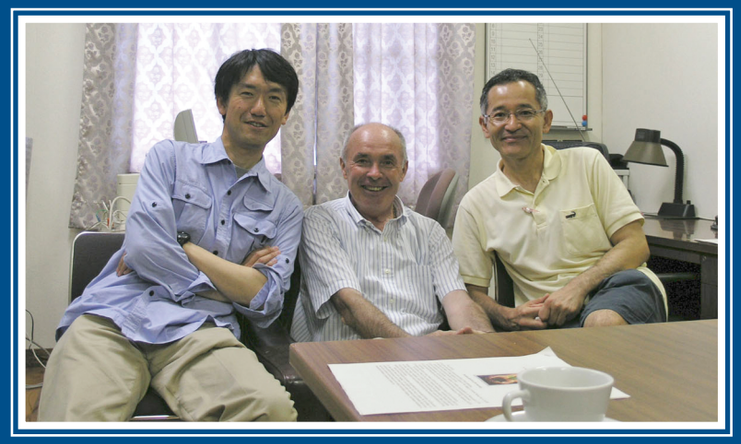


Автор висловлює свою щиру подяку японським колегам, проф. Кюоічі Оцукі, д-ру Атсусі Куме та д-ру Томоомі Кумагаю за надану можливість ознайомитися з дослідженнями в галузі біофізики навколишнього середовища в Університетах Кюсю та Тояма

The author is much indebted to Japanese colleagues, Prof. Kyoichi OTSUKI, Dr. Atsushi KUME and Dr. Tomo'omi KUMAGAI for providing the opportunity to conduct research in the Field of Environmental Biophysics in Kyushu University and Toyama University, Japan

ISBN 978-966-2122-01-5

БІОФІЗИКА І МЕТОДИ АНАЛІЗУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Ю.І. ПОСУДІН

БІОФІЗИКА І МЕТОДИ АНАЛІЗУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Ю.І. ПОСУДІН

БІОФІЗИКА І МЕТОДИ АНАЛІЗУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів

Київ-2009

PAB09112.indd 1 26.11.2009 16:28:38

УДК 577.3
ББК 28.07
П 61

Рецензенти:

В.П. Замостян,
доктор медичних наук, професор кафедри екології Національного університету «Києво-Могилянська академія»;

Я.Ю. Тевтуль,
доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії та екології хімічних виробництв Чернівецького національного університету ім. Юрія Федькевича;

А.П. Відьмаченко,
доктор фізико-математичних наук, зав. відділом фізики тіл сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України

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

Посудін Ю. І. Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища: Навчальний посібник.—К.:Видавничий центр НУБіП України, 2009.—234 с.; іл.—бібліогр.: С. 224—228.
П 61
ISBN 978-966-2122-01-5.

Основною метою навчального посібника «Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища» є ознайомлення студентів екологічних спеціальностей з фізичним оточенням живих організмів; вивчення впливу фізичних факторів середовища на живі організми та їх здатності сприймати ці фактори, реагувати на них і таким чином взаємодіяти з навколишнім середовищем та адаптуватися до нього; висвітлення сучасних фізичних методів контролю навколишнього середовища та принципів дії приладів, що застосовуються для вимірювання параметрів навколишнього середовища та аналізу його стану.

Навчальний посібник призначений для підготовки фахівців в аграрних вищих навчальних закладах III — IV рівнів акредитації з напряму 0708 «Екологія» (спеціальність 6.070800 «Екологія та охорона навколишнього середовища») та напряму 0929 «Біотехнологія» (спеціальність 8.092903 «Екобіотехнологія»).

УДК 577.3
ББК 28.07

ISBN 978-966-2122-01-5

© Посудін Ю. І., 2009

PAB09112.indd 2 26.11.2009 16:28:43

«Biophysics includes everything
that is interesting
and excludes everything that is not»
(K. S. Cole)

ПЕРЕДМОВА

Біофізика — це наука, яка вивчає фізичні механізми та фізико-хімічні процеси, що лежать в основі життєдіяльності біологічних об'єктів; вона застосовує фізичні принципи, фізичні методи та фізичні прилади для вивчення живих систем.

Навколишнє природне середовище — це сукупність природних та змінених діяльністю людини абіотичних, хімічних та біотичних факторів, що оточують та діють на живі організми або екосистеми, а саме на ріст, розвиток та виживання живих організмів.

Населення земної кулі, яке досягне у 2050 році 9 млрд, а також численні представники фауни і флори взаємодіють з навколишнім середовищем шляхом обміну енергією та речовиною.

Застосування сучасних технологій з метою забезпечення людства продуктами харчування, безумовно, впливає на навколишнє середовище. Асортимент хімічних препаратів, що використовують для інтенсифікації цього виробництва, з кожним роком збільшується. Потрапляючи в атмосферу, ґрунт, воду, ці забруднювачі мігрують до рослин та організмів тварин і таким чином можуть впливати на здоров'я людини.

Ще одне джерело шкідливих речовин — різноманітні машини та механізми, які спричинюють забруднення середовища відходами нафтопродуктів, важкими металами, поверхнево-активними речовинами.

Серйозним джерелом забруднення навколишнього середовища у сільському господарстві є відходи тваринництва й рослинництва, включаючи стоки із залишками пестицидів та добрив, що потрапляють у ґрунт, ґрунтові води, водойми й завдають непоправної шкоди фауні та флорі.

PAB09112.indd 3 26.11.2009 16:28:43

Хімічні елементи й сполуки, які потрапляють в атмосферу, можуть поглинати сонячне проміння, викликаючи зміни температури атмосфери (парниковий ефект), або брати участь у хімічних реакціях, що спричиняють опади у вигляді кислотних дощів чи виникнення озонових дірок.

Не можна не враховувати згубної дії на навколишнє середовище експлуатації військової техніки, освоєння космосу, техногенних аварій та екологічних катастроф.

Отже, вивчення взаємодії живих організмів з навколишнім середовищем в умовах демографічного зростання, збільшення світового використання добрив, дефіциту орної землі, збільшення концентрації двоокису вуглецю в атмосфері, вичерпання паливних запасів та порушення екологічної рівноваги, є надто невідкладним.

У навчальному посібнику «*Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища»* описано фізичне оточення живих організмів, зокрема такі зовнішні фізичні фактори як тиск, вітер, гравітація, вібрації, природні коливання та хвилі, акустичні фактори та шум, вологість і температура, природні випромінювання, опади; здатність живих організмів реагувати на зміни зовнішніх факторів завдяки рецепторним системам, тобто здійснювати механо-, граві-, акусто-, термо- і фоторецепцію та обирати оптимальні умови існування; явища та процеси, які характеризують взаємодію живих організмів з навколишнім середовищем з позицій явищ перенесення — необоротних процесів, важливих з точки зору життєдіяльності живого організму, внаслідок яких між ним та навколишнім середовищем відбувається просторове перенесення фізичних величин — ентропії, маси (вода та розчинені речовини, водяна пара та гази, частинки), імпульсу (особлива увага приділяється турбулентним явищам у граничному шарі атмосфери та методу вихрової коваріації); енергетичний баланс фізичних та біологічних систем з навколишнім середовищем; принципи дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища та можливі застосування сучасних методів аналізу його стану (особливо автоматизованих та дистанційних систем).

Основною метою навчального посібника *«Біофізика та методи аналізу навколишнього середовища»* є вивчення:

- фізичного оточення живих організмів;
- впливу фізичних факторів середовища на живі організми та їх здатності сприймати ці фактори, реагувати на них і таким чином взаємодіяти з навколишнім середовищем та адаптуватися до нього;
- сучасних фізичних методів вимірювання параметрів навколиш-

PAB09112.indd 4 26.11.2009 16:28:43

нього середовища та аналізу його стану, зокрема систем автоматизованого та дистанційного контролю навколишнього середовища;

• процесів, які характеризують взаємодію живих організмів з навколишнім середовищем;

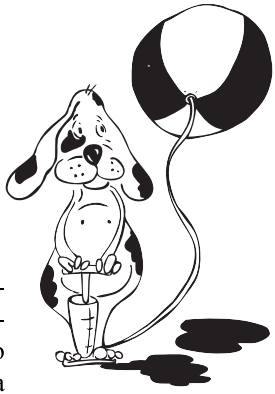
• основних принципів енергетичного балансу фізичних та біологічних систем з довкіллям.

Навчальний посібник призначений для підготовки фахівців у вищих навчальних закладах III — IV рівнів акредитації з напряму 0708 «Екологія» (спеціальність 6.070800 «Екологія та охорона навколишнього середовища») та напряму 0929 «Біотехнологія» (спеціальність 8.092903 «Екобіотехнологія»); він може бути також використаний студентами таких напрямів підготовки як 1301 — «Агрономія», 1302 — «Зооінженерія», 1303 — «Водні ресурси», 1304 — «Лісове і садово-паркове господарство», 1305 — «Ветеринарна медицина».

PAB09112.indd 5 26.11.2009 16:28:43

розділ **I**

ФІЗИЧНЕ ОТОЧЕННЯ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ



1. ТИСК

1.1. Атмосферний тиск

Тиск p — це фізична величина, що характеризує інтенсивність нормальних (перпендикулярних до поверхні) сил, з якими одне тіло діє на поверхню другого. Середня величина тиску на будь-яку площину дорівнює відношенню середнього значення сили, що діє перпендикулярно цій площині, до її площі:

$$p = \sum_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS} \quad . \qquad (1.1)$$

Якщо сили розподілені вздовж поверхні рівномірно, то тиск p на будь-яку частину поверхні дорівнює:

$$p = \frac{F}{S}, \qquad (1.2)$$

де F — сума докладених перпендикулярно до поверхні сил; S — площа цієї частини.

Одиниця вимірювання тиску в системі СІ — *паскаль*; 1Па = 1Н/м^2.

Позасистемні одиниці та їх зв'язок з паскалем:

1атм = 1,01325×10 ^{5} Па = 1013,25 мбар = 760 мм рт. ст.;

1 мбар = 100 Па = 1 гПа = 0,75006 мм рт. ст.;

1 мм рт. ст. = 1 тор = 1,3332 мбар = 133,32 Па;

1Па = 9,87×10 $^{-6}$ атм = 7,5×10 $^{-3}$ мм рт. ст.

PAB09112.indd 6 26.11.2009 16:28:43

Атмосферний тиск — це тиск стовпа атмосферного повітря на одиницю площі земної. Викликається цей тиск вагою розташованого вище стовпа атмосфери, яка являє собою суміш газів, твердих та рідких частинок. Грубо, атмосферу можна уявити як сухе повітря разом з водяною парою.

Середній атмосферний тиск на рівні моря становить $1{,}01325\times10^5$ Па. В цілому, атмосферний тиск залежить від висоти, простору і часу. Горизонтальний розподіл атмосферного тиску визначається рухом поверхневих мас повітря. Густина і температура атмосферного повітря також залежать від висоти (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Залежність густини і температури атмосферного повітря від висоти

Висота h**, км**	**Густина** ρ**, кг/м³**	**Температура** T**, °C**
0	1,225	15,00
2	1,007	2,00
4	0,909	–4,49
6	0,660	–23,96
8	0,526	–36,94
10	0,414	–49,90
12	0,312	–56,50
14	0,228	–56,50
16	0,166	–56,50
18	0,122	–56,50
20	0,089	–56,50
22	0,065	–54,58
24	0,047	–52,59
26	0,034	–50,61
28	0,025	–48,62
30	0,018	–46,64

Примітка: Зверніть увагу на те, що температура атмосфери змінюється із збільшенням висоти несподіваним чином: до 12 °C температура зменшується, в межах 12—20 °C є сталою, від 20 °C до 30 °C — збільшується. Пояснення такій поведінці температури атмосфери можна знайти пізніше, коли буде розглядатися тема «Температура атмосфери».

Уявлення про те, що молекули повітря рівномірно розподілені по об'єму — помилкове; ці молекули знаходяться у полі тяжіння Землі. Крім того, на них впливає тепловий рух. Сумісна дія поля тяжіння та

PAB09112.indd 7 26.11.2009 16:28:44

теплового руху призводять до такого стану, при якому концентрація та тиск газу зменшуються зі зростанням висоти над земною поверхнею. Зменшення атмосферного тиску з висотою h визначається за *барометричною формулою*:

$$p(h) = p(0)\exp(-\frac{M_A gh}{RT}) = p(0)\exp(-\frac{mgh}{kT}), \qquad (1.3)$$

де M_A — молярна маса газу (для повітря M_A = 0,029 кг/моль); m — маса молекули газу; $p(0)$ — тиск на рівні моря.

