі людини:

1. Оскільки одна клітина містить близько  $10^8$  біополімерів, то її статистичну вагу можна оцінити як  $\Gamma_{\text{клітини}} = 10^8!$ , а інформаційний зміст – як

$$I_{\text{клітини}} = \log_2(10^8!) \approx 10^8 \cdot \log_2 10^8 = 2,6 \cdot 10^9 \text{ bit}.$$

2. Організм людини налічує  $N = 10^{13}$  клітин, тому інформаційний зміст клітинної маси становить

$$I_{\text{клітинної маси}} = I_{\text{клітини}} \cdot N = 2,6 \cdot 10^{22} \text{ bit}.$$

Ентропійний еквівалент клітинної маси визначимо з отриманого вище виразу:

$$S_{\text{клітинної маси}} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ ентропійних одиниць}.$$

3. Білкова маса організму становить приблизно 7 кг і містить  $3 \cdot 10^{25}$  амінокислотних і  $3 \cdot 10^{23}$  нуклеїнових залишків, що збільшує інформаційний вміст на  $1,3 \cdot 10^{26}$  і  $6 \cdot 10^{23}$  біт відповідно. Аналогічно ентропійний еквівалент становитиме  $S_{\text{білків}} = 301,4$  ентропійних одиниць.

У результаті величина сумарної ентропії людського організму

$$S_{\text{організму людини}} \approx 301,5 \text{ ентропійних одиниць.}$$

Проведений вище аналіз показує, що з позицій термодинаміки виникнення життя потребує дуже малих енергетичних витрат, а протікання життєвих процесів характеризується надвеликим обсягом специфічної інформації. Як наслідок вплив на організм будь-якого фізичного поля може мати як енергетичний, так і інформаційний характер.

### 1.3. Загальний характер реакції біологічного об'єкта на дію фізичного поля

Реакцію біологічного об'єкта розглянемо на основі вчення М. Є. Веденського про фізіологічні ритми нервових процесів.

Будь-яка збудлива тканина реагує на подразнення потенціалом дії. Реакція має чотири фази, що умовно зображені на рис. 1.7:

I – абсолютна рефрактерна: біотканина не відповідає на подразнюючий стимул;

II – відносна рефрактерна: збудливість нижче нормальної;

III – супернормальна: нормальна реакція досягається під час дії подразнення;

IV – у цій фазі зберігається на деякий час фаза субнормальності.

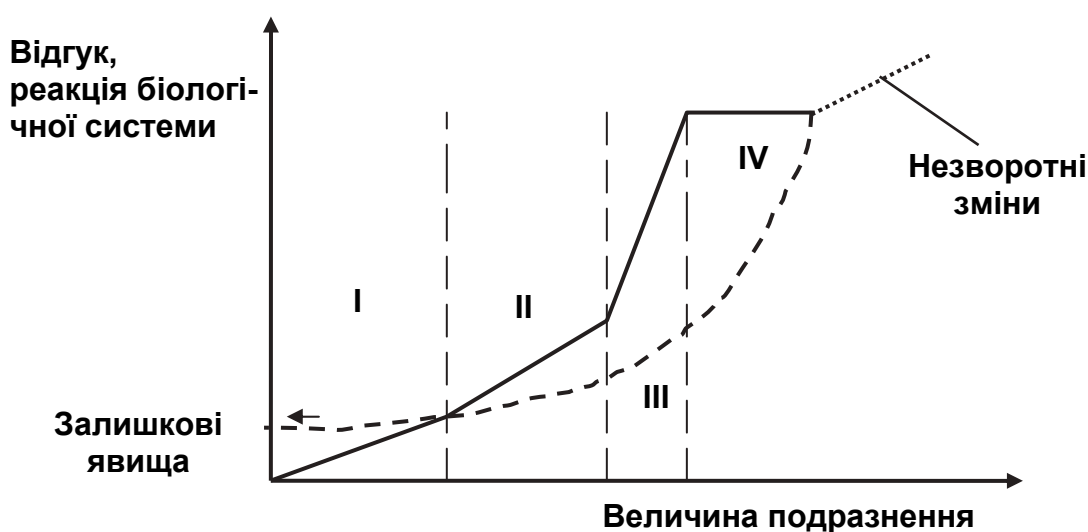


Рис. 1.7. Фази відгуку на подразнення

Запропонована модель залишається правомірною, якщо величину подразнення (впливу) приймати як реальну кількісну характеристику фізичного поля (наприклад, силу, напруженість, кількість енергії, потужність).

#### 1.4. Поняття екологічного моніторингу. Раціобіосфера

Активна діяльність людської спільноти призвела до суттєвої зміни параметрів навколишнього середовища. З урахуванням дії природних чинників і накладення на них антропогенних факторів актуальним завданням стає підтримка гомеостатичного стану біосфери. Одним з механізмів забезпечення гомеостатичності біосфери є моніторинг.

Моніторинг – це комплексне дослідження навколишнього середовища, що діє на біооб'єкти (рис. 1.8).

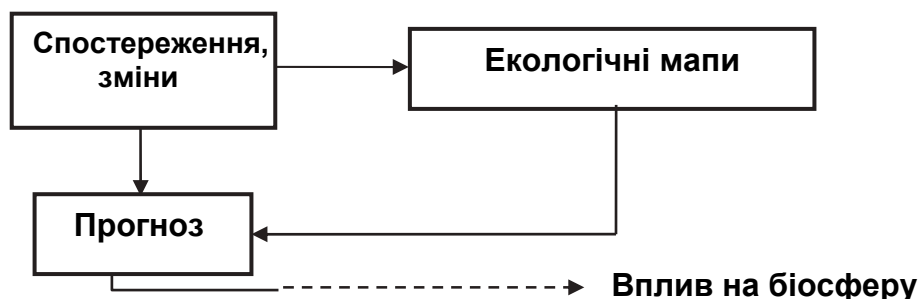


Рис. 1.8. Схема екологічного моніторингу

Задачі моніторингу:

- поточний облік зміни параметрів навколишнього середовища;
- прогноз змін у навколишньому середовищі і пов'язаних з ними екологічних наслідків.

Початкове поняття моніторингу – якість середовища – це сукупність параметрів екологічного середовища, що задовольняють екологічній ніші людини і науково-технічному прогресу суспільства.

Як початкову точку відліку змін контрольованих параметрів використовують фонові значення, тобто такі, які не підпадають під локальні антропогенні впливи. Очевидно, що головним завданням моніторингу є контроль параметрів, які безпосередньо є характеристиками фізичних полів (температура, тиск, швидкість переміщення повітряних і водних мас; напруженості електричного і магнітного полів; рівень іонізуючого випромінювання; освітленість; віброшвидкість і віброприскорення, сейсмічна активність та ін.).

Прагнення людини мати комфортні умови свого існування незалежно від діючих природних факторів (температури, вологості, освітленості, то-

що) стимулювало побудову цілого ряду біотехнічних систем. Сукупність такого роду біотехнічних систем формує раціобіосферу.

Раціобіосфера – штучне середовище, що оточує людину і створює оптимальні умови життя. Частково параметри раціобіосфери збігаються з характеристиками фізичних полів, а частково пов'язані з ними опосередковано. Схему раціобіосфери в системі життєзабезпечення людини зображено на рис. 1.9.

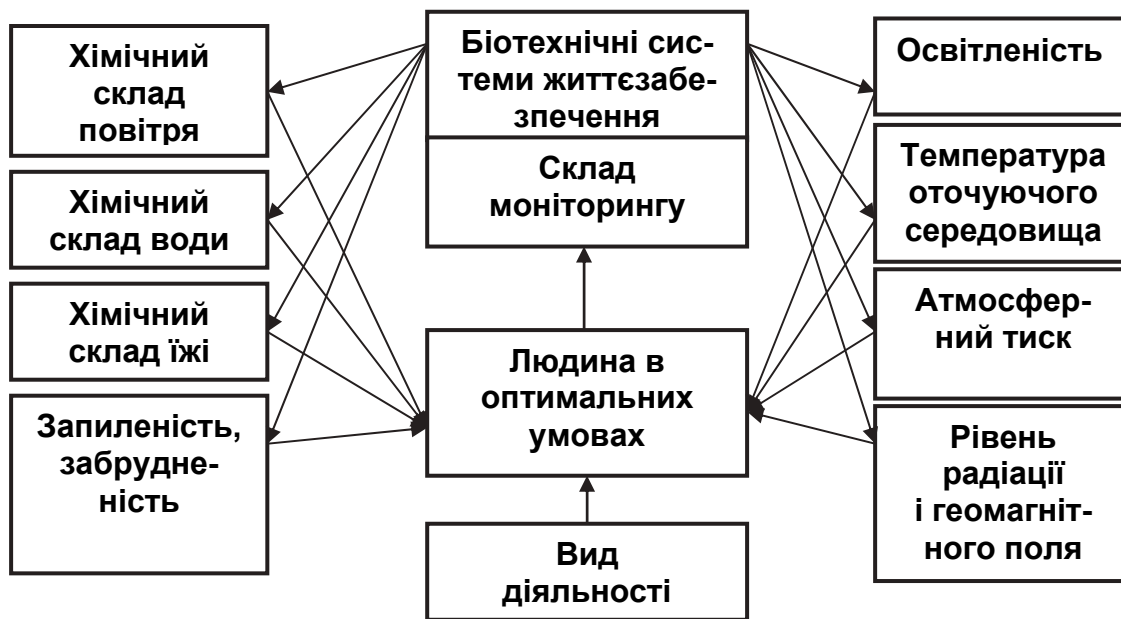


Рис. 1.9. Схема раціобіосфери

### Контрольні запитання

1. Поняття фізичного поля. Види фізичних полів.
2. Як фізичні поля впливають на просторові границі біосфери?
3. Приклади явищ, коли фізичні поля безпосередньо виступають як абіотичні та біотичні екологічні фактори.
4. Фізичні чинники забезпечення гомеостазу біогеоцензу та екосистеми.
5. Особливості застосування законів термодинаміки для біологічних систем.
6. Ентропійний еквівалент інформації.
7. Узагальнені фази реакції біологічних систем на вплив зовнішніх факторів.
8. Функції фізичних полів у створенні раціобіосфери.

## 2. ДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

### 2.1. Феноменологічні підходи для оцінювання дії електромагнітних полів на біологічні об'єкти

Електрика і магнетизм є одними з важливих екологічних факторів еволюції природи. Сонячне випромінювання – основне енергетичне джерело для біосфери – не що інше, як електромагнітне випромінювання в досить широкому спектральному діапазоні.

*Електромагнітне поле – це форма взаємодії електричних зарядів.* Оскільки всі біосередовища живих організмів можуть бути віднесені до провідників другого роду, то об'єктом взаємодії на макроскопічному рівні розгляду є іони.

Деякі явища, що виникають у результаті дії електромагнітних полів (особливо низькочастотних) або їх складових на біоструктури, можна пояснити, використовуючи відомий вираз для сили Лоренца

$$F = qE + q[VB],$$

де  $q$  – заряд іона;  $V$  – швидкість його руху;  $E$  – напруженість електричного поля;  $B$  – індукція магнітного поля.

Найбільш загальний макроскопічний підхід до розгляду взаємодії електромагнітного поля з речовиною базується на рівняннях Максвелла:

$rotE = -dB/dt$  – узагальнення закону електромагнітної індукції;

$divD = \rho$  – узагальнення закону електростатичної індукції;

$rotH = j + dD/dt$  – узагальнення закону повного струму;

$divB = 0$  – узагальнення закону про неперервність магнітних силових ліній.

У наведених рівняннях:  $H$  – напруженість магнітного поля;  $D$  – індукція електричного поля;  $\rho$  – об'ємна густина заряду;  $j$  – густина струму провідності.

Для вирішення практичних завдань рівняння Максвелла повинні бути доповнені матеріальними рівняннями, які враховують електричні властивості середовища взаємодії:  $D = \epsilon\epsilon_0E$ ;  $B = \mu\mu_0H$ ;  $j = \sigma E$ , де  $\epsilon_0$  – діелектрична стала;  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища;  $\mu_0$  – магнітна стала;  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища;  $\sigma$  – питома провідність середовища.

Наведені вище рівняння дозволяють вирішувати всі завдання, пов'язані як з постійними, так і змінними полями, за умови, що довжина хвилі електромагнітного поля значно перевищує відстань між елементарними частинками речовини (лінійні розміри атомів і молекул речовини), а джерела полів досить віддалені від розглянутої точки простору. При вирішенні

конкретних завдань повинні бути задані граничні умови (значення полів на межах поділу розглянутих середовищ).

Таким чином, теорія Максвелла реалізує макроскопічний підхід аналізу дії електромагнітного поля на речовину, а для її застосування до біологічних об'єктів необхідно знати  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  живої речовини, а також характеристики власного електромагнітного поля біосередовищ (у багатьох практичних випадках через їхню малість цей фактор не враховують).

Живий організм щодо електричних властивостей можна вважати як провідником, так і діелектриком. Уважають, що носіями електричних зарядів в білках та інших елементах живого організму є іони, які в сукупності з системою електронно-діркової провідності створюють єдину провідність живого організму. Однак провідність різних біотканин істотно відрізняється, наприклад, питома провідність на постійному струмі коливається від сотень 1/Ом·м (кров, біорідини) до одиниць 1/Ом·м (шкіра, кісткова тканина). Крім цього, спостерігається частотна залежність (дисперсія) провідності живих біотканин (рис. 2.1).

Діелектричні властивості біотканин також неоднакові і для них характерна частотна залежність (рис. 2.1).

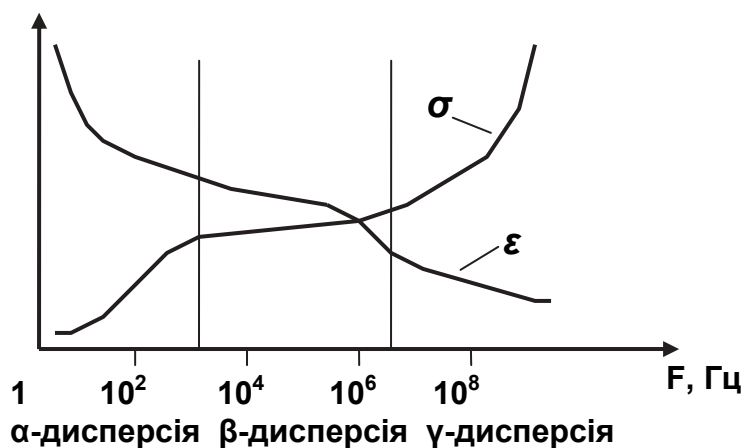


Рис. 2.1. Якісна дисперсійна залежність величин  $\epsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$

Виділяють характерні області дисперсії:  $\alpha$  - зумовлена релаксацією зарядів на клітинних мембранах;  $\beta$  - неоднорідністю клітинної структури біотканин і повним залученням внутрішньоклітинного середовища до утворення іонів;  $\gamma$  - збудженням дипольних молекул води.

Для одночасного врахування провідникових і діелектричних властивостей біосередовищ зручно використовувати вираз для комплексної діелектричної проникності:  $\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ , де  $\epsilon_1 = \epsilon$ , а відношення

$$\epsilon_2/\epsilon_1 = \sigma / (2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon) = \operatorname{tg} \delta ,$$

де  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута діелектричних утрат у середовищі.

Магнітні властивості біотканин в їх макроскопічних проявах слабо відрізняються від вакууму і є в основному діамагнітними і парамагнітними з модулем магнітної сприйнятливості  $|\chi| \ll 1$  ( $B = \mu\mu_0 H = \mu_0(1 + \chi)H$ ).

Використання рівнянь Максвелла дозволяє теоретично знаходити характеристики полів у будь-який проміжок часу як для будь-якої точки всередині об'єкта (внутрішня задача електродинаміки), так і для будь-якої точки простору поза ним (зовнішня задача). Однак існуючий математичний апарат призводить до громіздких обчислень (найчастіше нерозв'язних) при істотному спрощенні властивостей самого об'єкта. Тому на практиці для виявлення найбільш істотних ефектів дії поля аналізують дію окремих його компонентів, наприклад, електростатичного, магнітостатичного, низькочастотних електричного і магнітного, високочастотного і надвисокочастотного, оптичного та іонізуючого випромінювань.

У деяких випадках для пояснення виникаючих явищ необхідно використовувати мікроскопічні властивості речовин і закони квантової теорії.

## 2.2. Дія електростатичних полів на біологічні об'єкти

Електростатичне поле - електричне поле, створюване нерухомими зарядами. Зауважимо, що ідеальних статичних полів у природі не існує, так як елементарні заряди знаходяться в тепловому русі. Однак довжини пробігу цих зарядів малі порівняно з лінійними розмірами просторових областей, що розглядаються. Тому напруженість електростатичного поля є величиною, що не залежить від часу. Для квазістатичних полів вважають, що період їх зміни в часі набагато триваліше інтервалу часу спостереження за об'єктом, який підпадає під дію цього поля.

Біосередовище в електростатичному полі буде реагувати двояко. По-перше, відбудеться електризація середовища за рахунок зміщення різнополярних зарядів. Повної компенсації зовнішнього поля всередині біосередовища не буде (як в провідниках), тому що іони мають обмежену область зміщення, спричинену структурою живих біотканин, однак відбудуться зміна внутрішньої енергії біосередовища і просторове спотворення зовнішнього поля. Таким чином, електростатичне поле частково проникає всередину біосередовища, спричиняючи поляризацію діелектриків.

Діелектричні властивості живої тканини визначаються двома класами діелектриків. Діелектрики з полярними молекулами складаються з несиметричних молекул, що мають власний електричний дипольний момент (наприклад, молекули води). За відсутності зовнішнього поля в результаті рівномірної орієнтації молекулярних дипольних моментів сумарний дипольний момент  $\sum P_i = 0$ . При накладенні зовнішнього поля  $E \neq 0$ ,  $\sum P_i \neq 0$  на кожен елементарний диполь діє момент сил  $M_i = [P_i \cdot E]$ . Діелектрики з неполярними (симетричними) молекулами (азот, водень) за відсутності зовнішнього поля не мають власного дипольного моменту. Якщо  $E \neq 0$ , то



виникає індукований дипольний момент  $P_{\text{інд}} = \epsilon_0 \alpha E$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт поляризації.

Урахування квантових явищ, а саме ефекту Штарка в воднеподібних системах дозволяє розглянути ще один фактор дії електростатичного поля на біосередовища.

Ефектом Штарка називається розщеплення спектральних ліній внаслідок дії на речовину зовнішнього електричного поля. Оскільки навіть дуже сильне зовнішнє електричне поле слабше внутрішньоатомного, то його вплив на рух атомних електронів незначний. Однак для водню і воднеподібних систем має місце лінійний ефект Штарка, який частково знімає виродження між енергетичними рівнями єдиного атомного електрона. Енергія розщеплення спектральних ліній невелика і пропорційна напруженості зовнішнього електричного поля:  $\Delta W \sim nE$ , де  $n$  - деяка функція квантових чисел. При значній величині напруженості має місце квадратичний ефект Штарка:  $\Delta W \sim E^2$  ( $E > 10^5$  В/см).

З огляду на те, що біосередовища – водо-, а отже, і водневмісні речовини, дія зовнішнього електростатичного поля відповідно до ефекту Штарка спричиняє зміну спектрів випромінювання і поглинання електромагнітного випромінювання.

Таким чином, вплив електростатичного поля на біоструктури призводить до часткових електризації і поляризації речовини, супроводжується силовою дією поля і збільшує внутрішню енергію середовища, а також змінює її спектральні характеристики.

Розглянемо приклади електростатичних полів, під вплив яких найбільш часто підпадають біологічні об'єкти.

Серед них – електростатичне поле природного походження, зумовлене перерозподілом зарядів між верхніми шарами атмосфери і поверхнею Землі. Як відомо, зовнішньою оболонкою атмосфери є іоносфера, в якій на відстанях 110...120 і 180...300 км від поверхні Землі зосереджена повітряна плазма (рис. 2.2). Первинна іонізація в цих шарах спричиняється жорстким ультрафіолетовим- і гамма-випромінюваннями, потоками елементарних частинок, що викидаються Сонцем, а також реліктовим космічним випромінюванням. Шляхом теплової конвекції повітряних мас, опадів і грозових явищ, протікання «струмів з вістря» і струмів провідності частина атмосферного заряду розподіляється на поверхні Землі. Експериментально встановлено, що струми провідності переносять заряд  $+60$  Кл/с·км<sup>2</sup>, струми опадів  $+20$  Кл/с·км<sup>2</sup>, грозові явища  $-20$  Кл/с·км<sup>2</sup>, «струми з вістря», зумовлені кривизною земного рельєфу,  $-100$  Кл/с·км<sup>2</sup>. Звідси загальна густина струму на поверхню землі є від'ємною і становить  $-40$  Кл/с·км<sup>2</sup>.

Таким чином, усі живі об'єкти біосфери знаходяться в квазістатичному електричному полі гігантського сферичного конденсатора, внутрішньою обкладкою якого є поверхня Землі, а зовнішньою – нижні шари іоносфери. Напруженість електричного поля поблизу поверхні Землі становить близь-

ко 150 В/м, сумарний поверхневий заряд –  $5 \cdot 10^7$  Кл, а циркулюючий електричний струм –  $\sim 1500$  А.

