

Прилади
для вимірювання параметрів навколишнього середовища
(конспект лекцій)

Укладач к.т.н. доцент **Трасковський В.В.**

Лекція 1

Загальні характеристики об'єктів та методів вимірювання.

Навколишнє середовище (“environment”) – сукупність природних і змінених діяльністю людини абіотичних та біотичних факторів, що безпосередньо або опосередковано впливають на людину. Термін походить від французьких *environ* або *environner*, що означають навколо, кругом, оточувати, а разом утворюють словосполучення – довкілля.

Фактори та параметри навколишнього середовища.

Фактор – причина або рушійна сила будь – якого процесу, що відбувається у навколишньому середовищі.

Абіотичні фактори – компоненти та явища неживої, неорганічної природи, що впливають на живі організми:

а) фізичні (кліматичні): тиск; рух повітря, вітер; вологість; атмосферні опади; температура; сонячне випромінювання; іонізаційні випромінювання;

б) атмосферні: структура і склад атмосфери; фізичні й хімічні властивості атмосфери, здатні впливати на живі організми;

в) гідрографічні (фактори водного середовища): фізичні та хімічні властивості води як середовища мешкання живих організмів;

г) едафічні (грунтові): структура та склад ґрунтів, сукупність їхніх фізичних і хімічних властивостей, що справляють екологічний вплив на живі організми.

Біотичні фактори — сукупність впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших, а також неживе середовище.

Параметр — величина, що характеризує будь — яку властивість процесу або явища, що відбувається у довкіллі.

Забруднення — несприятлива зміна навколишнього середовища як цілковитий або частковий результат людської діяльності, що безпосередньо або опосередковано впливає на розподіл енергії та рівні радіації, фізико — хімічні властивості навколишнього середовища та умови існування живих істот.

Такі зміни впливають на людину безпосередньо або через сільськогосподарські ресурси, воду чи інші біологічні продукти та речовини.

Система спостережень, оцінки та контролю за станом природного середовища, що оточує людину, з метою розробки заходів щодо його охорони і запобігання критичним ситуаціям, а також прогнозування масштабів неминучих змін називається **моніторингом**. Основою та невід'ємною складовою такої системи є вимірювальні прилади (вимірювальне обладнання).

Загальні характеристики вимірювального обладнання.

Вимірювання параметра навколишнього середовища – це послідовність експериментальних та обчислювальних операцій, що здійснюються з метою знаходження значення параметра, що характеризує певний об'єкт або явище. Вимірювання передбачає кількісну оцінку параметра в стандартних одиницях, тобто порівняння параметра з рекомендованим стандартом для визначення їхньої рівності або ступеня різниці.

Вимірювання включає: об'єкт (явище), властивості або стан якого характеризує величина, що вимірюється;

одиницю цієї величини; технічні засоби, проградуйовані в обраних одиницях; метод вимірювання; спостерігача (системи реєстрації), що сприймає результат вимірювання; отримане значення величини, що вимірювалася та оцінку його відхилення від дійсного значення, тобто похибку вимірювання.

Вимірювання бувають **прямими**, якщо сигнал, що надходить на вимірювальний прилад від сектора, містить безпосередньо інформацію про параметр, який вимірюється, та **посередніми**, під час яких значення параметра знаходять за допомогою обчислень на основі відомих формул або залежностей між цим параметром та параметрами, які вимірюються безпосередньо.

Вимірювальний прилад – засіб вимірювань, що дає можливість безпосередньо відраховувати значення величини, що вимірюється. Залежно від того, яким шляхом вимірювальні прилади дають інформацію, вони діляться на **аналогові** та **цифрові**.

Аналоговий прилад отримує інформацію, яка постійно змінюється і відповідно аналогічно реєструється. Такий прилад містить: сенсор – функціональний елемент, що забезпечує зв'язок між приладом та параметром, що вимірюється; перетворювач сигналу, який трансформує

отриманий сенсором сигнал таким чином, щоб його можна було спостерігати, читати, реєструвати; аналоговий індикатор, що перетворює сигнал від перетворювача у форму, зручну для реєстрації оператором.

