22. МЕТОД ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ

22.1. Турбулентність

Турбулентність — це явище, що спостерігається в течії рідин або газів, та яке полягає в утворенні в цих течіях чисельних вихрів різних розмірів, внаслідок чого такі характеристики як швидкість, температура, тиск, густина зазнають хаотичних флуктуацій та відповідних нерегулярних змін у просторі та часі. Цим турбулентні течії відрізняються від ламінарних.

Завдяки великій інтенсивності турбулентного перемішування відбувається підвищена здатність течії до перенесення кількості руху, теплоти, маси (частинок).

Перехід від ламінарної течії до турбулентної визначається *числом Рейнольда*: ламінарна течія характеризується переважанням сил в'язкості та низькими значеннями числа Рейнольда; турбулентна течія відбувається при великих значеннях числа Рейнольда.

Турбулентність супроводжується появою *флуктуацій* або *вихрів* — потоків повітря, які можуть мати напрямок, протилежний основному потоку, особливо під час кругового руху. Отже, повітряний потік може бути представлений як горизонтальний потік численних кругових вихрів, які поширюються у тривимірному просторі і мають, таким чином, вертикальну компоненту (рис. 22.1).

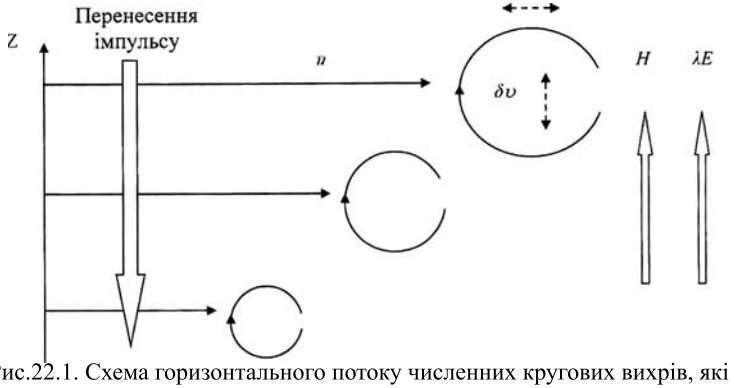


Рис.22.1. Схема горизонтального потоку численних кругових вихрів, які поширюються у тривимірному просторі і мають вертикальну компоненту

PAB09112.indd 201 26.11.2009 16:29:25

Турбулентність регулярно відбувається у відносно тонкому шарі атмосфери, який називається *граничним шаром.* Розміри турбулентного шару коливаються від 100 м уночі та до 4000 м удень.

Ці вихри беруть участь у перенесенні теплоти, води, імпульсу тощо в атмосфері.

Якщо порція повітря, що відповідає одному рівню, даній температурі та імпульсу, переходить на другий рівень, цей перехід супроводжується також перенесенням теплоти та імпульсу на новий рівень. Це явище аналогічно дифузійному процесу в газах.

Процес перенесення теплоти, маси та імпульсу з одного рівня на інший характеризується потоком відповідної величини, який можна оцінити як добуток флуктуацій температури, горизонтальної компоненти вітру або маси на вертикальну компоненту вітру.

Незважаючи на хаотичний характер повітряного потоку такого типу, його параметри можна оцінити за допомогою *методу вихрової коваріації.*

22.2. Латентна теплота

Кількість енергії у формі тепла, що звільнюється або поглинається речовиною під час переходу з одного фазового стану до іншого, називається *латентною теплотою*. Походить від латинського *latere* — ховати.

Можливі фазові переходи: твердий стан → рідина → газ. Наприклад, перехід від рідкого стану до газоподібного називають *випаровуванням.* Процес переходу між фазовими станами може бути *ендотермічним*, коли система поглинає енергію (наприклад, під час переходу від твердого стану до рідини та газу) або *екзотермічним*, коли система звільнює енергію (перехід у зворотному напрямку).

Наприклад, молекули води під час випаровування з водойми транспортують енергію в атмосферу, оскільки цей процес вимагає теплової енергії, щоб подолати сили притягання між молекулами води. Ця теплота називається *латентною теплотою випаровування.*

Людина не здатна відчувати латентну теплоту, оскільки ця теплота не супроводжується зміною температури.

Якщо водяна пара конденсується у воду, латентна теплота, що була поглинута під час випаровування, звільнюється як відчутна теплота.

Латентна теплота визначається за виразом:

$$Q = mL, \qquad (22.1)$$

PAB09112.indd 202 26.11.2009 16:29:26

де Q — кількість енергії, потрібної для зміни фази речовини (Дж); m — маса речовини (кг); L — питома латентна теплота конкретної речовини (Дж/кг).

Латентна теплота не вимагає зміни температури — наприклад, вода залишається при 100 ^{0}C під час кипіння.

У глобальних масштабах транспортування латентної теплоти відбувається тоді, коли холодне повітря рухається до екватора.

Потік латентної теплоти — це потік теплоти від земної поверхні до атмосфери, який супроводжується випаровуванням води з поверхні з подальшою конденсацією водяної пари в тропосфері. Цей процес дуже важливий з точки зору забезпечення енергетичного бюджету Землі.

22.3. Відчутна теплота

Теплота, що викликає зміну температури об'єкта, називається *відчутною теплотою*. Перенесення цієї теплоти здійснюється завдяки процесам теплопровідності або конвекції. Коли об'єкт нагрівається, його температура підвищується, і навпаки. Величина відчутної теплоти визначається за виразом:

$$Q = mc(T - T_0), \qquad (22.2)$$

де m — маса тіла; c — питома теплоємність; $(T - T_0)$ — різниця температури тіла та опорної температури.

Потік відчутної теплоти — це процес перенесення теплової енергії з земної поверхні до атмосфери завдяки теплопровідності або конвекції (після чого цей потік може рухатися горизонтально завдяки циркуляції атмосфери). Але оскільки теплопровідність повітря невисока, основним процесом перенесення відчутної теплоти є конвекція.

Коли земна поверхня тепліша за атмосферу, відбувається *позитивний потік відчутної теплоти*; якщо холодніша — *негативний.*

Виражається цей потік як кількість теплоти, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу (Дж/м^2·с).

Отже, для реалізації потоку відчутної теплоти необхідний температурний градієнт. Людина *відчуває* потік *відчутної* теплоти через зміну температури повітря.

У глобальних масштабах транспортування відчутної теплоти відбувається у формі теплого повітря, що рухається до полюсів.

Відчутна теплота не викликає зміни фізичного стану речовини, але завжди супроводжується зміною температури. Отже, її можна оцінити за допомогою термометра.

PAB09112.indd 203 26.11.2009 16:29:26

22.4. Метод вихрової коваріації

Коваріація — це статистичне вимірювання кореляції між флуктуаціями двох різних величин. Коваріація визначає ступінь, з яким обидві величини змінюються разом.

Метод вихрової коваріації використовують для оцінювання атмосферних потоків H_2O, CO_2, аерозолів, імпульсу, теплоти, що переносяться в атмосферному граничному шарі у вертикальному напрямку.

Розглянемо швидкість вітру з горизонтальною u та вертикальною υ компонентами:

$$u = \overline{u} + \delta u;\ \upsilon = \overline{\upsilon} + \delta\upsilon \quad , \tag{22.3}$$

де $\overline{u}$ та $\overline{\upsilon}$ — середні значення компонентів швидкості вітру, а δu та $\delta\upsilon$ — флуктуації цих компонентів.

Коваріація між двома змінними величинами δu та $\delta\upsilon$ визначається так:

$$\mathrm{Cov}_{u\upsilon} = \frac{\sum \delta u \delta\upsilon}{n}, \tag{22.4}$$

де n — кількість змінних.

Підставляючи (22.3) у (22.4), одержимо:

$$\mathrm{Cov}_{u\upsilon} = \frac{\sum (u-\overline{u})(\upsilon-\overline{\upsilon})}{n}. \tag{22.5}$$

Потік вертикального моменту. Миттєвий вертикальний потік імпульсу визначається так:

$$F(t) = \rho u(t)\upsilon(t). \tag{22.6}$$

Усереднений потік дорівнює:

$$F = \rho\left(\overline{u\upsilon}\right), \tag{22.7}$$

де ρ — густина повітря.

Врахуємо середні значення компонентів швидкості вітру та їх флуктуації:

$$\overline{F} = \rho\overline{(\overline{u}+\delta u)(\overline{\upsilon}+\delta\upsilon)} =$$

$$= \rho(\overline{u}\,\overline{\upsilon} + \overline{u}\overline{\delta\upsilon} + \overline{\delta u}\ \overline{\upsilon} + \overline{\delta u\delta\upsilon}). \tag{22.8}$$

PAB09112.indd 204 26.11.2009 16:29:26

Оскільки $\overline{\upsilon} = 0$ та $\overline{\delta u} = \overline{\delta \upsilon} = 0$, останнє рівняння матиме вигляд:

$$F = \rho \overline{\delta u \delta \upsilon} \qquad (22.9)$$

Тут припускаємо, що густина повітря не змінюється.

Потік відчутної теплоти. Прямий потік теплоти з поверхні в атмосферу завдяки теплопровідності або конвекції називається *потоком відчутної теплоти.* Цей потік виникає завдяки градієнту температури між земною поверхнею та атмосферою. Сенсибілізована теплота викликає зміну температури речовини, але не її фізичного стану.

Цей потік залежить від густини повітря, питомої теплоємності повітря за сталого тиску та коваріації флуктуацій миттєвої вертикальної швидкості повітря та температури:

$$H = \rho_a C_\rho \overline{\delta \upsilon \delta T_a} \qquad (22.10)$$

де $\overline{\delta \upsilon}$ та $\overline{\delta T_a}$ — флуктуації миттєвої вертикальної швидкості повітря та температури.

Потік прихованої теплоти. Потік енергії від земної поверхні до атмосфери, що переноситься водяною парою, називається *потоком прихованої теплоти.* Прихована теплота викликає зміну фізичного стану (вода перетворюється у пару), але не змінює температуру речовини.

Потік прихованої теплоти λE визначається як коваріація між флуктуаціями миттєвої вертикальної швидкості вітру та густиною водяної пари:

$$\lambda E = L_v \overline{\delta \upsilon \delta \rho_v} \qquad (22.11)$$

де L_v — прихована теплота випаровування; ρ_w — густина водяної пари; $\delta \upsilon$ — флуктуації миттєвої вертикальної швидкості; $\overline{\delta \rho}$ — флуктуації густини водяної пари.

Потік двоокису вуглецю. Цей потік може бути представлений як коваріація між флуктуаціями $\delta \upsilon$ миттєвої вертикальної швидкості та густини двоокису вуглецю $\overline{\delta \rho_c}$:

$$F_C = \overline{\delta \upsilon \delta \rho_c} \qquad (22.12)$$

Усереднення здійснюються протягом 15 або 30 хв (10 Гц).

Перенесення атмосферою теплоти або маси залежить від розмірів

PAB09112.indd 205 26.11.2009 16:29:26

вертикальних флуктуацій, які збільшуються з відстанню від земної поверхні.

Якщо рослинний покрив більш теплий, ніж атмосфера, турбулентні потоки викликають вертикальні потоки латентної (випаровування) та відчутної (градієнт температури) теплоти.

Вимірювання вихрової коваріації. Зазвичай комплекс приладів для оцінювання вихрової коваріації передбачає вимірювання густини водяної пари, температури повітря, швидкості вітру і містить три сенсори: інфрачервоний газоаналізатор (або гігрометр) для оцінювання H_2O та CO_2, тривимірний ультразвуковий анемометр для оцінювання температури повітря та швидкості вітру у вертикальному та двох горизонтальних напрямках (рис. 22.2).

Всі ці прилади розміщені на різних висотах за допомогою метеорологічної башти (рис. 22.3).

Рис.22.2. Комплекс приладів для вимірювання вихрової коваріації

PAB09112.indd 206 26.11.2009 16:29:27

Рис. 22.3. Метеорологічна башта (станція Кахоку, Японія)

Дані, що одержані від цих приладів, обробляються на комп'ютері.

23. ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРИКИ

23.1. Електрохімічний потенціал

Розглянемо деяку ємність, розділену на два відсіки мембраною, яка проникна тільки для іонів калію. Якщо концентрація розчинів *KCl* в обох відсіках однакова, то кількість іонів K^+, що переходять з відсіку *I* у відсік *II* і навпаки, буде однаковою. Через це різниця потенціалів, що встановлюється на мембрані, дорівнює нулю.

Якщо концентрація розчину *KCl* у відсіку *I* перевищує концентрацію у відсіку *II*, буде мати місце дифузія іонів, внаслідок якої кількість позитивних зарядів у відсіку *II* збільшиться. Таким чином, на мембрані встановиться різниця потенціалів.

Отже, різниця концентрацій іонів K^+ між відсіками являє собою *хімічний градієнт* (або хімічну різницю потенціалів), який призводить до дифузійного потоку іонів крізь мембрану з відсіку *I* у відсік *II*.