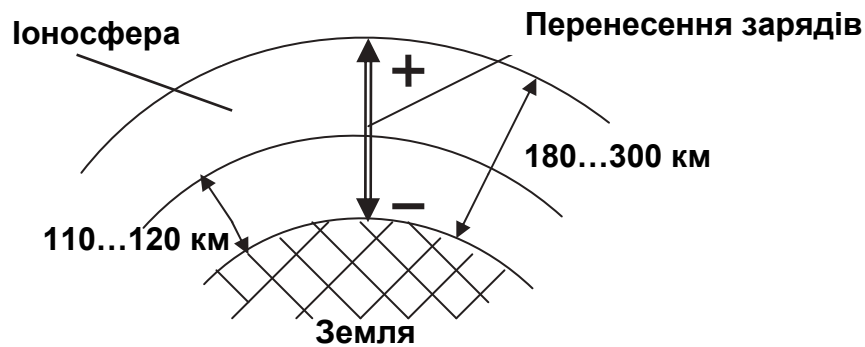


Рис. 2.2. Виникнення електростатичного поля Землі

Другим за значущістю джерелом природних електричних полів є електризація повітряних мас при їх переміщеннях.

До джерел електростатичного поля техногенного походження належать потужні енергоустановки, електризація засобів пересування, електризація одягу зі штучного волокна, електризація поверхні електронно-променевих трубок.

Специфіка дії електростатичного поля на людський організм знайшла своє застосування в медицині.

Набув поширення лікувальний метод – електростатичний душ, або франклізація, при якому організм пацієнта піддається впливу постійного електричного поля, створеного джерелом високої напруги. Розрізняють загальну (джерело напруги 50...150 кВ) і місцеву (15...20 кВ) франклізації. Пацієнта розташовують на заземленому електроді, а активний електрод фіксують на відстані 6...10 см від області впливу, як показано на рис. 2.3.

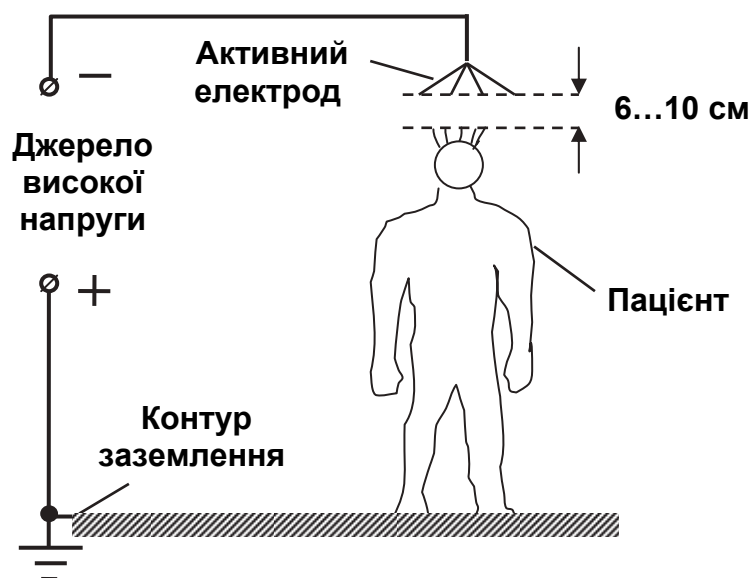


Рис. 2.3. Електростатичний душ

У біотканинах, розташованих поблизу активного електрода, відбуваються поляризація молекул діелектрика, електризація провідникових структур з появою мікрострумів, що призводить до перерозподілу іонів в області впливу і створення ефектів подразнення, стимуляції. Додатковий ефект – вдихання негативних аероіонів, що утворюються поблизу електрода негативної полярності.

Штучна іонізація повітря на основі коронного розряду, спричиненого постійним електричним полем, застосовується в апаратах аероіонізації, а відповідний метод лікування отримав назву «аероіонотерапія».

Електростатичне поле також застосовують для електростатичного очищення повітря. Відомо, що дрібні частинки пилу, аерозолів, диму, як правило, несуть електричний заряд. Очистити таке забруднене повітря можна шляхом його прокачування між пластинами конденсатора, до яких підключена постійна електрична напруга в кілька сотень вольт (рис. 2.4). Під дією сили електростатичного поля заряджені частинки скупчуються на обкладинках конденсатора, а очищене повітря надходить до пацієнта.

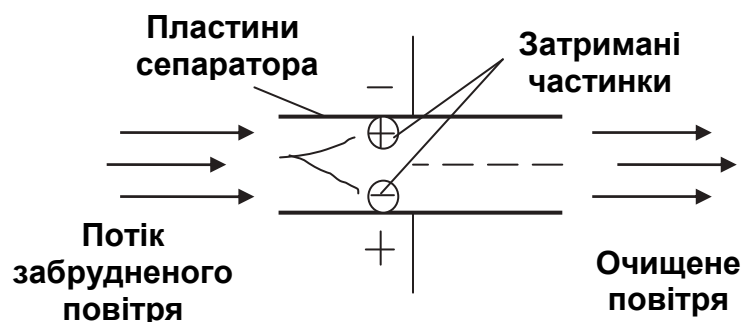


Рис. 2.4. Електростатичне очищення повітря

### 2.3. Дія електричних струмів

Один із способів створення електричного поля всередині біооб'єкта забезпечується підключенням джерела напруги до електродів, що встановлюються на його поверхні. Величина струму, що протікає, визначається напругою джерела і опором біосередовища.

Опір людського організму постійному струму на окремих ділянках шкірного покриву становить у середньому  $10^3 \dots 10^6$  Ом і обмежений опором шкірного покриву. Опір внутрішніх органів, як правило, нижче 300...500 Ом. Подолавши опір шкіри, струм спрямовується від електрода до електрода по тканинах з найменшим опором – кровоносних судинах, м'язах та інших тканинах з великим умістом рідин, значно відхиляючись від найкоротшої відстані між електродами.

Специфіка проходження змінного струму пов'язана з розподіленою ємністю величиною близько 0,01...0,02 мкФ/см<sup>2</sup>, утвореною металевим електродом, що знаходиться на поверхні шкіри, і підшкірними тканинами. При площі електрода 100 см<sup>2</sup> утворена ємність становить 1...2 мкФ, що визначає ємнісний імпеданс близько 3200 Ом і 32 Ом на частотах 50 Гц і 5 кГц відповідно. Тому на проходження змінного струму ізолюючі властивості шкіри впливають менше.

Слід також ураховувати, що опір біотканин нелінійно залежить від величини струму, що протікає, і фізіологічного стану організму.

Розглянемо більш детально дію на біоструктури струмів з різними динамічними характеристиками.

**Первинна дія постійного струму** на організм пов'язана з рухом іонів, їх просторовим поділом і зміною концентрацій в тканинах. Тому проходження електричного струму через біологічні тканини як провідник другого роду (електроліт) супроводжується явищем електролізу. Маса речовини, яка виділяється на електродах при проходженні струму через електроліт, пропорційна величині перенесеного заряду і може бути описана першим законом електролізу Фарадея

$$M = K \cdot q = K \cdot I \cdot t, K = A / (F \cdot Z),$$

де  $q$  – заряд;  $t$  – час протікання струму;  $K$  – коефіцієнт пропорційності;  $F$  – число Фарадея;  $A$  – атомна вага;  $Z$  – валентність речовини іонів.

Для живих тканин закон електролізу виконується умовно, тому більш справедливий вираз  $M \sim K \cdot I \cdot t$ .

Розглянемо деякі приклади використання постійних струмів у медицині для діагностичних і терапевтичних цілей.

**Гальванізація** – вплив на пацієнта з лікувальною метою постійного електричного струму величиною до 50 мА, густиною струму не більше 0,1 мА/см<sup>2</sup> і напругою до 80 В. Вона проводиться за допомогою електродів, підключених до джерела постійного струму що накладаються на шкіру пацієнта. Основні біофізичні ефекти, які досягаються при гальванізації:

- внутрішньотканинний електрофорез переміщення іонів, молекул під дією зовнішнього електричного поля;

- зміна мембранного потенціалу клітин, збудливості тканин, утворення вільних радикалів;

- посилення мікроциркуляції крові і лімфи.

**Електрофорез ліків** – одночасний вплив на організм постійного електричного струму і лікувальної речовини, що надходить в організм зі струмом через шкірні покриви або слизові оболонки. При електрофорезі між електродом і шкірою розташовують прокладку або гель, що містять розчин лікувальної речовини. Обов'язковою вимогою є дисоціація речовини на іони в розчині. Лікувальна речовина, введена за допомогою постійного

струму, утворює шкірно-іонне «депо», з якого за допомогою крово- і лімфоциркуляції розподіляються по всьому організму.

*Електропунктурна діагностика* – метод дослідження фізіологічного стану пацієнта на основі вимірювання електричного опору постійному струму в біологічно активних точках. Для вимірювань використовуються мікрострумові режими, які не спричиняють істотного енергетичного впливу на організм.

**Вплив на біологічні об'єкти імпульсних струмів** на низьких, звукових і ультразвукових частотах спричиняє зміщення іонів, їх поділ, зміну концентрації всередині клітини і в міжклітинному просторі. Біологічний ефект – подразнення, стимуляція фізіологічних процесів. Величина реакції біологічного об'єкта залежить від форми, тривалості, амплітуди імпульсів, а також від частоти їх повторення. Залежність амплітуди порогового струму подразнення ( $I_{пор}$ ) для імпульсів прямокутної форми від їх тривалості ( $\tau_i$ ) показано на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Подразнення прямокутними імпульсами

Імпульсні струми, які використовуються в лікувальних цілях, мають такі характеристики:

- прямокутної форми, частота повторення  $F = 1...2$  Гц, тривалість  $\tau_i = 0,8 \dots 3$  мс, застосовуються для електрокардіостимуляції;

- прямокутної форми,  $F = 1...130$  Гц,  $\tau_i = 0,2...2$  мс (струми Ледюка), використовуються для отримання стану, аналогічного фізіологічному сну (електросон);

- трикутної форми,  $F = 100$  Гц,  $\tau_i = 1...1,5$  мс, спричиняють скорочення м'язів;

- експоненційної форми,  $F = 8...100$  Гц,  $\tau_i = 2...60$  мс (струми Лапіка), застосовуються для стимуляції м'язів або електрогімнастики.

Експериментально встановлено, що інтервали частот від 1 до 10 Гц оптимальні для збудження симпатичних нервів; від 20 до 100 Гц - для парасимпатичних; від 80 до 150 Гц - для пригнічення больової чутливості. На

основі цих даних було розроблено кілька методів електролікування імпульсними струмами. Наведемо деякі з них.

**Діадинамотерапія** – вплив на організм двома однополярними низькочастотними імпульсними струмами (50 і 100 Гц). Чергування частот імпульсних струмів спеціальної форми дозволяє оптимізувати режими стимуляції та болевгамування.

**Ампліпульстерапія** – вплив високочастотними струмами (2...5 кГц), модульованими по амплітуді сигналами частотою від 1 до 200 Гц. Цей метод дозволяє стимулювати глибоко розташовані в організмі тканини за рахунок зниження імпедансу шкірного покриву.

**Інтерференцтерапія** – одночасний вплив двома високочастотними струмами (3...8 кГц), різниця частот яких становить  $\pm 200$  Гц (частоти биття). Відмінністю цього методу є локалізація внутрішньої області стимуляції на частоті биття.

**Дія змінних струмів**, у тому числі і гармонічних, на організм людини при низьких, звукових і ультразвукових частотах характеризується двома граничними значеннями:

- поріг відчутного струму - найменша сила струму, від якого людина відчуває подразнення;
- поріг невідпускаючого струму - мінімальне значення сили струму, при якому настає судорожний стан (тобто стан, при якому людина не в змозі самостійно звільнитися від уражаючого фактора).

На рис. 2.6 показано графіки частотної залежності цих струмів. Слід звернути увагу на те, що максимальна вразливість організму людини до дії змінних струмів знаходиться в області промислових частот 50...60 Гц.

При невеликих частотах для медичних застосувань більш істотна подразнююча дія струму, а не тепловий ефект.

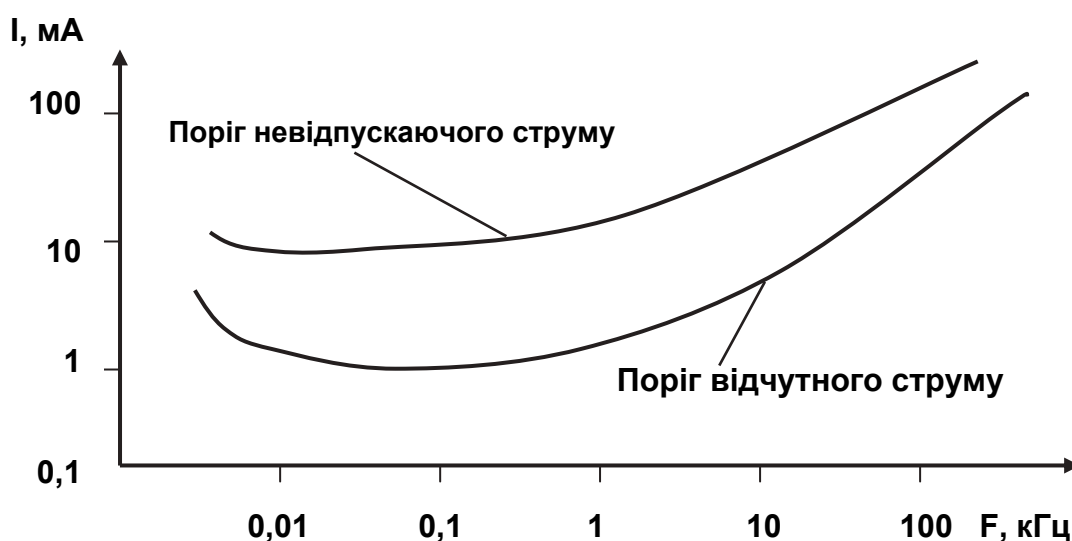


Рис. 2.6. Дія гармонічних струмів

**Нагрівання біотканин струмами високих частот.** При збільшенні сили струму від постійного до ультразвукових частот виникає явище електролізу, що призводить до руйнування тканин. Тому для прогрівання тканин використовують виключно струми високої частоти в діапазоні 0,1...10 МГц. Оцінимо кількість енергії, яка виділяється в одиничному об'ємі. Припустимо, що між електродами площею  $S$  знаходиться однорідна біотканина протяжністю  $\ell$  з питомим опором  $\rho$ , через яку протікає змінний струм з ефективним значенням  $I$ . Тоді в міжелектродному середовищі виділяється потужність

$$P = I^2 R = (j^2 S^2 \rho \ell) / S = j^2 r V,$$

де  $j = I / S$  – густина струму, що протікає;  $V = S \cdot \ell$  – об'єм енергоутворення. Енергія електричного струму перетворюється в теплову і для одиничного об'єму становить  $q = j^2 \rho$ .

Таким чином, найбільше нагріваються ділянки біотканин з великим питомим опором (шкіра, жир, кістки, м'язи), менше – печінка, легені, кровоносні і лімфатичні судини. Теплова дія високочастотних струмів застосовується у медицині.

**Діатермія** – тепловий лікувальний вплив затухаючими імпульсними струмами частотою близько 1 МГц, амплітудою початкової напруги 100...150 В і максимальним струмом у кілька ампер.

**Діатермокоагуляція** – припікання або «зварювання» біотканин струмами високої частоти. Необхідна ступінь нагрівання досягається при густині струму 6...10 мА/мм<sup>2</sup>.

**Діатермотомія** – метод розтину біотканин струмами високої частоти з густиною  $j \geq 10$  мА/мм<sup>2</sup>.

**Дарсонвалізація** – нетеплова дія високочастотним (100...400 кГц) імпульсним струмом високої напруги (10...100 кВ) і малої сили струму (10...15 мА). На рис. 2.7 зображено спрощену схему процедури дарсонвалізації.

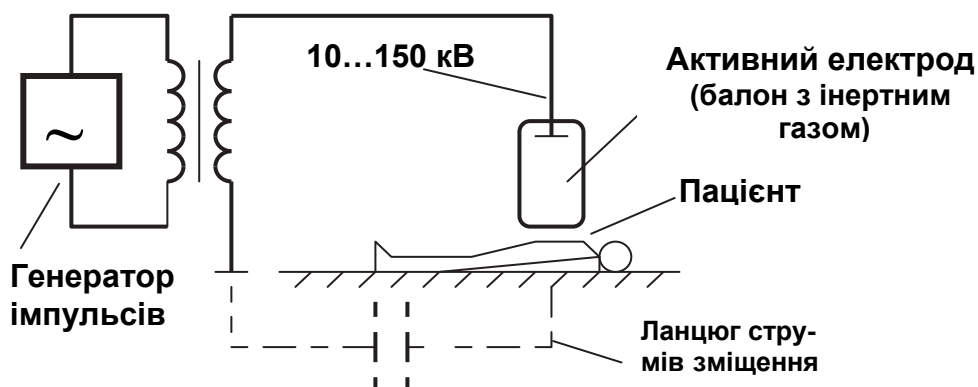


Рис. 2.7. Структурна схема дарсонвалізації

Зміщення іонів у тканинах під дією високочастотних струмів у край мале, тому відсутнє явище, властиве електролізу, хоча коливання частинок у високочастотному полі відбувається з подоланням сил тертя і виділенням тепла. Однак при впливі короткочасними імпульсами (тривалість імпульсу становить кілька періодів високочастотного струму, а частота повторення – кілька десятків герц) виділення тепла буде мінімальним. Тому основна дія таких струмів – подразнення рефлекторним шляхом, а лікувальний ефект – болевгамування.

## 2.4. Дія магнітних полів на біологічні об'єкти

Магнітним називається поле, яке спричиняє силову дію на рухомі тіла, що мають електричний заряд, а також на тіла, що мають магнітний момент незалежно від їх стану руху. Магнітне поле характеризується спрямованістю і напруженістю. Магнітне поле в речовині описує індукція

$$B = \mu_0 \mu H = \mu_0 (1 + \epsilon) H,$$

де  $\epsilon$  – магнітна сприйнятливості речовини. Оскільки магнітні властивості біотканин (діамагнетики і парамагнетики) виражені досить слабо  $|\epsilon| \approx 1$ , то первинний вплив зовнішнього магнітного поля на біооб'єкт визначається в основному силовою дією на заряди іонів. Багато біофізичних проявів дії статичних і низькочастотних магнітних полів можуть бути розглянуті з урахуванням сили Лоренца

$$F_n = q_i [V_i B],$$

де  $q_i$  – заряд;  $V_i$  – швидкість переміщення іона.

*Внутрішньотканинний магнітофорез* – явище інтенсифікації обмінних процесів в області накладення магнітного поля, яке пояснюється зміною фізіологічного і теплового руху іонів біосередовища до дуго- і спірально-подібних траєкторій (сила Лоренца перпендикулярна швидкості руху іона). Таким чином, енергія магнітного поля трансформується у фактор стимуляції біохімічних процесів.

*Магнітофорез ліків* – уведення лікувальних форм через шкірний покрив під дією магнітного поля (рис. 2.8). Необхідною умовою проведення магнітофорезу ліків є дисоціація на іони препарату ліків у розчині. Накладення зовнішнього магнітного поля спричиняє посилення дифузії через потові і сальні канали, міжклітинний простір за рахунок силової дії магнітного поля на іони препаратів ліків.



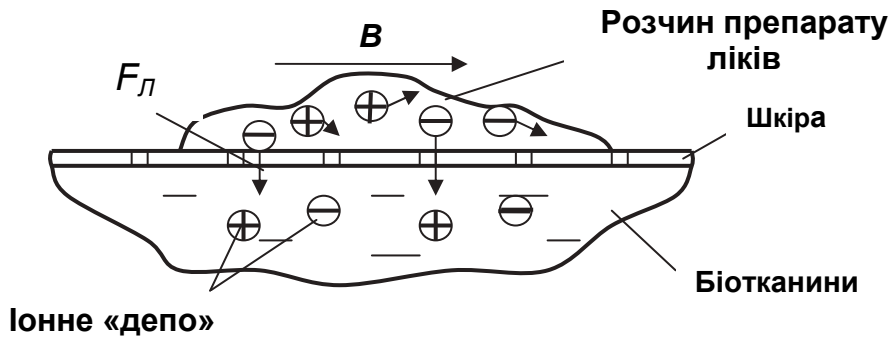


Рис. 2.8. Принцип проведення магнітофорезу ліків

*Ефект Холла* спостерігається в судинах з фізіологічно спрямованим рухом крові і лімфи. Оскільки лімфа і особливо кров є біологічними електролітами, то судинне русло можна трактувати як провідник зі струмом, поміщений в зовнішнє магнітне поле. Величина струму, що протікає  $I$ , буде пропорційна концентрації і заряду іонів в електроліті і швидкості їх переміщення (наприклад, швидкості кровотоку). Тоді на стінках судин виникає поперечна ЕРС (ЕРС Холла)

$$U_x = (R_x [IB]) / d,$$

де  $R_x$  - стала Холла;  $d$  - діаметр судини.

Таким чином, на власні біоелектричні потенціали, викликані фізіологічними процесами в організмі, накладаються потенціали, індуковані зовнішнім магнітним полем. Ступінь такого впливу буде визначатися стійкістю гомеостатических механізмів організму відносно цього впливу.

*Магнітогідродинамічний ефект* для біосередовищ живих об'єктів також пов'язують з циркуляцією крові та інших електропровідних рідин у магнітному полі. Якщо електропровідну рідину, яка рухається, помістити в магнітне поле, то в ній виникнуть пондеромоторні сили. Густина пондеромоторних сил  $F_{об} \approx [j B]$ , де  $j$  – густина повного струму. Очевидно, що виникають сили, які спрямовані перпендикулярно до руху електропровідного середовища. Тому сумарний прояв магнітогідродинамічного ефекту описують як збільшення в'язкості рідинних рухомих провідних середовищ у зовнішньому магнітному полі. В'язкість середовища з урахуванням сказаного можна подати у вигляді  $\eta = \eta_0 + \Delta\eta (B)$ , де  $\eta_0$  – в'язкість за відсутності магнітного поля;  $\Delta\eta (B)$  – збільшення в'язкості, спричинене дією магнітного поля. Проведені дослідження впливу магнітного поля величиною 0,1 і 0,2 Тл на швидкість кровотоку показали відносне зменшення швидкості на 0,03 і 0,1 % відповідно. Гіпотетично – практично повна зупинка кровотоку може статися в магнітному полі з індукцією  $\sim 200$  Тл.