(Типові приклади).

Цифровий прилад подає інформацію у вигляді дискретних сигналів, хоча величина параметра змінюється безперервно. Ділянка змін величини параметра, що вимірюється ділиться на певну кількість рівних інтервалів. Кожен інтервал відповідає найменшій зміні параметра, яку здатний зареєструвати прилад. Такий прилад містить: сенсор; аналого – цифровий перетворювач, який перетворює отриманий сигнал у цифрову форму; цифровий дисплей для читання отриманої інформації.

Лекція 2.

Прилади для вимірювання параметрів абіотичних факторів навколишнього середовища.

Атмосферний тиск.

Атмосфера – це суміш газів, твердих та рідких частинок. У спрощеному вигляді – сухе повітря разом з водяною парою. Атмосферне повітря в діапазоні температур і тисків, що існують в природі, можна розглядати як

ідеальний газ, що описується рівнянням Клайперона – Менделєєва:

$$P_A V_A = (m_A / M_A) R T_A$$

де R – універсальна газова стала ($R = 8,314551 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$)

M_A - молярна маса газу ($M_A = 0,029 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ для сухого повітря,

$M_A = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ для водяної пари)

Середній атмосферний тиск на рівні моря становить $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Горизонтальний розподіл атмосферного тиску визначається рухом поверхневих мас повітря.

Прилади для вимірювання тиску.

Прилад для вимірювання тиску називають **манометром**. Манометри бувають **сифонного** або **чашечкового** типу. Манометр сифонного типу – це U-подібна скляна трубка, заповнена водою або ртуттю. Один з кінців манометра запаяний і позбавлений повітря; відкритий кінець сполучений з атмосферним повітрям. Різниця рівнів рідини у двох колінах трубки про- градуйована в одиницях тиску. Манометр чашечкового типу містить вертикальну

скляну трубку, запаяну зверху і заповнену рідиною. Нижній кінець трубки занурений у резервуар, що частково заповнений рідиною.

Тиск, що утворюється стовпчиком рідини у трубці, врівноважується атмосферним тиском. Висока точність вимірювання манометра чашечкового типу (0,1 мм. рт ст.) дає змогу використовувати його як стандартний прилад для перевірки анероїдних барометрів та висотомірів.

Ртутний барометр є класичним прикладом манометра чашечкового типу. Атмосферний тиск, що вимірюється ртутним барометром, дорівнює:

$$p = p_{\text{Hg}} gh(T_0)$$

де $h(T_0)$ – висота ртутного стовпчика за нормальної температури. Барометр містить скляну трубку, заповнену ртуттю і занурену у резервуар зі ртуттю. Рівень ртуті у резервуарі контролюється за допомогою конусоподібної кістки. Точність вимірювання тиску ртутного барометра становить 0,1 гПа.

Барометр – анероїд містить анероїдну капсулу, що складається з двох тонких (0,2 мм товщиною) металевих гофрованих мембран. З капсули повітря відкачено (тиск 10^{-3} гПа).

² гПа) або капсулу заповнюють інертним газом при тиску 65 гПа. Кількість капсул в сучасних приладах може сягати 14. Мембрани знаходяться у напруженому стані завдяки гофрованій поверхні та дії пружини.

Перевагою барометра-анероїда є його компактність, механічна міцність, можливість транспортування. Ці прилади можуть застосовуватися в системах автоматичного вимірювання тиску, оскільки механічні переміщення анероїдних капсул легко перетворити на електричний сигнал. Недоліком барометра – анероїда є менша порівняно з ртутним барометром точність вимірювань.

Барограф – прилад, що використовується для безперервної реєстрації тиску повітря. Він складається із стовпчика анероїдних коробок, з'єднаного зі стрілкою самописа.