У той же час, накопичення позитивних електричних зарядів у відсіку *II* сприяє утворенню *електричного градієнта* (або електричної різниці потенціалів), який примушує іони K^+ рухатися в протилежному напрямку — з відсіку *II* у відсік *I*.

У цілому наявність концентраційного (хімічного) та електричного градієнтів зумовлює стан *електрохімічної рівноваги* іонів K^+. Різниця потенціалів, що виникає на мембрані за такого стану, називається *електрохімічним (рівноважним) потенціалом*.

23.2. Потенціал спокою та потенціал дії

Внутрішнє і зовнішнє середовища клітини характеризуються нерівномірним розподілом певних іонів. Так, основним іоном у зовнішньому середовищі клітини є натрій — його концентрація в зовнішньому середовищі клітини в 5—15 разів перевищує концентрацію у внутрішньому середовищі. Усередині клітини переважають іони калію, концентрація яких в 20—40 разів більша, ніж у зовнішньоклітинному середовищі. Крім того, клітинна мембрана характеризується селективною іонною проникністю, зумовленою наявністю іонних каналів. У стані спокою мембрана харак-

PAB09112.indd 208 26.11.2009 16:29:28

теризується великою проникністю для іонів калію і незначною — для іонів натрію. Врешті-решт, на клітинній мембрані утворюється так званий *потенціал спокою*. Величина його коливається для різних клітин від –60 до –90 мВ. Про клітину у стані спокою кажуть, що вона *поляризована.*

Під час дії на мембрану зовнішнього стимулу (наприклад, механічної, хімічної або електричної природи) електричний баланс порушується, що супроводжується входженням іонів натрію всередину клітини і виникненням швидкої зміни мембранного потенціалу. У той же час іони калію залишають клітину, хоча й не так швидко, як іони натрію. На мембрані встановлюється позитивний *потенціал дії* (близько 20—30 мВ). Цей потенціал виникає не на всій мембрані, а лише в тій ділянці, до якої був прикладений зовнішній стимул. Процес збудження мембрани, що супроводжується появою потенціалу дії, називається *деполяризацією.* Мембрана повертається до первинного стану рівноваги, який характеризується блокуванням проходження іонів натрію всередину клітини. Цей процес транспорту іонів натрію назовні, що викликає поляризацію клітини, називається *реполяризацією.*

Основними властивостями потенціалу дії є: 1) типова величина амплітуди становить близько 130 мВ і не залежить від амплітуди зовнішнього стимулу; потенціал дії триває декілька мілісекунд (рис.23.1); 2) полярність потенціалу дії протилежна полярності потенціалу спокою; 3) під час деполяризації і на початку фази реполяризації відповідна ділянка мембрани тимчасово стає незбуджуваною, несприйнятливою (*рефрактерною*); 4) потенціал дії поширюється по клітинній мембрані від місця збудження начебто біжуча хвиля зі швидкістю 50—150 м/с (для хребетних).

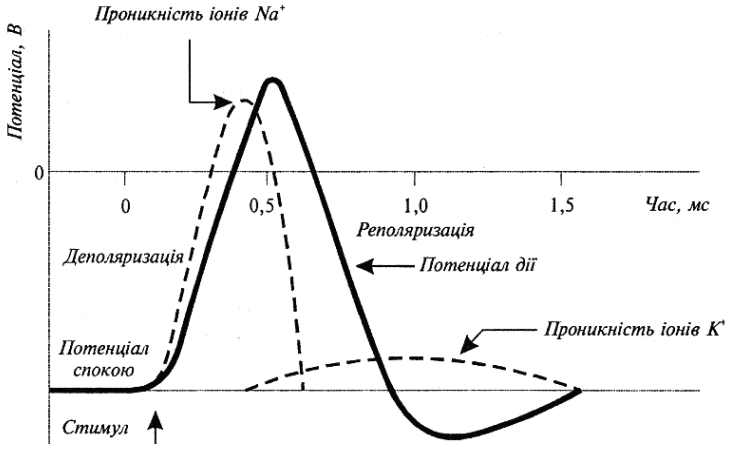


Рис. 23.1. Утворення потенціалу дії (пояснення в тексті)

PAB09112.indd 209 26.11.2009 16:29:28

Для клітинної мембрани, яка розділяє зовнішнє і внутрішнє середовища, процес появи потенціалу дії описується *рівнянням Нернста*:

$$\Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_i = \frac{RT}{ZF}\ln\frac{C_i}{C_e}, \qquad (23.1)$$

де $\Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_{ii}$ — різниця потенціалів між зовнішнім та внутрішнім середовищами; R — універсальна газова стала; T — абсолютна температура; Z — валентність іонів; F — стала Фарадея; C_e — концентрація зовнішнього середовища; C_i — концентрація внутрішнього середовища.

При температурі T = 20 ^{0}C фактор RT/F дорівнює 25,3 мВ.

Приклад

У рослинних клітинах встановилася рівновага потоків із зовнішнім розчином, який містить по 10^{-3} моля іонів K^+, Na^+ та Cl^-. Внутрішня їх концентрація станови·ть $89\cdot10^{-3}$, $10\cdot10^{-3}$ та $24\cdot10^{-3}$ моля відповідно. Визначити потенціал Нернста для кожного іона.

Розв'язання

Рівноважний потенціал визначимо за допомогою рівняння Нернста (вираз (23.1)). Підставляємо в це рівняння числові дані, враховуючи, що RT/F = 25,3 мВ:

$$\Delta\varphi_K = \frac{RT}{zF}\ln\frac{C_i}{C_e} = 25{,}3\text{ мВ}\times\ln\frac{1}{89} = -114\text{ мВ};$$

$$\Delta\varphi_{Na} = 25{,}3\text{ мВ}\times\ln\frac{1}{10} = -58\text{ мВ};$$

$$\Delta\varphi_{Cl} = -25{,}3\text{ мВ}\times\ln\frac{1}{24} = +80\text{ мВ}.$$

Типові значення мембранного потенціалу клітин водоростей наведено у табл. 23.1.

Звичайно різниця потенціалів між внутрішнім середовищем рослинної клітини та зовнішнім розчином, що омиває клітину, знаходяться в межах від −50 до −250 мВ (наприклад, різниця потенціалів для клітин кореневої системи *Pea sativum* та *Avena sativa* дорівнює −110 мВ та −84 мВ відповідно).

PAB09112.indd 210 26.11.2009 16:29:28

Таблиця 23.1

Мембранний потенціал клітин водоростей

Об'єкт	Потенціал між вакуолею та зовнішнім розчином $E_{во}$	Потенціал між цитоплазмою та зовнішнім розчином $E_{цо}$	Потенціал між вакуолею та цитоплазмою $E_{вц}$
Прісноводні водорості:			
Nitella translucens	–122	–140	+18
Nitella flexilis	–155	–170	+15
Chara corallina	–152	–170	+18
Hydrodictyon africanum	–90	–116	+26
Морські водорості:			
Halicystis ovalis	–80	–80	±0
Valonia ventricosa	+17	–71	+88
Chaetomorpha darwinii	+10	–70	+80
Griffithsia	–55	–80	+25
Acetabularia mediterranea	–174	–174	±0

23.3. Збудливість рослинних клітин

Загальною рисою рослин є *збудливість* — здатність рослинних клітин, тканин та органів змінювати свій стан та реагувати на зовнішні подразники. Рослина утворює електрохімічні сигнали — потенціали дії, які спроможні поширюватися (подібно нервовим імпульсам) по рослинному організму. Ці потенціали є носіями інформації у внутрішньо- та зовнішньоклітинному просторі щодо змін у навколишньому середовищі рослини.

Реакції рослинних тканин та органів на зовнішні подразнення можуть бути локальними або поширюватися на великі відстані вздовж

PAB09112.indd 211 26.11.2009 16:29:28

усієї рослини завдяки плазмодесмам — найдрібнішим цитоплазматичним тяжам, які проходять крізь отвори у клітинних оболонках і з´єднують протопласти сусідніх клітин. Координація внутрішніх процесів рослини та їх балансу з навколишнім середовищем здійснюється внаслідок збудливості рослинних клітин. Збудження, що викликається зовнішніми фізичними та хімічними подразниками, переноситься по рослині. Швидкість поширення цього збудження залежить від багатьох факторів — таких як світловий та водний режими, температура, обробка агрохімічними препаратами (гербіцидами, солями, стимуляторами росту тощо), механічні пошкодження, електромагнітні та гравітаційні поля, травмування з боку комах та тварин.

Генерація та поширення потенціалів дії та електричних імпульсів здійснюється від кореневої системи до верхівки і навпаки як відгук на зовнішні фактори. До рослин, в яких зареєстровано потенціали дії, належать бобові, помідори, огірки, картопля, гречка. Амплітуда потенціалів дії, які вимірювалися у рослин, становить 5—80 мВ та істотно залежить від типу зовнішнього стимулу. Швидкість поширення електричних сигналів знаходиться в діапазоні 0,05—20 см/с. Можливим шляхом, по якому здійснюється поширення потенціалів дії, може бути система ситоподібних трубок флоеми, які являють собою нерозривний ланцюг плазматичних мембран. Специфічність електричного сигналу, який використовується рослиною для передачі інформації, досягається завдяки змінам у часі та просторі таких параметрів як амплітуда імпульсу, його тривалість, поляризація, швидкість поширення.

Розглянемо реакцію рослини на зовнішні подразнення.

Вплив освітлення. Електричні сигнали генеруються в клітинах зелених рослин. Під час вмикання або вимикання світла сигнали генеруються лише у фотосинтетичних клітинах. Але, Люттге та Хигинботам (1984) встановаили, що при роботі з тканинами, що складаються із зелених та незелених клітин, існує електричний зв'язок між цими клітинами: якщо збуджувати зелену клітину, електричний потенціал можна зареєструвати в незеленій клітині.

Вплив температури. Реакцію рослини (помідора) на температурний стимул, прикладений до верхнього листка, наведено на рис. 23.2. Потенціал дії реєстрували на різних ділянках рослини — від верхівки до коріння. Було обрано такі режими експерименту: *A* — стимул — полум'я, прикладене до верхівки; індикаторний електрод прикладений до черешка, якщо опорний електрод занурений у ґрунт; *B* — стимул — нагрітий метал, прикладений до верхівки, каломельний індикаторний електрод, прикладений до черешка; *C* — використання двох

PAB09112.indd 212 26.11.2009 16:29:28

індикаторних електродів, розміщених на черешку на відстані 28 мм; *D* — індикаторний електрод, прикладений до стеблини, опорний електрод занурений у грунт; *E* — порівняння сигналів, що реєструються на черешку та стеблині; *F* — порівняння сигналів на коріннях, які занурені у воду або розчин (2 мМ) аспірину; стимул прикладений до верхівки, реєстрація сигналів на черешку.

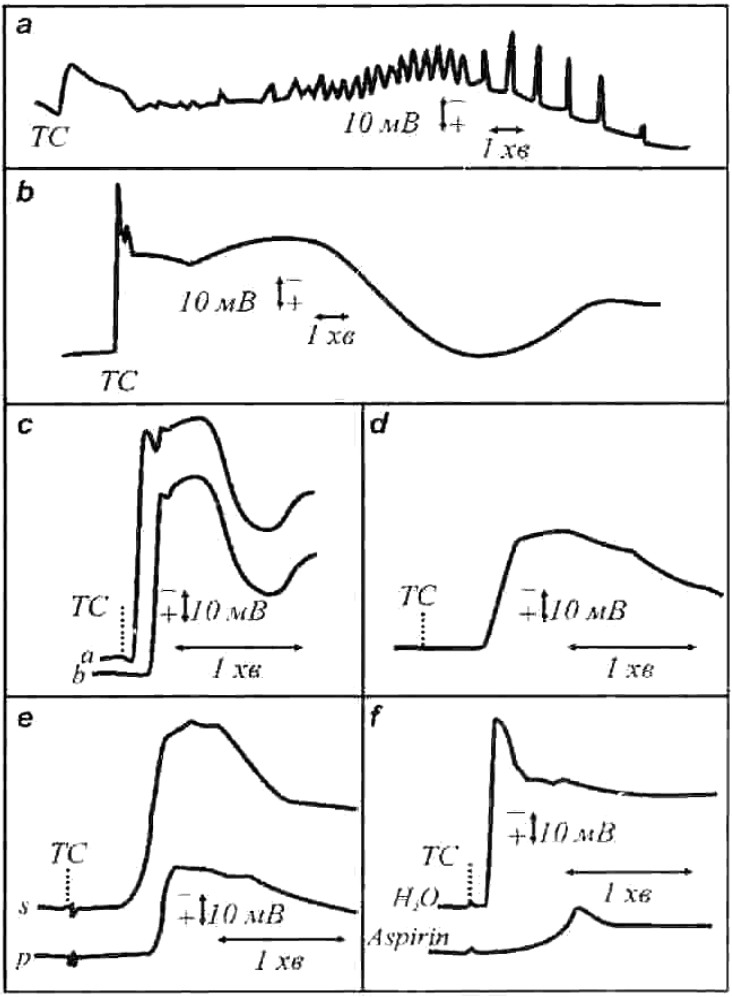


Рис. 23.2. Реєстрація потенціалу дії у відповідь на температурний стимул на різних ділянках рослини (пояснення в тексті)

PAB09112.indd 213 26.11.2009 16:29:29

Електричний шок. Результати вимірювання електричних потенціалів, індукованих прикладеним електричним полем амплітудою 10 В наведено на рис. 23.3. Швидкість поширення сигналу вздовж ситоподібних трубок у напрямку до основи рослини становить 3—5 см/с.