Приклад

Визначити атмосферний тиск на висоті 10 км.

Розв'язання

Використовуючи барометричну формулу (1.3), отримуємо:

$$p_A(h) = p_A(0)\text{e}\,[\,-\,(\,gM_A / RT_A\,)]h =$$

$$= 1{,}01325\times10^5 \text{ Па } e^{-\frac{0{,}029 кг\cdot моль^{-1}\cdot 9{,}8 м\cdot с^{-2}\cdot 10^4 м}{8{,}31451 м^2\cdot кг\cdot с^{-2}\cdot К^{-1}\cdot моль^{-1}\cdot 223{,}25 К}} =$$

$$= 1{,}01325\times10^5 \text{ Па}\times e^{-1{,}531} = 1{,}01325\times10^5 \text{ Па}\times 0{,}2163 = 0{,}219\times10^5 \text{ Па}.$$

1.2. Тиск води

Абсолютний тиск p на глибині d від поверхні рідини перевищує тиск p_A на величину ρgh, яка відповідає тиску, що утворює вага стовпчика рідини d і площею S:

$$p = p_A + \rho gd, \qquad (1.4)$$

де p_A — атмосферний тиск; ρ — густина рідини; g — прискорення вільного падіння; d — глибина.

Приклад

Визначити тиск на глибині 1000 м океану, якщо густина води $1{,}0\times10^3$ кг/м^3, а атмосферний тиск $1{,}01325\times10^5$ Па.

Розв'язання

Використовуємо рівняння (1.4):

$p = p_A + \rho gd = 1{,}01325\times10^5$ Па + ($1{,}0\times10^3$ кг/м^3) (9,8 м/с^2) (10^3 м) =

$= 9{,}9\times10^6$ Па.

PAB09112.indd 8 26.11.2009 16:28:44

1.3. Вплив тиску на живі організми

Вплив зменшення тиску на здоров'я людини. Люди, які досягають значних висот без спеціального обладнання (альпіністи, пілоти повітряних куль та мешканці високогірних районів) приречені до так званої *гірської хвороби*. Зменшення атмосферного тиску призводить до певних фізіологічних наслідків.

Розглянемо вплив зменшщення атмосферногот тиску з висотою на людину.

1500 м. У першу чергу страждає від зменшення тиску сітківка ока; на таких висотах мозок має порушення у здатності керувати ночним зором.

2500 м. Підйом на кожні 100 м відносно цієї висоти супроводжується зменшенням фізичної активнсті людини приблизно на 1 %.

3000 м. Перебування на цих висотах викликає зменшення рівня насиченості крові киснем до 90 % та погіршення ночного зору на 12—15 %. Виникає ейфорія, фізична гіпоксія, перші ознаки гірської хвороби проявляються у вигляді слабких змін пульсу та швидкості дихання, починається *анорексія* — повна відсутність апетиту та бажання їсти при об'єктивній потребі в їжі; зменшення ваги тіла приблизно на 1 кг за тиждень. Всі ці симптоми значно підсилюються в діапазоні висот 3000—4000 м.

4200 м. Сходження до цих висот супроводжується зменшенням насичення крові киснем до 85 %, що викликає серйозне погіршення зору, пригніченням розумової здатності та пам'яті, м'язової активності. Первинними симптомами гірської хвороби є задишка, *тахікардія* (збільшення числа серцевих скорочень до 100 ударів за хвилину); нездужання, пов'язане з відчуттям дискомфорту, нудота та блювання; безсоння, втомленість та апатія.

4800 м. Насичення крові киснем зменшується до 79 %. Спостерігаються серйозні зміни емоціонального стану, такі як ейфорія, агресивність, роздратування.

5400 м. Насичення крові киснем продовжує зменшуватися до 71 %, що викликає проблеми у діяльності мозку.

6000 м. Втрата свідомості через 5—15 хв перебування на цих висотах та смерть в разі тривалішого перебування.

7500 м. Критичне зменшення рівня насиченості крові киснем призводить до смерті.

Таким чином, фізіологічний вплив зменшення атмосферного тиску та недостатнього постачання в організм кисню характеризується *гіпоксією*, тобто збільшенням пульсу та частоти дихання на висотах

PAB09112.indd 9 26.11.2009 16:28:44

3150—4750 м, погіршенням розумової здатності та м'язової активності, зміною емоціонального стану в діапазоні висот 4750—6100 м та швидкою втратою нейром'язового контролю, знепритомлюванням, припиненням дихання та можливою смертю на висотах 6100—7260 м.

Механізм гірської хвороби можна пояснити місцевим розширенням кровоносних судин мозку як відгук на гіпоксію, що призводить до збільшення кров'яних потоків та відповідно тиску у кровоносних капілярах або загальним звуженням судин легеневої циркуляції, яка при постійній серцевій активності також викликає збільшення капілярного тиску.

Вплив зменшення тиску на тварин. Певні тварини здатні пристосовуватися до зменшення атмосферного тиску та адаптуватися до перебування у гірських регіонах.

Ропухи, мешканці озера Тітікака, що розташоване на висоті 3812 м, використовують поширені вигини шкіри, які забезпечують необхідний газообмін; високий рівень гематокриту та концентрації еритроцитів призводить до інтенсифікації транспортування кисню.

Черепахи характеризуються достатньою толерантністю до гіпоксії завдяки їхній здатності до анаеробного метаболізму та шунтування кровоносних судин при неможливості їх вентиляції.

Мули, що використовуються як транспортні засоби під час альпіністських експедицій в діапазоні висот 5250—6000 м, здатні розраховувати свої фізичні можливості і відмовляються переносити вантаж, якщо ці можливості знаходяться за межами безпечних границь.

Інші тварини також можуть знаходитися у високогірних районах: *вікунья* (5000—6000 м), *домашні вівці* (до 5250 м) та *коні* (до 4600 м). Зазвичай, тварини, що живуть у гірських районах, мають підвищений рівень кількості еритроцитів та гемоглобіну.

Однак рекорди висоти належать птахам, що мігрують над Тибетським плато та Гималайськими горами, зокрема: *кондорам* (7600 м), *гірським гусям* (8534 м), *клушиці* (9000 м) та *білоголовому сипу* (11278 м). Перетинання високогірних регіонів призводить до структурних змін гемоглобіну, що забезпечує здатність птахів літати на великих висотах.

Вплив зменшення тиску на рослини. Зміни клімату, що спостерігаються із збільшенням висоти, індукують морфологічні та фізіологічні зміни у рослин та рослинних екосистем. Дуже часто рослини у горах мають компактні або карликові форми, вузькі та густоопушені листки. В альпійській зоні (3230—3660 м) можна знайти суттєві зміни якісних та кількісних характеристик фауни, що викликаються як

PAB09112.indd 10 26.11.2009 16:28:44

зменшеним тиском, так і вітром, вологістю, опадами, температурою, сонячним випромінюванням та газообміном.

Фізіологічний вплив збільшення тиску на живий організм. Якщо людина пірнає на глибину, тиск оточуючої води збільшується на 1 атм кожні 10 м (тобто, $\Delta p = 1$ атм, якщо $\Delta d = 10$ м). Тиск з боку оточуючої води передається до внутрішнх частин тіла, через що встановлюється стан рівноваги — зовнішній тиск зрівноважується внутрішнім. Якщо пірнальник опустився на глибину 30 м, тиск в його легенях становитиме відповідно до рівняння (1.4) 4 атм. Під час підйому на поверхню, де тиск дорівнює 1 атм, тиск у легенях дорівнює 3 атм. Така різниця тисків викликає розрив легень або *пневмоторакс.*

Коли людина вдихає повітря, кров наповнюється розчиненим азотом, якого у повітрі 79 %. Згідно із *законом Генрі* кількість розчиненого у рідині газу залежить від парціального тиску цього газу. Кров пірнальника здатна на глибині містити велику кількість розчиненого азоту. Але, якщо пірнальник швидко підіймається, надлишок азоту виходить з розчину у вигляді газових бульбашок, які здатні заблокувати постачання крові до певних тканин та важливих органів. Комплекс болісних симптомів, які відчуває внаслідок швидкого підіймання пірнальник, називається *кесоновою хворобою* (від французького слова *«caisse»* — груди). Ця хвороба призводить до втомленості, болів у суглобах, висипу, свербіжу, запаморочення, нудоти, дезорієнтації, невралгічних болісних відчуттів, паралічу і, навіть, смерті.

У кровоносній судині, в якій з певних причин утворилась бульбашка газу, за рахунок потоку форма бульбашки спотворюється (ліва й права півсфери мають різні за величиною радіуси кривизни). Отже, згідно з рівнянням Лапласа, додаткові тиски, зумовлені поверхневим натягом рідини на лівій та правій межах поділу, будуть відрізнятися. Ця різниця тисків може призвести до розриву або закупорки судини. Така ситуація називається *газовою емболією.*

Крім того, на великих глибинах пірнальник приречений на отруєння киснем, яким насичуються тканини, або двоокисом вуглецю, який заходиться у повітрі, що видихається, та накопичується у шоломі пірнальника.

Адаптація водних тварин до глибини. Глибоководне середовище характеризується високим гідростатичним тиском, який збільшується приблизно на 1 МПа (10^6 Па) через кожні 100 м. Втім, у глибинах океану мешкають водні тварини, які здатні витримувати значні тиски до десятків або сотень атмосфер. Діапазон глибин, в яких існують водні тварини, становить: 200—300 м (максимальна глибина близько

PAB09112.indd 11 26.11.2009 16:28:44

900 м) — котики, *Callorhinus*; 457 м — тюлень Ведделя, *Leptonychotes weddelli*; 500—2000 м — глибоководний вугор, *Synaphobranchus kaupi*; більше, ніж 500 м — імператорський пінгвін, *Aptenodytes fosteri*; близько 1500 м — північний морський слон, *Mirounga angustirostris*; 2000—3000 м — кашалот, *Physeter catodon*; 7250 м — морський їжак, *Echinoidea*; 7360 м — морська зірка, *Asteroidea*; 8370 м — ошибнева риба, *Ophidiidae*; 10190 м — морський огірок (голотурія), *Holothurioidea*.

Тривалість перебування під водою цих тварин варіює від 12 хв для імператорського пінгвіна до 30 хв для тюленів та більше однієї години для кашалота.

Жак Пікард, який вивчав морські глибини, спостерігав через ілюмінатор сконструйованого ним батіскафа креветок та риб на глибині 10912 м.

Деяких безхребетних та бактерій було знайдено на дні Маріанської западини (глибина 11043 м, тиск близько 110 МПа).

Такі здатності морських тварин пояснюються так званим *пірнальним рефлексом ссавців*, в основі якого лежить стратегія економії кисню та який включає:

Брадикардію — зменшення частоти серцевих скорочень. Морські тварини здатні зменшувати частоту серцевих скорочень; так, ондатра зменшує пульс від 320 на водній поверхні до 34 ударів за хвилину на глибині, а тюлень від 107 до 68 ударів за хвилину відповідно.

Звуження периферійних судин, що викликає зменшення потоків крові, які досягають кінцівок, щоб забезпечити постачання кров'ю та киснем життєво важливих органів, таких як серце та мозок.

Зсув крові — перенесення плазми крові до грудної порожнини, щоб запобігти злипання легень під час пірнання. Слід відзначити здатність морських тварин видихати повітря з високою ефективністю.

Так, кити можуть видихати за один прийом 88 % повітря, що містилося в легенях, тоді як людина може видихнути за раз лише 12 % повітря.

Здатність тварин зменшувати об'єм легень дає можливість запобігти надходженню атмосферних газів у кровоносні судини. Більшість кисню у морських тварин знаходиться у м'язах та крові, тоді як лише близько 5 % кисню — в легенях.

Один з основних адаптаційних механізмів морських тварин пов'язаний з їх здатністю розподіляти та накопичувати кисень. Під час вдихання кисень постачається з атмосферного повітря та переноситься у легені, після чого — у кров, яка містить гемоглобін — моле-

PAB09112.indd 12 26.11.2009 16:28:44

кулу, що відповідає за транспортування кисню по всьому організму.