Лекція 3.

Рух повітря.

Рух повітря відносно земної поверхні називається вітром. Утворення повітряних потоків відбувається завдяки дії таких чинників, як:

1. Градієнти тиску, що забезпечують рух повітря від зони високого тиску до зони низького.
2. Гравітаційна сила, що прискорює рух повітря до величини $d = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^2$.
3. Сила тертя, що визначається як:

$$F = -\mu V$$

де μ - коефіцієнт внутрішнього тертя, який залежить від характеру підстилаючої поверхні. V – швидкість вітру.

4. Сила Коріоліса, що відхиляє напрямок руху повітря (праворуч – в Північній півкулі, ліворуч – в Південній) визначається виразом:

$$F_k = 2\rho V\omega \sin \varphi$$

де ρ = густина повітря; V – швидкість руху повітря; ω - кутова швидкість обертання Землі ($7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$); φ - широта місцевості.

Параметри вітру.

Швидкість вітру вимірюється в $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. Оцінюється за допомогою шкали Бофорта.

Напрямок вітру визначається щодо сторін світу і позначається або в румбах (всього 16): північний, північно – східний тощо, або в поділках: одна поділка містить 5° або 10° залежно від необхідної точності вимірювань.

Поривчастість вітру – це стрибкоподібні підсилення і послаблення швидкості ΔV вітру ($\Delta V = \pm 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при $V = 5 \div 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\Delta V = \pm 5 \div 7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при $V = 11 \div 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$)

Прилади для вимірювання параметрів вітру.

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

Анемометр чашечкового типу складається з трьох – чотирьох напівсферичних чашок, що обертаються навколо осі, перпендикулярної напрямку вітру. Якщо C_1 та C_2 є коефіцієнтами зчеплення з повітрям увігнутої та опуклої поверхонь чашок відповідно, то сили, що діють на діаметрально протилежні чашки, визначаються за виразом:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot C_1 \rho S (V - V_t)^2 ,$$

$$F_o = \frac{1}{2} \cdot C_2 \rho S (V + V_t)^2 ,$$

де V – швидкість вітру, V_t – тангенціальна швидкість чашки, що обертається, ρ – густина повітря, S – площа поперечного перерізу чашки.

Обертальна швидкість системи, що знаходиться у рівновазі з повітряним потоком, передбачає рівність сил F_y та F_o , звідки:

$$C_1 (V - V_t)^2 = C_2 (V + V_t)^2.$$

Розв'язок останнього рівняння щодо V_t приводить до виразу:

$$V_t = V \frac{1 - \sqrt{C_1 C_2}}{C_1 - C_2}$$

Для перетворення механічних обертань у сигнал, що інформує про швидкість вітру, використовують електричні генератори, оптоелектричні або ємнісні перетворювачі. Перевагою чашечкових анемометрів є лінійна залежність швидкості V_t від швидкості вітру V за умови, що коефіцієнти зчеплення сталі (для анемометрів чашечкового типу ця умова виконується). Порогова чутливість чашечкового анемометра становить $90 \div 2,24$ м · с⁻¹. Анемометри цього типу прості і чутливі.

Анемометр пропелерного типу має три – чотирилопатевий пропелер, вісь якого показує напрямок вітру. Залежність швидкості обертання лопаті V_t від швидкості вітру має вигляд:

$$V_t = \frac{V}{k \tan \theta},$$

де θ – кут нахилу лопаті пропелера відносно осі обертання, k – коефіцієнт, що залежить від конструкції пропелера ($k \approx 1$). Якщо вибрати кут нахилу лопаті $\theta = 45^\circ$, то $\tan \theta = 1$ і тангенціальна швидкість руху лопаті приблизно дорівнює швидкості руху вітру. Гранична чутливість пропелерного анемометра становить $1,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; використовують ці прилади для вимірювання швидкості вітру до $90 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Перевагою анемометра пропелерного типу порівняно з чашечковим є його мала вага (пропелер може бути виготовлений з пластмаси), у три рази більша швидкість обертання і здатність вимірювань слабких повітряних потоків.