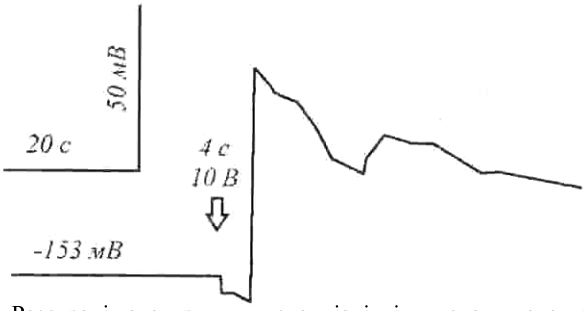


Рис. 21.3. Реєстрація електричних потенціалів, індукованих електричним полем амплітудою 10 В

Зміна водного режиму. Якщо рослина росте у достатньо вологому ґрунті, подальше додавання води не змінює параметри потенціалу спокою. Але якщо рослина росте у сухому ґрунті, додавання води або водне обприскування різко збільшують амплітуду потенціалу до 7± 2 мВ (рис. 23.4).

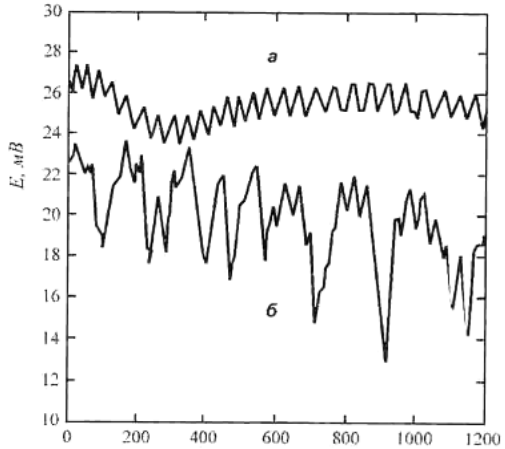


Рис. 23.4. Різниця потенціалів між електродами, зануреними у стеблину картоплі внаслідок обприскування: *а* — 0,3 мл дистильованої води вологого ґрунту; *б* — 50 мл дистильованої води сухого ґрунту

Вплив хімічних стимулів. Обробка листя картоплі водним розчином пентахлорофенолу з подальшим вимірюванням електричних по-

PAB09112.indd 214 26.11.2009 16:29:29

тенціалів на відстані 9см на стеблині рослини свідчить про монотонне зменшення протягом однієї години амплітуди потенціалу від 30 мВ до 0 ± 3мВ. Швидкість поширення сигналу при цьому дорівнювала 0,05 см/с.

Вплив комах. Результати зміни параметрів електричних потенціалів, що вимірювалися на стеблині, внаслідок розміщення на листках колорадських жуків наведено на рис. 23.5. Сигнал поширюється від верхівки до бульби.

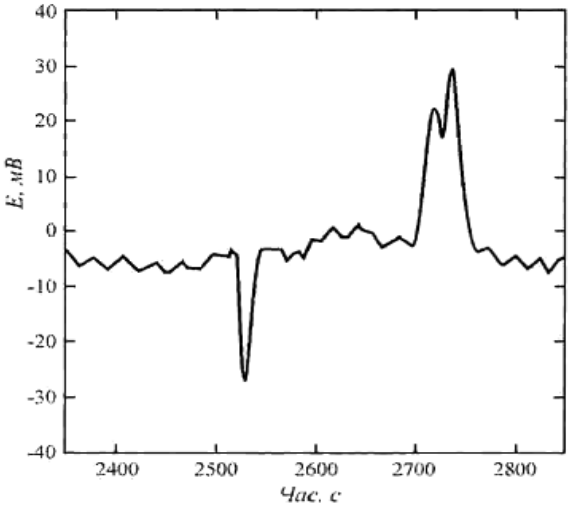


Рис. 23.5. Поява дзеркального відображення різниці потенціалів між електродами у відповідь на розміщення на листках картоплі колорадських жуків

Таким чином, рослина здійснює обмін інформацією за допомогою електричних сигналів у відповідь на зміну різноманітних параметрів навколишнього середовища.

24. ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ

24.1. Перенесення теплоти через теплопровідність

Перенесення теплоти — це обмін енергією між термодинамічною системою та навколишнім середовищем завдяки теплопровідності, конвекції, тепловому випромінюванню або випаровуванню. Внаслідок перенесення теплоти здійснюється теплова рівновага між тілом та його оточенням.

Теплопровідність — перенесення теплоти від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що сприяє вирівнюванню температури. Цей процес описується *законом Фур'є*:

$$\frac{dQ}{Sdt} = -k\frac{dT}{dS}, \qquad \frac{dT}{dS} \qquad (24.1)$$

де Q — кількість теплоти, що переноситься завдяки теплопровідності за час dt; k — коефіцієнт теплопровідності; S — площа, через

яку переноситься тепло; $\frac{dQ}{Sdt}$ — градієнт температури.

Під час теплопровідності $\frac{dT}{dS}$ компоненти лінійного закону термодинаміки необоротних процесів мають вигляд: $J_q =$ – густина потоку теплоти; $L_q = -k$; $F_q =$ Звідси можна одержати вираз:

$$J_q = L_q \times F_q . \qquad (24.2)$$

Одиниці вимірювання густини потоку теплоти — *Дж/м²·с = Вт/м²*; коефіцієнта теплопровідності — *Вт/м·К*; градієнта температури —*град/м.*

Типові значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин наведено в табл. 24.1.

PAB09112.indd 216 26.11.2009 16:29:29

Приклад

Визначити кількість теплоти, що віддається за одиницю часу свинею, яка лежить на бетонній підлозі товщиною 8 см при температурі 0^0С. Площа тіла свині — 3000см^2; теплопровідність бетону — 2,43 Вт/м·К, температура тіла 38^0С.

Розв'язання

Підставляємо числові значення в формулу (24.1):

$$dQ = -2{,}43\frac{Вт}{м\cdot град}\cdot 3000\cdot 10^{-4}\text{м}^2(0-38)\text{ К} / 8\cdot 10^{-2}\text{м} =$$

$$= -2{,}43\cdot 3\cdot 10^{-1}\cdot(-38) / 8\cdot 10^{-2} = 346{,}27\text{ Дж/с}.$$

Таблиця 24.1

Значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м×К	Температура, °С
Повітря (сухе)	0,0237	–10
«	0,0243	0
«	0,0250	10
«	0,0257	20
«	0,0264	30
«	0,0270	40
«	0,0277	50
Вода	0,565	0
«	0,599	20
«	0,627	40
Бетон	2,43	20
Деревина	0,126	20
Пластик	0,04	20
Цегла	0,63	20
Повсть	0,04	20

Контрольне завдання

Цегляна стінка тваринницької ферми має розміри 4м×10м×0,15 м. Визначити кількість теплоти, що пройде протягом 12 год через стінку, якщо зовнішня температура дорівнює 5 ^{0}С, внутрішня температура 20 ^{0}С. Коефіцієнт теплопровідності цегли 0,8 Вт/м×К.

Відповідь: 138,24·10^{6}Дж.

PAB09112.indd 217 26.11.2009 16:29:30

24.2. Перенесення теплоти через конвекцію

Конвекція — процес теплообміну, що супроводжується перемішуванням нагрітих і холодних шарів рідини або газів. Є різні види конвекції залежно від причин, що її породжують.

Вільна конвекція виникає в полі сили тяжіння через неоднорідності густини, які спричинюються різницею температур. Нагріта речовина під впливом архімедової сили переміщується відносно менш нагрітої речовини у напрямку, протилежному напрямку до сили тяжіння.

Вимушена конвекція викликається зовнішнім механічним впливом на середовище, наприклад за рахунок вітру. Збільшення швидкості вітру викликає збільшення кількості теплоти, розсіяної внаслідок вимушеної конвекції. Поблизу поверхні листка утворюється граничний шар повітря, в якому відбувається перехід від нерухомого повітря до повітряного потоку.

Тепловий потік J_Q, що проходить через одиницю площі подвійного граничного шару (наприклад, який утворюється навколо плоского листка) за одиницю часу та переноситься конвекційним потоком, залежить від коефіцієнта теплопровідності $k_п$ повітря (див. табл. 24.1) та градієнта температури $\frac{\partial T}{\partial x}$:

$$J_Q = \delta 2\, k_п \frac{\partial T}{\partial x} = 2\, k_п \frac{(T_л - T_п)}{\delta_{гр}}, \qquad (24.3)$$

де тепловий потік J_Q вимірюється у $Вт/м^2$. Тепловий потік вважається додатним, якщо теплота переноситься з листка у повітря, і від—ємним — у протилежному разі.

Ефективна товщина граничного шару $\delta_{гр}$ залежить від швидкості вітру δ та розмірів листка L:

$$\delta_{гр}(мм) = 4{,}0 \sqrt{\frac{L(м)}{\upsilon(м/с)}}. \qquad (24.4)$$

Вираз (24.3) можна записати так:

$$J_Q = k_Q(T_л - T_п), \qquad (24.5)$$

де $k_Q = k_п / \delta$ — коефіцієнт конвекції, який вимірюється в $Вт \times м^{-2} \times K^{-1}$.

Тепловий потік J_Q для об′єктів циліндричної форми радіусом r, обумовлений теплопровідністю, визначається за виразом:

PAB09112.indd 218 26.11.2009 16:29:30

$$J_Q = \frac{k_n(T_ц - T_п)}{r\ln\left(\frac{r+\delta_{гр}}{r}\right)}, \qquad (24.6)$$

де $T_ц$ — температура поверхні циліндричного об´єкта; $T_п$ — температура навколишнього повітря. Для об'єктів циліндричної форми товщина граничного шару визначається за виразом:

$$\delta_{гр}(\text{мм}) = 5{,}8\sqrt{\frac{D(м)}{\upsilon(м/с)}}, \qquad (24.7)$$

де D — діаметр циліндра.

Приклад

Визначити тепловий потік J_Q, зумовлений теплопровідністю, для плоского листка довжиною 10 см, якщо температура листка $t_л$ = 25 ^{0}C, температура навколишнього повітря $t_п$ = 20 ^{0}C, а товщина граничного шару дорівнює 1,4 мм.

Розв'язання

Підставимо числові дані у рівняння (24.3):

$$J_Q = 2k_п\frac{(T_л - T_п)}{\delta_{гр}} = \frac{2\cdot 0{,}0259 Вт\cdot м^{-1}\cdot{}^0 C(25^0C - 20^0C)}{1{,}4\cdot 10^{-3} м} = 185 \text{ Вт}\times\text{м}^{-2}.$$

Контрольне завдання

Розрахувати густину потоку теплоти, якою обмінюється завдяки конвекції з навколишнім середовищем тварина, що можна апроксимувати циліндром, діаметр якого 0,20 м, якщо температура тіла — 40 ^{0}C, швидкість руху повітря — 5 м/с.

24.3. Перенесення теплоти через випромінювання

Розглянемо теплообмін тварини з навколишнім середовищем. Протягом дня на тварину діє пряме (800 Вт/м^2) та розсіяне сонячне випромінювання (100—250 Вт/м^2), а також довгохвильове випромінювання земної поверхні (320—370 Вт/м^2). Випромінювання, що досягає тіла тварини, поглинається, відбивається або пропускається твариною.

Якщо випромінювання повністю поглинається, таке тіло називають *абсолютно чорним;* якщо поглинається лише частина зовнішнього випромінювання, таке тіло називають *сірим.* Реальні тіла є джерелами сірого випромінювання, однакового за складом з випромінюванням абсолютно чорного тіла, але з меншою енергетичною яскравістю. Тварини характеризуються поглинальною і випромінювальною здатністю.

PAB09112.indd 219 26.11.2009 16:29:30

Кількість поглинутої твариною енергії визначається за законом Стефана-Больцмана:

$$Q_a = Sa\sigma T_S^4, \qquad (24.8)$$

де S — площа поверхні тіла тварини; a — поглинальна здатність тварини; a — стала Стефана-Больцмана; T_s — температура поверхні тіла тварини.