Тварини-пірнальники використовують кисень з крові, яка має високе значення об'єму та гематокриту (кількості кров'яних клітин). Внаслідок цього тканини скелетних м'язів тварини містять близько 47 % загального рівня кисню організму. Саме завдяки великому вмісту гемоглобіну можна пояснити темно-червоний колір м'язів морських тварин. Накопичення кисню здійснюється міоглобіном, основна функція якого полягає у зв'язуванні кисню. Міоглобін характеризується більшою спорідненістю з киснем, ніж гемоглобін. Коли кров проходить через м'язи, кисень переноситься з крові до м'язів. Оскільки кількість міоглобіну у морських тварин у 3—10 разів вища, ніж у земних тварин, то саме морські тварини здатні накопичувати кисень з високою ефективністю.

Людина здатна накопичувати кисень близько 20 мл на 1 кг маси тіла, тоді як пігвіни — 55, а тюлені Ведделя — 87 мл на 1 кг маси тіла.

1.4. Вимірювання тиску

Прилад для вимірювання атмосферного тиску називається *барометром.* Є два основних типи барометрів: барометр-анероїд та трубка Бурдона.

Барометр-анероїд містить анероїдну капсулу, що складається з двох тонких (0,2 мм завтовшки) металевих гофрованих мембран (рис. 1.1).

В середині капсули повітря відкачане (тиск становить 10^{-2} гПа) або капсулу заповнюють інертним газом при тиску 65 гПа. Кількість капсул у сучасних приладах може досягати 14. Мембрани знаходяться у напруженому стані завдяки гофрованій поверхні та дії пружини.

Перевагою барометра-анероїда є його компактність, механічна міцність, здатність до транспортування. Ці прилади можуть бути застосовані в системах автоматичного вимірювання тиску, оскільки механічні переміщення анероїдних капсул легко перетворити на електрич-

Рис. 1.1. Барометр-анероїд

PAB09112.indd 13 26.11.2009 16:28:44

ний сигнал. Недоліком барометра-анероїда є невисока точність вимірювань.

Трубка Бурдона являє собою плоску скривлену трубку, яка випрямляється завдяки зміні атмосферного тиску. Просторове пересування трубки перетворюється у рух зв'язаною з нею індикаторною стрілкою (рис. 1.2).

Барограф — прилад, що використовується для безперервної реєстрації тиску повітря. Він складається із стовпчика анероїдних коробок, поєднаного зі стрілкою самописа (рис. 1.3).

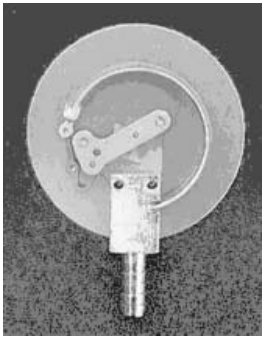


Рис. 1.2. Трубка Бурдона

Рис. 1.3. Барограф

Цифровий барометричний сенсор тиску. Цей прилад, виготовлення якого стало можливим завдяки сучасним технологіям, складається з двох кремнієвих сплавів, з'єднаних між собою прошарком діоксиду кремнію (рис. 1.4). Кремнієві сплави виконують функції обкладинок конденсатора, тоді як товщина діоксиду кремнію та, відповідно, ємність конденсатора залежать від прикладеного атмосферного тиску.

PAB09112.indd 14 26.11.2009 16:28:45

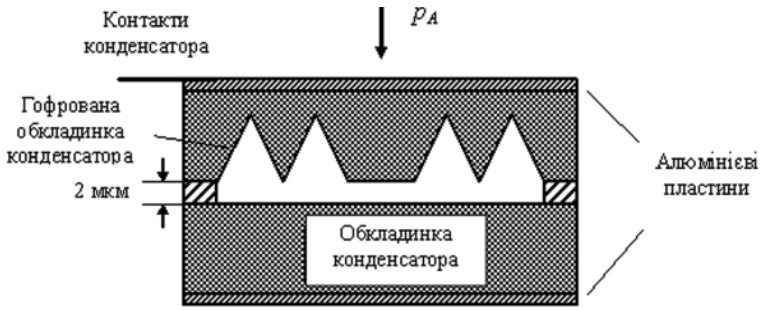


Рис. 1.4. Цифровий барометричний сенсор тиску

П'єзоелектричний сенсор тиску. Кристалічні речовини, в яких при стисненні або розтягненні в певних напрямках виникає електрична поляризація навіть за відсутності електричного поля, називаються *п'єзоелектриками.* Явище виникнення зарядів на поверхні п'єзоелектрика під впливом механічних деформацій називається *прямим п'єзоефектом*, а поява механічних деформацій під впливом електричного поля — *оберненим п'єзоефектом*. До п'єзоелектриків належать кварц, дигідрофосфат амонію (АДР), сульфат літію, сегнетова сіль, титанат барію тощо. П'єзоелектричні перетворювачі знайшли своє застосування як датчики механічних коливань та вібрацій.

Схему п'єзоелектричного сенсора тиску наведено на рис. 1.5.

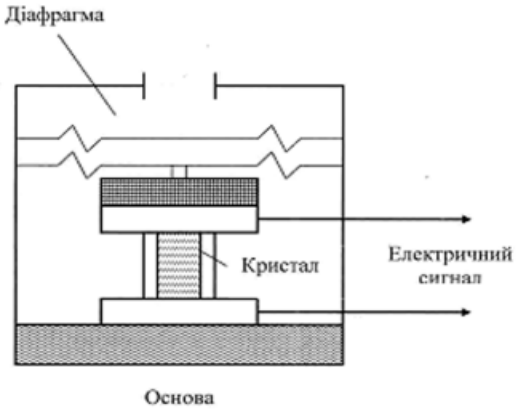


Рис. 1.5. Схема п'єзоелектричного сенсора тиску

Перевагою п'єзоелектричних сенсорів є їх компактність, лінійна залежність електричного сигналу від механічного навантаження, здатність мати високу стабільність у широкому температурному діапазоні (до 1000 ^{0}C).

PAB09112.indd 15 26.11.2009 16:28:45

Аудиторні завдання

1. Визначити атмосферний тиск на висоті:

а) вершини Евересту (8848,82 м);

б) траси реактивного лайнера (10650 м);

в) вершини Ельбрусу (5633 м);

г) нижньої границі стратосфери (20 км).

2. На якій висоті атмосферний тиск зменшується до 0,5 атм? Температура повітря 260 К.

3. Визначити тиск на глибині:

а) Маріанської западини (10912 м);

б) яку досягає північний морський слон (1500 м);

в) занурювання військового підводного човна (900 м);

г) мешкання глибоководних риб (8370 м).

PAB09112.indd 16 26.11.2009 16:28:45

2. ВІТЕР

2.1. Причини виникнення вітру

Виникнення вітру. Рух повітря відносно земної поверхні називається *вітром*. На утворення повітряних потоків впливають такі чинники:

1. Градієнти тиску, які забезпечують рух повітря від області високого тиску до області низького тиску.

2. Гравітаційна сила, яка прискорює рух повітря до величини g = 9,8 м/с^2. Дія вертикального градієнта тиску врівноважується гравітаційною силою.

3. Сила тертя, яка визначається як:

$$F = -\mu\upsilon, \qquad (2.1)$$

де μ — коефіцієнцт внутрішнього тертя, який залежить від характеру підстилаючої поверхні; υ — швидкість вітру. Сила тертя пропорційна до швидкості вітру і має протилежний останньому напрямок.

4. Сила Коріоліса, яка відхиляє напрямок руху повітря (вправо на північній півкулі, вліво — на південній). Визначається ця сила за виразом:

$$F_k = 2\rho\upsilon\omega\sin\varphi, \qquad (2.2)$$

де ρ — густина повітря; υ — швидкість руху повітря; ω — кутова швидкість обертання Землі ($7{,}3\times10^{-5}$рад/с); φ — широта місцевості.

Розглянемо причини виникнення сили Коріоліса. У системі відліку, що обертається, матеріальна точка, яка рухається не паралельно осі цього обертання, відхиляється за напрямком, перпендикулярним до її швидкості. На Землі цей ефект, зумовлений її добовим обертанням, призводить до того, що вільнопадаючі тіла відхиляються до схід, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються на північній півкулі вправо від напрямку руху, на південній — вліво. На екваторі $\sin\varphi = 0$ і $F_k = 0$; на полюсах $\sin\varphi = 1$, отже сила Коріоліса максимальна.

PAB09112.indd 17 26.11.2009 16:28:45

5. Відцентрова сила, яка визначається за формулою:

$$F_в = \frac{m\upsilon^2}{r}, \qquad (2.3)$$

де r — радіус криволінійної траєкторії. При великих швидкостях і малих радіусах кривизни $F_в$ може значно перевищувати градієнтну силу (тропічні циклони, смерчі).

6. Морські узбережжя є джерелами різниці температур між водою та земною поверхнею. Влітку вранці температура води та берега однакова; опівдні берег нагрівається скоріше, оскільки великі маси води здатні поглинати сонячне випромінювання без нагрівання. Крім того, відбите від земної поверхні випромінювання нагріває поверхневий шар повітря. Все це сприяє появі температурного градієнта (наприклад, $t_в = 18\ ^0C$; $t_б = 27\ ^0C$).

Взимку, коли температура води перевищує температуру берега, ситуація змінюється (наприклад, $t_в = 18\ ^0C$; $t_б = 13\ ^0C$), і вітер прямує з берега до водної поверхні.

2.2. Параметри вітру

До основних параметрів вітру належать швидкість, напрямок і поривчастість.

Швидкість вітру вимірюється в *м/с*, хоча можуть застосовуватися такі одиниці як *вузол* або *км/год* (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Зв'язок між одиницями швидкості вітру

м/с	***вузол***	***км/год***
1,000	1,943	3,600
0,515	1,000	1,853
0,278	0,540	1,000

Залежно від швидкості руху υ розрізняють вітер: помірний ($\upsilon = 5$—8 м/с); сильний ($\upsilon > 14$ м/с); штормовий ($\upsilon = 20$—25 м/с); ураганний ($\upsilon > 30$ м/с). В Антарктиці швидкість вітру сягає 65 м/с, у тропіках — 110 м/с. Швидкість вітру υ залежить від висоти h над рівнем моря: $\upsilon = 5$ м/с ($h = 20$ м); $\upsilon = 20$—25 м/с ($h = 300$ м); $\upsilon = 60$—80 м/с ($h = 10$—17 км). Швидкість вітру та його дія оцінюються за допомогою *шкали Бофорта* (табл.2.2), яку запровадив у 1805 році Френсіс Бофорт на основі візуальних спостережень за вітром та його наслідками.

PAB09112.indd 18 26.11.2009 16:28:46

Таблиця 2.2

Шкала Бофорта

Бал	**Характеристика**	***м/с***	***вузол***	***км/год***	**Наслідки**
1	2	3	4	5	6
0	Безвітря	0,0—0,2	< 1	< 1	Дим прямує вертикально
1	Легкий вітрець	0,3—1,5	1—3	1—5	Дим повільно дрейфує
2	Легкий бриз	1,6—3,3	4—6	6—11	Шурхіт листя, вітер відчувається, анемометр починає обертатися
3	М'який бриз	3,4—5,4	7—10	12—19	Листя та гілки починають рухатися
4	Помірний бриз	5,5—7,9	11—16	20—28	Невеликі гілки дерев починають гнутися, підіймається пил
5	Свіжий бриз	8,0—10,7	17—21	29—38	Невеликі дерева починають рухатися
6	Сильний бриз	10,8—13,8	22—27	39—49	Великі гілки рухаються, шум у проводах
7	Близький до штормового вітер	13,9—17,1	28—33	50—61	Дерева гнуться, важко йти
8	Штормовий вітер	17,2—20,7	34—40	62—74	Гілки ламаються
9	Сильний штормовий вітер	20,8—24,4	41—47	75—88	Гілки відриваються від дерев, руйнування дахів
10	Шторм	24,5—28,4	48—55	89—102	Дерева вириваються з грунту, руйнування будинків
11	Шалений шторм	28,5—32,6	56—63	103—117	Поширене руйнування дерев та будинків
12	Ураган	> 32,7	> 64	> 118	Серйозні руйнування будинків та дерев

PAB09112.indd 19 26.11.2009 16:28:46

Напрямок вітру визначають відносно сторін світу і позначають або в *румбах* (всього їх 16): північний, північно-східний, східний тощо, або в *поділках*: одна поділка має 5 ^{0} або 10 ^{0} залежно від необхідної точності вимірювань.