Розглянуті вище біофізичні явища застосовуються в медицині у вигляді методу магнітотерапії. Для проведення магнітофорезу використовують комплекти аплікаторів на основі постійних магнітів. Магнітні браслети застосовують для нормалізації периферичного кровопостачання.

**Дія змінних магнітних полів** на біосередовища насамперед пов'язана з глибиною проникнення і енерговиділенням.

*Глибина проникнення змінного магнітного поля* в біологічні тканини залежить від їх магнітних і електричних властивостей, частоти поля і визначається виразом

$$d_{\text{прон}} = (\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma)^{-1/2}.$$

Значення  $d_{\text{прон}}$  характеризує глибину проникнення змінного магнітного поля, на якій його амплітуда зменшується в  $e$  раз. Для водомістких біотканин (біорідин, м'язових тканин, речовини мозку  $\sigma = 0,6 \dots 1 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ ,  $\mu \approx 1$ ) може бути застосована розрахункова формула  $d_{\text{прон}} = 390 \cdot (f)^{-1/2}$ . Тоді для частот 10 Гц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц глибина проникнення становитиме близько 120; 3,9; 1,2; 0,39 м відповідно. Тому для частот до десятків і сотень кілогерц справедливі розглянуті вище явища для статичних і низько-частотних магнітних полів. Для високочастотних магнітних полів більш значущим є коливальний рух іонів з розсіюванням енергії в оточуючих тканинах.

*Нагрівання біотканин змінним магнітним полем* (енергетичний вплив). Нехай на деяку глибину в середовищі проникає змінне магнітне поле  $\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}_0 \cos \omega t$ . Як було показано раніше, питома потужність, що виділяється в провідному середовищі, визначається виразом

$$q = j^2 \rho = j^2 / \sigma.$$

Знайдемо наведену густину струму з рівнянь

$$\begin{aligned} \text{rot} \mathbf{E} &= - d\mathbf{B}/dt, \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E}. \end{aligned}$$

Звідси отримаємо  $\text{rot} \mathbf{j} = - \sigma (d\mathbf{B}/dt)$ . Для простоти припустимо, що існує деякий контур з просторовою координатою  $\ell$ , для якого справедливо  $\text{rot} \mathbf{j} = \partial \mathbf{j} / \partial \ell$ . З огляду на циклічний характер зміни магнітного поля отримаємо диференціальне рівняння

$$\partial \mathbf{j} = (\sigma \omega \mathbf{B}_0 \sin \omega t) \partial \ell.$$

Виконавши інтегрування, маємо

$$\mathbf{j} = \sigma \omega \mathbf{L} \mathbf{B}_0 \sin \omega t,$$

де  $L$  – лінійний розмір області, в якій відбувається дія магнітного поля.

Тоді питома потужність, що виділяється в електропровідному середовищі під дією магнітного поля,

$$q = \sigma \cdot (\omega \cdot L \cdot B_0 \sin \omega t)^2.$$

Таким чином, під дією змінного магнітного поля більшою мірою будуть нагріватися біологічні тканини з великою електропровідністю (кровоносні судини, м'язові тканини, речовина мозку), меншою – жирові і кісткові тканини, шкіра. Властивості змінних магнітних полів знайшли своє застосування в методах індуктотермії і низькочастотної магнітотерапії.

*Індуктотермія* – метод електролікування при впливі на певні ділянки тіла високочастотним (15 ... 50 МГц) магнітним полем. Лікувальні рівні магнітного поля формують індуктори (високочастотні соленоїди), підключені до генератора струму. Механізм лікувальної дії оснований на виділенні тепла, що стимулює перебіг біопроеесів. Тепло, яке утворюється на глибині 7...8 см, є сильним подразником, що стимулює реакцію багатьох функціональних систем організму.

*Низькочастотна магнітотерапія* – застосування з лікувальною метою змінних, постійно переривчастих і імпульсних магнітних полів низької частоти (50...1000 Гц). Механізм лікувальної дії зумовлений не величиною утворюваного тепла (воно мале внаслідок низької частоти поля), а факторами, які спричиняють подразнення.

**Мікроскопічний (квантовий) механізм дії магнітних полів** на речовину пов'язаний з наявністю власних магнітних моментів елементарних частинок, атомів і їх ядер. Для елементарних частинок властива наявність орбітального і спінового моментів імпульсу, які породжують орбітальний і спіновий магнітні моменти відповідно. Останні утворюють результуючий магнітний момент квантової системи. Якщо квантову систему (ядро, атом, молекулу) помістити в зовнішнє магнітне поле, то в результаті взаємодії власного магнітного моменту з зовнішнім полем відбудеться розщеплення дозволених енергетичних рівнів на підрівні. Таке явище отримало назву ефекту Зеємана. Для практичних застосувань виявилася важливою (як наслідок ефекту Зеємана) зміна спектральних характеристик речовини, яка поміщена в зовнішнє магнітне поле.

*Електронний парамагнітний резонанс* (ЕПР) – резонансне поглинання електромагнітного випромінювання парамагнетиками, пов'язане з переходами його атомних електронів між зеєманівськими рівнями, які виникають при накладенні на речовину постійного магнітного поля. Мінімальна різниця енергій між зеєманівськими рівнями розщеплення

$$\Delta W_{e3} = g \cdot \mu_B \cdot B,$$

де  $\mu_B$  – магнетон Бора;  $g$  – константа, що залежить від типу квантової системи (фактор Ланде).

Отже, мінімальна частота резонансного поглинання електромагнітного випромінювання

$$\nu_{EPR} = (g \cdot \mu_B \cdot B) / h,$$

де  $h$  – стала Планка.

Особливістю живих організмів є те, що за парамагнітні властивості в них відповідають вільні радикали – атоми або групи хімічно пов'язаних атомів, що мають неспарені електрони на зовнішніх оболонках. Концентрація вільних радикалів у тканинах є об'єктивною діагностичною ознакою різних патологій. Для ЕПР використовують магнітні поля з індукцією  $\sim 0,3$  Тл, для якої  $\nu_{EPR} \sim 10$  ГГц, а тому цей метод діагностики належить до НВЧ-спектроскопії.

*Ядерний магнітний резонанс* (ЯМР) – резонансне поглинання речовиною електромагнітного випромінювання, зумовлене переходом його ядер між зееманівськими підрівнями енергії при накладанні зовнішнього магнітного поля. Для мінімальної частоти ЯМР справедливе співвідношення

$$\nu_{ЯМР} = (g_{Я} \cdot \mu_{Я} \cdot B) / h,$$

де  $\mu_{Я}$  – магнетон ядер речовини;  $g_{Я}$  – фактор Ланде.

Для індукції магнітного поля  $\sim 0,3$  Тл частота резонансу  $\nu_{ЯМР} \sim 10$  МГц, тому ЯМР належить до методів радіочастотної спектроскопії. За частотами резонансу і відповідними інтенсивностями поглинання визначають не тільки хімічний склад речовини, а й просторову структуру з'єднань, у тому числі і живих тканин. ЯМР застосовується в медицині для томографічних досліджень. ЯМР-томографія – це метод візуалізації внутрішніх структур живого організму за розподілом ядер речовини в досліджуваному шарі на основі просторової залежності інтенсивності поглинання і частоти ЯМР, заданої відомим розподілом індукції магнітного поля. Найбільш часто для візуалізації використовують ядра водню (протони), тому цей метод також називають ЯМР-протонною томографією.

До основного джерела магнітних полів у межах біосфери належить магнітне поле Землі. Його величина і напрямок залежні від географічних координат. Для території України величина земного магнітного поля становить близько  $4 \cdot 10^{-5}$  Тл. Біологічна дія магнітного поля Землі визначається не тільки його статичними характеристиками, але і динамічними змінами, які називаються магнітними бурями. Причиною флуктуацій магнітного поля Землі в основному є динаміка сонячної активності (особливо його компонента іонізуючих випромінювань). Це призводить до зміни концентрації заряджених частинок в іоносфері і, як наслідок, – до виникнення ат-

мосферних струмів до поверхні Землі. Ці струми створюють відносно тривалі флуктуації магнітного поля, що призводять до виникнення біосенсорних реакцій живих об'єктів.

Власні магнітні поля живих істот, що породжуються біострумами, незначні і, наприклад, для мозкової і серцевої діяльності організму людини становлять  $10^{-12} \dots 10^{-10}$  Тл.

Більш істотні магнітні поля, пов'язані з техногенною діяльністю людини. Це перш за все енергогенеруючі станції, мережі електропередач, електротранспорт, а також побутові електро- і радіоприлади.

## 2.5. Вплив змінним електричним полем

На невеликих відстанях  $r$  від джерела електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  і при виконанні умови  $r < \lambda$  на біооб'єкт можна впливати переважно однією компонентою поля. Розглянемо енергетичну дію змінного електричного поля напруженістю  $E = E_0 e^{i\omega t}$  на деякий об'єм біосередовища з ізотропними діелектричними і провідниковими властивостями. Як і в разі магнітного поля, визначимо струм провідності, індукований в середовищі змінним електричним полем, з системи рівнянь

$$J = j + \partial D / \partial t; \quad D = \epsilon_0 \epsilon E; \quad j = \sigma E,$$

де перше рівняння характеризує повний струм у середовищі (струми провідності і зміщення), друге і третє – дозволяють виразити струм провідності через індукцію електричного поля. Тоді для повного струму отримаємо вираз

$$J = j + \partial D / \partial t = \sigma E + \epsilon_0 \epsilon \cdot \partial E / \partial t = \sigma E + \epsilon_0 \epsilon \omega E i = \epsilon_0 \epsilon \omega E \cdot (\sigma / (\epsilon_0 \epsilon \omega) + i).$$

Оскільки тангенс діелектричних втрат у середовищі позначають, як  $\text{tg} \delta = \sigma / (\epsilon \epsilon_0 \omega)$ , де  $\delta$  – кут між векторами повного струму і струму зміщення, то останній вираз набуває вигляду

$$J = \epsilon_0 \epsilon \omega E \cdot (\text{tg} \delta + i).$$

З огляду на те, що за активні втрати в речовині відповідає струм провідності  $j = \epsilon_0 \epsilon \omega E \cdot \text{tg} \delta$ , а  $\sigma = j / E$ , для питомого енерговиділення можна записати

$$q = j^2 / \sigma = (j^2 E) / j = \epsilon_0 \epsilon \omega E^2 \cdot \text{tg} \delta.$$

Таким чином, ступінь нагріву біотканин змінним електричним полем залежить від співвідношення їх діелектричних і провідних властивостей, а також від частоти поля.

*Використання змінних електричних полів у медицині. УВЧ-терапія* – застосування з лікувальною метою впливу на живий організм безперервного або імпульсного поля ультрависокої частоти (30...300 МГц). Для реалізації методу розміщують область тіла пацієнта між ємнісними електродами, підключеними до вихідного контуру генератора УВЧ-коливачів. Виділяють тепловий та осциляторний (нетепловий) механізми впливу. Завдяки тому, що біологічні тканини мають досить велику ємнісну провідність, УВЧ-поле вільно проникає через шкіру і жировий шар у внутрішні елементи організму. Коливання зарядів у височастотному електричному полі з дисипацією енергії приводить до нагрівання біотканин, що, в свою чергу, стимулює фізіологічні процеси. До нетеплових проявів дії УВЧ-поля відносять бактерицидну дію, вплив на нервову систему (ефекти вгамування болю), поліпшення судинної проникності і периферійного кровопостачання.

*Ємнісна плетизмографія* – діагностичний метод, оснований на залежності ємності конденсаторного датчика від кровонаповнення тканин, розташованих між електродами конденсатора. Вимірювання імпедансу в ланцюзі датчика проводиться на частотах діапазону 0,3...1 МГц.

## 2.6. Біоб'єкти в електромагнітному полі

Вище були розглянуті випадки впливу окремих компонентів електромагнітного поля на біоб'єкти. Завдання цього розділу – врахувати особливості дії електромагнітного поля як процесу випромінювання. У цьому випадку визначальним є поняття хвильової зони.

*Хвильова зона* – це простір, в якому електромагнітне поле визначається хвильовими властивостями: частотою зміни, довжиною хвилі і напрямком поширення. Хвильова зона – це також частина простору, в якому джерело електромагнітного випромінювання можна вважати точковим.

За особливостями впливу на біологічні об'єкти спектр електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону поділяють на п'ять інтервалів:

1. Долі та одиниці герців ...10 кГц – хвильова зона знаходиться на відстанях, де інтенсивність електромагнітного поля втрачає свою біологічну значущість. Стосовно цієї ділянки спектра практичне значення мають окремі складові електричного і магнітного полів, дію яких розглянуто в попередніх розділах.

2. 10 кГц...30 МГц – характерно нерівномірне поглинання електромагнітної енергії різними біоструктурами організму. Поглинання енергії зростає пропорційно  $\omega^2$ .

3. 30 МГц...10 ГГц – характерно виникнення виражених інтерференційних явищ, що супроводжуються складним розподілом поглиненої організмом енергії. Максимальне поглинання має місце в разі виникнення резонансних явищ при певному співвідношенні довжини хвилі і розмірів об'єкта. Виникають області так званих «гарячих плям».

4. 10...200 ГГц – характерно швидке загасання хвилі при проходженні через тканини. Ефективна глибина проникнення – близько  $(0,01 \dots 0,1)\lambda$ . Характерний ефект локального впливу для організму людини спостерігається в діапазоні біорезонансних частот 49...60 ГГц.

5. 200...3000 ГГц – характерно поглинання енергії самими поверхневими шарами. При незначних рівнях енергії випромінювання дію пов'язують з подразненням рецепторів шкіри або дією на біологічно активні точки.

Розглянемо деякі характеристики проникнення, поширення і поглинання електромагнітного випромінювання біоструктурами, моделюючи їх суцільними середовищами з просторовим розподілом параметрів  $\epsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ .

*Глибина проникнення електромагнітного випромінювання в біологічні тканини* – це відстань, на якій амплітуда електричного поля зменшується в  $e$  раз, а густина потоку енергії – в  $e^2$  раз. Ця величина визначається за формулою

$$d = \lambda_0 [ 2\pi^2 \epsilon \cdot ((1 + \text{tg}^2 \delta)^{1/2} - 1) ]^{1/2},$$

де  $\lambda_0$  – довжина хвилі у вакуумі.

Враховуючи те, що  $\text{tg} \delta = \sigma / \omega \epsilon \epsilon_0$ , при значному збільшенні частоти  $\text{tg} \delta \approx 0$ , отже, параметр  $d$  – нескінченно мала величина. Однак експериментальна перевірка показала, що теоретична формула дає дещо занижений результат, особливо для діапазону НВЧ. Цю розбіжність пояснюють неадекватністю моделі біотканин як суцільного середовища.

*Довжину хвилі електромагнітного випромінювання в біотканинах* характеризує формула

$$\lambda_{mk} = \lambda_0 \cdot [(\epsilon \mu / 2) \cdot ((1 + \text{tg}^2 \delta)^{1/2} + 1)]^{-1/2}.$$

Якщо врахувати, що біосередовища – це водомісткі тканини, для яких в діапазонах ВЧ-НВЧ  $\text{tg} \delta \ll 1$ , а  $\epsilon \approx 81$ ,  $\mu \approx 1$ , то для оцінних розрахунків застосовують формулу

$$\lambda_{mk} \approx \lambda_0 \cdot (\epsilon)^{-1/2} \approx \lambda_0 / 9 \dots \lambda_0 / 6.$$

Таким чином, для електромагнітного випромінювання, що проникло у біологічне середовище, притаманне явище укорочення довжини хвилі. Графіки частотної залежності  $\lambda_{mk}$  і  $d$  показано на рис. 2.9. Для тканин з низьким вмістом води укорочення довжини хвилі становить 2 – 2,5 раза.

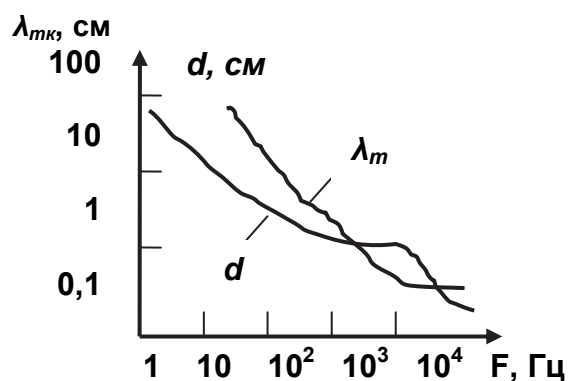


Рис. 2.9. Частотна залежність  $\lambda_{mk}$  і  $d$  для біотканин

Інтерференційні явища зумовлені шаруватою структурою біотканин. У тих випадках, коли товщина декількох шарів речовини менше глибини проникнення випромінювання, частина енергії відбивається від границь їх розділу і в тканинах виникають максимуми поглинання («гарячі плями», рис. 2.10).

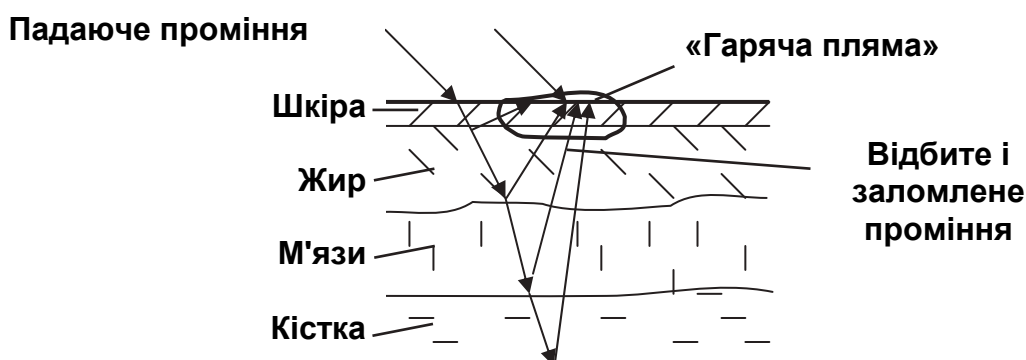


Рис. 2.10. Моделювання виникнення «гарячих плям»

Загальна кількість поглиненої енергії електромагнітного випромінювання і її розподіл усередині біологічного об'єкта є складною функцією електричних властивостей тканин та їх загальних геометричних розмірів і умов опромінення. Об'єктивною характеристикою енергетичного впливу є specific absorbed rate (SAR), або питома поглинена потужність (ППП) – частина енергії електромагнітного випромінювання, що поглинається одиницею маси в одиницю часу,  $[W] = \text{Вт} / \text{кг}$ . На рис. 2.11 показано залежності ППП для об'єкта, по-різному орієнтованого щодо плоскополяризованого електромагнітного випромінювання (вектори  $E$ ,  $H$ ,  $K = [EH]$ ) у вільному просторі. За орієнтаційну ознаку об'єкта обрана відстань  $L$ , що з'єднує максимально віддалені точки об'єкта (наприклад, зріст людини), за аргумент



взято відношення  $L/\lambda$ . Для отримання залежностей використовувалися експериментальні фантоми (фізичні моделі біооб'єктів).

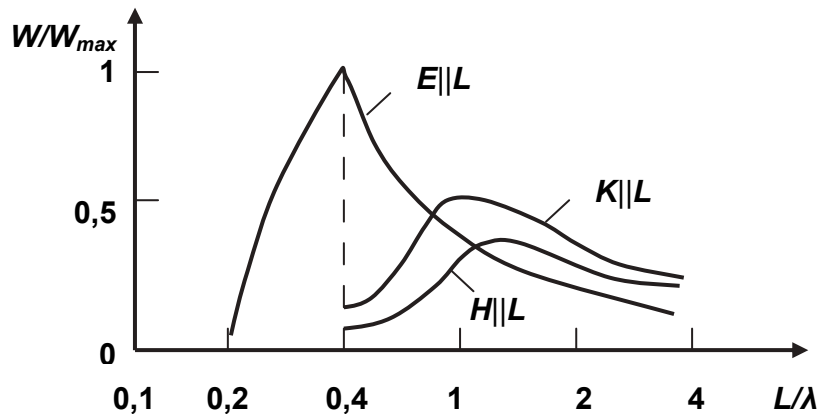


Рис. 2.11. Залежності ППП від параметрів опромінення об'єкта

Дослідження, проведені на тваринах, підтвердили наявність максимуму ППП, коли максимальний розмір об'єкта  $L$  дещо менше половини довжини хвилі випромінювання і орієнтований паралельно площині поляризації –  $E||L$ .

При опроміненні у вільному просторі на частотах до 1 МГц розміри тіла тварин і людини малі порівняно з довжиною хвилі, діелектричні процеси в тканинах виражені слабо. Тому тіло людини або тварини можна вважати однорідним еліпсоїдом з питомим електричним опором  $\rho$ . З огляду на те, що енерговиділення пропорційно квадрату густини струму і опору тканин людського тіла, для сфероподібної моделі були отримані такі формули для  $Q_E$  і  $Q_H$  складових поля:

$$Q_E = 2 \cdot 10^{-21} \rho f^2 E^2, \quad Q_H = 2 \cdot 10^{-17} \rho f^2 H^2,$$

де  $[Q] = \text{кал/хв}$ .