Кількість енергії, що випромінюється твариною, визначається за виразом:

$$Q_a = S\varepsilon\sigma T_e^4, \qquad (24.9)$$

де ε — випромінювальна здатність тіла тварини; T_e — температура сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні.

Таким чином, випромінювальний баланс тварини визначається за виразом:

$$R_n = Q_a - Q_e = Sa\sigma T_S^4 - S\varepsilon\sigma T_e^4. \qquad (24.10)$$

Поглинальна здатність тварини залежить від кольору шкіряного покриву — тварини білої масті поглинають меншу кількість сонячного випромінювання, ніж тварини з чорним забарвленням.

Відбивання сонячного випромінювання від тварини відбувається в видимій та інфрачервоній областях спектра; рівень відбивання залежить від кута падіння сонячного випромінювання і забарвлення тварини. Максимум відбивання поверхні тварини припадає на 1—2 мкм.

Крім того, оптичне випромінювання, що проходить крізь шкіру тварини, зазнає розсіювання на структурних елементах тканини. Характер розподілу розсіяного випромінювання залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання, що падає на поверхню тіла тварини, розмірів та форми біологічних структур, що беруть участь у розсіюванні.

24.4. Перенесення теплоти через пароутворення

Втрати теплоти через пароутворення λE визначаються процесами дихання та потовиділення (тут $\lambda = 2{,}43\times10^6$ Дж/ кг — прихована теплота пароутворення; E — втрати вологи при диханні або потовиділенні). У процесі випаровування молекули рідини з найбільшою

PAB09112.indd 220 26.11.2009 16:29:31

швидкістю і кінетичною енергією залишають поверхню тіла тварини, в результаті чого температура поверхні знижується. Цей процес відбувається тоді, коли температура повітря вища, ніж температура тіла. Типові значення втрат енергії через випаровування змінюються від 7,0 до 20,9 Вт/м^2.

Процес потовиділення вдвоє збільшує втрати теплоти (людина спроможна виділити близько 1,5 кг вологи за годину, що еквівалентно 600 Вт/м^2). Вівці та собаки здатні компенсувати неспроможність потіти важким диханням, тоді як велика рогата худоба втрачає велику кількість теплоти саме через потовиділення. Швидкість випаровування залежить від поверхні тіла тварини. Процес виділення поту потовими залозами тварин відбувається рефлекторно.

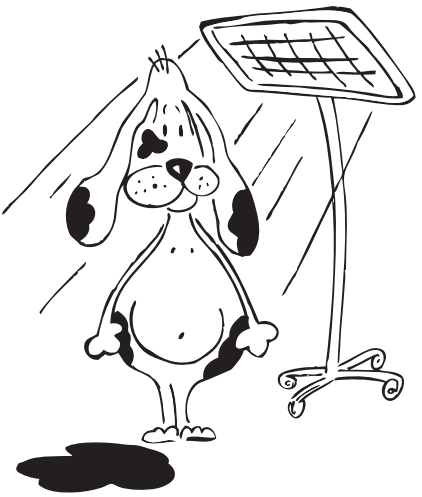
PAB09112.indd 221 26.11.2009 16:29:31

розділ IV

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ФІЗИЧНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ З НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

25. КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

25.1. Закони теплового випромінювання



Кожне тіло випромінює за будь-якої температури, крім абсолютного нуля, енергію у вигляді електромагнітних хвиль. Це електромагнітне випромінювання, що виникає за рахунок внутрішньої енергії тіла, називається *тепловим випромінюванням.*

Експериментально одержаний спектральний розподіл енергії абсолютно чорного тіла при різних температурах наведено на рис. 25.1, звідки видно, що повна енергія, яка випромінюється, представлена площею під кривою і швидко збільшується з підвищенням температури.

Частота ν_{max}, на якій знаходиться максимум випромінювальної здатності, також збільшується з підвищенням температури.

Цей короткохвильовий зсув максимуму розподілу у разі збільшення температури сформулював як закон у 1893 р. В. Він.

PAB09112.indd 222 26.11.2009 16:29:31

Закон зміщення Віна *λ довжина хвилі λ_{max}, на яку припадає максимум енергії в спектрі рівноважного випромінювання, обернено пропорційна абсолютній температурі T тіла, що випромінює:*

$$\lambda_{max} = b/T, \quad (25.1)$$

де $b = 2{,}897756 \cdot 10^{-3}$ м/К.

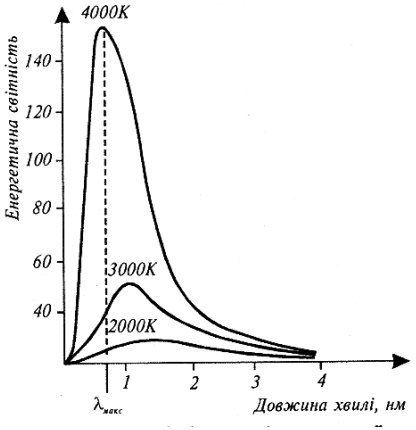


Рис. 25.1. Залежність енергетичної світності абсолютно чорного тіла

Приклад

Температура поверхні листка становить 280 К. На яку довжину хвилі припадає максимум випромінювання поверхні листка?

Розв'язання

Використовуючи закон Віна, одержуємо:

$\lambda_{max} = 2{,}8978 \cdot 10^{-3}/T = 2{,}8978 \cdot 10^{-3} / 280 = 10 \cdot 10^{-6}$ м = 10 мкм.

У 1900 р. М. Планк запропонував теоретичне обгрунтування спектральних закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла, яке було сформульоване як *закон випромінювання Планка (формула Планка):*

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad (25.2)$$

де h — стала Планка ($h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ Дж×с); λ — довжина хвилі; c — швидкість світла; T — абсолютна температура; k — стала Больцмана; e — основа натурального логарифма.

Як наслідок закону випромінювання Планка випливає *закон випромінювання Стефана–Больцмана — повна випромінювальна здатність R абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню температури:*

$$R = \sigma T^4, \quad (25.3)$$

де R вимірюється в *Вт/м²*; σ — стала Стефана–Больцмана ($\sigma = 5{,}67051 \cdot 10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$).

Цей закон застосовується для оцінювання випромінювання та випромінювального балансу компонентів навколишнього середовища.

PAB09112.indd 223 26.11.2009 16:29:31

25.2. Короткохвильове сонячне випромінювання

Температура поверхні Сонця становить близько 6000 К. Довжина хвилі сонячного випромінювання визначається за законом зміщення Віна (25.1):

$\lambda_{max}(Сонце) = (2{,}8978 \cdot 10^{-3}$ м/К)/6000 К = $4{,}83 \cdot 10^{-7}$ м = $483 \cdot 10^{-9}$ м = = 483 нм.

Отже, максимум сонячного випромінювання припадає на видиму область спектра. Під час проходження сонячного випромінювання через атмосферу, частина його поглинається молекулами або частинками атмосфери або розсіюється ними.

25.3. Довгохвильове випромінювання земної поверхні

Земна поверхня діє як абсолютно чорне тіло з температурою 288 К. Довжина хвилі випромінювання земної поверхні визначається за законом зміщення Віна (25.1):

$$\lambda_{max}(Земля) = (2{,}8978 \cdot 10^{-3} \text{ м/К})/288 \text{ К} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 10 \text{ мкм}.$$

Максимум випромінювання земної поверхні припадає на інфрачервону область спектра.

Таким чином, спектральна область сонячного випромінювання становить 200–5000 нм з максимумом близько 500 нм; спектральна область випромінювання земної поверхні становить 4–50 мкм з максимумом 10 мкм (рис. 25.2).

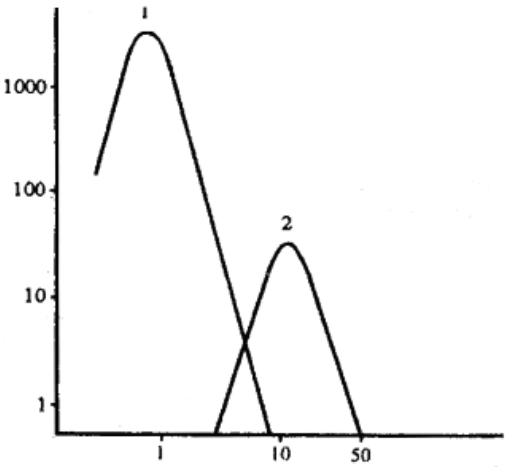


Рис. 25.2. Спектри випромінювання: 1 — Сонця; 2 — земної поверхні

PAB09112.indd 224 26.11.2009 16:29:31

25.4. Озоновий шар

Основна маса озону атмосфери (близько 90 %) міститься в стратосфері на висоті 10—50 км з максимумом на висоті 20–25 км. Решта озону знаходиться в тропосфері. Слід зазначити, що незважаючи на незначну концентрацію озону (одна молекула озону припадає на мільйон молекул повітря), він здатний поглинати ультрафіолетове сонячне випромінювання: майже все випромінювання УФ-С області (200—300 нм), та частину випромінювання УФ-В області (280—320 нм). Саме УФ-В область призводить до еритеми, небезпечних генетичних порушень в організмі людини, раку шкіри. Короткохвильове (<270 нм) ультрафіолетове випромінювання спроможне розщепити молекулу кисню O_2 на синглетний кисень O, який взаємодіє з O_2 і утворює озон O_3. В цілому, озоновий шар являє собою ефективний фільтр для сонячного ультрафіолетового випромінювання в ділянці 280—320 нм, в якій поглинають біологічно важливі молекули білків і нуклеїнових кислот.

У стратосфері під впливом сонячного випромінювання відбуваються такі процеси.

1. Взаємодія короткохвильового ($\lambda < 240$ нм) випромінювання з молекулою озону, яка призводить до появи атомарного кисню:

$$O_2 + h\nu \rightarrow O + O. \qquad (25.4)$$

2. Взаємодія атомарного кисню з молекулярним:

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M, \qquad (25.5)$$

де M — якась інша молекула (звичайно, азот або кисень).

3. Взаємодія довгохвильового (λ = 300–315 нм) випромінювання з озоном, що викликає зворотне перетворення останнього:

$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O. \qquad (25.6)$$

Озонова дірка утворюється в шарі стратосферного озону, який дуже чутливий до впливу різних сполук, які містять хлор, навіть при незначних концентраціях останнього. Відносно механізму утворення озонової дірки немає єдиної думки. Існують дві версії щодо причин виникнення цього явища. Одні вчені вважають, що озоновий шар руйнується внаслідок послаблення потоку ультрафіолетового випромінювання, необхідного для утворення озону, в кінці року; тут певну роль

PAB09112.indd 225 26.11.2009 16:29:32

відіграють швидкі переміщення великих повітряних мас над Антарктидою. Інші стверджують, що озоновий шар руйнується через потрапляння в атмосферу хлорфторвуглецiв (фреонів), які використовують як хладоагенти та розпилювачі в холодильних установах, вогнегасниках, аерозольних виробах. Характерним є досить тривалий (від 70 до 500 років) проміжок часу існування цих сполук; поширюючись у повітряному просторі, вони руйнуються під впливом сонячного випромінювання, виділяють атоми хлору чи брому, що взаємодіють із молекулами озону, руйнуючи останні.

У 1985 р. було прийнято Віденську конвекцію із захисту озонового шару, а в 1987 р. у Монреалі підписано міжнародний протокол щодо речовин, які руйнують озоновий шар. У 1988 р. Україна приєдналася до віденської конвенції, підписала доповнення та поправки до монреальського договору.

Спостереження за загальним вмістом озону (ЗВО) в Україні почалися в 1973—1974 роках на станціях Бориспіль, Карадаг, Одеса, Львів. Тоді ці станції входили до загальноозонової мережі моніторингу озону. Вони були розташовані так, що, з урахуванням станцій Воронеж і Цимлянськ, охоплювали практично всю територію України. Після розпаду Союзу схід України виявився практично не охопленим національними засобами спостереження. У 1990 році було відкрито озонометричні станції в Києві (УКРНДГМІ) і Богуславі, на яких вимірювали вміст озону, сонячну та ультрафіолетову радіацію. Тоді почали вивчати ультрафіолетовий клімат у всіх регіонах країни, робити моніторинг опромінення території України, щоб запобігти негативним наслідкам від озонових аномалій. Для більш повної інформації тепер використовують дані, отримані з супутникового приладу TOMS.

Глобальні вимірювання рівня озону за допомогою супутників протягом 1979-1993 рр. свідчать про суттєве збільшення ультрафіолетового опромінювання в високих і середніх широтах обох півкуль. Зменшення озонового шару продовжувалося до 1998 р., після чого спостерігається його поступове відновлення.

25.5. Вимірювання озону

Одиниці Добсона використовуються для вимірювання „товщини" озонового шару. Якщо уявити, що всі молекули озону, які присутні в стратосфері, можна зібрати на поверхні (при нормальних тиску та температурі), то товщина цього шару становитиме 3 мм. Ця кількість озону відповідає 300 *DU* (одиницям Добсона).