Трубка Піто має вигляд циліндра з двома отворами, один з яких спрямований у напрямку руху і призначений для вимірювання загального тиску (статистичного p і динамічного $pV/2$), а інший збоку, що дає змогу

вимірювати тільки статистичний тиск p . Різниця тисків, що вимірюються диференціальним манометром дорівнює:

$$\Delta p = \rho V^2 / 2,$$

де ρ – густина повітря, V – швидкість вітру.

Анемометри цього типу використовуються для вимірювань швидкостей вітру у межах $2 \div 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Звичайно ці анемометри застосовують переважно в метеорології, а не для вимірювання параметрів навколишнього середовища.

Термоанемометр ґрунтується на реєстрації впливу повітряного потоку на температуру нагрітого провідника або тіла. Принцип дії приладів цього типу описується законом Кінга: тепловий потік, яким обмінюється циліндр, нагрітий до температури, що перевищує температуру навколишнього повітря, з повітряним потоком що рухається зі швидкістю V , дорівнює:

$$Q = (\alpha + bV^{1/2}) \Delta T^n,$$

де ΔT – різниця температур циліндра та повітря, а α і β – константи, що залежать від розмірів циліндра, n – коефіцієнт, близький до одиниці.

Розглянемо провідник з опором R_1 , що перебуває при температурі T_1 навколишнього повітря. Внаслідок нагрівання провідника до температури T_2 опір провідника становить R_2 ; згідно з законом Джоуля – Ленца кількість теплоти, що виділяється провідником за одиницю часу дорівнює:

$$Q = R_2 I^2,$$

де I – електричний струм.

Поеднуючи ці вирази отримуємо:

$$R_2 I^2 = (\alpha + \beta V^{1/2})(T_2 - T_1).$$

На практиці частіше використовують рівняння, що враховує зміну опорів, а не температур, Дійсно, використовуючи співвідношення:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2 + \dots],$$

де α і β – температурні коефіцієнти опору, і нехтуючи членами другого порядку, отримуємо:

$$R_2 I^2 \equiv (\alpha' + \beta' V^{1/2})(R_2 - R_1),$$

де α' і β' – нові константи.

Анемометри цього типу чутливі до зміни як швидкості вітру, так і температури.

Ультразвуковий анемометр використовує той факт, що звук (ультразвук) поширюється швидше у напрямку, в якому діє вітер. Звичайно 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. Передавач посилює безперервні або імпульсні ультразвукові хвилі. Залежно від напрямків поширення вітру з ультразвуковою хвилею час проходження хвилею відстані d між передавачем та приймачем визначається так:

$$t_1 = d / (V_{yz} + V_i); \quad t_2 = d / (V_{yz} - V_i),$$

де V_{yz} - швидкість поширення ультразвукової хвилі, V_i – швидкість поширення проекції вектора вітру на вісь i .

Різниця в часі проходження відстані d між передавачем та приймачем двома ультразвуковими хвилями становить:

$$\Delta t = 2dV_i / (V_{yz}^2 - V_i^2) \approx 2dV_i / V_{yz}^2.$$

Величина швидкості вітру, які вимірюють ультразвукові анемометри, сягає 30 м с-1. 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.