При опроміненні у вільному просторі в діапазоні частот 1...400 МГц спостерігається пропорційна залежність ППП від площі поверхні біооб'єктів

$$W \sim S \cdot \ln(f).$$

На рис. 2.12 показано частотні залежності усереднених ППП для різних частин тіла людини, отримані чисельними методами. Уважається, що об'єкт знаходиться у вільному просторі, а інтенсивність падаючого випромінювання - 1 мВт/см<sup>2</sup>. Спостерігається ряд характерних резонансів поглинання, а ППП голови людини має кілька максимумів в інтервалі частот 300...400 МГц.

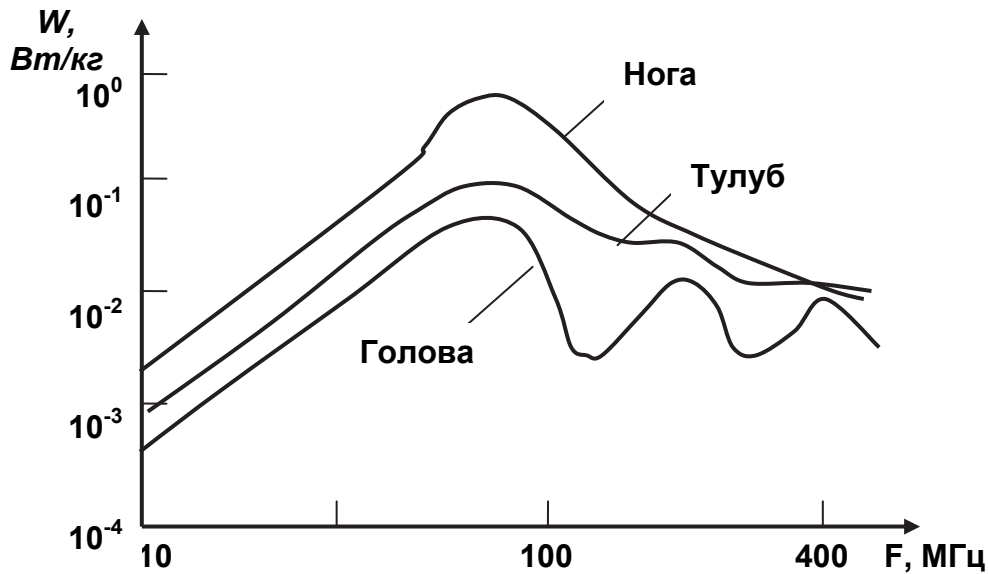


Рис. 2.12. Частотні залежності ППП для частин тіла людини

Відмінною особливістю дії електромагнітного випромінювання в інтервалі частот 300...300000 МГц (1 м...1 мм) на біосередовища є виконання умов хвильової зони, тому застосування електромагнітного випромінювання НВЧ- і КВЧ-діапазонів у медицині ґрунтується, перш за все, на локалізації їх впливу, ефективному теплоутворенні (пропорційному частоті поля) і ряді специфічних нетеплових ефектів.

*Мікрохвильова терапія* – метод лікування, оснований на використанні електромагнітного випромінювання дециметрового і сантиметрового діапазонів. Первинна дія цього випромінювання проявляється в зоні локального впливу і складається з теплового і осциляторного (екстермічного) ефектів. Тепловий ефект у біотканинах зумовлений розсіюванням енергії коливань вільних іонів електролітів і дипольних молекул діелектриків навколо своєї осі в процесі їх орієнтування щодо силових ліній електромагнітного поля. Найбільше утворення тепла відбувається у водомістких тканинах (кров, м'язи, лімфа). До осциляторного ефекту належать зміни коефіцієнтів поверхневого натягу біорідин, проникності клітинних мембран, резонансного поглинання випромінювання білковими макромолекулами і амінокислотами. Цей ефект проявляється при малих потужностях впливу.

Виражену біологічну дію має електромагнітне випромінювання діапазону 49...60 ГГц слабкої і надслабкої інтенсивностей. Розрізняють *мікрохвильову резонансну терапію* та *інформаційно-хвильову терапію*. У першому випадку лікувальний ефект досягається впливом вузькосмугового випромінювання з інтенсивністю близько  $10^{-6}$ ... $10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>, в іншому – широкосмуговим випромінюванням з обов'язковою складовою міліметрового діапазону й інтенсивністю  $\sim 10^{-15}$  Вт/см<sup>2</sup>. Обидва методи сприяють нормалізації фізіологічних процесів в організмі, стимулюють імунні функції, мають болезаспокійливу дію.

Вплив електромагнітних випромінювань на живі організми має і *негативні прояви*. Поглинена біотканинами енергія спричиняє підвищення температури у всьому організмі або в деяких локальних областях. Величина підвищення температури залежить від дифузних механізмів нагрівання та охолодження тканин. Якщо здатність системи до терморегулювання виявиться недостатньою і тепловідвід утруднений, відбувається перегрівання тканин, що може призвести до їх руйнування і навіть смерті всього організму.

*Тепловий стрес* – явище підвищення температури тіла, збільшення частоти пульсу і дихання вищих тварин і людини при інтенсивному і тривалому їх опроміненні електромагнітним НВЧ-полем. Ураження очей (мікрохвильова катаракта) – помутніння кришталика при інтенсивному опроміненні НВЧ-полем.

Природні джерела потужних ВЧ- і НВЧ-випромінювань у межах біосфери відсутні. Однак техногенна діяльність людини в останні десятиліття викликала суттєве зростання інтенсивностей електромагнітних випромінювань і розширення їх спектра в область надвисоких частот. Тому законодавчо введений в Україні допустимий рівень інтенсивності випромінювання  $2,5 \text{ мкВт/см}^2$  для людини повинні контролювати метрологічні служби.

## 2.7. Дія електромагнітних випромінювань оптичного діапазону

Оптичне випромінювання (світло) – випромінювання квантів (фотонів) електромагнітного поля, енергетичний вплив якого на речовину в основному визначається механізмами поглинання і розсіяння. Залежно від довжини хвилі виділяють три діапазони оптичного випромінювання: інфрачервоне (ІЧ) (1000...0,76 мкм), видиме світло (0,76...0,4 мкм), ультрафіолетове випромінювання (УФВ) (0,4...0,01 мкм). Відмінною особливістю оптичного випромінювання від радіочастотного є його дискретність, тобто випромінювання електромагнітних хвиль відбувається не безперервно, а окремими порціями – квантами. Це пов'язано з властивістю елементарних частинок, атомів, молекул змінювати свій енергетичний стан стрибкоподібно, поглинаючи або випромінюючи квант електромагнітного випромінювання:

$$h\nu = W_i - W_k,$$

де  $\nu$  – частота випромінювання;  $W_i$  і  $W_k$  – енергетичні рівні системи, що відповідають правилам відбору.

Кванти оптичного діапазону випромінювання називають також фотонами.

Ряд важливих явищ взаємодії оптичного випромінювання з біосередовищами зручно розглядати з феноменологічних позицій, не зачіпаючи базові квантові механізми.

*Поглинання світла* – ослаблення інтенсивності світла при проходженні через речовину внаслідок перетворення світлової енергії в інші види. У разі однорідного середовища і монохроматичного випромінювання процес поглинання описує закон Ламберта - Бугера - Бера

$$I_{\ell} = I_0 e^{-k\ell},$$

де  $\ell$  – довжина поширення випромінювання в речовині;  $I_0$  і  $I_{\ell}$  – інтенсивності випромінювання на вході в речовину і виході з неї;  $k$  – натуральний показник поглинання.

Оскільки в біологічному середовищі квантовими системами, що поглинають енергію, є молекули з концентрацією  $n$ , а просторовою характеристикою області взаємодії – ефективний переріз молекул  $S_{\text{еф}}$ , то натуральний показник поглинання можна подати у вигляді  $k = n S_{\text{еф}}$ . Якщо розглядати всю сукупність молекул, що входять у речовину, очевидно, що параметри  $n$ ,  $S_{\text{еф}}$  є функціями частоти або довжини хвилі падаючого випромінювання, тому  $k = k(\lambda)$ .

Важливе значення закон поглинання має для досліджень біорідин і розчинів біосередовищ. Припустимо, що молекули, які поглинають фотони, знаходяться в розчиннику, який є прозорий для обраного монохроматичного випромінювання. Тоді концентрація речовини поглиначка  $n = CN_A$ , де  $N_A$  – число Авогадро;  $C$  – молярна концентрація, при цьому показник  $k = nS_{\text{еф}} = CN_A S_{\text{еф}} = \varepsilon' C$ . Величина  $N_A S_{\text{еф}} = \varepsilon'$  – натуральний молярний показник поглинання, що характеризує ефективний переріз поглинання усіх молекул одного моля розчиненої речовини. Використовуючи уведену величину, закон поглинання для розчинів набуває вигляду

$$I_{\ell} = I_0 e^{-\varepsilon' C \ell}, \text{ або } I_{\ell} = I_0 10^{-\varepsilon C \ell},$$

де  $\varepsilon = 0,43 \varepsilon'$ .

На основі закону поглинання оптичного випромінювання набуло поширення декілька методів досліджень.

*Концентраційна кольорометрія* – метод визначення концентрації речовини в забарвленому розчині. Ґрунтується на визначенні концентрації речовини з виразу  $C = (\lg(I_0 / I_{\ell}) / \varepsilon \ell)$  за умови наявності табличних відомостей про  $\varepsilon$  для  $\lambda = \text{const}$ .

*Спектроскопічні дослідження* хімічного складу біосередовищ основані на залежностях  $k = k(\lambda)$  і  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ .

*Оптична плетизмографія* – метод дослідження кровонаповнення органів і тканин на основі залежності  $\lg(I_0 / I_{\ell}) = \Phi(\ell)$ .

Наступне важливе явище взаємодії оптичного випромінювання з речовиною – це *розсіювання світла*, тобто процес перетворення світла речовиною, що супроводжується зміною напрямку поширення й інтенсивнос-

ті і проявляється як невласне свічення речовини. Причинами розсіювання світла є оптичні неоднорідності, які поділяють на два види.

Неоднорідності першого виду – дрібні частинки в однорідній прозорій речовині. Середовища з такою неоднорідністю отримали назву каламутних середовищ, а сам процес – явища Тиндаля. Якщо розміри неоднорідностей відповідають умові  $d \leq (0,1 \dots 0,2) \lambda$ , то інтенсивність розсіювання  $I_{роз} \sim 1 / \lambda^4$ , для частинок більшого розміру  $d > 0,2\lambda - I_{роз} \sim 1 / \lambda^2$ . Багато біологічних рідин, суспензії біосередовищ, аерозолі (пар, туман, дим) належать до каламутних середовищ.

Неоднорідності другого виду виникають у чистій однорідній речовині через статистичне відхилення концентрації молекул від рівномірного розподілу (наприклад, флуктуації густини при нерівномірному нагріванні).

У загальному випадку інтенсивність розсіяного випромінювання може бути описана функцією  $I_{роз} = \Phi(\alpha, \lambda)$ , де  $\alpha$  – кут між напрямком падаючого проміння і розсіяного. Метод якісного дослідження розмірів неоднорідностей, їх концентрації за характером розсіювання біопробами оптичного випромінювання заданого спектру отримав назву «нефелометрія».

Явище *обертання площини поляризації* плоскополяризованого оптичного випромінювання при проходженні через біосередовища також може бути розглянуто з феноменологічних позицій. Сутність цього явища полягає в тому, що деякі оптично прозорі речовини мають властивість змінювати (обертати) положення площини поляризації монохроматичного випромінювання, як схематично показано на рис. 2.13. Такі речовини отримали назву оптично активних середовищ. Кут повороту площини поляризації знаходять з виразу  $\alpha = \alpha_0 C \ell$ , де  $\alpha_0$  – питома обертає площини поляризації речовиною при заданій довжині хвилі випромінювання  $\lambda$ ;  $\ell$  – оптичний шлях випромінювання;  $C$  – концентрація оптично активного середовища.

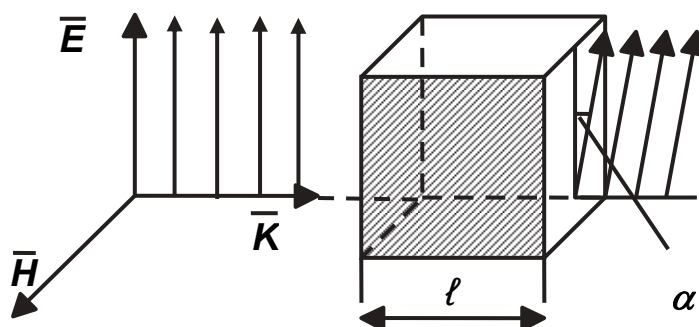


Рис. 2.13. Обертання площини поляризації випромінювання

Більшість біосередовищ і їх розчинів є оптично активними середовищами, тому розглянуте явище знайшло своє застосування в медичних лабораторних дослідженнях для визначення концентрацій речовин по куту

повороту площини поляризації (метод поляриметрії). Частотна дисперсія кута повороту площини поляризації використовується в методі *спектрополяриметрії*. Цей метод за отриманою залежністю  $\alpha = \alpha(\lambda)$  дозволяє визначити концентрації декількох оптично активних речовин у розчині.

**Квантовий механізм взаємодії оптичного випромінювання з речовиною** дозволяє доповнити розглянуті вище явища. Основними елементами цього механізму є атомні або молекулярні спектри випромінювання і поглинання.

*Атомними спектрами* називаються спектри як випромінювання, так і поглинання, які виникають при квантових переходах між енергетичними рівнями вільних або слабовзаємодіючих атомів. До атомних належать оптичні спектри, які зумовлені квантовими переходами між енергетичними рівнями зовнішніх електронів (з енергіями фотонів приблизно декількох електрон-вольт), що відповідає енергіям квантів ультрафіолетової, видимої і близької інфрачервоної областей спектра. Прикладом атомних спектрів можуть служити спектри водню як невід'ємної речовини в складі біосередовищ: спектральна серія Лаймана (УФВ), серія Бальмера (ближнє УФВ і видиме випромінювання), серія Пашена (ІЧ-випромінювання). Як метод дослідження складу речовини набув поширення атомний спектральний аналіз з використанням спектрів як випромінювання (емісійний спектральний аналіз), так і поглинання (абсорбційний спектральний аналіз). У біологічних дослідженнях атомний спектральний аналіз застосовують для визначення мікроелементів у тканинах організму, атомів металів у продуктах, атомів деяких хімічних елементів в судовій медицині.

*Молекулярні спектри* – це спектри випромінювання і поглинання, що виникають при квантових переходах з одного енергетичного рівня на інший. Складність молекулярних спектрів порівняно з атомними зумовлена великою кількістю енергетичних станів, що реалізуються в молекулі. Це енергетичні рівні, які визначаються станом електронних оболонок ( $W_{ел}$ ), коливальними ( $W_{кол}$ ) і обертальними ( $W_{об}$ ) рухами молекул. Тому частота випромінювання або поглинання молекули при переходах між енергетичними рівнями  $W'$  і  $W''$  має багатокomпонентну структуру

$$\nu = 1/h \cdot (W' - W'') = 1/h \cdot [(W'_{ел} - W''_{ел}) + (W'_{кол} - W''_{кол}) + (W'_{об} - W''_{об})] = 1/h \cdot (\Delta W_{ел} + \Delta W_{кол} + \Delta W_{об}),$$

при цьому справедлива нерівність  $\Delta W_{ел} \gg \Delta W_{кол} \gg \Delta W_{об}$ , якій відповідають три види молекулярних спектрів.

Якщо виконується умова  $\Delta W_{ел} = 0$ ;  $\Delta W_{кол} = 0$ ;  $\Delta W_{об} \neq 0$ , то спектр називається обертальним і знаходиться в області НВЧ- і дальнього ІЧ-діапазонів ( $\lambda = 0,1 \dots 1$  мм). За умови  $\Delta W_{ел} = 0$ ;  $\Delta W_{кол} \neq 0$ ;  $\Delta W_{об} \neq 0$  має місце коливально-обертальний спектр у ближньому ІЧ-діапазоні. Якщо  $\Delta W_{ел} \neq 0$ ;  $\Delta W_{кол} \neq 0$ ;  $\Delta W_{об} \neq 0$ , то виникає електронно-коливально-обертальний спектр,

що спостерігається у видимій та ультрафіолетовій областях випромінювання.

Специфічність і індивідуальність спектрів окремих молекул лежать в основі якісного та кількісного спектрального аналізу. Молекулярні спектри дозволяють досліджувати не тільки будову молекул, а й характер міжмолекулярної взаємодії.

Молекулярні спектри поглинання (рис. 2.14) дають інформацію про біологічно активні молекули і використовуються в біохімічних і біофізичних дослідженнях.

**Фотолюмінісценція** – це надмірне над тепловим випромінювання речовини при даній температурі, що має тривалість, яка значно перевищує період ( $10^{-15}$  с) випромінювання світлових хвиль, і виникає при впливі на речовину опромінювання оптичного діапазону. Фотолюмінісценція підрозділяється на *флуоресценцію* (короткочасне післясвітіння) і *фосфоренцію* (порівняно тривалий післясвітіння). Початковим етапом будь-якої люмінесценції є збудження атома або молекули опромінюючим фотоном. У найбільш простому випадку квантова система повертається у початковий енергетичний стан з випромінюванням фотона світла тієї ж частоти. Це явище називають резонансною флуоресценцією, яке спостерігається в парах і газах і виникає через  $10^{-8}$  с після дії первинного опромінювання.

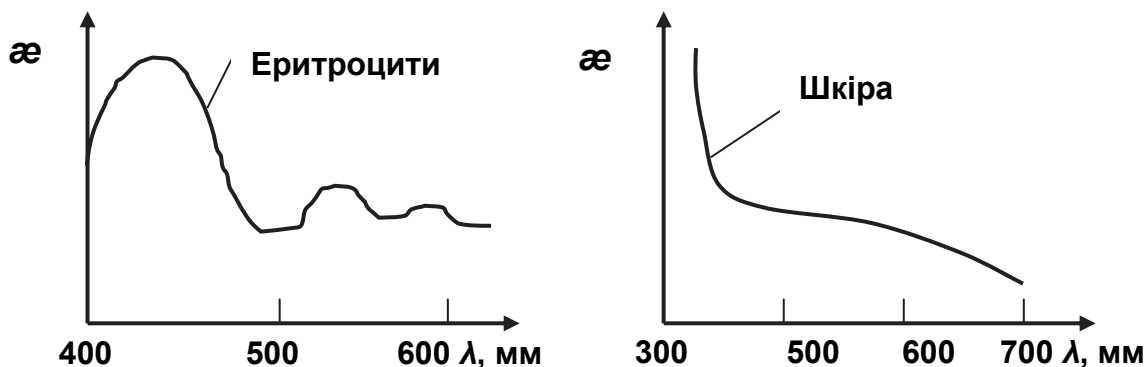


Рис. 2.14. Молекулярні спектри поглинання

Для біологічно активних молекул характерна фотолюмінісценція. Відповідно до закону Стокса спектр люмінесценції зміщений в область довших хвиль щодо спектра первинного опромінювання. Схему енергетичних переходів для флуоресценції зі зміщенням спектра випромінювання показано на рис. 2.15, а. Відмінною особливістю фосфоренції є велика тривалість світіння (від часток секунд до декількох годин), що зберігається після припинення опромінювання. Це пояснюється наявністю метастабільних енергетичних станів, в яких може перебувати квантова система (рис. 2.15, б).

Фотолюмінісценція в медицині використовується для досліджень міжмолекулярної взаємодії в біотканинах, проникності біотканин за допо-

могою люмінесцентних зондів, виявлення мікроорганізмів і бактерій та малих кількостей речовини.

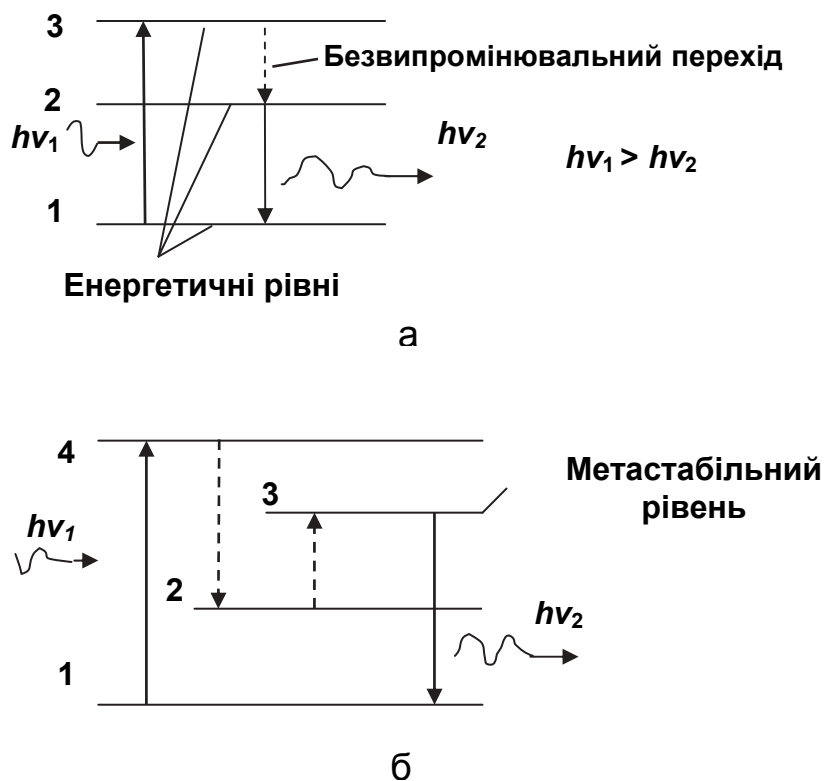


Рис. 2.15. Схеми енергетичних переходів для фотолюмінесценції

Наведені вище явища розглядають живу речовину як пасивний об'єкт взаємодії, а реакцію біооб'єктів на дію оптичного випромінювання враховують фотобіологічні процеси.