Озоновий зонд являє собою прилад, що встановлюється на повітря-

PAB09112.indd 226 26.11.2009 16:29:32

ній кулі з газом, яка підіймається на висоту до 35 км. Він містить озоновий сенсор, джерело живлення, газову помпу та радіопередавач. Під час польоту кулі повітря з озоном пропускається за допомогою помпи через розчин, окислення якого озоном призводить до появи електричного струму, що реєструється. Величина цього струму пропорційна потоку озону і, таким чином, його концентрації.

Спектрофотометр Добсона. Цей прилад використовують для оцінювання озонового шару на основі диференціальної спектрофотометрії. Як джерело світла використовують ультрафіолетове випромінювання Сонця або Місяця. Метод диференціальної спектрофотометрії передбачає порівняння рівня поглинання на двох довжинах хвиль – 305 нм (поглинання озону) та 325 нм (опорна довжина хвилі). Аналіз поглинання ультрафіолетового випромінювання на аналітичних довжинах хвиль дає можливість оцінити концентрацію озону в атмосфері та його просторовий розподіл. Принцип дії спектрофотометра Добсона пояснюється на рис. 25.3. Клиноподібний фільтр поступово змінює інтенсивність опорного променя, доки обидва оптичних сигнали не зрівноважаться. Барабан, який пересовує клин, обладнаний шкалою в одиницях концентрації озону.

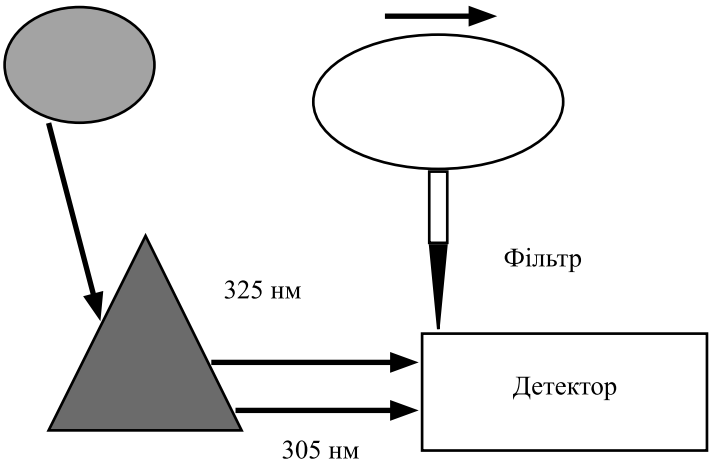


Рис. 25.3. Принцип дії спектрофотометра Добсона

Лідари. Дистанційне зондування озону можна здійснювати шляхом вимірювання поглинання лазерного випромінювання на довжинах хвиль 308 нм та 351 нм озоновим шаром. Порівняння поглинання

PAB09112.indd 227 26.11.2009 16:29:32

на цих довжинах хвиль дає можливість оцінити профіль озону в діапазоні висот від 10 до 50 км.

Супутники. За допомогою запуску космічних платформ відповідно до експерименту за моніторингом глобального озону *(Global Ozone Monitoring Experiment)* було здійснено спостереження за основними компонентами атмосфери, в тому числі й за озоном. Зрозуміти принцип та масштаб цих спостережень читач зможе за допомогою сайту:

http://www.esa.int/esaLP/SEMTTEG23IE_LPmetop_0.html

25.6. Парниковий ефект

На межі XIX—XX ст. шведський вчений С. Ареніус передбачив можливість нагромадження в атмосфері вуглекислого газу, що може призвести до підвищення температури нижніх шарів атмосфери. Дані свідчать, що в результаті господарської діяльності людини в атмосфері збільшується вміст вуглекислого газу (CO_2), закису азоту (N_2O), метану (CH_4), галогенопохідних вуглеводнів і тропосферного озону (O_3).

Оцінки вчених дають приблизну цифру швидкості зростання CO_2 в атмосфері — 3 Гт/рік. Отже, в кінці XXI ст. вміст CO_2 в атмосфері подвоїться порівняно із серединою XIX ст.

Основними молекулами атмосфери, які беруть участь у парниковому ефекті, є водяна пара, двоокис вуглецю, озон, оксид вуглецю, метан і оксиди азоту. Асиметричні молекули, такі як H_2O, O_3, мають електричний дипольний момент і здатні поглинати оптичне випромінювання.

Симетричні молекули, такі як азот і кисень, внаслідок своєї симетричної структури позбавлені електричного дипольного моменту і не беруть участі у процесі поглинання.

У той же час, молекули, лінійні за своєю структурою (CO_2, N_2O) беруть участь у *валентних* (при яких змінюються довжини зв'язків) та *деформаційних* (що полягають у зміні кута між двома зв'язками) коливаннях (рис. 25.4). Очевидно, що завдяки таким коливанням у цих молекулах відбувається просторове зміщення різноіменних електричних зарядів та індукується електричний дипольний момент.

Теплове довгохвильове випромінювання Землі поглинається атмосферними газами (CO_2, H_2O, CH_4), що викликає нагрівання приповерхневого шару атмосфери.

Дійсно, земна поверхня, яка випромінює довгохвильове випромінювання, характеризується відносно високим коефіцієнтом теплопровідності (k = 0,209 Вт/м·К); те ж саме можна сказати про водяну пару в атмосфері (k = 0,599 Вт/м·К). Але повітряний шар між земною

PAB09112.indd 228 26.11.2009 16:29:32

поверхнею та водяною парою атмосфери має незначний коефіцієнт теплопровідності (k = 0,0257 Вт/м·К). Ось чому водяна пара та вищезгадані атмосферні гази відіграють роль віконного скла у парнику, через що це явище назвали *парниковим ефектом*.

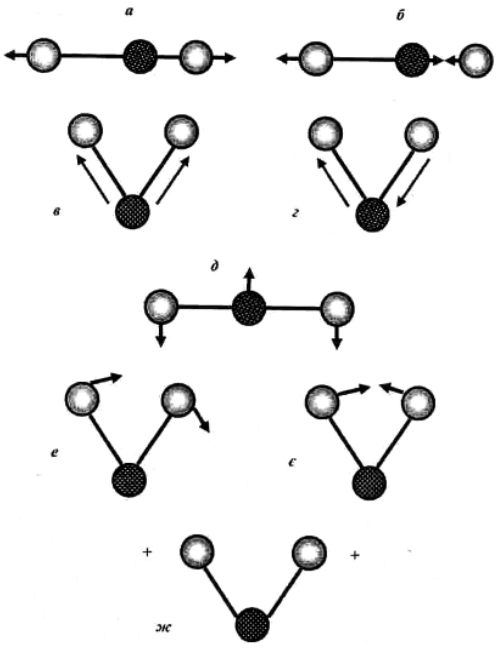


Рис. 25.4. Основні типи валентних та деформаційних коливань: *а* — симетричне валентне; *б* — антисиметричне валентне; *в* — симетричне валентне; *г* — антисиметричне валентне; *д* — деформаційне; *є* — деформаційне крутильне; *ж* — деформаційне різальне; *з* — деформаційне

Внаслідок цього ефекту порушується тепловий баланс; цілком імовірним є підвищення глобальної температури поверхні Землі за рахунок зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату. Згідно із рекомендаціями Міжнародної конференції «Роль двуокису вуглецю та інших газів, які викликають парниковий ефект, у змінах клімату і пов'язаних із ними діях» (Австрія, 1985), підвищення середніх температур негативно впливає на врожаї пшениці і кукурудзи в зернових областях середніх широт Північної Америки й Західної Європи. Так, при сучасній технології сільського господарства і сучасному складі зернових культур потепління на 2 К при незмінній

PAB09112.indd 229 26.11.2009 16:29:32

кількості опадів повинне призвести до зниження врожаю у середньому на 10±7 %. Крім того, підвищення температури може викликати розтавання полярного льоду і збільшення рівня Світового океану. А це, в свою чергу, сприятиме затопленню територій, збільшенню тривалості сезонного відтавання грунтів, погіршенню лісних масивів, що розташовані в області вічної мерзлоти.

25.7. Вимірювання впливу парникового ефекту

Розглянемо декілька методичних прийомів щодо кількісного оцінювання парникового ефекту.

Вимірювання температури морської поверхні як з борту океанських суден, так і супутників за допомогою інфрачервоних і надвисокочастотних радіометрів дозволяє оцінити електромагнітне випромінювання, що висилається та відбивається морською поверхнею, а також висилається та поглинається атмосферою (у разі використання супутників). Моделювання цих процесів призводить до точних оцінок глобальних змін температури навколишнього середовища.

Оцінка глобального нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (НДВІ). Перевагою цього індексу є близька до лінійної залежність його величини від кількості рослинної продукції, яка залежить від температури.

Визначення концентрації атмосферних газів дає можливість оцінити випромінювальний баланс Землі, температуру земної поверхні, температурний профіль атмосфери та фізичні властивості хмар. Перспективним методом кількісної оцінки атмосферних газів є спектроскопія Фур'є перетворення, в основі якої лежить можливість будь-якому частотному спектру зіставити специфічну інтерферограму – так званий *спектр Фур'є*. Методи спектроскопії Фур'є перетворення характеризуються високим розділенням, точністю і відтворюваністю.

Вимірювання температури приповерхневого шару базується на оцінці інфрачервоного випромінювання, що висилається системою «земна поверхня-атмосфера» на 19 спектральних ділянках в області від 3,7 до 15 мкм, а також надвисокочастотного випромінювання на 4 ділянках поблизу 50 МГц спектра випромінювання кисню. Комбінація двох спектральних областей дає можливість обмежити вплив хмарності та більш точно оцінити температуру приповерхневого шару атмосфери.

PAB09112.indd 230 26.11.2009 16:29:32

25.8. Енергетичний баланс земної поверхні

Сумарне випромінювання $R_{сум}$ земної поверхні описується рівнянням:

$$R_{сум} = (1 - a)\, E_{g\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_S^4 - T_A^4), \qquad (25.7)$$

де $E_{g\downarrow}$ — короткохвильове сонячне випромінювання, що падає на земну поверхню (Вт/м^2); a — альбедо або доля сонячного випромінювання, що відбивається від земної поверхні (отже, $-aE_{g\downarrow}$ — це короткохвильове сонячне випромінювання, що відбивається від земної поверхні); величина $-\varepsilon\sigma T_S^4$ є довгохвильовим випромінюванням земної поверхні, тоді як $\varepsilon\sigma T_A^4$ є довгохвильовим атмосферним випромінюванням, що падає на земну поверхню (рис. 25.5). У формулі (25.7) знаки «мінус» характеризують втрати випромінювання,

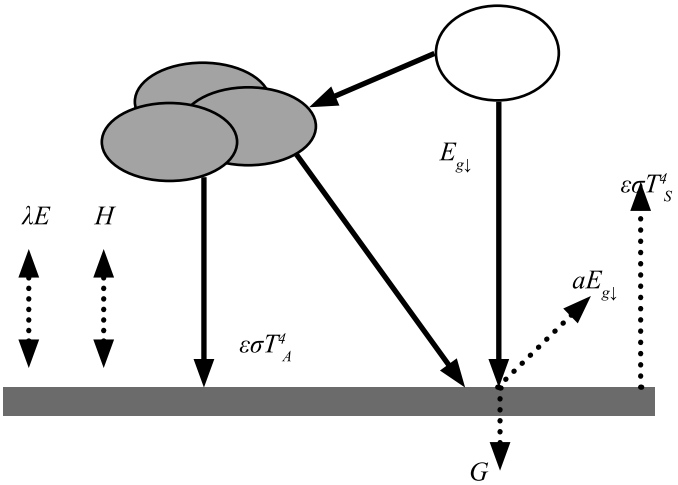


Рис. 25.5. Енергетичний баланс земної поверхні

Сумарне випромінювання, що одержано земною поверзнею, витрачається на певні процеси, а саме.

1. *Потік теплоти G через земну поверхню* характеризується передачею теплової енергії углиб земної поверхні завдяки конвекції. Умовою реалізації цього процесу є наявність температурного градієнту між поверхневими та глибинними шарами грунту. Тепловий потік вважається додатним, якщо температура поверхні перевищує температуру грунту на глибині; в цьому випадку тепловий потік направлений униз. Якщо цей потік незначний у регіонах помірного та тропічного

PAB09112.indd 231 26.11.2009 16:29:32

клімату, то в арктичних зонах він становить 10—20 % від сумарного випромінювання.

2. *Прихована теплота* λE — це кількість енергії у вигляді теплоти, яку треба надати речовині для переходу в інший фазовий стан. Прихована теплота передається в атмосферу завдяки випаровуванню або транспірації.

Наприклад, процес переходу води у пару або випаровування характеризується теплотою λE, де $\lambda = 2.43 \times 10^6$ Дж/кг є прихованою теплотою пароутворення, а E — швидкістю випаровування (або транспірації), що вимірюється в кг/м^2·с.