Поривчатість вітру — це стрибкоподібні посилення і послаблення швидкості $\Delta\upsilon$ вітру; $\Delta\upsilon = \pm 3$ м/с при $\upsilon = 5$–10 м/с; $\Delta\upsilon = \pm 5$—7 м/с при $\upsilon = 11$—15 м/с.

2.3. Стресові ситуації, пов'язані з вітром

Вітер надзвичайної інтенсивності часто має специфічні назви — шторм, ураган, тайфун, торнадо.

Шторм — це вітер зі швидкістю від 51 до 102 км/год. Вітер такої інтенсивності оцінюється у 7—10 балів за шкалою Бофорта.

Ураган — це тропічний шторм, швидкість поширення якого варіює від 119 до 257 км/год; він супроводжується грозами, зливами та повенями. Такий вітер спостерігається у північній Атлантиці; аналогічні явища у Тихому океані називають *«тайфунами»*. Тривалість ураганів від 1 до 30 днів. Оцінюють урагани згідно зі шкалою Сафіра-Сімсона (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Шкала Сафіра-Сімсона оцінки ураганів

Категорія	Швидкість, км/год	Наслідки
1 (мінімальний)	119—153	Руйнування дерев, рухомих будинків, часткове затоплення прибережних районів
2 (помірний)	154—177	Суттєве пошкодження рослинності, вириванння дерев, затоплення прибережних доріг
3 (великий)	178—279	Руйнування малих будинків, затоплення прибережної території на відстань до 13 км
4 (екстремальний)	210—249	Руйнування дахів, вікон, повне руйнування рухомих будинків, затоплення до 10 км
5 (катастрофічний)	> 249	Руйнування будинків, промислових підприємств, необхідність евакуації населення в зоні 8—16 км

Смерч — сильний маломасштабний вітер з вертикальною віссю, що має велику швидкість обертання. В Америці його називають *торнадо*. Причиною смерча є великі градієнти тиску, нестійкість нижнього шару атмосфери (до 2 км), яка виникає при зіткненні сухих холод-

PAB09112.indd 20 26.11.2009 16:28:46

них повітряних мас з теплими і вологими. Діаметр смерча сягає 100 м над водною поверхнею, від декількох десятків метрів до декількох сот метрів – над земною поверхнею. Висота смерчу — 100 м. Характерна особливість — спіралеподібний рух повітря навколо вертикальної осі. Швидкість руху становить 50—100 м/с, а інколи 250 м/с, причому є вертикальна компонента швидкості величиною 70—90 м/с. Тривалість смерчу — від декількох хвилин до декількох годин. Як приклади можна навести смерчі в США: в 1925 р., коли загинуло 695 людей і в 1999 р., коли загинули десятки людей

Для оцінки смерчів використовують *шкалу Фудзі* (табл.2.4).

Таблиця 2.4

Шкала Фудзі оцінки смерчів

Категорія	**Швидкість, км/год**	**Наслідки**
F_0 (легкий)	64—115	Руйнування телевізійних антен, труб, дерев, вікон
F_1 (помірний)	116—179	Перевертання автомобілів, виривання дерев з корінням
F_2 (значний)	180—251	Знесення дахів, перевертання рухомих будинків
F_3 (суворий)	252—330	Руйнування металевих будівель, зсунення зовнішніх стін, полягання лісів та угідь
F_4 (спустошливий)	331—416	Падіння стін, перенесення металевих та бетонних конструкцій на велику відстань
F_5 (неймовірний)	417—509	Перенесення будинків на велику відстань, руйнування шкіл, мотелів
F_6 (неуявленний)	510—606	Автомобілі летять у повітрі

Суховій — вітер, що виникає при високій температурі (більше 25 ^{0}C) і вкрай низькій відносній вологості (менше 30 %). Спостерігаються суховії в степових та лісостепових зонах України. Швидкість руху повітря сягає 5—20 м/с.

Пилові бурі виникають на оголених земельних ділянках, на розпиленому і висушеному грунті, на розорених схилах. Основним фактором, що сприяє пиловій бурі, є сильний вітер (понад 10 м/с) і відносна вологість, що не перевищує 50 %. В Україні у степовій зоні відбувається за рік 4—5 днів з пиловими бурями, а в деяких областях — 10—15 днів на рік.

PAB09112.indd 21 26.11.2009 16:28:46

Бора — сильний, холодний і поривчастий вітер, що походить з області невисоких горних хребтів і пересувається у бік теплого моря. Утворюється в холодну пору року, коли над холодним континентом виникає область підвищеного тиску, а над теплим морем — область низького тиску. Над хребтом переріз повітряного потоку зменшується, а швидкість збільшується. Швидкість вітру під час бори досягає 40—60 м/с, температура повітря може зменшуватися до — 20 ^{0}С. Тривалість бори — 1—3 дні.

2.4. Вплив вітру на живі організми

Здатність літаючих комах орієнтуватися відносно такого зовнішнього стимулу як вітер, тобто рухатися до цього стимулу або від нього, називається *анемотаксисом*. Комахи прагнуть летіти вздовж вітру, якщо вони знаходяться у контакті з клубом феромону, або повертати проти напрямку вітру або перпендикулярно йому, якщо цей контакт втрачений. *Феромони* (від грецького *pherein* — нести або переносити та *hormōn* — збуджувати або стимулювати) — це молекули, що переносяться вітром і використовуються комахами у пошуках статевих партнерів та для комунікації. Крім того, комахи можуть контролювати своє положення під час польоту спостереженням за наземними об'єктами.

Мухи мають рецепторні органи на антенах, які чутливі до вітру і допомагають змінити положення тіла відповідно до напрямку і швидкості вітра.

Жуки можуть орієнтуватися відповідно до напрямку вітру завдяки джонстонівському органу на антенах.

Медоносна бджола спроможна оцінювати швидкість потоків повітря та їх напрямок під час польоту завдяки чутливим волоскам, які діють як *аеродинамічні датчики*. Розташовані ці волоски на складних очах бджоли (рис.2.1), на деяких ділянках голови та крилах. Оцінка швидкості руху відносно земної поверхні відбувається візуально, за рахунок фоторецепторів. Витрати енергії під час польоту дозволяють

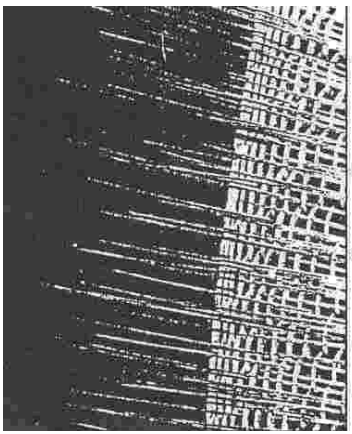


Рис.2.1. Фрагмент складного ока бджоли: між фасетками розміщені чутливі волоски, що діють як рецептори повітряних потоків

PAB09112.indd 22 26.11.2009 16:28:46

бджолі мати уявлення про відстань польоту. Отже, вітровий режим безсумнівно впливає на продуктивність бджіл.

Крім того, бджола отримує інформацію через *рецептори тиску*, які знаходяться на стінках медового мішка: тиск зменшується, якщо мішок спорожнюється.

Сенсорні волоски сарани збуджуються при їх зміщенні під впливом вітру і реагують на вітер шляхом підвищення частоти генерації електричних імпульсів від 50—70 Гц до 245 Гц.

Вітер без сумніву впливає на рослини. Вітер викликає настирні рухи рослин, стимулює перенесення теплоти та маси, зміни опору граничного шару приземного повітря, зміну рослинної архітектури. На відкритих місцевостях вітер може придушувати розвиток рослинності, особливо дерев; вплив вітру призводить до затримки їх росту та викривленню стовбура, збільшення транспірації в умовах низької вологості, поширення міграції насіння, плодів, спор, перенесення частинок грунту та агрохімічних препаратів.

Під час ураганів можливе перенесення рослин і тварин на великі відстані, що впливатиме на склад лісових суспільств. Негативними наслідками дії сильних вітрів є інтенсифікація процесу випаровування, видування посівів, пошкодження сходів, повітряна ерозія, вилягання зернових культур, вітровали і буреломи.

2.5. Вимірювання параметрів вітру

Прилади, що визначають швидкість руху повітряних потоків, називаються *анемометрами*. Принцип дії полягає в перетворенні енергії поступального руху повітря на механічне обертання різноманітних вертушок, вітрових коліс або гвинтів. Найпоширенішеми є анемометри чашечкового та пропелерного типів.

Анемометр *чашечкового типу* складається з трьох-чотирьох півсферичних чашок (рис. 2.2 на с. 24). Порогова чутливість чашечкового анемометра становить від 90 мм/с до 2,24 м/с. Анемометри цього типу прості та чутливі. Анемометр *пропелерного типу* містить три-чотирилопастевий пропелер, вісь якого показує напрямок вітру (рис.2.3 на с. 24). Гранична чутливість пропелерного анемометра становить 1,1 м/с; використовують ці прилади для вимірювання швидкості вітру до 90 м/с. Перевагою анемометра пропелерного типу порівняно з чашечковим є його мала вага (пропелер може бути виготовлений з пластмаси), у три рази більша швидкість обертання і можливість вимірювання слабких повітряних потоків.

PAB09112.indd 23 26.11.2009 16:28:46

Рис. 2.3. Анемометр чашечкового типу

Рис. 2.3. Анемометр пропелерного типу

Термоанемометр оснований на реєстрації впливу повітряного потоку на температуру нагрітого провідника або тіла. Анемометри цього типу складаються з тонкого (кількох мікрометрів) провідника, по якому пропускають електричний струм. Опір провідника залежить від температури; під час дії вітру температура провідника та його опір зменшуються.

Вимірювання опору провідника дає можливість оцінити швидкість вітру.

Ультразвуковий анемометр використовує той факт, що звук (ультразвук) поширюється швидше у напрямку, в якому діє вітер. Зазвичай ультразвуковий анемометр вимірює три компоненти вітрового вектора у тривимірному просторі. Вздовж кожної осі розташовано дві пари «передавач-приймач» на відстані 0,1—0,5 м (рис. 2.4).

Рис. 2.4. Ультразвуковий анемометр

Передавач посилає безперервні або імпульсні ультразвукові хвилі. Час проходження хвилею відстані між передавачем та приймачем залежить від того,

PAB09112.indd 24 26.11.2009 16:28:46

збігається чи ні напряок поширення вітру з ультразвуковою хвилею. Швидкість вітру, яку вимірюють ультразвукові анемометри, досягає 30 м/с. Недоліком ультразвукових анемометрів є залежність швидкості поширення ультразвуку від температури, вологості, атмосферного тиску, що потребує відповідного калібрування приладів. Крім того, електронне обладнання підвищує вартість приладів цього типу.

Доплерівський анемометр діє на основі ефекту Доплера: при опроміненні об'єкта, який рухається зі швидкістю υ, ультразвуковою хвилею певної довжини хвилі Λ відбувається розсіювання хвилі, причому частота (довжина хвилі) розсіяної ультразвукової хвилі залежить від швидкості руху об'єкта. Допплерівський зсув $\Delta\Omega$ частоти ультразвукової хвилі, розсіяної під кутом θ об'єктом, що рухається зі швидкістю υ, описується виразом:

$$\Delta\Omega = \frac{4\pi\upsilon}{\Lambda}\sin\frac{\theta}{2}\cos\varphi\,, \qquad (2.4)$$

де φ — кут між напрямком швидкості υ і напрямком поширення ультразвукової хвилі. Допплерівські анемометри здатні вимірювати швидкість вітру на висотах до 1 км; точність вимірювання становить 5 %.

Визначення напрямку вітру здійснюється *флюгерами*, які являють собою металеву пластину прямокутної форми, що обертається навколо вертикальної осі. Для одночасного вимірювання швидкості і напрямку руху повітря використовують *анеморумбометр*. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється на послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна до швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.

Аудиторні завдання

1. Назвати причини, що призводять до утворення вітру.

2. Перевести одиницю вимірювання швидкості вітру «вузол» у «м/с» та «км/год».