**Фотобіологічними** називаються процеси, що відбуваються в біологічних об'єктах при впливі випромінювання оптичного діапазону з сенсорними проявами на фізіологічному рівні. Виділяють такі стадії цих процесів: фотофізична – поглинання кванта світла і передача енергії з утворенням збудженого стану в речовині; фотохімічна – хімічні перетворення молекул; фізіологічна – відповідь організму на опромінювання. Поглинання кванта випромінювання оптичного діапазону викликає збудження молекули, а отже, – підвищення її реакційної здатності, в результаті чого можуть відбуватися хімічні реакції, які були б неможливі в темряві. Такі реакції називаються фотохімічними, а виникаючі в них продукти, – фотопродуктами. Безпосередній вплив світла на хімічну речовину найчастіше призводить до утворення нестабільних продуктів, які в ланцюзі подальших реакцій перетворюються в стабільні. Ці реакції, як правило, вже не потребують дії світла і тому називаються темновими.

Для кількісної оцінки фотобіологічних процесів застосуємо феноменологічний підхід. Нехай  $n_0$  і  $n_t$  – початкова і кінцева концентрації фотобіологічно активних молекул,  $I$  і  $t$  – інтенсивність і час опромінювання,  $\varphi_x$  – кван-



товий вихід фотохімічної реакції,  $S_{\text{еф}}$  – ефективний переріз поглинання молекули. Тоді справедливий вираз

$$\ln(n_0/n_t) = D S_x,$$

де  $S_x = S_{\text{еф}} \varphi_x$  – площа перерізу молекули для фотохімічного перетворення;  $D = I \cdot t$  – доза опромінення.

Величина біологічної реакції однозначно пов'язана з дозою опромінення, а її вибірковість визначається спектром дії  $S_x = \Phi(\lambda)$  (який безпосередньо пов'язаний з функцією  $\alpha = \alpha(\lambda)$  – спектром поглинання).

*Фотосинтез* – перетворення світлової енергії в енергію хімічних зв'язків органічних речовин – є найважливішим фотобіологічним процесом. Унаслідок фотосинтезу здійснюється приплив негативної ентропії в живі організми. Фотосинтез здійснюється вищими зеленими рослинами, зеленими і бурими водоростями, зеленими і пурпурними бактеріями.

До інших фотобіологічних процесів належать *регуляторні та інформаційні реакції*. Прикладами таких фізіологічних проявів можуть бути: відчуття тепла (дія інфрачервоного випромінювання на організм); зорові реакції (випромінювання видимого діапазону), фототаксис (рух мікроорганізмів до світла або від нього); фототропізм (обертання листя і стебел рослин до світла або від нього); синтез вітаміну **D** (вплив ультрафіолетового випромінювання), ерітемоутворення (почервоніння шкіри, спричинене розширенням кровоносних судин шкіри), засмагання (утворення у шкірі пігменту меланіну), канцерогенез (утворення пухлин), бактерицидний ефект. З усього діапазону електромагнітного випромінювання людина має рецептори тільки до інфрачервоного (терморекцептори) та видимого (зорові рецептори) випромінювань.

*Використання оптичного випромінювання для лікування і діагностики захворювань.* Для прогрівання поверхневих тканин тіла пацієнта (на глибині близько 2 см) використовують тепловий ефект інфрачервоного випромінювання ближньої області ( $\lambda = 0,76 \dots 2,5$  мкм). Як джерело випромінювання застосовуються спеціальні лампи ІЧ-діапазону. У медичній діагностиці знайшло своє застосування ІЧ-зондування, що використовує явище дифузійного розсіювання. Застосування інфрачервоного випромінювання в судмедекспертизі ґрунтується на візуалізації прихованих біологічних структур і сторонніх речовин. ІЧ-спектроскопія – кількісний і якісний аналіз коливально-обертальних спектрів амінокислот, вуглеводів, гормонів, ліпідів, білків. До негативних проявів дії інфрачервоного випромінювання на людину належить тепловий удар – перегрівання організму при переважанні процесу поглинання енергії над процесами тепловіддачі.

Медичне застосування ультрафіолетового випромінювання тісно пов'язане з фізіологічними проявами його дії на біоб'єкти. У діапазоні УФВ виділяють три зони: **A**-зона ( $\lambda = 400 \dots 315$  нм), або антирахітна, спричиняє синтез вітаміну **D**; **B**-зона ( $\lambda = 315 \dots 280$  нм) сприяє утворенню еритеми і

синтезу пігменту меланіну, який має захисну дію при ультрафіолетовому опроміненні, так як поглинає кванти світла і одночасно є антиоксидантом; С-зона ( $\lambda = 280...200$  нм), або бактерицидна, викликає мутації, канцерогенез, має бактерицидний ефект. УФВ у діапазоні  $\lambda = 200...10$  нм призводить до дисоціації та іонізації молекул. Невеликі дози ультрафіолетового опромінення сприятливо діють на серцево-судинну, ендокринну, нейрогуморальну, дихальну системи. Однак молекулярний механізм такого впливу ультрафіолету в більшості випадків точно не відомий. Комбінована дія лікарських препаратів і ультрафіолетового опромінення А-зони широко використовується при лікуванні ряду шкірних захворювань, наприклад псоріазу, вітіліго. Однак така терапія має ряд побічних ефектів, наприклад, призводить до утворення еритеми, едеми. Фотосенсибілізатор гематопорфірін і його похідні використовують при лікуванні злоякісних пухлин, так як виявлено, що ці сполуки накопичуються виключно в пухлинних клітинах і відсутні в здорових. Сенсибілізатори підвищують чутливість пухлини до дії видимого світла, опромінення яких призводить до її загибелі. Цей метод фотохіміотерапії використовують при лікуванні пухлин як шкіри, так і внутрішніх органів. В останньому випадку опромінення проводиться за допомогою спеціальних світловодів. Вибіркове накопичення в пухлинах гематопорфірину використовують і при діагностиці онкологічних захворювань, так як люмінесценція цих молекул дозволяє визначити розміри пухлини. УФВ великої потужності надає бактерицидний ефект, тому використовується при стерилізації медичних інструментів і приміщень. Як джерело випромінювання застосовуються спеціальні бактерицидні лампи.

**Джерела оптичного випромінювання** також можна розділити на об'єкти природного і штучного походження. До природних джерел позаземного походження відносять Сонце та інші зірки, до джерел біосферного знаходження – природне загоряння, розряди в атмосфері, люмінесценцію. Основним природним джерелом оптичного випромінювання для біосфери є Сонце. Інтенсивність його випромінювання у верхніх шарах атмосфери становить  $1350 \text{ Вт/м}^2$ , а на широтах України на поверхні землі  $\sim 10^3 \text{ Вт/м}^2$ . Спектральні густини енергетичної світності Сонця (рис. 2.16) за межами земної атмосфери і на земній поверхні істотно розрізняються.

Близько 48 % енергії сонячного випромінювання припадає на видимий діапазон, 45 % - на ІЧ-діапазон, 6 % - на УФВ,  $\sim 1$  % - на інші частотні інтервали, в тому числі і НВЧ. Дозовану сонячну радіацію застосовують як сонцелікування (геліотерапія), а також як засіб загартовування організму.

До штучних джерел оптичного випромінювання належать: теплові, в тому числі лампи розжарювання (видиме і ІЧ-випромінювання); газорозрядні (видиме і ближнє УФІ); люмінесцентні (від ІЧ до УФВ-діапазону), світлодіодні (від ІЧ до видимого), лазерні (оптичні квантові генератори). Відмінною особливістю лазерного випромінювання є велика спектральна яскравість, монохроматичність, мала розбіжність, когерентність. Природні джерела випромінювання з характеристиками, близькими до лазерного,

відсутні. Застосування лазерного випромінювання в медицині: лазерна терапія (подразнення рефлекторним шляхом, прискорення загоєння ран), отримання голографічних зображень біоструктур, лазерна хірургія. У хірургії використовуються лазерні скальпелі, здатні приводити до високотемпературного руйнування тканини з одночасною коагуляцією білка. Такі операції протікають безкровно і широко практикуються при лікуванні відшарування сітківки, глаукоми (лазером проколюються мікроскопічні отвори діаметром 50...100 мкм, що викликає зниження внутрішньоочного тиску).

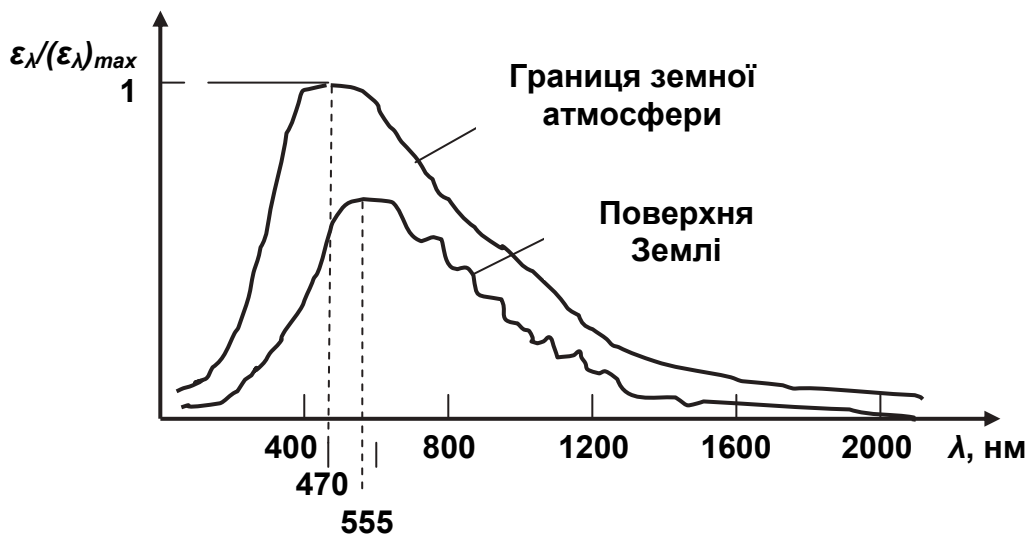


Рис. 2.16. Спектральні характеристики сонячного випромінювання

## 2.8. Дія іонізуючих випромінювань на біоб'єкти

Підвищення частоти електромагнітного випромінювання, а отже, і енергії кванта є умовою іонізації. *Іонізація* – це явище виникнення заряджених частинок в електрично нейтральній речовині в результаті взаємодії речовини з високоенергетичним випромінюванням. Критерієм, на підставі якого електромагнітне випромінювання може бути віднесено до іонізуючого, є виконання умови  $h \cdot \nu \geq A_i$ , де  $A_i$  – робота, що витрачається квантом на іонізацію. Наведена умова виконується для короткохвильового УФВ, рентгенівського- і гамма-випромінювань ( $\gamma$ ) (рис. 2.17).

Первинні фізичні процеси іонізації речовини квантами електромагнітного випромінювання приводять до відриву з електронних оболонок як мінімум одного електрона і перетворенню атома або молекули в позитивно заряджений іон. Енергетичний баланс взаємодії відображує рівняння

$$h\nu_{пер} = h\nu_{втор} + A_i + W_k,$$

де  $\nu_{втор}$  – частота кванта вторинного випромінювання;  $W_k$  – кінетична енергія зарядів, що утворилися (в основному електронів).

Можуть бути різні варіанти перерозподілу енергії первинного кванта. Якщо відсутнє вторинне випромінювання  $h\nu_{пер} = A_u + W_k$ , виникає внутрішній фотоефект. При  $h\nu_{пер} = h\nu_{втор}$  має місце когерентне розсіювання, а іонізація відсутня. Якщо виконується нерівність  $\nu_{пер} > \nu_{втор}$ , спостерігають некогерентне розсіювання, у цьому випадку іонізація імовірна.

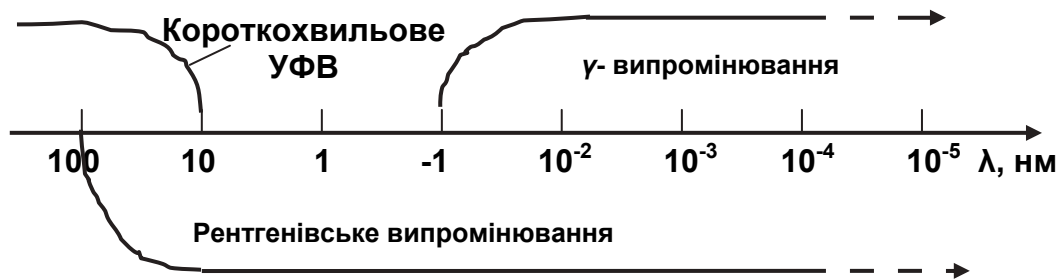


Рис. 2.17. Шкала іонізуючих випромінювань

Можливі випадки, коли квант випромінювання взаємодіє з вільними електронами або утвореними в результаті іонізації (фотоелектронами). Якщо умовно вважати електрон нерухомим у момент взаємодії з квантом випромінювання, то енергетичний баланс можна записати як

$$h\nu_{пер} + m_0c^2 = h\nu_{втор} + mc^2,$$

де  $m_0$  – маса спокою електрона;  $c$  – швидкість світла;  $m$  – динамічна маса,  $m = m_0/(1-V^2/c^2)^{1/2}$ ;  $V$  – швидкість електрона після взаємодії, причому обов'язкове виконання умови –  $\nu_{втор} < \nu_{пер}$ .

Для квантів  $\gamma$ -випромінювання вірогідні фотоядерні реакції, або ядерний фотоефект – випускання ядром протона, нейтрона, а також ділення ядер. Для ядерного фотоефекту енергія  $\gamma$ -кванта повинна бути не менше енергії зв'язку нуклонів в ядрі. При енергії  $\gamma$ -кванта, не менше за суму енергій спокою електрона і позитрона, можливе утворення пари «електрон - позитрон» ( $h \cdot \nu_\gamma \geq 1,02 \text{ MeV}$ ).

Розглянутим механізмам іонізації в речовині властиві багатофакторність і міграція проявів, які умовно на прикладі атома показано на рис. 2.18.

Поглинання іонізуючого випромінювання речовиною прийнято описувати аналогічно закону для оптичного діапазону феноменологічним способом:  $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ , де  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення, який інтегрально відображує втрати енергії, спричинені всіма розглянутими вище процесами. Біотканини частково прозорі для рентгенівського і  $\gamma$ -випромінювань, а ступінь поглинання залежить від частоти випромінювання і густини біологічної речовини. Це дозволило використовувати ці випромінювання для візуалізації внутрішньої будови біоб'єктів.

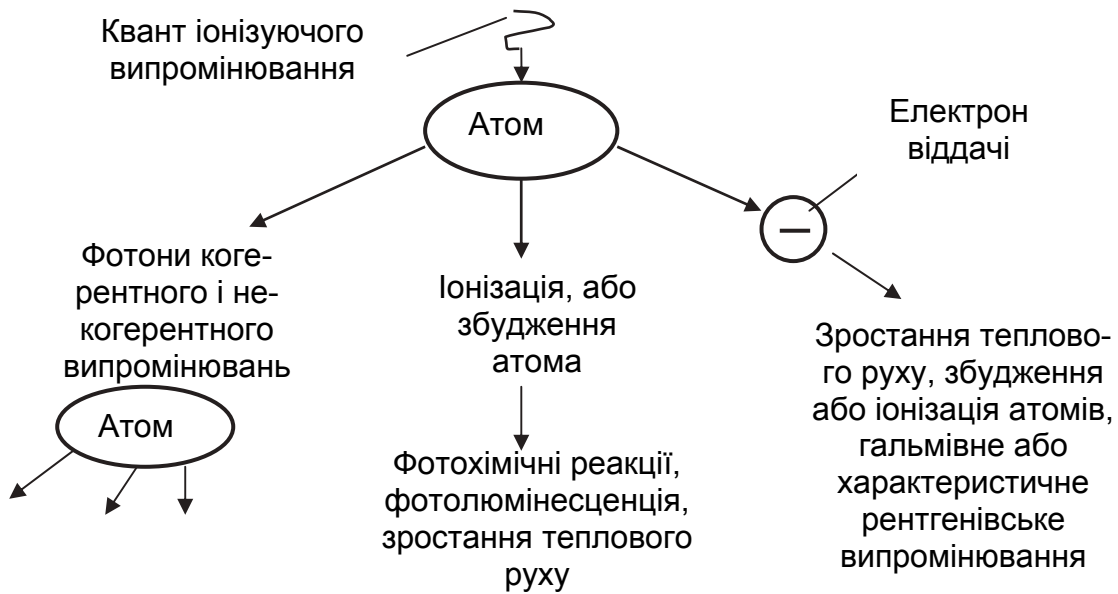


Рис. 2.18. Схема багатофакторної дії іонізуючого випромінювання

Потоки елементарних частинок також відносять до корпускулярної форми іонізуючого випромінювання. Подібно тому як фотони високих енергій мають властивості частинок, так і частинки малої маси мають хвильові властивості. Одним з механізмів взаємодії їх з речовиною є іонізація. Тому потоки елементарних частинок трактують як *корпускулярне іонізуюче випромінювання*. Користуючись відомим енергетичним еквівалентом маси

$$mc^2 = h\nu_{\text{част}} = h \cdot c / \lambda_{\text{част}}, \quad m = m_0 / (1 - V^2/c^2)^{1/2},$$

довжина хвилі елементарної частинки може бути подана як

$$\lambda_{\text{част}} = h/mc = h \cdot (1 - V^2/c^2)^{1/2} / m_0 c.$$

Якщо  $c \gg V$ , то  $\lambda_{\text{част}} \approx h / m_0 c$  – комптонівська довжина хвилі. Для електрона така довжина хвилі становить  $\lambda_e = h/m_e \cdot c \approx 2,4 \cdot 10^{-3}$  нм, для протона –  $\lambda_p \approx 1,32 \cdot 10^{-6}$  нм, для нейтрона –  $\lambda_n \approx 1,31 \cdot 10^{-6}$  нм. Усі елементарні частинки залежно від маси, вираженої в електронвольтах, підрозділяють на три класи: лептони (0...100 МеВ, електрони, позитрони), мезони (100...1000 МеВ, частинки з часом життя  $10^{-8}$ ... $10^{-16}$  с), баріони (з енергією понад 1000 МеВ, протони, нейтрони,  $\alpha$ -частинки).

Однією з важливих характеристик взаємодії корпускулярного іонізуючого випромінювання з речовиною є довжина вільного пробігу в речовині. Для потоків  $\alpha$ -частинок довжина вільного пробігу в повітрі становить одиниці сантиметрів, для біоструктур – доли міліметрів.  $\beta$ -випромінювання (потоки електронів) проникають у біотканини на глибину 10...15 мм.

**Дози іонізуючого випромінювання.** Незалежно від конкретної природи іонізуючого випромінювання в результаті опромінення речовині передається певна кількість енергії. Для вимірювання фізичного або біологічного ефекту введені одиниці – дози іонізуючого випромінювання.

*Поглинена доза випромінювання* – відношення енергії іонізуючого випромінювання, що поглинається речовиною, до маси цієї речовини. Одиниця поглиненої дози грей ( $[D] = \text{Гр}$ ) відповідає дозі випромінювання, при якій опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія 1 Дж,  $1 \text{ Гр} = \text{Дж/кг}$ . Потужність поглиненої дози  $N = D/t$ ,  $[N] = \text{Гр / с}$ . Позасистемна одиниця поглиненої дози випромінювання – рад (Radiation Absorb ved Dos),  $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 100 \text{ ерг/г}$ .

Оскільки результат дії іонізуючого випромінювання залежить не тільки від величини поглиненої дози, але і від властивостей речовини, параметр  $D$  неоднозначно характеризує результат дії іонізуючого випромінювання на речовину. Іонізуюче випромінювання характеризується насамперед своєю властивістю іонізувати середовище. Кількісно цю характеристику відображає експозиційна доза  $D_{\text{екс}}$ . Експозиційна доза випромінювання являє собою характеристику рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання, що оцінюється за ефектом іонізації сухого атмосферного повітря  $D_{\text{екс}} = q/m$ . Одиницею експозиційної дози є кулон на кілограм (Кл/кг) – експозиційна доза рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання, при якій сума електричних зарядів  $q$  одного знака, утворених в масі 1 кг повітря, дорівнює 1 Кл. Найчастіше експозиційна доза вимірюється у позасистемних одиницях – рентгенах ( $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл / кг}$ ). Потужність експозиційної дози випромінювання  $N_{\text{екс}} = D_{\text{екс}}/t$ ,  $[N_{\text{екс}}] = \text{А/кг}$ . Використовуються також і позасистемні одиниці потужності експозиційної дози: рентген у секунду (Р/с),  $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$ ; рентген у хвилину –  $1 \text{ Р/хв} = 4,30 \cdot 10^{-6} \text{ А/кг}$ ; рентген на годину –  $1 \text{ Р/г} = 7,17 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$ .