Зазвичай прихована теплота передається в атмосферу через конвекцію і становить близько 16 % від загальних втрат енергії земною поверхнею.

3. *Відчутна теплота* H — це теплова енергія, що переноситься тілом, яке має температуру вищу, ніж температура його оточення, завдяки теплопровідності або/та конвекції. Для здійснення цього процесу необхідний температурний градієнт між поверхнею та навколишнім повітрям. Оскільки повітря має невеликий коефіцієнт теплопровідності, більш реальною у перенесенні теплової енергії є участь конвекції. Якщо температура земної поверхні перевищує температуру повітря, потік відчутної теплоти вважається додатним. Втім, перенесення теплоти з земної поверхні охолоджує останню. Типові значення відчутної теплоти становлять близько 5 % від загальних втрат енергії земною поверхнею.

Отже, сумарне випромінювання, що одержано земною поверхнею, описується рівнянням:

$$R_{сум} = G + \lambda E + H. \qquad (25.8)$$

Загальне рівняння енергетичного балансу земної поверхні матиме вигляд:

$$(1 - a)\, E_{g\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_S^4 - T_A^4) = G + \lambda E + H. \qquad (25.9)$$

Енергетичний баланс земної поверхні залежить від часу доби. Так, отримання енергії завдяки сумарному випромінюванню та втрати її через потік прихованої теплоти (випаровування у повітря) та потік відчутної теплоти (конвекції) максимальні вдень. Вночі втрати теплоти пов'язані з сумарним випромінюванням, тоді як потоки прихованої теплоти (процеси конденсації) та відчутної теплоти (зворотна конвекція) забезпечують накопичення теплоти.

PAB09112.indd 232 26.11.2009 16:29:33

25.9. Енергетичний баланс листка та рослин

Розглянемо можливі шляхи постачання енергії на поверхню листка (рис. 25.6). На верхню поверхню листка надходить пряме та дифузне (розсіяне хмарами та частинками атмосфери) сонячне випромінювання ($E_{C\downarrow}$) видимої області спектра, а також довгохвильове випромінювання атмосфери (σT_A^4). На нижню поверхню листка надходить випромінювання, відбите від земної поверхні, стовбура, гілок, інших листків тощо ($a_з E_{C\downarrow}$), та довгохвильове випромінювання земної поверхні ($\varepsilon\sigma T_З^4$). Відбите випромінювання може становити 10-30 % від загального випромінювання, що досягає поверхні листка.

Втрати енергії верхньою поверхнею листка визначаються процесами відбивання ($a_Л E_{C\downarrow}$) сонячного випромінювання видимої області спектра; відбивання випромінювання, що надходить із земної поверхні ($rE_{C\downarrow}$); поглинання інфрачервоного випромінювання листком $a_{Iч}(T_A^4+\varepsilon_з T_З^4)$; теплового (інфрачервоного) випромінювання листка $2\sigma_Л \sigma T_Л^4$(фактор 2 пов'язаний з наявністю двох сторін листка). Тут: $a_Л$ поглинання листком глобального сонячного випромінювання; r — відбивання сонячного випромінювання земною поверхнею; $a_{Iч}$ — частка енергії падаючого інфрачервоного випромінювання, поглинутого листком; $\varepsilon_з$ — випромінювальна здатність грунту; $\varepsilon_{Iч}$ — випромінювальна здатність листка; T_A — температура повітря; $T_З$ — температура земної поверхні; $T_Л$ — температура листка.

Якщо врахувати реальні значення параметрів, що характеризують випромінювальний баланс листка, а саме: $a_з = 0{,}15$, $a_Л = \varepsilon_Л = 0{,}2$, $\tau_з = 0{,}95$, $\varepsilon_Л = 0{,}97$, то рівняння випромінювального балансу листка можна подати у вигляді:

$$R_{сум} = a_Л(1+r)E_{C\downarrow} + a_{Iч}\sigma(T_A^4 + \varepsilon_з T_З^4) - 2\sigma_{Iч}\varepsilon T_Л^4. \qquad (25.10)$$

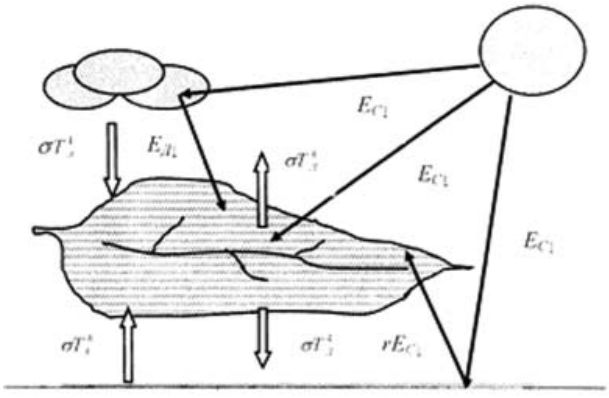


Рис. 25.6. Енергетичний баланс листка

PAB09112.indd 233 26.11.2009 16:29:33

Енергія, що описується рівнянням (25.10), витрачається на такі процеси, що відбуваються у листку або рослині в цілому:

$$R_{сум} = G + \lambda E + H, \qquad (25.11)$$

де G — потік теплоти через земну поверхню; λE — прихована теплота; H — відчутна теплота (рис. 25.7).

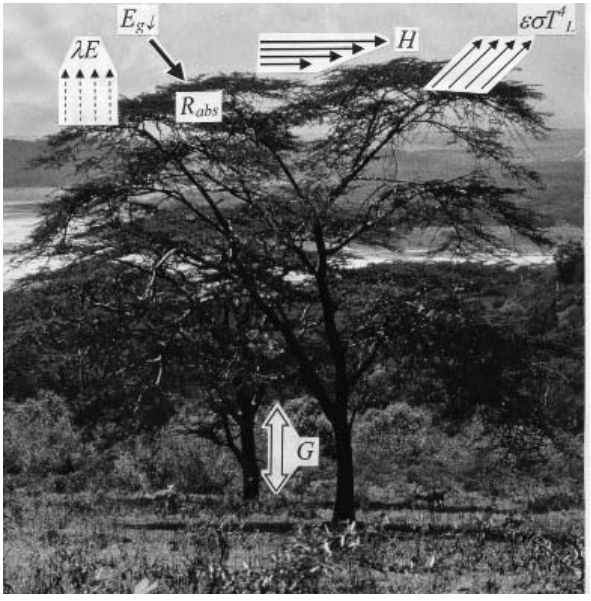


Рис. 25.7. Основні процеси, що описують обмін енергією рослини з навколишнім середовищем (пояснення в тексті)

Загальне рівняння енергетичного балансу листка або рослини матиме вигляд:

$$a_{Л}\,(1+r)E_{C\downarrow} + a_{Iч}\sigma(T^4_A + \varepsilon_3 T^4_3) - 2\varepsilon_{Iч}\sigma T^4_3 = G + \lambda E + H. \qquad (25.12)$$

25.10. Енергетичний баланс тварини

Рівняння загального енергетичного балансу тварини описується рівнянням:

$$R_{сум} + M = \varepsilon\sigma T^4_S - H - G - \lambda E, \qquad (25.13)$$

PAB09112.indd 234 26.11.2009 16:29:33

де $R_{сум}$ — сумарна кількість випромінювання, поглинутого поверхнею тварини; M — швидкість продукції теплоти твариною за рахунок метаболічних процесів з одиниці площі тварини; $\varepsilon\sigma T^4_{Л}$ — втрати енергії завдяки тепловому випромінюванню; H – відчутна теплота; λE — прихована теплота (випаровування); G — потік теплоти через земну поверхню (рис. 25.8).

Принциповою відміною енергетичного балансу тварини є *метаболізм* — сукупність хімічних процесів, що відбуваються в організмі тварини, завдяки яким підтримується життєдіяльність та структура живого організму, його ріст, репродукція та реакція на навколишнє середовище.

Швидкість продукції теплоти M за рахунок метаболічних процесів можна оцінити з одиниці поверхні S або маси m тіла тварини за допомогою виразів:

$$S = 0{,}1m^{2/3} \quad (25.14)$$

та

$$M_b = Cm^{3/4}, \quad (25.15)$$

де C – стала (C = 3–5 % для ендотермів та близько 5 % для пойкілотермів при температурі 20 ^{0}C). Тут M_b вимірюється в Bm; m – в *кг*.

Типові значення M_b для ендотермів варіюють від 30 до 50 Вт/м^2 .

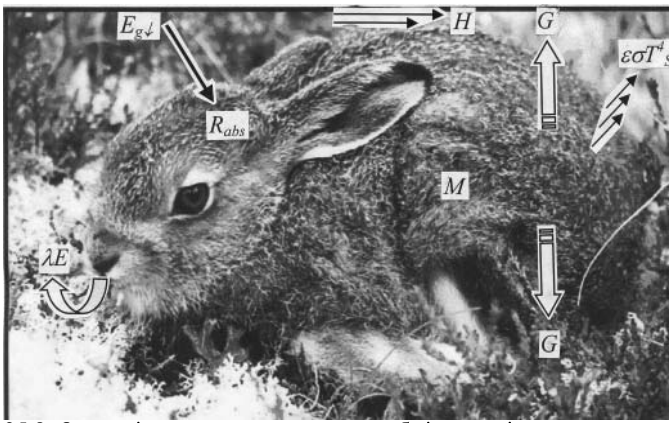


Рис. 25.8. Основні процеси, що описують обмін енергією тварини з навколишнім середовищем (пояснення в тексті)

25.11. Енергетичний баланс водойм

Енергетичний баланс водних резервуарів можна представити таким рівнянням:

$$R_{сум} = H_н + H_{тк} + H + \lambda E + H_{гв}, \quad (25.16)$$

PAB09112.indd 235 26.11.2009 16:29:33

де $R_{сум} = (1 - a)\, E_{g\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_B^4 - T_A^4)$ — сумарне випромінювання водної поверхні; $E_{g\downarrow}$ — короткохвильове сонячне випромінювання, що падає на водну поверхню (Вт/м^2); a – альбедо або доля сонячного випромінювання, що відбивається від водної поверхні; $\varepsilon\sigma T_B^4$ – довгохвильове випромінювання водної поверхні; $\varepsilon\sigma T_A^4$ — довгохвильове атмосферне випромінювання, що падає на водну поверхню; $H_н$ — теплова енергія, що накопичується водою; $H_{тк}$ — сумарна енергія, що переноситься потоком води через теплопровідність або конвекцію; H — відчутна теплота; λE — прихована теплота (випаровування); $H_{гв}$ — тепловий потік у грунтові води (рис. 25.9).

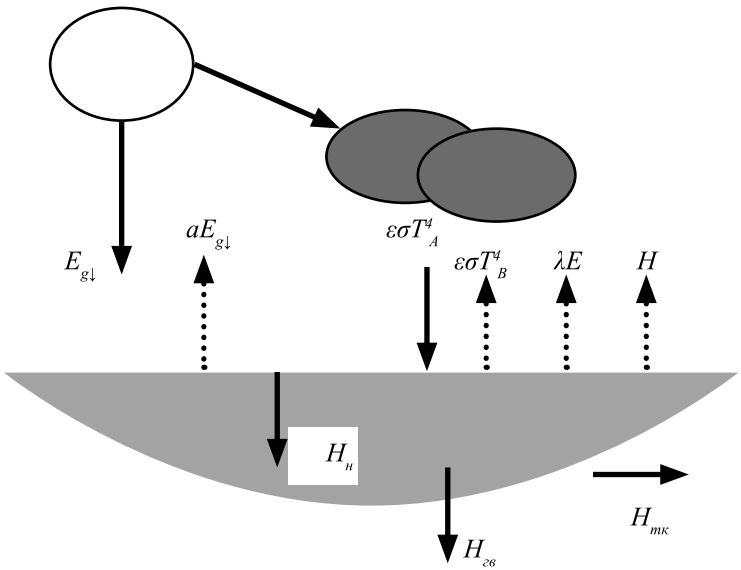


Рис. 25.9. Енергетичний баланс водойм

ДОДАТОК
Психрометричні таблиці
1. Пружність водяної пари, мм рт. ст.