PAB09112.indd 25 26.11.2009 16:28:47

3. ГРАВІТАЦІЯ

3.1. Визначення гравітації

Розглянемо сили, що діють на нерухоме тіло, розташоване на земній поверхні. З боку Землі діє сила тяжіння F, що визначається за законом всесвітнього тяжіння:

$$F = G\frac{mM_з}{R_з^2}, \tag{3.1}$$

де m — маса тіла; $M_з$ — маса Землі; $R_з$ — радіус земної кулі.

Гравітаційна взаємодія між тілами здійснюється за рахунок *гравітаційного поля*. Основною властивістю цього поля є те, що на будь-яке тіло масою m, розміщене в цьому полі, діє сила гравітації:

$$\vec{F}_{гр} = m\vec{E}_\gamma \ , \tag{3.2}$$

де вектор $\vec{E}_\gamma$ не залежить від m і називається напруженістю гравітаційного поля:

$$\vec{E}_\gamma = \frac{\vec{F}_{гр}}{m} \ . \tag{3.3}$$

Враховуючи рівняння (3.1), можна отримати вираз:

$$\vec{E}_\gamma = -\frac{GM_з}{R_з^3}\vec{R} \ . \tag{3.4}$$

Напруженість поля тяжіння визначається силою, що діє з боку поля на матеріальну точку одиничної маси і збігається з напрямком дії сили тяжіння. В кожній точці гравітаційного поля відношення сили, що діє на матеріальну точку, до її маси є величиною сталою і називається прискоренням вільного падіння $\vec{g}$. Біля поверхні Землі $\vec{g}$ = 9,80 м/с^2. Для точок, що розміщені поблизу поверхні Землі, прискорення вільного падіння $\vec{g}$ дорівнює напруженості $\vec{E}_\gamma$ гравітаційного поля.

Таким чином, універсальна взаємодія між будь-якими видами фізичної матерії називається тяжінням або гравітацією.

PAB09112.indd 26 26.11.2009 16:28:47

3.2. Вплив гравітації на живі організми

Гравітаксис водоростей. На відміну від інших зовнішніх стимулів гравітація існує завжди і не змінюється за величиною; її не можна увімкнути чи вимкнути. Вертикальна міграція водних мікроорганізмів являє собою поведінковий механізм пошуків оптимального, з точки зору їх росту та репродукції, положення у водному середовищі. Водні мікроорганізми використовують світло як зовнішній стимул: при низьких рівнях освітлення вони демонструють позитивний фототаксис, прямуючи до водної поверхні, щоб отримати достатнє для життєдіяльності сонячне випромінення. Але при високій інтенсивності сонячного випромінювання вони використовують негативний фототаксис, прямуючи на глибину, щоб запобігти руйнівній дії цього випромінення. Фотоорієнтація не має місця у темряві, але є на значних глибинах, де світла не вистачає. В цьому разі водні організми використовують гравітацію як зовнішній фактор для вертикальної орієнтації.

Гравітаційне поле Землі є важливим зовнішнім фактором для організмів, що пересуваються у водному середовищі. Таку спроможність організмів орієнтувати напрямок свого руху відносно гравітаційного поля називають *гравітаксисом*. Гравітаксис спостерігається у таких водоростей як *Euglena gracilis*, *Chlamydomonas nivalis*, *Cryptomonas*, *Peridinium gatunense* та *P.faeroense*, *Amphidinium caterea, Prorocentrum micans, Dunalialla salina*. Напрямок гравітаційної орієнтації організмів залежить від виду та віку водорості. Так, *Peridinium faeroense* та молода популяція *Euglena gracilis* виявляють позитивний гравітаксис (рух від водної поверхні), у той час як *Chlamydomonas nivalis*, *Peridinium gatunense*, *Amphidinium caterea*, *Prorocentrum micans* та старим популяціям *Euglena gracilis* притаманний негативний гравітаксис (рух до водної поверхні). Рівень гравітаційної орієнтації водоростей визначається віком культури та часом доби, наявністю важких металів у середовищі, впливом сонячного, зокрема ультрафіолетового випромінення. Таким чином, гравітаксис є важливим екологічним фактором, який дозволяє водним організмам знаходити кращі умови існування.

Щодо механізмів гравітаксису водоростей, то тут існує дві гіпотези. Згідно з першою гіпотезою пасивної переорієнтації, гравітаксис є чисто фізичним явищем, яке пояснюється нерівномірним розподілом маси в клітині. Важка частина клітини утворює обертаючий момент, який встановлює клітину у вертикальне положення; завдяки дії джгутикового апарата клітина прямує до водної поверхні. Але ця гіпотеза не підтверджується результатами останніх досліджень. Так, гравітаксис *Euglena gracilis* інгібується ультрафіолетовим випромінюванням, тоді як

PAB09112.indd 27 26.11.2009 16:28:48

швидкість руху залишається незмінною. Перша гіпотеза не здатна пояснити, чому молодим популяціям *Euglena gracilis* притаманний позитивний гравітаксис, тоді як старим — негативний. Не пояснюється також реверсія гравітаксиса під впливом важких металів. Експерименти, що були проведені у космосі, свідчать про те, що гравітаксис водоростей залежить від рівня гравітації, але не від магнітного чи електричного поля Землі.

Отже, була запропонована друга гіпотеза, згідно з якою гравітаксис є активним фізіологічним процесом, в основі якого лежить різниця густини тіла клітини (1,05 г/мл) та середовища (1,00 г/мл), в якому вона знаходиться. Внаслідок седиментації тіло клітини утворює тиск на клітинну мембрану, що призводить до її зміщення на 1 нм та активізації чутливих до гравітації йонних каналів. На користь цієї гіпотези свідчать результати застосування специфічних препаратів — інгібітора механочутливих каналів гадолінію, йонофору A23187 та ванадату, які навіть при незначних концентраціях пригнічують гравітаксис, тоді як рухливість клітин залишається незмінною. Крім того, ці результати дають можливість допустити участь у механізмі гравіорієнтації електричних потенціалів, що виникають на цитоплазматичній мембрані. Типову схему спостереження та оцінки гравітаксису водоростей наведено на рис. 3.1.

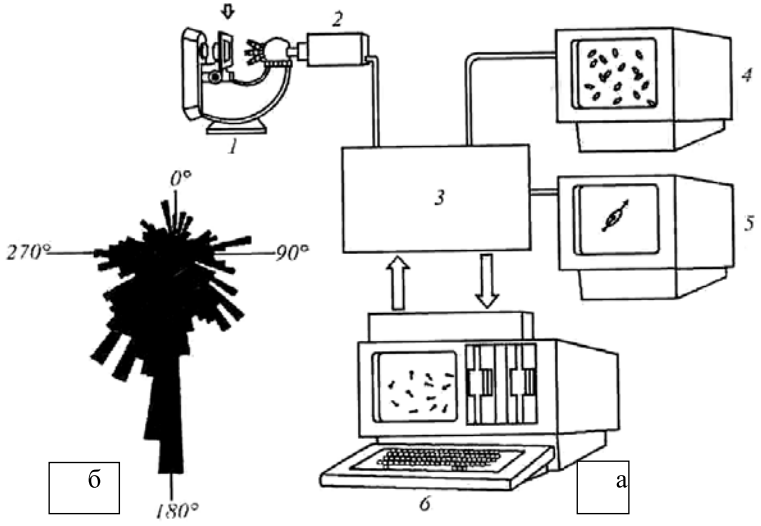


Рис. 3.1. Гравітаксис водоростей: *а* — типова схема спостереження та оцінки гравітаксису водоростей (1 — мікроскоп; 2 — відеокамера;3 — система обробки інформації;4 — монітор спостереження за популяцією;5 — монітор спостереження за окремою клітиною;6 — комп'ютер); *б* — гістограма кутового розподілу клітин зеленої водорості *Dunaliella salina* під час гравітаксису

PAB09112.indd 28 26.11.2009 16:28:48

Гравітропізм рослин. Ростову реакцію рослин, яка викликає вигин або викривлення її певної частини у бік зовнішнього стимулу, називають *тропізмом.* Якщо рух направлений до стимулу, йдеться про *позитивний тропізм*; якщо в протилежний бік — про *негативний тропізм*.

Коли зовнішнім стимулом є гравітаційна сила, то реакція рослини на неї називається *гравітропізмом.* Рослина, покладена в горизонтальне положення, направляє паросток догори (*негативний гравітропізм*), а корінь — донизу (*позитивний гравітропізм*). Таким органам рослини як столони, ризоми, бокові гілки, що ростуть під прямим кутом до напрямку дії гравітаційної сили, притаманний *діагравітропізм*, а органам, напрямок росту яких знаходиться в інтервалі 0-90 ^{0} до вертикалі, — *плагіотропізм.* Якщо органи не чутливі до гравітації, їх називають *агравітропними.* Типові гравітропні відгуки стебла та коріння рослин наведено на рис. 3.2.

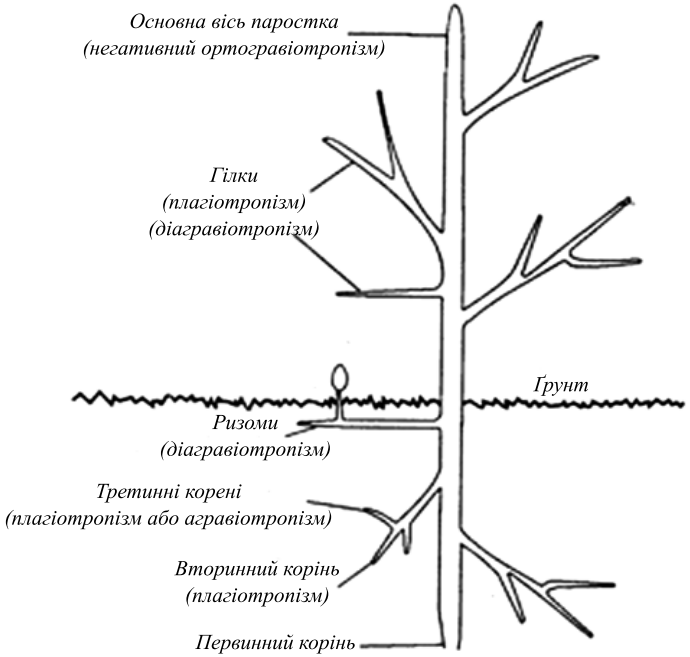


Рис. 3.2. Типові гравітропні відгуки стебла та коріння рослини

PAB09112.indd 29 26.11.2009 16:28:48

3.3. Вимірювання гравітропізму

У більшості експериментів використовується гравітаційне прискорення на рівні 1 *g* чи менше, що досягається орієнтуванням органа (колеоптиля чи кореня) у будь-якому не вертикальному положенні. Гравітаційна сила пропорційна синусу кута нахилу органа відносно вертикалі. Якщо потрібно звести нанівець вплив гравітаційного поля, застосовують *клініостати* — прилади, які забезпечують обертальний рух рослинного об'єкта, або проводять *космічні досліди*, в яких досягають стану невагомості.

3.4. Комахи та гравітація

Функції гравірецепторів бджоли виконують трихоїдні сенсили, що розміщені у місці зчленування голови та грудей. Тиск голови на груди залежить від положення голови бджоли відносно тіла; реєструючи рівень тиску за допомогою волосків, бджола спроможна контролювати положення свого тіла у просторі, а також вимірювати кути шестикутних чарунок при їх побудові.

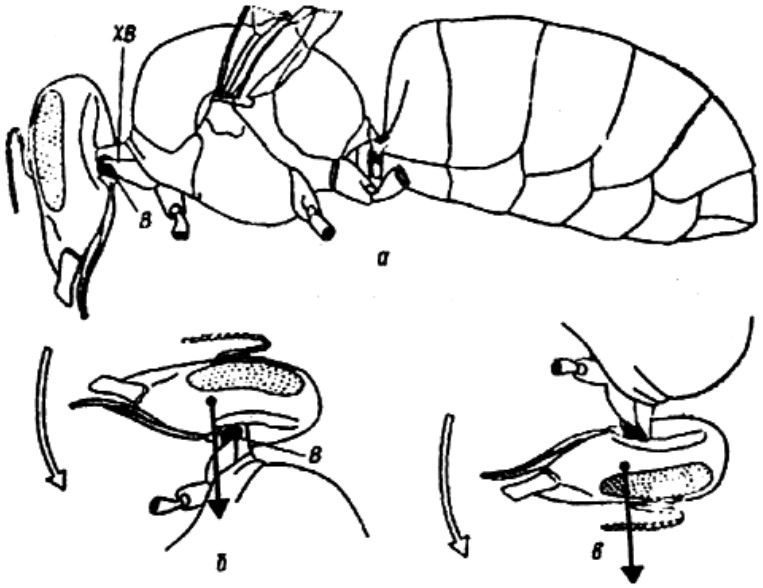


Рис. 3.3. Орган рівноваги бджоли

PAB09112.indd 30 26.11.2009 16:28:48

При побудові цих чарунок (саме шестикутники мають найменший периметр і при тій самій місткості порівняно з чарунками іншої форми зумовлюють найменшу кількість будівельного матеріалу) бджоли вимірюють кути за допомогою особливих органів чуттів, розміщених у місці зчленування голови та грудей (рис. 3.3). У звичайному стані голова опирається на два хітинових виступи грудей *(XB)* вище центра маси (рис. 3.3, *а*).