Експериментальному вимірюванню піддається експозиційна, а не поглинена доза, проте між ними існує зв'язок  $D = f \cdot D_{\text{екс}}$ , де  $f$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей речовини, що опромінюється, та виду іонізуючого випромінювання. Якщо як міру поглиненої дози взяти рад, експозиційної – рентген, а іонізуючим випромінюванням є рентгенівське,  $\gamma$  або  $\beta$ , то існує важлива для практики відповідність  $1 \text{ рад} = f \cdot 1 \text{ Р}$ , причому для води і м'яких біологічних тканин  $f = 1$ , для кісткових структур  $f = 1 \dots 4,5$ , для повітря  $f = 0,88$ .

Різні види іонізуючих випромінювань навіть за однакової поглиненої дози викликають різні біологічні прояви. Для врахування цього явища був уведений коефіцієнт якості  $K$ . Цей коефіцієнт показує, у скільки разів ефективність біологічної дії іонізуючого випромінювання цього виду більше рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання при однаковій поглиненій дозі. Коефіцієнт якості встановлюють на основі дослідних даних. Для рентгенівського,  $\gamma$ - і  $\beta$ -випромінювань  $K = 1$ , для теплових нейтронів ( $\sim 0,01 \text{ еВ}$ )  $K = 3$ , нейтронів ( $5 \text{ еВ}$ )  $K = 7$ , нейтронів ( $0,5 \text{ еВ}$ ), протонів  $K = 10$ ,  $\alpha$ -випромінювання

$K = 20$ . Поглинена доза разом з коефіцієнтом якості дає більш точне уявлення про біологічну дію іонізуючого випромінювання, тому величину  $D \cdot K$  використовують як єдину міру цієї дії і називають *еквівалентною дозою* випромінювання ( $D_{\text{екв}} = D \cdot K$ ). Оскільки  $K$  – безрозмірний коефіцієнт, еквівалентна доза випромінювання має ту ж розмірність, що і поглинена доза випромінювання, але отримала назву зіверт ( $[D_{\text{екв}}] = \text{Зв}$ ). Позасистемна одиниця еквівалентної дози – біологічний еквівалент рентгена (1 бер =  $10^{-2}$  Зв). Еквівалентна доза в берах дорівнює дозі випромінювання в радах, помноженій на коефіцієнт якості. Таким чином, при впливі рентгєнівського,  $\gamma$ - і  $\beta$ -випромінювань на м'які (водомісткі) тканини можна прийняти 1 бер = 1 рад = 1Р.

**Біологічна дія іонізуючих випромінювань** напряду пов'язана з утворенням речовин з високою хімічною активністю. Тому до основних процесів належать хімічні перетворення речовини, що отримали назву радіолізу. Для водомістких біотканин дію іонізуючого випромінювання пов'язують з продуктами радіолізу води (іонів і радикалів  $H^{\cdot}$ ):



Взаємодія молекул органічних сполук з іонізуючим випромінюванням викликає утворення збуджених молекул, іонів, радикалів, перекису:



З наведених реакцій видно, що ці високоактивні в хімічному відношенні сполуки будуть взаємодіяти з іншими молекулами біологічної системи, що призведе до порушення мембран, клітин і функцій всього організму.

Для біологічної дії іонізуючого випромінювання також притаманний ефект міграції – розбіжність області впливу випромінювання і місця біологічного прояву, а також прихований (латентний) період розвитку патології. Чутливість біотканин до іонізуючого опромінення залежить від їх фізіологічного стану і структури. У порядку пониження радіочутливості біотканини розташовані в такий спосіб: гемопоетичні тканини (кровотворні тканини), кишковий епітелій, гонади (залози), епітелій шкіри, тканини кришталика, фіброзні (з'єднувальні) тканини, хрящові тканини, кісткові тканини, м'язові тканини, нервові тканини. Таким чином, найбільш уразливі до іонізуючої дії тканини з інтенсивним обміном речовин.

Рівень біологічної дії іонізуючого випромінювання залежить від дози іонізуючого випромінювання, гальмівної здатності біоречовини, умов опромінення і розподілу поглиненої дози в організмі, часу опромінення, вибіркового враження критичних органів, функціонального стану організму перед опроміненням. Дію різних поглинених доз іонізуючого випромінювання на людину відображує така послідовність:

- <100 рад (малі дози) – спостерігається тимчасова зміна механізму кровотворення, можливо самовідновлення організму;
- 150...400 рад – розвивається променева хвороба легкої і середньої тяжкості;
- 400...600 рад – важка форма променевої хвороби;
- > 600 рад – абсолютно смертельна доза;
- > 5000 рад – блискавична форма променевої хвороби;
- > 20000 рад – загибель організму «під променем».

При дозах 100...1000 рад домінує кістково-мозковий механізм розвитку променевої хвороби, а при дозах 1000...5000 рад - кишковий механізм ураження.

Виділяють часові стадії дії іонізуючого випромінювання на біооб'єкти:

- фізична – поглинання енергії, іонізація або збудження молекул ( $10^{-15}$ ... $10^{-13}$  с);
- фізико-хімічна – перерозподіл надлишкової енергії, утворення іонів і радикалів ( $10^{-13}$ ... $10^{-11}$  с);
- хімічна – протікання біохімічної реакції ( $10^{-11}$ ... $10^{-6}$  с);
- загальнобіологічна – зміна клітинних структур, функціональних характеристик біотканин (від одиниць секунд до декількох років).

*Природні джерела іонізуючого випромінювання:* космічні промені (включаючи іонізуючу компоненту сонячного випромінювання), радіоактивність надр землі і води, радіоактивність ядер речовин, що входять до складу біотканин. Ці джерела створюють природний фон, що відповідає еквівалентній дозі приблизно 125 мбер.

*Штучні джерела іонізуючих випромінювань:* фонового характеру (технологічні процеси оброблення і збагачення корисних копалин), структури ядерної енергетики, технічні засоби цільового призначення (наукові і медичні дослідження, неруйнівний контроль, рентгенівська апаратура), побутова техніка (елементи, що містять радіоактивні речовини, монітори на основі електронно-променевих трубок). Гранично допустимою еквівалентною дозою при професійному опроміненні вважається доза 5 бер протягом року.

*Медична радіобіологія* (наука про використання іонізуючих випромінювань у медицині) містить такі напрями застосування іонізуючих випромінювань: рентген- і  $\gamma$ -діагностика, радіоізотопна діагностика, променева терапія (дія іонізуючих випромінювань на організм з лікувальною метою).

*Радіаційна гігієна* вивчає вплив іонізуючого випромінювання на здоров'я людини з метою розроблення методів протирадіаційного захисту.

*Дозиметрія* – отримання кількісних характеристик взаємодії іонізуючих випромінювань з об'єктами, визначення допустимих доз.

*Захист від іонізуючих випромінювань* передбачає три способи: часом, відстанню, матеріалом. Якщо джерело іонізуючого випромінювання вважати точковим, то для поглиненої дози справедливий вираз



$$D = (I \cdot t) / r^2,$$

де  $I$  – інтенсивність випромінювання;  $r$  – відстань до джерела.

Звідси випливає, що доза опромінення буде тим менше, чим далі від джерела знаходиться біооб'єкт і чим менше триває опромінення за часом. Захист матеріалом залежить від виду випромінювання. Так, для захисту від  $\alpha$ -випромінювання достатньо кількох сантиметрів повітря або аркуша паперу, від  $\beta$ -випромінювання – шару алюмінію, органічного скла в кілька сантиметрів, від рентгенівського і  $\gamma$ -випромінювання потрібен захист з металу з максимально можливим атомним номером (свинець). Для захисту від швидких нейтронів спочатку гасять їх швидкість у водомістких речовинах, а потім використовують кадмій як поглинач повільних нейтронів.

### Контрольні запитання

1. Які властивості біосередовища визначають вплив електромагнітних полів?
2. Електростатичне поле та його використання в медицині.
3. Від яких параметрів електричних струмів залежить ступінь подразнення біотканин?
4. Які електричні струми використовують у медицині для створення теплових ефектів?
5. Порівняйте теплову дію на біоструктури змінних електричних і магнітних полів.
6. Використання статичних і низькочастотних магнітних полів у медицині.
7. Які ефекти характеризують поширення електромагнітних хвиль у біотканинах? Специфіка дії випромінювань діапазону НВЧ.
8. Для якої кількісної оцінки використовують показник SAR?
9. Які основні природні джерела електромагнітних полів?
10. Фізичні явища дії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону на біологічні об'єкти та їх використання в біології і медицині.
11. Види іонізуючих випромінювань, кількісне оцінювання їх дії на біологічні об'єкти.
12. Які біотканини найбільш уразливі до іонізуючих випромінювань?

### 3. ДІЯ АКУСТИЧНИХ, ТЕПЛОВИХ І ГРАВІТАЦІЙНИХ ПОЛІВ

З огляду на те, що в попередньому розділі на прикладі електромагнітних полів було досить докладно розглянуто підходи аналізу взаємодії фізичного поля і біооб'єкта, то в цьому розділі зупинимося тільки на основних положеннях взаємодії, що належать до акустичних, теплових і гравітаційних полів.

#### 3.1. Акустичні поля і біологічні об'єкти

Поняття біологічного об'єкта і його життєдіяльності нерозривно пов'язані зі сферою існування. За цією ознакою всі організми можна розділити на такі, що живуть у повітряному, водному та змішаному (ґрунт, мул) середовищах. Макроскопічний механізм енергетичної взаємодії біооб'єкта з речовиною зовнішнього середовища характеризується полем сил механічного походження. Тому *акустичним полем* (у широкому сенсі) називають силове поле, що характеризує механічну взаємодію фізичних тіл. Внаслідок дії акустичного поля на біооб'єкт, останній отримує *деформацію* – зміну взаємного розташування точок тіла, що призводить до зміни його форми і розмірів. Деформація називається пружною, якщо після припинення дії сил акустичного поля об'єкт повертається до вихідної форми. *Пружна деформація* зумовлена виникненням пружних сил, які врівноважують зовнішні сили, прикладені до тіла. Величину, що кількісно дорівнює пружній силі, яка припадає на одиницю площі тіла, називають *механічною напруженою*

$$\sigma = dF_{np}/dS.$$

Ступінь зміни форми тіла в будь-якому напрямку  $x$  характеризує відносна деформація  $\varepsilon = \Delta x / x$ . У загальному випадку  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  є нелінійною залежністю. Пружні деформації, притаманні біотканинам, називають каучукоподібною еластичністю. Це пов'язано з тим, що в досить великому інтервалі відносних деформацій для біотканин виконується закон Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

де  $E$  – модуль Юнга.

Для біотканин також характерна *повзучість* – деформація, спричинена тривалістю дії постійного навантаження. Механізм повзучості в біополімерах пояснюють розпрямленням макромолекул під дією зовнішнього навантаження. При цьому відбуваються процеси, аналогічні протіканню в'язкої рідини, тому повзучість називають *в'язкою деформацією*:

$$\sigma = \eta \cdot d\varepsilon / dt,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості середовища.

Величина деформування живого об'єкта визначається механічними властивостями окремих видів біотканин. Під механічними властивостями біотканин розуміють два їх різновиди. До першого належать процеси *біологічної рухливості* (скорочення м'язів, поділ клітин, ріст біомаси). Ці процеси мають біохімічний механізм енергетичного забезпечення. Умовно цю групу називають *активними механічними властивостями*. До другої групи належать *пасивні механічні властивості*, що характеризують деформованість біотканин під дією сил акустичних полів. Тому наведені вище закономірності в основному пов'язані з пасивними механічними властивостями біотканин.

Біологічна тканина – це композиційний матеріал, утворений об'ємним поєднанням хімічно різнорідних компонентів. Наприклад, кісткова тканина наполовину (0,5 об'єму) складається з неорганічної речовини гідроксил-апатиту, а інша половина – з органічного матеріалу, головним чином – колагену (високомолекулярного з'єднання, волокнистого білка, що має високу еластичність). Композиційна будова кісток надає їм потрібні механічні властивості: твердість, пружність, міцність. Модуль Юнга для кісткової тканини  $\sim 10$  ГПа, а межа міцності  $\sigma_{max} = 100$  МПа.

Шкіра складається з волокон колагену (75 %), еластину (4 %, як і колаген, – це волокнистий білок) і основної тканини – матриці (21 %). Для колагену  $E = 10 \dots 100$  МПа,  $\sigma_{max} = 100$  МПа,  $\varepsilon_{max} = 10$  %; для еластину  $E = 0,1 \dots 0,6$  МПа,  $\sigma_{max} = 5$  МПа,  $\varepsilon_{max} = 200 \dots 300$  %. Ці характеристики підтверджують, що шкіра має високоеластичні властивості, добре розтягується і подовжується.

Приклади застосування пасивних механічних властивостей біотканин у медицині: заміна природних тканин штучними (протезування), вирівнювання і подовження кісток (травматологія та ортопедія). У судовій медицині визначають стійкість біоструктур до деформацій і ударів, у спортивній і авіаційній медицині – гранично допустимі напруги, перенавантаження.

Як було сказано вище, механічна дія навколишнього середовища на біооб'єкти характеризує силове поле. Величину і напрям сил цього поля визначають сили тяжіння і теплового руху частинок середовища (молекул повітря, рідини). Для макроскопічного опису сил впливу окремих частинок навколишнього середовища на об'єкт використовують таку фізичну величину, як *тиск*

$$P = F_n / S,$$

де  $F_n$  – сила, нормально прикладена до поверхні площею  $S$ .

Для повітряного середовища існування біооб'єктів тиск становить

$$P_{\text{пов}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{терм}},$$

причому  $P_{\text{атм}} = \rho gh$ , де  $h$  – висота над поверхнею землі;  $\rho_n = \rho_n(h)$  – густина повітря (залежить від висоти);  $P_{\text{терм}} = \sum P_{i \text{ терм}}$ ,  $P_{i \text{ терм}} = \rho_i RT / \mu$ , де  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $\mu$  – молярна вага  $i$ -ї газової компоненти повітря.

Опис квазістатичного акустичного поля повітряного середовища необхідно також доповнити силою Архімеда

$$F_a = \rho V_T g,$$

де  $V_T$  – об'єм тіла об'єкта.

Більшою мірою результуючий тиск повітряного середовища визначається атмосферним тиском, що істотно залежить від висоти над поверхнею Землі (рис. 3.1).

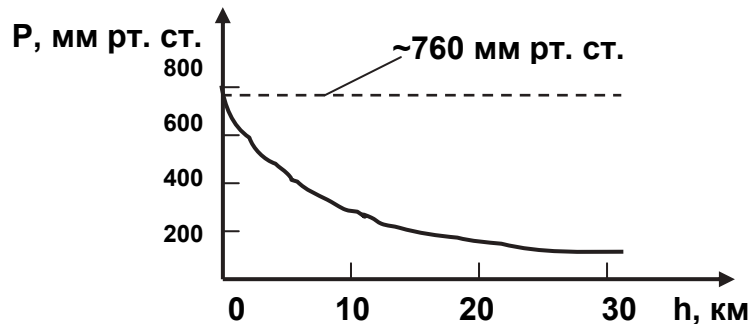


Рис. 3.1. Залежність атмосферного тиску від висоти

Аналогічні міркування можна навести і для об'єктів з водною або змішаною сферами існування.

Вплив на організм підвищеного або зниженого тиску навколишнього середовища розглянемо на прикладі людини. Дію підвищеного тиску пов'язують з компресійним і проникаючим ефектами.

*Проникаючий ефект* зумовлений токсичною дією кисню та інших газів повітряної суміші, концентрація яких у крові збільшується при підвищенні зовнішнього тиску. При збільшенні тиску до 4...8 атмосфер у людини спостерігається наркотична реакція.

*Компресійний ефект* – загальне об'ємне стиснення, зумовлене рівномірним підвищенням сил механічного тиску на органи і тканини. В результаті компресії змінюються об'єми повітряно-містких порожнин, виникають градієнти тиску всередині організму, як наслідок порушуються функції дихання, слуху, кровообігу.

Вплив зниженого тиску зумовлений розширенням газів, що містяться в порожнинах і біотканинах організму, наслідком чого є «висотна» хвороба і декомпресивні розлади. Особливо небезпечно для організму людини швидкоплинне зниження тиску навколишнього середовища. Це явище отримало назву *вибухової декомпресії*. При вибуховій декомпресії страждають насамперед легені, слухові шляхи, шлунково-кишковий тракт, пазухи носа.

*Баротравма* – пошкодження, спричинене різким перепадом тиску навколишнього середовища.

*Баротерапія* – застосування з лікувальною метою підвищеного або зниженого порівняно з атмосферним зовнішнього тиску.

Перелічені вище явища описують в основному дію статичних і квазі-статичних акустичних полів. Питаннями динамічних деформацій займається *акустика* – область фізики, що вивчає пружні коливання в середовищах. Виділяють два її напрямки: *фізичну акустику*, що вивчає особливості поширення пружних хвиль у середовищах, у тому числі й біологічних; *фізіологічну акустику*, що вивчає будову і роботу звукосприймаючих і звукоутворюючих органів у людини і тварин.

Розглянемо найбільш загальні положення фізичної акустики стосовно біологічних об'єктів. *Акустична хвиля* – це процес поширення механічної деформації в речовині. Основною умовою поширення акустичної хвилі є наявність пружних властивостей середовища. Існують два основних різновиди виникаючих хвиль: *поздовжні* (напрямок деформації збігається з напрямком поширення хвилі), *поперечні* (напрямок деформації перпендикулярний напрямку поширення хвилі). Обидва види акустичних хвиль можуть виникати в біологічних середовищах. Важливим параметром хвильового процесу є його швидкість.

Швидкість поздовжніх хвиль у рідких (водомістких біотканинах) і газоподібних середовищах визначається виразом  $c = (K / \rho)^{1/2}$ , де  $\rho$  – густина середовища;  $K = K(E, \mu)$  – модуль об'ємної пружності;  $E$  і  $\mu$  – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона. Швидкість поперечних хвиль у твердих середовищах  $c = (G / \rho)^{1/2}$ , де  $G$  – модуль зсуву. Тиск, що створюється хвилею, залежить від швидкості  $V$  коливань частинок середовища щодо недеформованого положення і визначається як  $P = \rho c V$ . Для взаємодії пружних хвиль (особливо звукового і ультразвукового діапазонів) з біосередовищем справедливі закони геометричної оптики. Умови проникнення хвилі з одного середовища в інше, відбиття, заломлення на межі розділу середовищ визначаються питомим акустичним імпедансом (хвильовим опором середовища)  $\rho c$ . Якщо  $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$ , відбиття на межі поділу двох середовищ відсутнє, якщо  $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$ , відбувається майже повне відбиття хвилі. Якщо інтенсивність падаючої хвилі  $I_1$ , а проникаючої  $I_2$ , то величина  $\beta = I_1 / I_2$  називається коефіцієнтом проникнення акустичної хвилі. Релей

показав, що коефіцієнт  $\beta$  можна виразити через акустичний імпеданс середовищ, і для випадку нормального падіння акустичної хвилі

$$\beta = 4 (\rho_1 c_1) / (\rho_2 c_2 (\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 + 1)^2).$$

Коефіцієнт проникнення акустичних хвиль з повітря ( $\rho_{пов} \cdot c_{пов} = 400 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ) у м'які тканини ( $\rho_{тк} \cdot c_{тк} = 1440 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ) становить  $\beta = 0,122 \%$ , що свідчить про відносну захищеність тканин живих організмів від хвильових акустичних полів.

Енергія акустичної хвилі, що поширюється в середовищі, аналогічно оптичному випромінюванню, частково поглинається і розсіюється, а частково відбивається на границях розділу біотканин з різними акустичними імпедансами. Згадані вище явища широко застосовуються в медицині в ультразвуковому діапазоні акустичних хвиль. Це зумовлено насамперед тим, що при середній швидкості поширення акустичних коливань у біотканинах  $1530 \text{ м/с}$  довжина пружної хвилі на частотах  $1 \dots 100 \text{ МГц}$  становить  $1,5 \dots 0,015 \text{ мм}$  відповідно. Тому на основі процесу відбиття пружних коливань від внутрішніх акустично неоднорідних біоструктур побудовані системи ультразвукової діагностики з просторовою роздільною здатністю, порівнянною з довжиною хвилі. Якщо ж відбиваюча поверхня рухлива, то згідно з ефектом Доплера відбувається зміна частоти відбитого сигналу пропорційно швидкості і напрямку її переміщення. Поглинання акустичних хвиль зумовлено внутрішнім тертям частинок і теплопровідністю біосередовищ і підпорядковується експоненційній залежності

$$I(x) = I_0 e^{-\gamma x},$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт поглинання;  $x$  – глибина проникнення, причому  $\gamma \sim \omega^2$ .

Таким чином, чим вище частота коливань, тим більше енергії виділяється в середовищі, що також пояснює використання ультразвуку для енергетичного і теплового впливів на біосередовища.

Розсіювання акустичних хвиль зумовлено акустичною неоднорідністю біосередовищ.

*Вібрація.* У біології та медицині вібрацією називають механічні коливальні рухи тіла, окремих органів і тканин під дією зовнішніх акустичних полів. Вібрація – це складні періодичні (квазіперіодичні) механічні коливання, що характеризуються широким амплітудним і частотним спектрами. Частотний спектр вібрації охоплює діапазон від інфранизьких до ультрависоких частот. Основний біологічний ефект – це інтенсифікація біофізичних і біохімічних процесів.

*Вібраційна чутливість* – властивість організму сприймати дію динамічних акустичних полів. Віброчутливість забезпечують переважно механорецептори, що розташовані в поверхневих і глибших шарах шкіри. Нега-

тивна дія вібрації на людину характеризується вібраційною хворобою – виникненням ділянок застійного подразнення, спазматичних явищ в судинах, порушень в опорно-руховому апараті. *Вібротерапія* – вплив з лікувальною метою на людину механічних коливань низької частоти й амплітуди.