Температура повітря, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,71	4,75	4,79	4,82	4,85	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,10	5,15	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5.72	5,76	5,84	5,89	5,93	5,93	5,97	6,02	6,05
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6.63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7.41	7,46
7	7,52	7,54	7,61	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55
9	8,61	8,67	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,65	9.71	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,25	10,32	10,38	10,45
12	10,52	10,59	10,66	10,74	10,80	10,88	10,95	11,02	11.09	11.16
13	11,24	11,31	11,39	11,46	11,54	11,61	11,69	11,76	11,84	11,91
14	11,99	12,07	12,15	12,23	12,31	12,39	12,47	12,55	12,63	12,72
15	12,78	12,87	12,95	13,03	13,12	13,20	13,29	13,38	13,46	13,55
16	13,64	13,72	13,80	13,89	13,98	14.07	14,16	14,25	14,34	14,43
17	14,53	14,62	14,71	14.81	14,90	15,00	15,09	15,18	15,27	15,38
18	15,48	15,57	15,67	15,77	15,87	15,97	16.07	16,17	16,27	16,38
19	16,47	16,58	16,68	16,79	16,89	17,00	17,10	17,21	17.31	17,43
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17.97	18,08	18,19	18,30	18,42	18,54
21	T8,65	18,76	18,88	18,99	19,11	19,23	19.35	19,47	19,59	19,71
22	19,83	19,95	20,07	20,20	20,32	20,44	20,56	20,69	20,82	20,94
23	21,07	21,19	21,33	21,46	21,58	21,71	21,83	21,98	22,11	22,24
24	22,38	22,51	22.65	22,78	22,92	23,06	23,20	23,33	23,47	23,62
25	23,76	23,90	24,04	24,19	24,33	24,47	24,62	24,76	24,91	25,06
26	25,21	25,36	25,51	25,66	25,81	25,96	26.12	26,27	26,43	26,59
27	26,74	26,90	27,06	27,21	27,37	27,54	27,70	27,86	28,18	28,18
28	28,3 ,34	28,51	28,69	28,85	29,02	29,19	29,36	29,53	29,70	29,87
29	30,04	30,22	30,40	30,57	30,75	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64
30	31,83	32,01	32,20	32,38	32,57	32,75	32,94	33,13	33,32	33,51
31	33,70	33.89	34,09	34,28	34.49	34,67	34,87	35,07	35,27	35,47
32	35,67	35,87	36,07	36,28	36,48	36,69	36.89	37,10	37,31	37,52
33	37,73	37.95	38.16	38,38	38,59	38,81	39,02	39,24	39.47	39,68
34	39,91	40.13	40,35	40,58	40,80	41.03	41.26	41,49	41,72	41,95
35	42,18	42,42	42,66	42,89	43,13	43,37	43,61	43,85	44,09	44,33
36	44,58	44,82	45.06	45,31	45,57	45,81	46,06	46,32	46,57	46,83
37	47,08	47,34	47,60	47,85	48,12	48,38	48,64	48,90	49,17	49,44
38	49,71	49,98	50,25	50,52	50,80	51,07	51,34	51,62	51,09	52,18
39	52,46	52,61	53,02	53,31	53,60	53,89	54,17	54,46	54,76	55,05

PAB09112.indd 237 26.11.2009 16:29:34

2. Пружність водяної пари, Па

Температура повітря, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	611	615	620	624	629	633	638	642	647	652
1	656	661	666	671	676	680	686	690	695	700
2	705	710	716	721	726	731	736	742	747	752
3	758	763	768	779	785	790	790	796	802	80?
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
5	872	878	884	891	897	903	909	916	922	928
6	935	941	948	954	961	968	974	981	988	995
7	1002	1008	1015	1022	1029	1036	1044	1051	1058	1065
8	1072	1080	1087	1095	1102	1110	1117	1125	1132	1140
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1220
10	1228	1236	1244	1253	1261	1270	1278	1287	1295	1304
11	1313	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
12	1403	1412	1421	1431	1440	1450	1459	1469	1478	1488
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1558	1568	1578	1588
14	1599	1609	1620	1630	1641	1051	1662	1673	1684	1695
15	1704	1715	1726	1737	1749	1760	1771	1783	1794	1806
16	1817	1829	1840	1852	1664	1 876	1888	1900	1912	1924
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2011	2024	2036	2050
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2183
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
20	2337	2352	2366	2381	2396	2410	2425	2440	2455	2471
21	2486	2501	2517	2532	2548	2563	2579	2595	2611	2627
22	2643	2659	2675	2692	2708	2724	2741	2758	2775	2791
23	2808	2825	2843	2860	2877	2894	2912	2930	2947	2965
24	2983	3001	3019	3037	3055	3074	3092	3110	3129	3148
25	3167	3186	3205	3224	3243	3262	3282	3301	332 I	3341
26	336161	3381	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
27	3565	3586	3007	3628	3649	3671	3692	3714	3735	3757
28	3779	3801	3824	3846	3868	3891	3913	3936	3959	3982
29	4005	4028	4052	4075	4099	4122	4146	4170	4194	4218
ЗО	4243	4267	4292	4316	4341	4366	4391	4416	4441	4467
31	4492	4518	4544	4570	4596	4622	4648	4675	4701	4728
32	4755	4782	4809	4836	4863	4891	4918	4946	4974	5002
33	5030	5059	5087	5116	5144	5173	5202	5231	5261	5290
34	5320	5349	5379	5409	5439	5470	5500	5531	5561	5592
35	5623	5654	5686	5717	5749	5781	58I3	5845	5877	5909
36	5942	5975	6007	6040	6074	6107	6140	6174	6208	6242
37	6276	6310	6345	6379	6414	6449	6484	6519	6555	6590
38	6626	6662	6698	6734	6771	6807	6844	6881	6918	6955
39	6993	7031	7068	7106	7145	7183	7221	7260	7299	7338

PAB09112.indd 238 26.11.2009 16:29:34

Список літератури

1. Бурдин К. С. *Основы биологического мониторинга*.— Изд-во МГУ, 1985.—156 с.
2. Посудін Ю. І. *Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища.* Київ, Світ, 2003.—286 с.
3. Посудін Ю. І. *Спектроскопічний моніторинг агросфери*. Київ, Урожай,1998.—127 с.
4. Посудін Ю. І. *Фізика і біофізика навколишнього середовища.* Київ, Світ, 2000.— 300 с.
5. Посудін Ю. І. *Практикум з методів вимірювання параметрів навколишнього середовища.* Київ, ЗАТ «НІЧЛАВА», 2007.—226 с.
6. Хмельницкий Р. А., Бродский Е. С. *Масс-спектрометрия загрязнения окружающей среды.* М.: Химия, 1990.—182 с.
7. Хргиан Ф. Х. *Физика атмосферы*.—Л.: Гидрометеоиздат, 1969.—647 с.
8. Хэнкс Р. Дж., Аси Крофт Дж. Л. *Прикладная физика почв. Влажность и температура почв*.—Л.: Гидрометеоиздат, 1995.—151 с.
9. Чижевский А. Л. *Земное эхо солнечных бурь.* М.: Мысль, 1976.—367 с.
10. Akoev G. N., Alekseev N. P., Krylov B. V. (1988) *Mechanoreceptors. Their Functional Organization*. Springer Verlag. Berlin/ Heidelberg/ New York/ London /Paris /Tokyo.—197 p.
11. *Analytical Instrumentation Handbook*. G. W.Ewing, ed. 1997. Marcel Dekker,Inc.—344 p.
12. Andreeva T. I. and Krasovsky K. S. Changes in smoking prevalence in Ukraine in 2001—5. *Tobacco control* (2007), 16(3), 202—206.
13. *Atmospheric Microbial Aerosols. Theory and Application*. B. Lighthart and A. J. Mohr, eds. Chapman & Hall, 1994.—397 p.
14. Barnett K., Kenneth E., Cocroft R. F., Reginald B., Fleishman, L. J. (1999) Possible Communication by Substrate Vibration in a Chameleon. *Copeia,* 1:225—228.
15. Barth, F. G. (1982) Spiders and vibratory signals: sensory reception and behavioral significance. In: *Spider Communication Mechanisms and Ecological Significance*, (Ed. by Witt, P. N. & Rovner, J. S.), pp. 66—122. Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press.
16. Benedict R. P. (1969) *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, John Wiley & Sons, New York.
17. *Bioacoustics*, B. Lewis, ed. London-N.Y.-Paris-San Diego-San Francisco-San Paulo-Sydney-Tokyo-Toronto, Academic Press, 1983.
18. *Bioaerosols Handbook*, C. S. Cox and C. M. Wathes, eds. Lewis Publishers, Boca Raton-London-Tokyo, 1995.—623 p.

PAB09112.indd 239 26.11.2009 16:29:34

19. *Biomonitors and Biomarkers as Indicators of Environmental Change*. A Handbook, F. M. Butterworth, L. D. Corkum, J. Guzman-Rincon, eds. Plenum Press, New York-London, 1995.—348 p.
20. Blake M. P., Mitchell W. S. *Vibration and Acoustical Measurement Handbook*, Spartan Books, New York-Washington, 1972.—649 p.
21. Boeker E., Rienk van Grondelle (2001) *Environmental Science: Physical Principles and Applications.* Wiley & Sons Australia.
22. Brownell, P. & Farley, R. D. (1979) Detection of vibrations in sand by tarsal sense organs of the nocturnal scorpion, *Paruroctonus mesaensis*//J. *Comp.Physiol*. A 131:23—30.
23. Campbell G. S., Norman J. M. (1998) *Environmental Biophysics.* 2nd ed. Springer: New York.—286 p.
24. Campbell J. B. *Introduction to Remote Sensing*, The Guilford Press, New York-London, 1987.—551 p.
25. *Comparative Hearing: Mammals*. (1994) R. Fay & A. N. Popper, eds. Springer Handbook of Auditory Research Series. Springer—Verlag, NY.
26. Datta A. K. (2002) *Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer.* Marcel Dekker AG. New York, Basel.
27. Dooling, R. J. (1980). Behavior and psychophysics of hearing in birds. In A. Popper and R. Fay (Eds.), *Comparative Studies of Hearing in Vertebrates*. (pp. 261—288). New York: Springer—Verlag.
28. Dusenbury D. B. (1992) *Sensory Ecology. How Organisms Acquire and Respond to Information.* W. H. Freeman and Company, N.Y.—558 p.
29. Ehleringer J. R., Cerling T. E. (2002) *Stable Isotopes.* Vol. 2, The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change, pp 544—550, Ed. H. A. Mooney and J. G. Canadell. In: Encyclopedia of Global Environmental Change. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
30. Engman E. T., Gurney R. J. (1991) *Remote Sensing in Hydrology*, Chapman and Hall, London-New York-Tokyo.—225 p.
31. *Environmental Biomonitoring.* (1997) K. S. Subramanian and G. V. Iyengar, eds. Amer.Chem.Soc, Washington.—288 p.
32. *Environmental Encyclopedia*, 2nd ed. (1998) Gale, Detroit-New York-Toronto-London.—1196 p.
33. Evans, H. D. (1998). *The Physiology of Fishes*, Second Edition. CRC Press, New York.
34. Fay R. R.. (1988). *Hearing in Vertebrates: a Psychophysics Databook*. Hill-Fay Associates, Winnetka IL.
35. Folk G. E., Riedesel M. L., Thrift D. L. (1998) *Principles of Integrative Environmental Physiology*. Austin & Winfield, Publishers.—992 p.

PAB09112.indd 240 26.11.2009 16:29:34

36. Fritschen L. J., Gay L. W. (1979) *Environmental Instrumentation*, Springer Verlag, New York-Heidelberg-Berlin.—216 p.
37. Gates D. M. (1980) *Biophysical Ecology.* Dover Publications, Inc. Mineola, New York.—611 p.
38. Granier A. (1985) Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci.For.* 42:193—200.
39. Gruber D., Diamond J. (1988) *Automated Biomonitoring: Living Sensors as Environmental Monitors*, Ellis Horwood Ltd, New York—Chichester—Brisbane—Toronto.—208 p.
40. Guyot G. (1998) *Physics of the Environment and Climate*. John Willey and Sons. Chichester-New York—Weinheim—Brisbane—Singapore—Toronto.—632 p.
41. Hader, D.-P. and Lebert, M. (2001). Graviperception and gravitaxis in algae// *Adv. Space Res*. 27:861—870.
42. Hallet R. F. (1982) *Physics for the Biological Sciences. A Topical Approach to Biophysical Concepts.* Chapman and Hall.—255 c.
43. Henry J. G., Heike G. W. (1996) *Environmental Science and Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.—778 p.
44. Hopkins W. G. (1999) *Introduction to Plant Physiology.* 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.:New York.—512 p.
45. Huber B. (1932) Beobachtung und Messung pflanzicher Saftstrome. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 50:89—109.
46. *Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences*/ B. W. Mitchell, ed. 2nd ed. (1983) Amer.Soc.Agr.Engineers, St. Joseph.
47. *Instrumentation for Environmental Monitoring*, V.1. Radiation. 2nd ed. (1983) John Wiley & Sons, New York—Chichester—Brisbane—Toronto—Syngapore.—1130 p.
48. *Instrumentation for Environmental Physiology* (1985) Camridge Univ. Press: Cambridge.—242 p.
49. Jones H. G. (2000) *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press.—428 p.
50. Kondepudi D., Prigogine I. (1998) *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures.* John Wiley & Sons, Inc.: New York—486 p.
51. Kryter K. D. (1996)*, Handbook of Hearing and the Effects of Noise,* New York: Academic Press.
52. Ksenzhek O. S., Volkov A. G. (1998) *Plant Energetics.* Academic Press: San Diego.—416 p.
53. *Laser Monitoring of the Atmosphere* / E. D. Hinkley, ed. (1976) Springer—Verlag, Berlin.—380 p.
54. Levis B. (1983) *Bioacoustics. A comparative approach*. Acad.