При вертикальному розміщенні бджоли головою догори нижня її частина тисне на груди (рис. 3.3, *б*), причому чутливі волоски *B* сприймають цей тиск; при розміщенні головою донизу ситуація змінюється (рис. 3.3, *в*). Таким чином, реєструючи рівень тиску голови на груди за допомогою волосків, бджола здатна контролювати положення у просторі свого тіла та стільників.

PAB09112.indd 31 26.11.2009 16:28:48

4. ВІБРАЦІЇ

4.1. Параметри вібрацій

Вібрації *(від лат. vibratio — коливання)* — механічні коливання матеріальних систем, що відбуваються з великою (більше 1 коливання за секунду) частотою та невеликою амплітудою. Транспортні засоби, промислові агрегати, будівельні механізми і машини є джерелами вимушених механічних коливань, що утворюються в ґрунті. Основна частина коливальної енергії переноситься поверхневими хвилями, які поширюються в поверхневому шарі ґрунту (10—15 м).

Вібрації характеризуються такими параметрами:

Зміщення — відстань від положення рівноваги, на якій знаходиться частинка або тіло, що коливається, в даний момент часу. Вимірюється у міліметрах або мікрометрах.

Амплітуда вібрацій — максимальне зміщення частинки або тіла, що коливається, від стану рівноваги.

Фаза коливань — частина періоду (часу одного повного коливання), протягом якого частинка або тіло відхиляється від стану рівноваги.

Частота коливання — кількість коливань, які здійснює частинка або тіло, що коливається, за одиницю часу. Одиниця частоти в системі СІ — Гц.

Швидкість — відношення зміни зміщення частинки або тіла, що коливається, до проміжку часу, за який вона відбулася. Одиниця швидкості в системі СІ — м/с.

Прискорення — відношення зміни швидкості коливання частинки або тіла, що коливається, до проміжку часу, за який вона відбулася. Одиниця прискорення в системі СІ — м/с^2.

Вібрацію оцінюють за рівнями *коливальних (вібраційних) швидкостей* в октавних смугах частот (в децибелах):

$$L_\upsilon = 20\lg(\upsilon/\upsilon_0), \qquad (4.1)$$

де υ — значення коливальної швидкості; υ_0 — опорна коливальна швидкість.

Типові значення вібраційних швидкостей для різних джерел вібрації наведено в табл. 4.1.

PAB09112.indd 32 26.11.2009 16:28:49

Таблиця 4.1

Основні джерела вібрацій

Джерело	Вібраційна швидкість, мм/с
Рейковий транспорт	0,3—160
Промислові установки	0,05—5
Будівельна техніка	0,002—1,6
Автотранспорт	0,005—0,07
Денний фон у місті	0,006—0,02
Нічний фон у місті	0,003—0,01
Безпечний «геологічний» рівень	0,225
Безпечний фізіологічний рівень	0,12

4.2. Вплив вібрацій на організм людини

Людський організм — це складна система, яка має велику кількість рухомих елементів. Кожний такий елемент характеризується певними ступенями свободи та власною частотою коливань. У цілому, організм людини чутливий до різних зовнішніх вібраційних параметрів, таких як інтенсивність, частота, тривалість вібрацій протягом контакту тіла з джерелом вібрацій. Наприклад, грудна клітина разом з черевною частиною характеризується резонансною частотою 3—6 Гц; очне яблуко відповідає на резонансні частоти в області 60—90 Гц; шелепна система — в області 300—400 Гц, хоча може реагувати на більш високі частоти в діапазоні 600—900 Гц.

Людський організм здатний сприймати дію ритмічних коливань, які утворюються різноманітними механізмами та інструментами, з якими організм перебуває в контакті. Вплив вібрацій на організм людини різноманітний: порушуються функції вестибулярного апарату, респіраторної та кардіоваскулярної систем, зорового аналізатора, м'язових веретен.

Стосовно людини, вібрації слід розглядати як небажані рухи, що призводять до *вібраційної хвороби* — професійного захворювання, яке зумовлене дією вібрацій та супроводжується порушеннями серцево-судинної та центральної нервової систем, дегенеративними змінами кісткових тканин, пошкодженнями слухового аналізатора.

Розрізняють загальну та локалізовану дію вібрацій.

Загальна вібрація виникає внаслідок впливу регулярно діючих джерел вібрацій на водіїв тракторів, скреперів або бульдозерів, які знаходяться на поверхні, що вібрує. Ці вібрації частотою 1—80 Гц передаються на все тіло працівника. Вібраційна хвороба, що зумовлена дією загальної вібрації, характеризується значними змінами в центральній нервовій системі, викликає дистонію (зміну тонусу) судин.

PAB09112.indd 33 26.11.2009 16:28:49

Вібрації частотою менше, ніж 1 Гц призводять до *кінетозу* — порушення загального стану людини, що викликається дією прискорень, виникаючих у процесі різноманітних переміщень тіла у просторі, на вестибулярний апарат, а також комплексом захворювань серцевої, травної та ендокринної систем.

Локальна вібрація викликається постійно діючими вібраційними інструментами такими, як відбійні молотки, циркулярні пили, електродрилі тощо. Локальна вібрація передається через руки та передпліччя. Частотний діапазон локальної вібрації становить 8—100 Гц. Основними симптомами є спазми судин кінцівок, порушення циркуляції кровоносних судин, побіління пальців (хвороба «білих пальців»). Тривала дія локальної вібрації може призвести до більш серйозних порушень, таких як гангрена.

У дітей, які довго грають в комп'ютерні ігри, став спостерігатися симптом «тремтіння рук» (hand-arm vibration syndrome).

Противібраційні заходи. Максимальна чутливість рук працівників, які використовують вібраційні інструменти, становить 8—16 Гц. Заходами, що дозволяють зменшити вплив вібрацій, є застосування антивібраційних печаток, які містять шар в'язкопружного матеріалу; обмеження часу перебування працівника на поверхні, що вібрує; механічна ізоляція джерел вібрації або поверхонь, на яких розташовані ці джерела; встановлення поглинаючих вібрацію сидінь; використання антивібраційних амортизаторів.

4.3. Вплив вібрацій на тварин

Багато комах мають настільки малі розміри, що процес утворення звуку завдяки тільки м'язовим волокнам виявляється вкрай неефективним. Вирішити цю проблему можна лише через помноження частоти звукового сигналу, що здійснюється у *стридуляційному апараті* комах. Незважаючи на різні анатомічні властивості стридуляційних апаратів, принципи їх дії майже однакові. Стрекотальний кантик, розміщений в одній частині апарату, рухається вздовж стрекотальної жилки, яка має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури становлять декілька мікрометрів. Протягом кожного м'язового скорочення кантик зачіпає сотні елементів жилки, утворюючи при цьому звуки високої частоти.

Завдяки активності стридуляційного апарату комаха генерує поздовжні хвилі, які поширюються вздовж субстрату (рослини) як сигнал комунікації, демонстрації територіальних претензій або привертання уваги статевих партнерів. Швидкість поширення таких хвиль становить близько 500 м/с.

PAB09112.indd 34 26.11.2009 16:28:49

Високою чутливістю до вібрацій характеризуються павуки (*Araneida*). Павуки відрізняють живу жертву від мертвої завдяки коливанням павутини, які відбуваються з частотою близько 50 Гц. Причому, павуки здатні відрізняти за допомогою своїх восьми кінцівок коливання, що утворюються комахою-жертвою від тих, що виникають завдяки вітру або статевому партнеру. Коливання передаються вздовж радіальних ниток павутини; здатність реєструвати часову затримку коливань між окремими нитками величиною 1 мс дає можливість мисливцю точно визначити напрямок до джерела коливань.

Нічні пустельні скорпіони (*Scorpionida*) визначають місцезнаходження жертви за вібраціями піску на відстані до 0,5 м. На кожній з восьмі кінцівок є рецептор вібрації, який генерує електричні розряди у відповідь на зміщення близько 0,1 нм на відстані до 15 см. Сукупність відгуків здатна орієнтувати скорпіона на джерело вібрації.

Таргани (*Blattodeae*) здатні сприймати коливання з порогом 10^{-9} м (амплітуда цих коливань дорівнює діаметру молекули водню!) в діапазоні частот 1000—5000 Гц, які виникають завдяки руху повітря або поверхні, на якій вони знаходяться.

Мешканець водойм клоп-стародуб знаходить здобич за коливаннями поверхні води амплітудою в 1мкм і частотою 100—50 Гц.

Мурашки-листорези здатні реагувати на зміщення близько $1{,}3 \cdot 10^{-7}$ см і частотою 1—23 кГц.

Водомірка-самка знаходить самця за коливаннями води з частотою 20 Гц.

Реакція бджоли на вібрації субстрату, на поверхні якого вона знаходиться, відбувається за рахунок субгенуальних органів (*s.scolopophora*) на гомілках передніх кінцівок.

4.4. Вимірювання вібрацій

Залежно від параметрів вібрацій, які вимірюються (зміщення, швидкість, прискорення, фаза, частота) розрізняють такі прилади: *віброметри, велометри, акселерометри, фазометри, частотоміри.* Пристрій, що перетворює вібраційні параметри у відповідний електричний сигнал, називається *перетворювачем.* Розглянемо принцип дії основних типів перетворювачів.

Перетворювачі опору — в основі цих приладів лежить залежність опору провідника від його довжини та перетворення механічного руху в зміну електричного опору за допомогою реостата або напівпровідника, що викликає відповідні зміни напруги або струму в системі реєстрації. Вібраційний процес викликає коливання рухливого контакту реостата та відповідні зміни опору. Сучасні технології до-

PAB09112.indd 35 26.11.2009 16:28:49

зволяють використовувати тонкі плівки або печатні електричні схеми, які дають можливість мініатюризувати такі перетворювачі.

П'єзоелектричні перетворювачі базуються на явищі п'єзоелектричного ефекту — здатності деяких матеріалів (кварц, титанат барію, турмалін, ніобат літію, сульфат натрію) утворювати електричні заряди під час деформації або механічної напруги. Під час вібрування основи на поверхнях кристала виникає напруга пропорційна прискоренню. Перевагою такого перетворювача є компактність, висока чутливість, спроможність давати показання в широкому частотному діапазоні.

Електродинамічні перетворювачі. Принцип дії перетворювача базується на явищі електромагнітної індукції — виникненні електричного струму в замкнутому провідному контурі під час зміни потоку магнітної індукції, що охоплюється цим контуром. Внаслідок руху провідника у формі котушки в магнітному полі на кінцях провідника виникає напруга, величина якої залежить від магнітної індукції, довжини провідника та швидкості його руху. Різновидами електромагнітних перетворювачів є *індуктивні перетворювачі*, що працюють на основі явища самоіндукції; *ємнісні перетворювачі*, що використовують залежність ємності конденсатора від відстані між обкладинками; *перетворювачі на основі ефекту Холла* — виникненні різниці потенціалів у провіднику зі струмом, розміщеному у магнітному полі.

Перетворювач швидкості (велометр) генерує електричний сигнал, величина якого пропорційна швидкості руху тіла, що вібрує. Цей перетворювач, що монтується на вібруючій поверхні, характеризується високою чутливістю, але має значні розміри.

Перетворювач прискорення (акселерометр) генерує електричний сигнал, величина якого пропорційна прискоренню, якого набуває вібруюче тіло. Перетворювачі такого типу відрізняються високою чутливістю, широким частотним діапазоном, компактністю.

Фотоелектричний перетворювач складається з електричного мосту, одне плече якого є фоторезистором, розміщеним на тілі, що коливається та освітлюється через діафрагму. Під час коливань відбуваються зміщення фоторезистора, рівень освітлення змінюється, що впливає на величину опору цього плеча і дисбаланс мосту.