*Інфразвук* - це низькочастотні акустичні коливання, які не сприймаються слуховим апаратом людини (зазвичай до 20 Гц). Джерелами інфразвуку можуть бути як природні явища (морські хвилі, землетрус, грозові розряди та ін.), так і явища штучного походження (вибухи, рух транспортних засобів, робота механізмів та ін.). Інфразвук часто супроводжується чутним шумом, наприклад в автомашині, тому виникають труднощі при вимірюванні і дослідженні власне інфразвукових коливань. Для інфразвуку характерне слабе поглинання різними середовищами, тому він поширюється на значну відстань. Оскільки довжина хвилі інфразвуку більше, ніж у чутних звуків, то інфразвукові хвилі краще дифрагують і проникають у приміщення, огинаючи перешкоди. Інфразвук спричиняє негативний вплив на функціональний стан ряду систем організму: з'являються втома, головний біль, сонливість, роздратування та ін. Уважається, що первинний механізм дії інфразвуку на організм має резонансне походження. Резонанс настає при близьких значеннях частоти інфразвукових хвиль і частоти власних коливань біоструктур. Частота власних коливань тіла людини в положенні «лежачи» становить 3...4 Гц, положенні «стоячи» – 5...12 Гц, частота власних коливань грудної клітини – 5...8 Гц, черевної порожнини – 3...4 Гц, що відповідає частоті інфразвуків. Виникаючі механічні напруги в біотканинах під час резонансу можуть перевищити межу міцності або значно порушити функціонування окремих органів. При низькій інтенсивності, але довготривалій дії інфразвуку у людини виникає комплекс неприємних відчуттів: запаморочення, болі в області живота, почуття психологічного пригнічення і страху, нудота, утруднене дихання. Повного захисту від шкідливої дії інфразвукових коливань немає, і боротьба з ними полягає лише в усуненні причин виникнення цих коливань.

*Звук, або звукові коливання* це – акустичні хвилі в газах, рідинах і твердих тілах, що сприймаються людським вухом в діапазоні 20...20000 Гц. Усі звуки прийнято поділяти на тони, шуми і звукові удари. Енергетичною характеристикою звуку як акустичної хвилі є інтенсивність  $[I] = \text{Вт}/\text{м}^2$  або звуковий тиск  $[P] = \text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ . *Поріг чутності* – найменша звукова дія, при якій звук сприймається органами слуху,  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  або  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт} / \text{м}^2$ . *Поріг больового відчуття* – найбільша інтенсивність або ефективний тиск звуку, що сприймається без больових відчуттів,  $I_{\text{max}} = 10 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ,  $P_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ . Обидва пороги визначаються на частоті 1000 Гц і є базовими для аудіометричних досліджень. Сприйняття рівня звуку людиною характеризує *гучність*. Це суб'єктивна оцінка енергетичного впливу звукової хвилі на органи слуху. У медичній діагностиці існує ряд методів, основаних на звукових явищах. *Аускультация* – діагностика

захворювань, основана на прослуховуванні звуків, які супроводжують функціонування організму (наприклад, дихання, серцебиття). *Перкусія* – вислуховування звучання окремих частин тіла при їх простукуванні. *Аудіометрія* – метод вимірювання гостроти слуху у людини.

### 3.2. Дія теплових полів на біологічні об'єкти

Розглянуті раніше фізичні поля – електромагнітне і акустичне – створюють певний енергетичний вплив на біооб'єкт. Енергія, що виділяється при цьому, врешті-решт, в основному переходить у теплову. В середовищі виникає градієнт температур, який приводить в дію як чисто фізичні, так і фізіологічні механізми перерозподілу тепла. Тому *теплове поле* – це фізичне явище, що характеризується розподілом температури в речовині і дія якого на фізичні об'єкти визначається механізмами теплопередачі. *Температура* – це фізична величина, що характеризує ступінь нагрітості речовини. На мікроскопічному рівні абсолютну температуру речовини визначає енергія хаотичного руху молекул і атомів у рідині і газі, у твердій речовині – енергія коливань кристалічної решітки, а в полімерах – енергія рухливості макромолекул. Оскільки в першому розділі вже були порушені питання термодинаміки живих об'єктів, зупинимось на фізичних механізмах теплообміну з навколишнім середовищем. За порівняльним критерієм «температура тіла – температура навколишнього середовища» усі живі істоти діляться на два види. *Пойкілотермні* (холоднокровні) тварини – це організми з непостійною температурою тіла, яка близька до температури навколишнього середовища (усі види найпростіших, безхребетні, риби, земноводні, плазуни). *Гомойотермні* (теплокровні) тварини – це організми з відносно постійною температурою тіла (птахи, тварини, ссавці, людина). У гомойотермних організмах умовно розрізняють дві температурні зони – оболонку і ядро. Оболонку становлять поверхневі структури (шкіра, сполучна тканина), ядро – кров, внутрішні органи і системи.

Температура ядра вище, ніж оболонки, і відносно стабільна, температура оболонки нижче температури ядра і відрізняється на різних ділянках оболонки.

Теплове поле живого організму визначається процесами теплопродукції і теплообміну із середовищем проживання (рис. 3.2).

При переважанні процесів теплопродукції над процесами тепловіддачі відбувається перегрівання організму (*гіпертермія*), в іншому випадку – охолодження організму (*гіпотермія*). Якщо в процесі охолодження температура біоструктур стає нижче граничної гіпотермічної, то такий їх стан відносять до *кріотермії*. У гомойотермних організмах особливо сильно виражений механізм гомеостазу теплового поля ядра (рис. 3.3).

Температурні границі життя організмів визначаються в основному життєздатністю білкових і клітинних структур. До дії високих температур



особливо чутливі білкові структури. Для переважної більшості земних організмів верхня температурна межа життя становить 60...70 °С. При цих температурах білки згортаються і організм гине. Є винятки: водорості в гарячих озерах живуть при 90 °С, а деякі мікроорганізми при підвищеному атмосферному тиску здатні жити при температурах ~ 150 °С. Гранично можливою температурою білкового життя вважається значення не більше 200 °С.

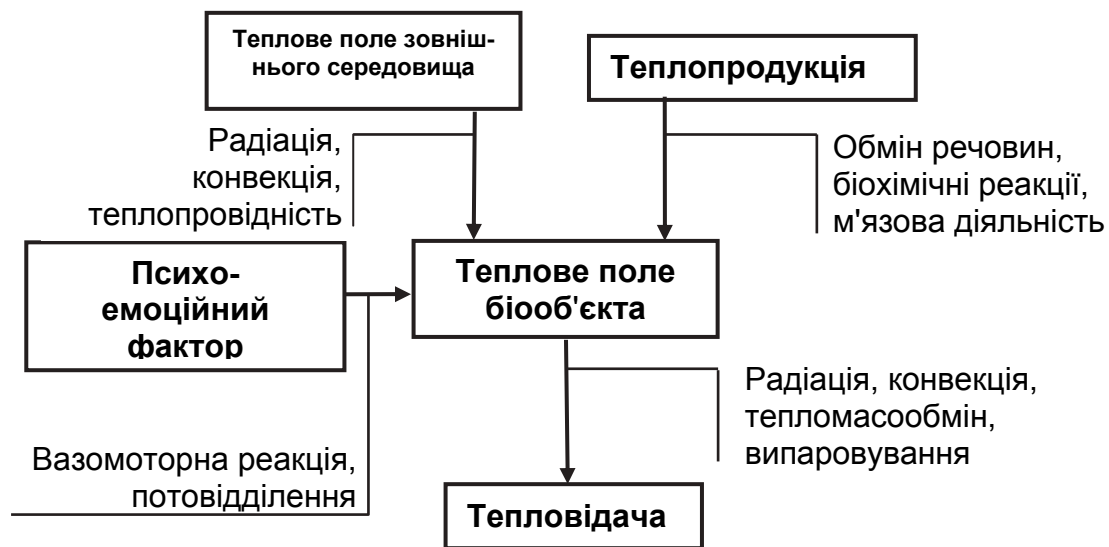


Рис. 3.2. Схема формування теплового поля біоб'єкта

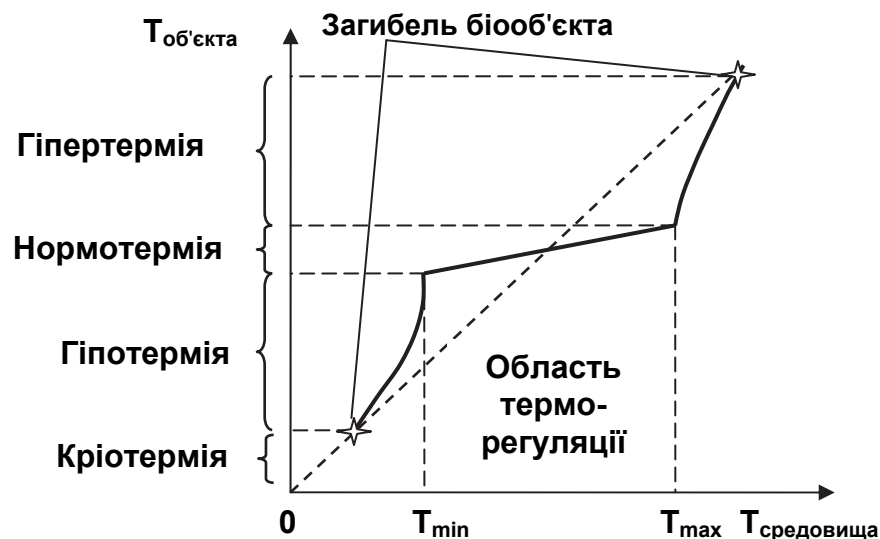


Рис. 3.3. Терморегуляція для гомойотермних організмів

Дія низьких температур призводить до кристалізації води і руйнування клітинних мембран при об'ємному розширенні. Однак пристосованість деяких форм життя до низьких температур виняткова. Відомо, що мікроорганізми у вигляді спор, цист, а деякі і в активному стані переносять температури  $\sim 3...4$  К.

Як лікувальні методи використовується вплив теплових полів на людину. *Піротерпія* – метод лікування за допомогою створення штучної гіпертермії. Пусковим механізмом реакції організму на гіпертермію є подразнення шкірних і судинних терморецепторів з подальшою реакцією системи терморегуляції. *Гіпотермія штучна* – охолодження тіла пацієнта з метою зниження метаболічних процесів і підвищення стійкості організму до гіпоксії (кисневого голодування) і травм. *Кріохірургія* – відторгнення патологічних тканин після кріотермічної обробки.

Природні теплові поля в біосфері в основному утворюються внаслідок поглинання глобальними структурами Землі електромагнітного випромінювання Сонця. Штучні теплові поля є результатом технічної діяльності людини. Формування раціобіосфери призводить до локальних змін природних теплових полів.

### 3.3. Біологічні біоб'єкти у гравітаційному полі

*Гравітаційне поле* (поле сил тяжіння) – це форма взаємодії фізичних тіл, які мають масу. Векторною характеристикою гравітаційного поля в межах біосфери Землі є його напруженість

$$g = P / m,$$

де  $m$  – маса об'єкта;  $P = F + F_{\text{ц}}$  – сила ваги, що діє на об'єкт, і є сумою векторів сили тяжіння і відцентрової сили (рис. 3.4) .

Сила тяжіння

$$F = f \cdot (m \cdot M / R^2),$$

де  $f$  - гравітаційна стала;  $M$  – маса Землі;  $R$  – радіус Землі (точніше, відстань від об'єкта біосфери до центру Землі).

Відцентрова сила

$$F_{\text{ц}} = m \cdot \omega^2 \cdot R \cos \varphi,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання Землі.

У більшості досліджень оперують не терміном напруженості гравітаційного поля, а поняттям *прискорення вільного падіння*. Строго кажучи,

$g = g(\varphi, h)$ , де  $h$  – висота розташування об'єкта над поверхнею Землі. Однак якщо  $h \ll R$ , то в розрахунках використовують округлене значення  $g = 9,81 \text{ м / с}^2$ .

Еволюція біологічних об'єктів відбувалася безпосередньо під впливом поля сил тяжіння. Це визначило будову, механізми пересування, способи орієнтації живих організмів. У людини та інших вищих тварин виник такий орган, як *вестибулярний апарат* – елемент нейродинамічної системи людини, який сприймає і аналізує інформацію про стан і рух тіла в гравітаційному полі Землі. Він розташований у внутрішньому вусі і складається з трьох взаємно перпендикулярних півколових каналів. На внутрішній поверхні півколових каналів знаходяться групи клітин, що утворюють рецептори гравітації. Порожнини цих каналів заповнені желеподібною рідиною – ендолімфою, яка виконує функцію пружного середовища. *Заколисування* – патологічний вплив на вестибулярний апарат людини активних і пасивних переміщень тіла в полі гравітаційних сил.

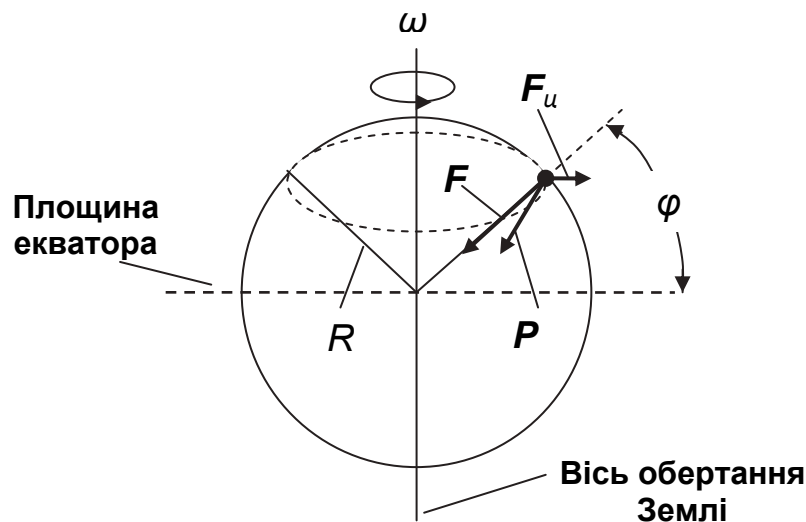


Рис. 3.4. Структура сил тяжіння в біосфері

У звичайних умовах на біоб'єкт діють сила тяжіння і сила реакції опори  $N$ . При відсутності прискорення ці сили дорівнюють одна одній і протилежно спрямовані. Такий стан, як правило, природний для малорухомих об'єктів. При прискореному русі системи «об'єкт - опора» можуть виникнути особливі стани – перевантаження і невагомість.

*Перевантаження* показує, у скільки разів сила, що спричиняє прискорення або гальмування руху тіла, а отже, і сила реакції опори більше сили тяжіння. *Перевантаження* оцінюється коефіцієнтом

$$\eta = N / (mg).$$

За тривалістю дії на організм перевантаження поділяють на тривалі ( $t_n > 1c$ ) і короткочасні ( $t_n < 1c$ ). При тривалих перевантаженнях основним негативним моментом є кисневе голодування (гіпоксія), яке виникає внаслідок місцевого або системного порушення кровообігу. Змінюється також взаємний тиск внутрішніх органів, відбувається їх деформація. Тому людина здатна витримувати лише обмежені рівні перевантаження ( $\eta \approx 4$  сидячи і до  $\eta \approx 14$  лежачи під деяким кутом на спині).

*Невагомість* – стан, при якому відсутня сила реакції опори ( $N = 0$ ), а отже, і деформація біоструктур. Для біологічних об'єктів невагомість – неприродний стан, хоча досить часто зустрічаються короткочасні періоди часткової невагомості: стрибки, гойдалки, початок руху ліфта і т. п. При тривалій дії невагомості (космічні польоти) характерна загальна детренованість, зменшується м'язова маса, відбувається демінералізація кісткової тканини організму. Тому космонавтам в умовах невагомості доводиться проводити спеціальні тренувальні фізичні вправи, носити особливі костюми, які, ускладнюючи рух, дозволяють довантажувати роботу м'язів.

### Контрольні запитання

1. Дайте визначення акустичного поля.
2. Які показники пасивних механічних властивостей біотканин?
3. Вплив на організм підвищеного або зниженого тиску навколишнього середовища.
4. Закономірності поширення акустичних хвиль у біоструктурах.
5. Приклади застосування акустичних полів у медицині.
6. Особливості теплових полів пойкилотермних і гомойотермних біологічних об'єктів.
7. Які методи лікування із застосуванням варіацій теплових полів набули поширення в медичній практиці?
8. Які фізичні явища визначають температурні границі життєздатності біологічних об'єктів?
9. Поняття гравітаційного поля.
10. Вплив гравітаційного поля на формування біосфери Землі.
11. Яка функція вестибулярного апарату в організмі людини?
12. Дія довготривалої невагомості на живі організми.
13. Захист від дії перенавантаження в авіації і космонавтиці.

## 4. ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

Навколо будь-якого тіла існують різні фізичні поля, зумовлені процесами, що відбуваються всередині нього. Не є в цьому сенсі виключенням і біологічні об'єкти. Фізичні поля, що генерує організм у процесі функціонування, називають власними фізичними полями біологічних об'єктів, у тому числі і людини.

Численні фізичні методи дослідження організму людини, що використовують реєстрацію власних фізичних полів, дозволяють одержати інформацію про процеси в організмі, яку не можна одержати іншими способами.

Фізичні поля, які створюють живі організми, мають специфічні кількісні параметри, тому існують механізми енергетичного або інформаційного впливу одних біологічних об'єктів на інші чи їх взаємодія.

Оскільки для медицини основним об'єктом діяльності є організм людини, то основну увагу звернемо на якісні і кількісні параметри його фізичних полів.

### 4.1. Електричне поле людини

Як було зазначено в другому розділі, первинним джерелом електричних полів є електричні заряди. Основними носіями електричних зарядів у живих організмах є іони. Просторовий розподіл іонів з позитивними і від'ємними зарядами формує внутрішнє і зовнішнє електричне поле організму. Фізіологічні процеси, від клітинного рівня до функціонування органів і систем відповідають за динаміку (зміну у часі) цих електричних полів.

Просторова нерівномірність концентрацій зарядів (дивергенція електричного поля) у біологічній речовині призводить до виникнення різниці електричних потенціалів – електричної напруги. Ця електрична напруга отримала назву біоелектричного потенціалу, а його реєстрація стала основою багатьох методів електрографії.

Початковим джерелом (як енергетичним, так і інформаційним) вважаються електричні потенціали живої клітини. Вони зумовлені різними концентраціями іонів у середині клітини, на її мембрані та в міжклітинній рідині.

Основними видами біопотенціалів є: мембранний потенціал (потенціал спокою), потенціал дії, постсинаптичні потенціали.

Мембранний потенціал (спокою) реєструється між зовнішньою і внутрішньою сторонами мембрани живої клітини. Для клітин нервової тканини його величина становить 60...80 мВ, для клітин м'язових волокон - 80...90 мВ, для клітин волокон серцевого м'яза - 90...95 мВ. При

незмінному функціональному стані потенціал спокою не змінюється. Під впливом різних факторів фізичного або хімічного походження величина мембранного потенціалу може змінюватися, і ці зміни описуються потенціалом дії. Амплітуда потенціалу дії у більшості нервових клітин ссавців становить 100...110 мВ (при тривалості 1...2 мс), для скелетних і серцевих м'язових волокон - 110...120 мВ (при тривалості 3...5 мс для скелетних і 50...600 мс для серцевих). У м'язовому волокні потенціал дії сприяє здійсненню ланцюга фізико-хімічних і ферментативних реакцій, що лежать в основі механізму скорочення м'язів. Постсинаптичні потенціали виникають на невеликих ділянках клітинної мембрани, що належать до синапсу. Величина цих потенціалів становить кілька мілівольт при тривалості 10...15 мс.

Електрична активність окремих клітин у процесі життєдіяльності характеризується виникненням різниці потенціалів для різних точок біотканин і органів живого організму. При вимірюванні біопотенціалів за допомогою контактних електродів, розташованих на поверхні шкіри або слизової оболонки, максимальна напруга досягає десятків мілівольт, а максимальні частоти – 1000 Гц.

Електрографія – група методів, оснований на реєстрації біопотенціалів тканин і органів у діагностичних або дослідницьких цілях. До основних методів електрографії належать:

- електрокардіографія – метод реєстрації біопотенціалів серцевої діяльності;
- електроенцефалографія – метод реєстрації біопотенціалів діяльності головного мозку;
- електроміографія – метод реєстрації біопотенціалів скорочення м'язів;
- електрогастрографія – метод дослідження роботи шлунка;
- електроокулографія – метод реєстрації рухів очей, оснований на графічній фіксації зміни електричного потенціалу сітківки і очних м'язів.

Фізичний підхід до електрографії полягає у створенні моделі електричного генератора, яка відповідає картині потенціалів, що реєструються.

Існують два фундаментальні завдання електрографії: розрахунок потенціалу в області вимірювання за заданими характеристиками електричного генератора – пряма задача (або задача впливу); розрахунок характеристик електричного генератора за виміряним потенціалом – зворотна задача (діагностична).

Додатково електричне поле поза тілом людини зумовлено головним чином трибозарядами, тобто зарядами, що виникають на поверхні тіла внаслідок тертя об одяг або об будь-який діелектричний предмет, при цьому на тілі створюється електричний потенціал порядку декількох вольт.

Електричне поле безперервно міняється в часі: по-перше, відбувається нейтралізація трибозарядів – вони стікають з високоомної поверхні шкіри з характерними інтервалами часу – 100 – 1000 с; по-друге, відбуваються зміни геометрії тіла внаслідок дихальних рухів, биття серця, і таким чином виникає модуляція постійного електричного поля поза тілом.