PAB09112.indd 241 26.11.2009 16:29:34

Press.–493 p.
55. *Living in the Environment. An Introduction to Environmental Science*. Fifth Editio (1988) Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.–603 p.
56. Marler, P. (2004). Science and birdsong: The good old days. In: *Nature's Music: The Science of Birdsong*, P. Marler & H. Slabbekoorn (eds.). Elsevier Academic Press, San Diego, CA , pp. 1–38.
57. Marshall B., Woodward F.I. (1985) *Instrumentation for Environmental Physiology*. Cambridge University Press.–242 p.
58. *McGrow-Hill Encyclopedia of Environmental Science and Engineering*. 3d ed. S.P.Parker and R.A.Corbitt, eds.(1993) McGrow-Hill Inc., New York.–749 p.
59. Measures R.M. *Laser Remote Sensing* (1984) Fundamentals and Applications. John Wiley and Sons, New York–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore.– 510 p.
60. Montheith J.L., Unsworth M. (1990) *Principles of Environmental Physics.* 2nd ed. Edward Arnold: London.–291 p.
61. Mook W.G. (2006) *Introduction to Isotope Hydrology: Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Carbon and Oxygen*.London: Taylor & Francis.–226 p.
62. Nobel P.S. (2005)*Physicochemical and Environmental Plant Physiology.* 3-d edition. Elsevier, Academic Press, Amsterdam.–567 p.
63. *Optical Remote Sensing of Air Pollution*, P.Camagni and S.Sandroni, Eds. (1984)Elsvier Science Publishers, Amsterdam.–350 p.
64. Pal Arya. (2001) *Introduction to Micrometeorology.* Elsevier Science & Technology. 420 p.
65. Posudin Yu. (2004) *Physics with Fundamentals of Biophysics*. Agrarna Nauka.–195 p.
66. Rees W.G. (1990) *Physical Principles of Remote Sensing*. New York/Port Chester/Melbourne/Sydney: Cambridge University Press.–261 p.
67. *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. G.A. Schultz and E.T. Engman, eds. (2000) Springer, Berlin.–483 p.
68. *Remote Sensing With Special Reference to Agriculture and Forestry* (1970) National Academy of Sciences, Washington.–424 p.
69. *Remote Sensing: The Quantitative Approach* (1978) McGraw-Hill Book Company, New York.–396 p.
70. Rose A.H. (1967) *Thermobiology*. Academic Press, London, N.Y.–653 p.
71. Sabins F.F.,Jr. *Remote Sensng. Principles and Interpretation*. 2nd ed. (1987) W.H. Freeman and Company, New York.–449 p.

PAB09112.indd 242 26.11.2009 16:29:34

72. Scholl M.. *Precipitation isotope collector designs*. At: http://water.usgs.gov/nrp/proj.bib/hawaii/precip_methods.htm
73. Scott H. Don. (2000) *Soil Physics: Agricultural and Environmental Applications*. Iowa State Univ.Press.–421 p.
74. Stebbins W. C. (1983) *The Acoustic Sense of Animals*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.–168 p.
75. Stephens G.L. *Remote Sensing of the Lower Atmosphere. An Introduction*. (1994) Oxford Univ. Press, New York-Oxford.–523 p.
76. Strangeways I. (2006) *Precipitation: Theory, Measurement and Distribution*. Cambridge University Press.
77. Sybesma C. (1988) *Biophysics. An Introduction.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht-Boston-London.–320 p.
78. Taiz L., Zeiger E. *Plant Physiology* (2002) Sinauer Associates, Sunderland, Massachusets.–690 p.
79. Tavolga, W.N. (1980) Hearing and sound production in fishes in relation to fisheries management. Fish behavior and its use in the capture and culture of fishes. International Center for Living Aquatic Resources Management. Manila, Philippines.
80. Tembrock, G. (1963). *Acoustic Behavior of Mammals*. (Busnel, R.G., ed). Elsevier Publications Co; Amsterdam., pp. 751–785.
81. Tempest W. (1976) *Infrasound and Low Freguency Vibration*, Academic Press, London, N.Y., San Francisco. –364 p.
82. Thielcke G.A. (1976) *Bird Sounds*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
83. Thompson R., Oldfield F. *Environmental Magnetism*, Allen & Unwin, London, 1986.–227 p.
84. Udias A. (1999) Principles of Seismology. Cambridge Univ. Press, Cambridge.–475 p.
85. Viessman W., Lewis G.L. (2003) *Introduction to Hydrology*, Harper Collins College Publishers, 5th Edition.
86. Warfield D. (1973) The study of hearing in animals. In: W Gay, ed., *Methods of Animal Experimentation***,** IV. Academic Press, London, pp 43–143.
87. Willmer P., Stone G., Johnston I. (2000) *Environmental Physiology of Animals*. Blackwell Science Ltd.–644 p.
88. Yost W.A., Nielsen D.W. (1985) *Fundamentals of Hearing. An Introduction*. 2nd ed. Fort Worth: Hartcourt College Publishers. –256 p.
89. Zelick, R., Mann, D. and Popper, A.N. (1999). Acoustic communication in fishes and frogs. In: *Comparative Hearing: Fish and Amphibians* (eds. R.R. Fay and A.N. Popper). Springer-Verlag, New York, pp. 363–411.

PAB09112.indd 243 26.11.2009 16:29:35

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....3

І. ФІЗИЧНЕ ОТОЧЕННЯ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ
1. Тиск.....6
1.1. Атмосферний тиск.....6
1.2. Тиск води.....8
1.3. Вплив тиску на живі організми.....9
1.4. Вимірювання тиску.....13
2. Вітер.....17
2.1. Причини виникнення вітру.....17
2.2. Параметри вітру.....18
2.3. Стресові ситуації, пов'язані з вітром.....20
2.4. Вплив вітру.на живі організми.....22
2.5. Вимірювання параметрів вітру.....23
3. Гравітація.....26
3.1. Визначення гравітації.....26
3.2. Вплив гравітації на живі організми.....27
3.3. Вимірювання гравітропизму.....30
3.4. Комахи та гравітація.....30
4. Вібрації.....32
4.1. Параметри вібрацій.....32
4.2. Вплив вібрацій на організм людини.....33
4.3..Вплив вібрацій на тварин.....34
4.4. Вимірювання вібрацій.....35
5. Коливання та хвилі.....37
5.1. Основні визначення.....37
5.2. Землетруси.....37
5.3. Цунамі.....38
5.4. Вплив природних коливань на тварин.....39
5.5. Вимірювання природних коливань.....40
6. Акустичні фактори середовища.....46
6.1. Хвилі в пружному середовищі.....46
6.2. Характеристики звукових коливань.....46
6.3. Утворення звуків тваринами.....49
6.4. Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку у навколишньому середовищі.....51
6.5. Акустична комунікація тварин.....52
7. Шум.....59
7.1. Основні визначення.....59
7.2. Розподіл шуму за інтенсивністю.....59
7.3. Сумарний шум.....60
7.4. Розподіл шуму за частотою.....60

PAB09112.indd 244 26.11.2009 16:29:35

7.5. Вплив шуму на живі організми....62
7.6. Вимірювання рівнів шуму....63
7.7. Звукова ізоляція....65
8.Вологість....69
8.1. Параметри вологості....69
8.2. Вплив вологості на живі організми....70
8.3. Вимірювання вологості....72
8.4. Вологість ґрунту....77
8.5. Вимірювання вологості ґрунту....77
9. Температура....81
9.1. Температурні шкали....81
9.2. Температура атмосфери....82
9.3. Температура ґрунту....84
9.4. Температура водойм....86
9.5. Вплив температури на живі оганізми....87
9.6. Вимірювання температури....92
10. Природні випромінювання....99
10.1. Параметри сонячного випромінювання....99
10.2. Вплив сонячного випромінювання на живі організми....103
10.3. Вплив випромінювання ультрафіолетової області спектра на живі організми....108
10.4. Вимірювання природних випромінювань....109
11. Опади....115
11.1. Параметри опадів....115
11.2. Взаємодія опадів з навколишнім середовищем....115
11.3. Ізотопи в опадах....116
11.4. Фракціонування ізотопів....116
11.5. Стабільні ізотопи у процесі опадів....117
11.6. Вимірювання опадів....118
11.7. Кислотні дощі....121
11.8. Вимірювання забруднень в опадах....121

II. РЕЦЕПЦІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА....125
12. Механорецепція....125
12.1. Типи механорецепторів....125
12.2. Механорецептори шкіри....125
12.3. Вестибулорецепція....127
12.4.Інтерорецепція....129
12.5. Механорецепція у риб....131
12.6. Механорецепція у комах....132
13. Гравірецепція....134
14. Акусторецепція....136
14.1. Акусторецепція у ссавців....136
14.2. Акусторецепція у птиці....139

PAB09112.indd 245 26.11.2009 16:29:35

14.3. Акусторецепція у риб.....140
14.4. Акусторецепція у комах.....141
15. Терморецепція.....142
15.1. Механізми терморецепції.....142
15.2. Теплова чутливість тварин.....144
16. Фоторецепція.....145
16.1. Фоторецепція у комах.....145
16.2. Зоровий аналізатор риб.....147
16.3. Зоровий аналізатор.птахів.....147
16.4. Зоровий аналізатор ссавців.....148
16.5. Механізми зору ссавців.....150

ІІІ. ФІЗИКА ЯВИЩ ПЕРЕНЕСЕННЯ.....152
17. Зміна ентропії.....152
17.1. Параметри термодинамічної системи.....152
17.2. Перший закон термодинаміки.....154
17.3. Другий закон термодинаміки.....156
17.4. Ентропія.....157
17.5. Рівноважна термодинаміка.....159
17.6. Нерівноважна термодинаміка.....160
17.7. Термодинамічні сили та термодинамічні потоки.....163
17.8. Явища перенесення.....165
18. Перенесення маси: вода та розчинені речовини.....167
18.1. Перенесення маси в ґрунті.....167
18.2. Перенесення маси (дифузія).....168
18.3. Дифузія через клітини.....168
18.4. Осмос.....169
18.5. Активне транспортування.....171
18.6. Коренева система.....172
18.7. Ксилема.....173
18.8. Об'ємний потік.....175
18.9. Флоема.....176
18.10. Вимірювання потоків соку.....177
19. Перенесення маси: водна пара та гази.....178
19.1 Транспірація.....178
19.2. Газообмін.....181
19.3. Вимірювання газообміну.....182
20. Частинки у навколишньому середовищі.....185
20.1. Фізика частинок.....185
20.2. Аерозолі та біоаерозолі.....187
20.3. Смог.....191
20.4. Тютюновий дим.....191
21. Перенесення імпульсу.....193
21.1. Перенесення імпульсу (в'язкість).....193

PAB09112.indd 246 26.11.2009 16:29:35

21.2. Моделювання зміни швидкості вітру
поблизу земної поверхні.....194
21.3. Моделювання зміни швидкості вітру у
рослинному покриві.....197
22. Метод вихрової коваріації.....201
22.1. Турбулентність.....201
22.2. Латентна теплота.....202
22.3. Відчутна теплота.....203
22.4. Метод вихрової коваріації.....204
23 Перенесення електрики.....208
23.1. Електрохімічний потенціал.....208
23.2. Потенціал спокою та потенціал дії.....208
23.3. Збудливість рослинних клітин.....211
24. Перенесення теплоти.....216
24.1. Перенесення теплоти через теплопровідність.....216
24.2. Перенесення теплоти через конвекцію.....218
24.3. Перенесення теплоти через випромінювання.....219
24.4. Перенесення теплоти через пароутворення.....220

IV. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ФІЗИЧНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ З НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ.....222
25. Квантові властивості випромінювання.....222
25.1. Закони теплового випромінювання.....222
25.2. Короткохвильове сонячне випромінювання.....223
25.3. Довгохвильове випромінювання земної поверхні.....224
25.4. Озоновий шар.....224
25.5. Вимірювання озону.....226
25.6. Парниковий ефект.....228
25.7. Вимірювання впливу парникового ефекту.....230
25.8. Енергетичний баланс земної поверхні.....230
25.9. Енергетичний баланс листка та рослини.....232
25.10. Енергетичний баланс тварини.....234
25.11. Енергетичний баланс водойм.....235

Додаток.....237

Список літератури.....239

Зміст.....244

PAB09112.indd 247 26.11.2009 16:29:35

Навчальне видання

Посудін Юрій Іванович

«Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища»

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1.4/18–Г–1868 від 02.11.07)

Редактор І.В. Сикотюк

PAB09112.indd 248 26.11.2009 16:29:35