Лазерний віброметр. На об'єкт, вібрації якого оцінюються, направляють випромінювання CO_2-лазера (10,6 мкм). Відбите випромінювання накладається на падаюче випромінювання та утворює биття, характер якого-залежить від руху об'єкта. Для збільшення чутливості приладу промінь лазера модулюють за частотою. Перевагою приладу є висока чутливість, яка досягає 50нм, а також можливість дистанційного вимірювання вібрацій.

PAB09112.indd 36 26.11.2009 16:28:49

5. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

5.1. Основні визначення

Коливання — це рухи або процеси, які відзначаються певною повторюваністю у часі.

Вільними (власними) називаються коливання, які відбуваються за відсутності зовнішніх впливів на коливальну систему і виникають внаслідок будь-якого початкового відхилення цієї системи від стану її стійкої рівноваги.

Періодичними є коливання, що повторюються через однакові проміжки часу.

Процес поширення коливань у суцільному середовищі називається *хвильовим процесом* або *хвилею*. Механічні збурення (деформації), що поширюються в пружному середовищі, називаються *пружними* (або механічними) хвилями. Пружні хвилі бувають *поздовжніми*, якщо частинки середовища коливаються у напрямку поширення хвилі, і *поперечними*, якщо частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі.

5.2. Землетруси

Землетруси — це підземні поштовхи та коливання земної поверхні, що виникають внаслідок раптових зміщень та розривів у земній корі або верхній частині мантії (оболонки, що розташована між земною корою та ядром), які передаються на велику відстань у вигляді пружних коливань. Землетруси є також джерелами коливань земної поверхні та підземних поштовхів, що викликаються природними причинами.

Землетруси характеризуються графічним розподілом місць виникнення поштовхів — *гіпоцентрів*, інтенсивністю, тривалістю, механізмами виникнення та тими руйнуваннями, які вони спричиняють. Розміщена над гіпоцентром ділянка земної поверхні, в межах якої інтенсивність поштовхів досягає найбільшої величини, називається *епіцентром.*

Під час зміщень та розривів у земній корі виникають *сейсмічні хвилі*, які викликають поштовхи. Розрізняють три типи сейсмічних хвиль.

PAB09112.indd 37 26.11.2009 16:28:49

P-хвилі — хвилі стиснення, які викликають коливання молекул у напрямку поширення хвилі; вони рухаються швидше, ніж всі інші типи хвиль та можуть поширюватися через будь-які речовини.

S-хвилі — хвилі зсуву. Вони поширюються більш повільно, ніж P-хвилі та не можуть проходити через водні середовища. Молекули речовини коливаються у перпендикулярному до поширення *S*-хвилі напрямку.

L-хвилі — поверхневі хвилі, які беруть активну участь у руйнуванні наземних об'єктів.

Схему поширення сейсмічних хвиль стиснення та зсуву наведено на рис. 5.1.

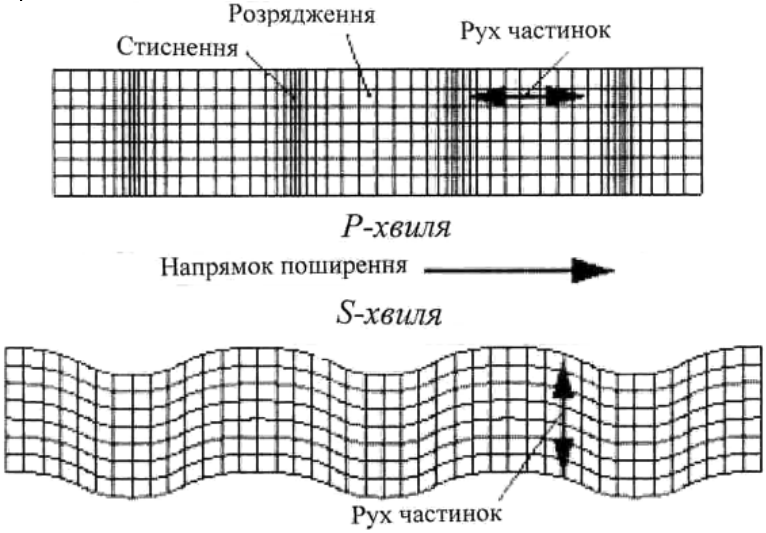


Рис. 5.1. Сейсмічні хвилі стиснення та зсуву

5.3. Цунамі

Слово «цунамі» походить від двох японських слів: «tsu» — гавань та «nami» — хвиля. Утворюється цунамі завдяки природним порушенням рівноваги великих мас води (землетруси, виверження вулканів, зсуви грунту, падіння метеоритів). Причиною, що найчастіше викликає цунамі, є підводні землетруси, які призводять до зміщення морського дна та його вертикального руху.

Період хвилі становить від хвилин до кількох годин (що відповідає відстані між максимумами до сотень кілометрів (звичайна мор-

PAB09112.indd 38 26.11.2009 16:28:49

ська хвиля має період 10 с, що відповідає відстані 150 м).

Причому, у глибокій воді цунамі має невелику амплітуду (60 см через 2 год після землетрусу), яка поширюється зі швидкістю від 500 до 1000 км/год; у зоні узбережжя швидкість зменшується приблизно до 70 км/год, але амплітуда збільшується до 24—30 м. Енергія цунамі оцінюється близько 20×10^{15} Дж (20 петаДж). Ця енергія вдвічі перевищує енергію всіх зарядів, що використовувалися протягом II світової війни, включаючи два атомних вибухи, але приблизно на два порядки менша, ніж енергія самого землетрусу.

5.4. Вплив природних коливань на тварин

Багато тварин можуть реагувати на природні коливання. Наближення шторму відчувають кити, деякі риби, медузи, дельфіни, чайки, дрібні рачки. Перші ознаки землетрусу сприймають свійські тварини, залишаючи будівлі.

Доведено, що тварини здатні детектувати Р-хвилі та ультразвукові хвилі, що генеруються під час землетрусу, навіть якщо ці хвилі занадто слабкі для сенсорних систем людини. Отже, тварини відчувають ці хвилі і збуджуються або стають нервозними.

Хоча внаслідок землетрусів та цунамі, що мали місце протягом останніх років, загинуло багато людей, жодних жертв серед тварин не спостерігалося. Є багато прикладів у літературі, які свідчать про здатність таких тварин як собаки, кішки, коні, кози, олені, курки, риби, рептилії, комахи виявляти незвичайну поведінку перед землетрусом.

Так, собаки та кішки забирають своє потомство та залишають свої помешкання; кози відмовляються йти у загін; свині верещать; кури залишають сідало серед ночі; птахи залишають свої гнізда; риби стають неспокійними.

Є. Є. Новогрудський зі співавторами у книзі «Інфразвук» наводить приклади таких спостережень. Так, у Туркменістані у м. Казанджик (4 листопада 1946 р.) за кілька годин до землетрусу незвично поводили себе вівці, ревли верблюди, вили собаки, невчасно співали півні. Про ашгабадський землетрус (13 жовтня 1948 р.) тут написано, що за дві години до поштовху коні у стайнях почали голосно іржати, відривалися від прив'язі, вибігали із стійл. Чергові конюхи вертали їх на місце. А за 15 хв до поштовху коні знову захвилювалися, та так, що не тільки вибігли із стійла, а й вибили ворота стаєнь і розбіглися по території. Катастрофічний поштовх зруйнував будівлі стаєн, але жодного коня там уже не було.

Китайські дослідники ідентифікували 58 видів свійських та диких

PAB09112.indd 39 26.11.2009 16:28:50

тварин, які здатні передбачати землетруси. Як приклад згадується землетрус магнітудою 7,3 бали у 1975 р. у місті Хайченг, адміністрація якого організувала евакуацію 1 млн мешканців на основі висновків, зроблених внаслідок спостереження за дивною поведінкою тварин напередодні землетрусу.

Серед можливих механізмів сенсорного сприймання природних коливань відмічаються здатність тварин реагувати на ультразвукові чи інфразвукові коливання, що супроводжують розриви кристалічних порід, які передують землетрусу; на магнітні поля, що утворюються поблизу епіцентра землетрусу; різноманітні електричні поля у водному середовищі; іонізацію повітря, що викликається електричними градієнтами у повітрі.

Втім, усі ці гіпотези та припущення щодо здатності тварин передбачати землетруси потребують ретельної експериментальної перевірки.

Хоча ми не здатні прогнозувати окремі землетруси, найбільші світові землетруси мають досить відому географічну картину, через що передбачення місця відбуття та інтенсивності можливих великих землетрусів є досить реальним.

5.5. Вимірювання природних коливань

Оцінювання землетрусів. Один із методів оцінювання інтенсивності землетрусів пов'язаний з вимірюванням енергії, яка вивільняється під час геофізичного процесу. Для цього використовують шкалу Ріхтера. Інтенсивність землетрусів змінюється в широких межах — від тих, що зумовлюють легкі тремтіння земної кори, які реєструються лише чутливими приладами, до тих, які спричинюють руйнування будинків. Енергія вимірюється сейсмографом — приладом, шкала якого побудована у логарифмічному масштабі. Згідно зі шкалою Ріхтера, амплітуда М землетрусу (магнітуда) оцінюється за виразом:

$$M = lgA - lgA_0, \qquad (5.1)$$

де A — максимальна амплітуда коливання, що вимірюється сейсмографом; A_0 — функція, яка відповідає амплітуді землетрусу певної інтенсивності, що зареєстрована на певній відстані від епіцентра.

Шкалу Ріхтера наведено у табл. 5.1.

PAB09112.indd 40 26.11.2009 16:28:50

Таблиця 5.1

Шкала Ріхтера для оцінювання інтенсивності землетрусів

Бал	**1–2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Енергія, Дж	$4{,}47\cdot10^{5}$	$7{,}94\cdot10^{7}$	$2{,}51\cdot10^{9}$	$7{,}94\cdot10^{10}$	$2{,}51\cdot10^{12}$	$7{,}94\cdot10^{13}$	$2.51\cdot10^{15}$

Так, інтенсивність 2 бали звичайно відповідає мікроземлетрусам; їх людина не відчуває, а лише реєструє апаратура. Землетруси інтенсивністю 4,6 бала і більше реєструються сейсмографами по всьому світу. Потужні землетруси мають інтенсивність 8 балів і більше.

Землетруси можна класифікувати за категоріями відповідно до їх магнітуд (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Класифікація землетрусів за магнітудами

Землетрус	**Магнітуда**	**Землетрус**	**Магнітуда**
Незначний	3–3,9	Сильний	6–6,9
Легкий	4–4,9	Дуже сильний	7–7,9
Помірний	5–5,9	Катастрофічний	8 та більше

Шкала Ріхтера не враховує пошкоджень і руйнувань, спричинених землетрусом. Крім того, логарифмічний масштаб, покладений в основу шкали Ріхтера, призводить до певних непорозумінь у спробі інтерпретувати землетруси населенням: так, землетрус інтенсивністю 6 балів може бути оцінений як вдвічі більший, ніж землетрус інтенсивністю 3 бали.

Другий підхід враховує не параметри саме землетрусу, а його вплив на людство, В даному випадку використовується *модифікована шкала Меркаллі* (табл.5.3).

Принцип дії сейсмографа. Класичним приладом для вимірювання сейсмічних коливань є маятник, поєднаний із записуючим пером, яке залишає слід на барабані, розташованому на платформі.

Під час виникнення землетрусу маятник продовжує коливання в постійній площині, тоді як барабан рухається у відповідь на поштовхи, що реєструється пером самозаписуючого пристрою (рис. 5.2 на с. 42).

PAB09112.indd 41 26.11.2009 16:28:50

Таблиця 5.3

Модифікована шкала Меркаллі оцінки наслідків землетрусів

Бал	Ознаки землетрусу
1	Не відчувається людьми
2	Відчувається у спокійній обстановці на верхніх поверхах
3	Відчувається в приміщеннях; здається, що під вікнами проїжджає легка вантажівка. Коливаються висячі предмети.
4	Здається, що проїжджає важка вантажівка. Дзвенить віконне скло, посуд. Риплять двері.
5	Відчувається на вулиці. Прокидаються люди. Скляні предмети розбиваються.
6	Відчувається усіма. Налякані люди вибігають на вулицю. Пересовуються меблі.
7	Важко стояти на ногах. Відчувається водіями машин під час руху. Дзвенять великі дзвони.
8	Важко вести автомобіль. Руйнуються цегляні стіни, труби, башти, пам'ятники. Виникають тріщини у сирому грунті.
9	Загальна паніка. Руйнуються каркаси будівель, утворюються суттєві тріщини в грунті.
10	Руйнується більшість споруд та фундаментів. Серйозні пошкодження гребель та насипів. Руйнуються мости.
11	Серйозна деформація залізничних колій. Виходять з ладу підземні трубопроводи.
12	Практично повне руйнування. Порушення лінії горизонту. Здіймаються у повітря окремі предмети.