У деяких випадках виникає електризація поверхні шкіри людини і особливо ділянок з волоссяним покривом. Це явище спостерігається при понижень вологості повітря, використання синтетичної одяжі та хутра. Накопичений заряд може досягати декількох тисяч вольт. Це призводить до короткочасних іскрових розрядів між тілом людини і іншим об'єктом з меншим або протилежним зарядом.

Ні трибозаряди, ні електризація суттєво не загрожують здоров'ю людини, але можуть призвести до виходу із ладу радіоелектронного обладнання. Наприклад, при реєстрації біоелектричних потенціалів вхідні кола інструментальних підсилювачів повинні мати захист від імпульсних високовольтних завад, а до тіла людини підключають компенсуючий (заземлюючий) електрод.

## 4.2. Електромагнітні поля та випромінювання

Оскільки електричні заряди в біологічних тканинах рухаються, причому прискорено, то породжувані ними електричні і магнітні поля є змінними в часі та за певних умов створюють електромагнітне випромінювання (електромагнітні хвилі). Рух основних носіїв зарядів – іонів і частково електронів – пов'язаний з протіканням фізіологічних процесів, починаючи з молекулярно-клітинного рівня і закінчуючи функціонуванням усього організму, а також тепловим рухом.

Тому джерела електромагнітних полів різні в різних діапазонах частот. Низькочастотні поля створюються головним чином при протіканні фізіологічних процесів, що супроводжуються електричною активністю органів: кишечником (1 хв), серцем (характерний час процесів ~1 с), мозком (0,1 с), нервовими волокнами (10 мс). Спектр частот, що відповідають цим процесам, обмежений зверху значеннями, що не перевищують 1кГц.

У радіочастотному та інфрачервоному (ІЧ) діапазонах джерелом фізичних полів є теплове електромагнітне випромінювання.

Щоб оцінити інтенсивність електромагнітного випромінювання на різних довжинах хвиль, тіло людини як випромінювач можна моделювати абсолютно чорним тілом. Випромінювальна здатність тіла  $\epsilon_{\lambda, T}$  – кількість енергії, що випромінюється одиницею поверхні тіла в одиницю часу в одиничному інтервалі довжин хвиль в усіх напрямках – залежить від довжини хвилі  $\lambda$  і абсолютної температури тіла  $T$ .

Ця функція має максимум на довжині хвилі близько  $\lambda_m \sim 10$  мкм, при температурі людського тіла  $T = 310$  К. Тому ІЧ-випромінювання тіла людини вимірюють тепловізорами або радіометрами в діапазоні 3...10 мкм, де воно максимальне.

Безконтактне вимірювання температури шкірного покриву тіла людини базується на спектральній залежності характеристик теплового випромінювання від температури.

У радіочастотному діапазоні теплове випромінювання людини зосереджено в інтервалі частот  $5 \cdot 10^8 \dots 10^{10}$  Гц (довжини хвиль поза тілом – 60...3 см). Джерелом цього випромінювання є внутрішні органи, тому за його параметрами радіометрами неінвазивно визначають їх температуру.

Електромагнітне випромінювання на частотах  $\sim 55 \dots 75$  ГГц пов'язують з електродинамічними явищами в живій клітині. При цьому клітина і її оболонка (мембрана) розглядаються як об'ємний резонатор, в якому збуджуються електромагнітні коливання. Але інтенсивність випромінювання є наднизькою  $\sim 10^{-15} \dots 10^{-20}$  Вт/см<sup>2</sup>. Тому для його використання в медичній діагностиці необхідна надчутлива апаратура.

### 4.3. Магнітне поле

Наявність біоелектричних потенціалів і електрична провідність біосередовищ спричиняє направлений рух зарядів – струм. Таким чином, магнітне поле тіла людини створюється струмами, які генерують клітини серця, кори головного мозку та інших органів. Величини індукції біомагнітних полів наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1  
Індукція магнітного поля організму людини  
і навколишнього середовища

Об'єкт	Магнітна індукція, Тл
Серце	$10^{-10}$
Головний мозок	$10^{-11} \dots 10^{-12}$
М'язи	$10^{-11}$
Сітківка ока	$10^{-12} \dots 10^{-13}$
Геомагнітний шум	$10^{-8} \dots 10^{-9}$
Магнітне поле Землі	$5 \cdot 10^{-5}$
Магніт ЯМР-томографа	0,3...3

Як видно з табл. 4.1, магнітне поле, створюване організмом людини, на багато порядків менше, ніж магнітне поле Землі, його флуктуацій (геомагнітний шум) або полів технічних пристроїв.



Для його вимірювання використовують спеціальні магнітometri. У медичній діагностиці набули поширення магнітometri на основі надпровідникових квантових інтерференційних датчиків (НКВІД). Цей датчик вимірює дуже слабкий магнітний потік, але для цього його треба охолодити до температури, при якій з'являється надпровідність (до температури рідкого гелію – 4 К). Для цього датчик поміщають у спеціальний кріостат, точніше – у його вузьку хвостову частину і максимально близько підносять до тіла людини.

Основні медичні застосування вимірів магнітних полів тіла людини – це магнітокардіографія (МКГ) і магнітоенцефалографія (МЕГ). Перевагою МКГ і МЕГ порівняно з традиційною електрокардіографією і електроенцефалографією є можливість локалізації джерела поля з високою точністю приблизно 1 см. Це пов'язано з тим, що динамічні магнітні поля дозволяють оцінити координати розташування токового диполя.

#### **4.4. Оптичне випромінювання тіла людини**

Оптичне випромінювання тіла людини надійно реєструється за допомогою сучасної техніки підрахунку фотонів. У цих пристроях використовують високочутливі фотоелектронні помножувачі (ФЕП), здатні реєструвати одиночні кванти світла і перетворювати їх на виході в короткочасні імпульси струму, що потім підраховуються за допомогою спеціальних електронних лічильників.

Виміри, проведені в ряді лабораторій, показали, що 1 см<sup>2</sup> шкіри людини за 1 с спонтанно випромінює в усі сторони 6 – 60 квантів, головним чином, у синьо-зеленій області спектра. Світимість різних ділянок шкіри різниться – найбільш сильне випромінювання виходить від кінчиків пальців, набагато слабкіше, наприклад, від живота або передпліччя. Це світіння не пов'язане з наявністю забруднень на шкірі і залежить від функціонального стану пацієнта, знижуючись у спокої і підвищуючись з ростом його активності.

Найбільш ймовірний механізм спонтанного світіння – це хемілюмінесценція, спричинена перекісним окислюванням ліпідів, що супроводжується появою радикалів, тобто молекул у збудженому електронному стані. При взаємодії таких молекул у визначеному (малому) відсотку випадків відбувається випромінювання світла. При індукованому світінні можливі й інші механізми, наприклад, випромінювання при активації кліток крові – нейтрофілів, пов'язане з генерацією активних форм кисню.

Можна індукувати світіння шкіри, наприклад, за допомогою оброблення її перекисом водню або впливом на шкіру попереднім опроміненням. Сильна післядія – фосфоресценція – спричинює

випромінювання на довжині хвилі 254 нм, що відповідає піку поглинання ДНК. Попереднє опромінення спричинює зростання індукованого світіння в тисячі разів, що потім спадає в часі за складною залежністю з декількома постійними часу від одиниць до десятків хвилин.

Оптичне випромінювання шкіри не є тепловим. Інтенсивність теплового випромінювання в оптичному діапазоні незначна – з 1 см<sup>2</sup> поверхні тіла один квант у середньому може випромінюватися лише за одиниці секунд.

#### 4.5. Акустичні поля

Діапазон власного акустичного випромінювання обмежений з боку довгих хвиль механічними коливаннями поверхні тіла людини (0,01 Гц), з боку коротких хвиль – ультразвуковим випромінюванням (від тіла людини реєстрували сигнали з частотою до 10 МГц).

У порядку зростання частоти розрізняють три діапазони акустичного поля:

- 1) низькочастотні коливання (частоти нижче 10<sup>3</sup> Гц);
- 2) кохлеарну акустичну емісію (КАЕ) - випромінювання з вуха людини (~10<sup>3</sup> Гц);
- 3) ультразвукове випромінювання (~ 1...10 МГц).

Джерела акустичних полів у різних діапазонах частот мають різну природу. Низькочастотне випромінювання створюється фізіологічними процесами: дихальними рухами, биттям серця, струмом крові в кровоносних судинах і деяких інших процесах, що супроводжуються коливаннями поверхні людського тіла в діапазоні приблизно 0,01...10<sup>3</sup> Гц. Це випромінювання у вигляді коливань поверхні можна зареєструвати контактними або безконтактними методами, однак його практично неможливо виміряти дистанційно за допомогою мікрофонів. Це пов'язано з тим, що акустичні хвилі, що йдуть із глибини тіла, практично цілком відбиваються назад від границі розділу «повітря – тіло людини» і не виходять назовні в повітря з тіла людини. Коефіцієнт відбиття звукових хвиль близький до одиниці через те, що щільність тканин тіла людини близька до щільності води, що на три порядки вище щільності повітря.

Група методів медичної діагностики, яка базується на прослуховуванні або апаратній реєстрації звукових феноменів діяльності організму, отримала назву аускультатії. Фонокардіографія – апаратна реєстрація акустичних характеристик діяльності серця є одним з поширених різновидів аускультатії.

В усіх наземних хребетних існує спеціальний орган, у якому здійснюється акустичне узгодження між повітрям і рідким середовищем, - це вухо. Середнє і внутрішнє вухо забезпечуює передачу майже без утрат звукових хвиль з повітря до рецепторних кліток внутрішнього вуха.

Відповідно можливий і зворотний процес – випромінювання з вуха в навколишнє середовище - і воно виявлено експериментально за допомогою мікрофона, вставленого у вушний канал.

Джерелом акустичних коливань мегагерцевого діапазону є теплове акустичне випромінювання – повний аналог відповідного електромагнітного випромінювання. Воно виникає внаслідок хаотичного теплового руху атомів і молекул людського тіла. Інтенсивність цих акустичних хвиль, як і електромагнітних, визначається абсолютною температурою тіла.

#### **4.6. Фізичні поля людини й екстрасенси**

Вивчення фізичних полів організму людини дозволяє відповісти на ряд запитань, що виникають при поясненні механізмів впливу екстрасенсів, хоча отримані дані про фізичні поля людини дозволяють не стільки пояснити феномени, що спостерігаються, скільки вказати труднощі в такому поясненні.

У режимі «діагностики», простежуючи ланцюг подій, у результаті якої екстрасенс міг би одержати інформацію про хворий орган пацієнта, можна відзначити таке:

1. Хворий орган відрізняється від здорового як за своїми фізичними характеристиками, наприклад, температурою, так і за фізіологічними параметрами - сигналами, що надходять від нього в нервову систему.

2. Інформація про різні стани органа може доставлятися на поверхню тіла з глибини або безпосередньо відповідно до фізичних законів переносу енергії, або шляхом «фізіологічного» проектування. У першому випадку це не може відбуватися за допомогою звичайної теплопередачі, також можливі способи передачі за допомогою теплового надвисокочастотного електромагнітного випромінювання або мегагерцевого акустичного випромінювання. Ці випромінювання дозволяють виводити на поверхню тіла тепло з глибини в кілька сантиметрів. «Фізіологічне» проектування може здійснюватися за рахунок нервових механізмів, наприклад, у зонах Захар'їна – Геда.

3. Передача інформації про хворий орган дистанційно може відбуватися тільки за допомогою електромагнітних полів, тому що передача акустичного випромінювання потребує безпосереднього контакту з тілом пацієнта. Можливість використовувати той або інший діапазон електромагнітного випромінювання визначається інтенсивністю відповідного випромінювання і чутливістю до нього рецепторів руки екстрасенса. Існуючі дані дозволяють виключити низькочастотне електричне і магнітне поля, а також хвилі радіочастотного діапазону, тому що до відомих слабких полів людина нечутлива. Випромінювання видимої і ультрафіолетової частин оптичного діапазону також не може бути носієм

інформації, оскільки інтенсивність власне світіння шкіри в мільйон разів менше інтенсивності сонячного або штучного випромінювання в кімнаті. Таким чином, найбільш ймовірний переносик інформації в режимі «діагностики» – це електромагнітне випромінювання тіла в інфрачервоному або близькому до нього діапазонах частот.

У режимі «лікування» головна проблема також полягає у нез'ясованості механізму переносу інформації від екстрасенса до пацієнта. За даними досліджень, у екстрасенсів не відзначалося будь-яких відмінностей їхніх фізичних полів від полів звичайної людини: немає ні надмірного оптичного, ні інфрачервоного, ні радіочастотного випромінювання дециметрового діапазону. У той же час тепловізійна апаратура реєструє в ряді випадків зміну поверхневої температури ділянок тіла пацієнта у результаті безконтактного впливу екстрасенса на них.

Механізми безконтактного впливу або так названого безконтактного масажу поки неясні. Існує гіпотеза, що у ІЧ-діапазоні досить велика потужність випромінювання, так що теплова рівновага шкіри пацієнта значною мірою визначається різницею потужностей, яка випромінюється шкірою і поглинається нею від стін кімнати. Оскільки температури шкіри і стін кімнати розрізняються на кілька градусів, то існує безперервна віддача потужності від тіла людини. Якщо проти будь-якої ділянки шкіри пацієнта з'являється рука екстрасенса, температура якої вище за кімнатну, то ця ділянка починає віддавати менше тепла, у результаті чого його температура підвищується і на це могли б відреагувати терморцептори шкіри. Основні труднощі пояснення подальшої реакції шкіри випробуваного полягають у тому, що відповідне підвищення температури шкіри досить мале, а терморцептори шкіри мають досить низьку чутливість. Можливо, що в зонах розташування біологічно-активних точок (БАТ) на поверхні шкіри, що відповідають «хворим» органам, чутливість терморцепторів значно вище. З'ясування цих механізмів потребує спеціальних фізичних і фізіологічних досліджень.

Давно існують також припущення про те, що «екстрасенсорне» сприйняття пов'язане з електромагнітним випромінюванням діапазону надвисоких частот з довжиною хвилі у вільному просторі 2...8 мм, причому інтенсивність такого випромінювання помітно вище інтенсивності теплового випромінювання. Поки немає прямих експериментальних даних про порівняльні виміри інтенсивності подібного випромінювання в екстрасенсів і в звичайних людей.

У цілому наявні на цей час дані щодо фізичних полів організму людини і механізмів чутливості його рецепторних систем не дозволяють дати послідовного фізичного опису проблеми екстрасенсорного впливу. Можливо, такий вплив – це якийсь різновид психотерапії.

Зробимо висновки. Фізичні поля людини на сьогодні – один з розділів медичної і біологічної фізики. Найбільш важливий його додаток – це дослідження стану різних органів людини за допомогою пасивної реєстрації електромагнітного або акустичного випромінювання безпосередньо цього органа або будь-яких інших ділянок тіла, пов'язаних з досліджуваним органом нервовими або гуморальними зв'язками.

Таким чином, біоб'єкт у процесі життєдіяльності і взаємодії з навколишнім середовищем створює навколо себе інтегроване фізико-хімічне поле з такими основними компонентами:

- електростатичні поля і квазіпостійні потенціали шкірних покривів в інтервалі частот –  $10^{-6} \dots 1$  Гц;

- електричні, магнітні, електромагнітні поля, а також змінні електричні потенціали (біопотенціали) у діапазоні частот –  $1 \dots 10^5$  Гц;

- теплове випромінювання в інфрачервоному, міліметровому і НВЧ-діапазонах;

- випромінювання у видимому діапазоні хвиль (надслабке світіння), зумовлене хемілюмінесценцією;

- природне гамма- і корпускулярне випромінювання, переважно за рахунок розпаду ізотопу калію-40;

- акустичні поля серця, серцево-судинної та бронхо-легеневої систем, стравоходу, суглобів опорно-рухомого апарату, голосових органів – в діапазоні від інфра- до ультразвукових частот;

- протуберанці хімічних сполук, які виділяються з повітрям, що видихається (149 найменувань), і випаровуються з поверхні шкіри (271 найменування).

Таким чином, живі організми - це багатокомпонентні генератори фізичних полів. Ці поля одночасно є як джерелами інформації про сам організм, так і чинниками впливу на інші об'єкти природи.

### Контрольні запитання

1. Які кількісні показники біоелектричних потенціалів?
2. Які основні методи дослідження в медицині основані на вимірюванні електричних біопотенціалів?
3. Частотні діапазони електромагнітного випромінювання організму людини.
4. Які інженерні складнощі реєстрації біомагнітних полів?
5. Фізичні механізми випромінювання акустичних хвиль живими організмами.
6. Гіпотези про інформаційний та енергетичний вплив осіб з екстрасенсорними властивостями.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Біофізика і біомеханіка: підручник / В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко та ін. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 334 с.
2. Большая медицинская энциклопедия (БМЭ) : в 36 т. – М. : Сов. энциклопедия, 1975. – 1978.
3. Давыдов, Б. И. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б. И. Давыдов, В. С. Тихончук, В. В. Антипов. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 177 с.
4. Волькенштейн, М. В. Физика и биология / М. В. Волькенштейн. – М. : Наука, 1980. – 152 с.
5. Думанский, Ю. Д. Влияние электромагнитных полей радиочастот на человека / Ю. Д. Думанский, А. М. Сердюк, И. П. Лось. – Київ : Здоров'я, 1975. – 160 с.
6. Екологія: базовий підручник для студентів вищих навчальних закладів / Ю. П. Бобильов, В. В. Бригадиренко, В. Л. Булахов та ін. – Харків : Фоліо, 2014. – 672 с.
7. Зигель, Ф. Ю. Жизнь в космосе / Ф. Ю. Зигель. – Минск : Наука и техника, 1966. – 198 с.
8. Колбун, Н. Д. Информационно-волновая терапия : науч.-практ. рук. / Н. Д. Колбун, А. Е. Бессонов, Р. Е. Волянюк. – Киев : Укр. энциклопедия, 1993. – С. 304.
9. Лавников, А. А. Основы авиационной и космической медицины / А. А. Лавников. – М. : ДОСААФ, 1975. – 360 с.
10. Манойлов, В. Е. Электричество и человек / В. Е. Манойлов. – Л. : Энергоиздат, 1988. – 224 с.
11. Медицинские приборы : Разработка и применение / Джон В. Кларк мл., Майкл Р. Ньюман, Валтер Х. Олсон и др.; Ред. Джон Г. Вебстер. – Киев : Медторг, 2004. – 620 с.
12. Мустецов, Т. М. Теорія біотехнічних систем: навч. посіб. / Т. М. Мустецов, А. С. Нечипоренко. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2015. – 188 с.
13. Олейник, В. П. Аппаратные методы исследований в биологии и медицине : учеб. пособие / В. П. Олейник, С. Н. Кулиш. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», 2004. – 110 с.
14. Олейник, В. П. Терапевтические аппараты и системы: учеб. пособие / В. П. Олейник. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», 2002. – 94 с.
15. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика / А. Н. Ремизов. – М. : Высш. шк., 1987. – 656 с.
16. Сапин, М. Р. Анатомия человека / М. Р. Сапин, Г. Л. Билич. – М. : Высш. шк., 1989. – 485 с.
17. Тиманюк, В. А. Биофизика : учебник / В. А. Тиманюк, Е. Н. Животнова. – 2-е изд. – Киев : ИД «Профессионал», 2004. – 704 с.
18. Физика визуализации изображений в медицине : в 2 т. / пер. с англ. : под ред. С. Уэбба. – М. : Мир, 1991.
19. Чайченко, Г. М. Фізіологія людини і тварин: підручник / Г. М. Чайченко, В. О. Дибенко, В. Д. Сокур. – Київ: Вища шк., 2003. – 463 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Фізичні поля як екологічні фактори.....	4
1.1. Життя як термодинамічний процес .....	9
1.2. Зв'язок ентропії та інформації для біологічних систем.....	10
1.3. Загальний характер реакції біологічного об'єкта на дію фізичного поля.....	11
1.4. Поняття екологічного моніторингу. Раціобіосфера.....	12
2. Дія електромагнітних полів.....	14
2.1. Феноменологічні підходи для оцінювання дії електромагнітних полів на біологічні об'єкти.....	14
2.2. Дія електростатичних полів на біологічні об'єкти.....	16
2.3. Дія електричних струмів.....	19
2.4. Дія магнітних полів на біологічні об'єкти.....	24
2.5. Вплив змінним електричним полем.....	29
2.6. Біооб'єкти в електромагнітному полі.....	30
2.7. Дія електромагнітних випромінювань оптичного діапазону.....	35
2.8. Дія іонізуючих випромінювань на біооб'єкти.....	43
3. Дія акустичних, теплових і гравітаційних полів.....	50
3.1. Акустичні поля і біологічні об'єкти.....	50
3.2. Дія теплових полів на біологічні об'єкти.....	56
3.3. Біологічні біооб'єкти у гравітаційному полі.....	58
4. Фізичні поля живих організмів.....	61
4.1. Електричне поле людини.....	61
4.2. Електромагнітні поля та випромінювання.....	63
4.3. Магнітне поле.....	64
4.4. Оптичне випромінювання тіла людини.....	65
4.5. Акустичні поля.....	66
4.6. Фізичні поля людини й екстрасенси.....	67
Бібліографічний список.....	70

Навчальне видання

**Олійник Володимир Петрович**

## **ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

Редактор С. П. Гевло

Зв. план, 2020

Підписано до друку 15.04.2020

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

Ум. друк. арк. 4. Обл.-вид. арк. 4,5. Наклад 30 пр.

Замовлення 85. Ціна вільна

---

Видавець і виготовлювач  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
<http://www.khai.edu>  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
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