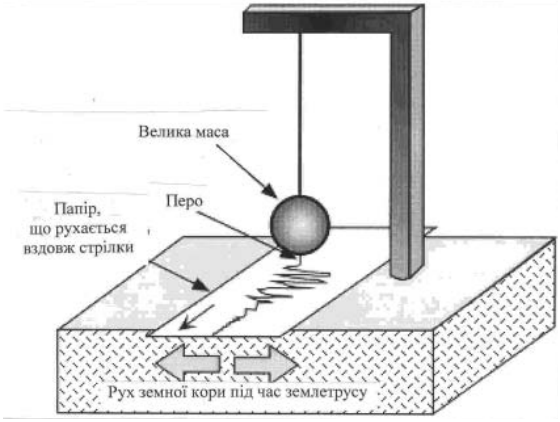


Рис. 5.2. Схема маятникового сейсмографа

PAB09112.indd 42 26.11.2009 16:28:50

Схему типового приладу для оцінювання землетрусів (*сейсмографа*) наведено на рис. 5.3. Основу приладу складає котушка, приєднана до тіла маятника, що рухається у магнітному полі. Цей рух супроводжується виникненням у котушці електричного струму, який вимірюється. Коливання рухомої частини сейсмографа фіксуються системою реєстрації приладу у вигляді *сейсмограми*, яка показує значне підсилення амплітуди коливань під час землетрусу (рис. 5.4).

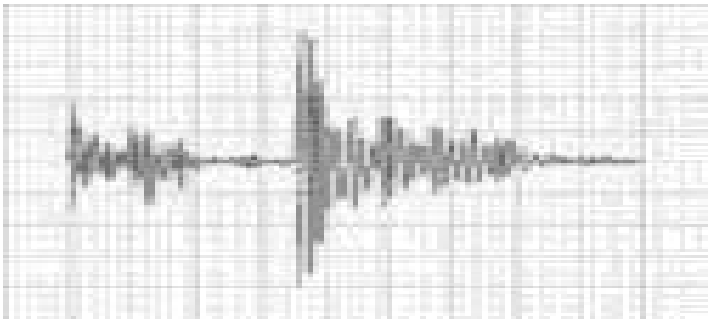


Рис. 5.4. Сейсмограма

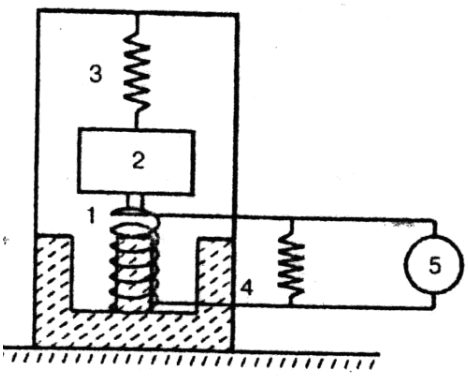


Рис. 5.3. Схема типового приладу для оцінювання землетрусів

Застосування супутників. За допомогою супутника DEMETER («**D**etection of **E**lectro-**M**agnetic **E**missions **T**ransmitted from **E**arthquake **R**egions» — «Детектування електромагнітних випромінювань з районів землетрусів») стало можливим визначати високий рівень кореляції між сейсмічною активністю поблизу південної Японії та електронною густиною йоносфери й температурою напередодні потужного земле-

PAB09112.indd 43 26.11.2009 16:28:50

трусу магнітудою 7,1 бала, який відбувся у серпні-вересні 2004 року.

VAN-метод. Цей метод, назва якого є скороченням прізвищ авторів — грецьких вчених (**V**arotsos, **A**lexopoulos, **N**omicos) передбачає занурення металевих стрижнів у ґрунт в зоні передбачуваного землетрусу з подальшою реєстрацією електричних сигналів, індукованих землетрусом.

Оцінювання цунамі. Застосування методу ультразвукової діагностики морського дна в Індійському океані в районі Бірманського плато, надало можливість спостерігати гребінь висотою 1500 м та великий рів довжиною кілька кілометрів, які були викликані зсувами земної кори. Такий прилад, що називається *сонар* (від англ. фрази **S**ound **N**avigation **A**nd **R**anging) може бути застосований для завчасного попередження землетрусів та цунамі**.**

Систему попередження цунамі розроблено та впроваджено у зоні Алеутських островів (Аляска) (рис. 5.5).

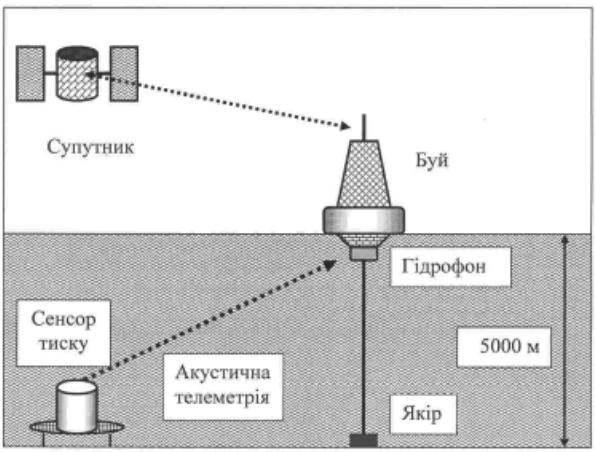


Рис. 5.5. Система попередження цунамі в зоні Алеутських островів (Аляска)

Вона складається з чутливого (менше, ніж 1 см) сенсора тиску, виконаного з кристала кварцу, який розміщений на морському дні. Коли виникає хвиля цунамі, сенсор посилає акустичний сигнал на буй, розташований на водній поверхні; цей сигнал перетворюється в радіосигнал, який сприймається супутниковою системою тривоги, яка попереджає мешканців даної зони через мобільний зв'язок.

PAB09112.indd 44 26.11.2009 16:28:51

Конструктивний тест

Відомо, що логарифмічний масштаб, покладений в основу шкали Ріхтера, призводить до певних непорозумінь у спробі інтерпретувати землетруси населенням; чи не можна використати звичайний масштаб для оцінки землетрусів?

Домашнє завдання

Знайдіть у літературі перелік найбільш руйнівних землетрусів XX сторіччя. Чи можна запобігти впливу землетрусів? Які альтернативні заходи можна запропонувати, щоб запобігти впливу природних факторів?

PAB09112.indd 45 26.11.2009 16:28:51

6. АКУСТИЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

6.1. Хвилі в пружному середовищі

Пружним називається середовище, деформації якого, що викликаються зовнішніми впливами, зникають після припинення цих впливів. Процес поширення коливань у суцільному середовищі називається *хвильовим процесом* або *хвилею.* Механічні збурення (деформації), що поширюються в пружному середовищі, називаються *пружними* (або *механічними*) *хвилями*. Пружні хвилі бувають *поздовжніми*, якщо частинки середовища коливаються у напрямку поширення хвилі, і *поперечними*, якщо частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі. Пружна хвиля називається *гармонічною*, якщо відповідні їй коливання частинок середовища є гармонічними.

Пружні хвилі, що мають частоту в діапазоні 20—20000 Гц, називаються *звуковими*; з частотами > 20000 Гц — *ультразвуковими* і < 20 Гц — *інфразвуковими*.

Галузь фізики, яка досліджує пружні коливання та хвилі звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів, процеси їх збудження та поширення, взаємодію їх з речовинами та різноманітні застосування, називається *акустикою.*

6.2. Характеристики звукових коливань

Інтенсивність звуку — це середня за часом енергія, що переноситься за одиницю часу хвилею через одиницю площі, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі: $I = E/St$. Одиниця вимірювання інтенсивності $Вт/м^2$.

Діапазон інтенсивностей звуку, що оточують нас, дуже великий. Мінімальний за інтенсивністю звук (наприклад, дзижчання бджоли, шелестіння листя) становить $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2, тоді як максимальний (наприклад, ревіння двигуна реактивного літака) дорівнює $I_{макс} = 10$ Вт/м^2. Отже, діапазон інтенсивностей можливих звуків варіює в межах 13 порядків.

Важливим параметром шуму є *рівень інтенсивності звуку L*, який оцінюється так:

PAB09112.indd 46 26.11.2009 16:28:51

$$L = 10\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad (6.1)$$

де I — інтенсивність звукової хвилі, I_0 — мінімальна інтенсивність. Тут L вимірюється в децибелах (дб).

Типові значення рівня інтенсивності звуку наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Типові значення рівнів інтенсивності звуку

Джерело звуку	**Рівень інтенсивності звуку, дб**
Шелестіння листя	10
Шепіт	20—30
Шум, при якому можна спати	35
Дзижчання комара	40
Читальна зала	40
Спокійна бесіда	55—60
Пральна машина	50—75
Пилосос	60—85
Міська вулиця	75
Голосна розмова	80
Автомобільний сигнал на відстані 6 км	90
Електрична дриль	95
Постріл із рушниці	100
Дискотека	110
Важка техніка	110—120
Поріг болісних відчуттів	130
Реактивний літак	140—150
Пошкодження барабанної перетинки	160
Запуск космічної ракети	180

Контрольне завдання

Визначити інтенсивність звуку, що викликає болісні відчуття, використовуючи дані табл. 6.2.

Відповідь: 1 Вт/м^2.

Швидкість поширення звукових хвиль становить 330 м/с для газів; 1493 м/с для рідини; 5100 м/с для металів (алюмінію).

PAB09112.indd 47 26.11.2009 16:28:51

Принципові властивості звукових коливань такі.

1. Звукові коливання поширюються через середовище, викликаючи коливання частинок цього середовища та відповідні зміни густини і тиску; ці хвилі не можуть поширюватися у вакуумі.

2. Звукові хвилі переносять механічну енергію.

3. Звукові хвилі є поздовжніми хвилями, оскільки частинки збудженого середовища рухаються у напрямку поширення хвилі.

Суб'єктивні характеристики звукових хвиль. Звук, який є об'єктом звукових вражень, оцінюється живим організмом суб'єктивно.

Висота звуку відповідає якості звука, що визначається суб'єктивно на слух і залежить в основному від частоти звукових коливань. Зі зростанням частоти висота звуку збільшується і навпаки. Значно менше висота звуку залежить від інтенсивності і складності звуку.

Гучність звуку — це величина, яка характеризує слухові відчуття для даного звуку. Гучність звуку складним чином залежить від інтенсивності звуку, акустичного тиску, частоти і форми звукових коливань.

Тембр звуку визначається спектральним складом звуку, тобто інтенсивністю і частотою обертонів відносно основного тону.

Характеристики ультразвукових коливань. До основних особливостей ультразвуку належить його властивість поширюватися по прямій, що дозволяє розглядати цей процес з позицій геометричної акустики (відбивання, заломлення, фокусування). Крім того, оскільки густина потоку енергії пропорційна квадрату частоти, ультразвукові хвилі характеризуються великою енергією.

Характеристики інфразвукових коливань. Інфразвукові хвилі характеризуються високою інтенсивністю, здатністю поширюватися вздовж земної поверхні на великі відстані без втрат. У природі джерелами інфразвуку є рослини і дерева, що коливаються, мікросейсмічні коливання земної поверхні, землетруси, урагани, вулканічні виверження, шторми, грозові розряди, цунамі, водоспади, відриви льодовиків та айсбергів, припливи та відливи. В індустріалізованому суспільстві до джерел інфразвуку належать автомобільні, корабельні, авіаційні та ракетні двигуни, сільськогосподарські механізми. Биття серця, коливання легень, робота кишечника, вібрації голосових зв'язок – усе це супроводжується генерацією інфразвуку.

Інфразвукові коливання з рівнем інтенсивності < 120 дб вважаються помірними, більше — інтенсивними.

PAB09112.indd 48 26.11.2009 16:28:51