Допплерівський анемометр діє на основі ефекту Допплера: при опромінюванні об'єкта що рухається зі швидкістю V , ультразвуковою хвилею певної довжини Λ відбувається розсіювання хвилі, причому частота (довжина) розсіяної ультразвукової хвилі залежить від швидкості руху об'єкта. Допплерівський зсув $\Delta\Omega$ частоти ультразвукової

Хвилі, розсіяні під кутом θ об'єктом, що рухається зі швидкістю V , описується виразом:

$$\Delta\Omega = \frac{4\pi V}{\Lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi,$$

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

Для визначення напрямку вітру використовують флюгери, що мають вигляд металевої пластини прямокутної

форми, яка обертається навколо вертикальної осі. Передача інформації про напрямок вітру в сучасних приладах здійснюється за допомогою потенціометра (Рис.), зміна положення реохорда в якому спричиняє відповідну зміну електричного струму, що проходить через статор приймальної системи, викликаючи обертання ротору цієї системи та стрілки індикатора. Точність визначення напрямку вітру потенціометричною системою становить $\pm 3\%$. Збільшити точність можна, використавши сельсинову систему (Рис). Обертання ротору сельсин-давача зумовлює появу електрорушійної сили, пропорційної синусу кута обертання, що приводить до появи електричного струму в статорі сельсин-приймача, відповідного магнітного поля, яке змушує обертатися ротор приймача, сполученого з індикатором.

Для одночасного вимірювання швидкості і напрямку руху використовують анеморумбометр. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється в послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.

За нормами міжнародної метеорологічної організації, прилади, призначені для вимірювання напрямку вітру,

повинні визначати напрямок вітру в інтервалі швидкостей $0,5 \div 50 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ з роздільною здатністю $\pm 2^0 \div \pm 5^0$.

Вологість

Вологість – це наявність водяної пари в повітрі або порах ґрунту.

Параметри вологості:

Абсолютна вологість повітря – кількість водяної пари у гр., що знаходиться в 1 м^3 повітря ($\text{гр.} \times \text{м}^{-3}$).

Пружність водяної пари (парціальний тиск) – тиск, який матиме водяна пара, що знаходиться в газовій суміші, якщо б вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій самій температурі.

Максимальна пружність водяної пари E – граничне значення тиску, що відповідає рівновазі між паром та водою, тобто насиченому стану пари.

Відносна вологість повітря r – відношення пружності водяної пари e до максимальної пружності E при даній температурі:

$$r = \frac{e}{E} \times 100\% .$$

Дефіцит вологості d – різниця між максимальною пружністю E і фактичною пружністю e при даній температурі:

$$d = E - e.$$

Точка роси t_d - температура, при якій повітря, якщо його охолодити при сталому тиску, спадає насиченим водяною парою.

Масова частка вологості – дорівнює відношенню маси водяної пари до маси вологого повітря.

Масове відношення вологості – це відношення маси m_g вологості повітря до маси m_a сухого повітря.

Прилади для вимірювання вологості повітря

Аспіраційний психрометр. Прилад містить два термометри – сухий і зволожений; ціна поділки становить 0,2 °С. Термометри розташовані у металевих трубках, з'єднаних далі в одну (Рис.). Резервуар одного з термометрів обмотаний батистом, що зволожується. При вимірюванні вологості психрометр встановлюють горизонтально і обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора. З поверхні резервуару зволоженого термометра за допомогою вентилятора. З поверхні резервуару зволоженого термометра випаровується вода, що залежить від вологості навколишнього повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна оцінити парціальний тиск e за психрометричною формулою:

$$e = E_1 - A(t_c - t_{зм})p_A,$$

де E_1 – максимальна пружність водяної пари, що відповідає температурі зволоженого термометра; $A=6,62 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ – психрометричний коефіцієнт (для швидкості вітру 3 м/с); t_c – температура сухого термометра; $t_{зм}$ – температура зволоженого термометра; p_A – атмосферний тиск (в мм рт. ст. або паскалях). Максимальну пружність водяної пари E ,

яка відповідає температурі сухого термометра, визначають у мм рт. ст. або паскалях за таблицею.

Недоліком аспіраційного психрометра є те, що вентилятор захоплює повітря тільки на відстані кількох сантиметрів, що не дає змоги точно визначити вологість у певних ділянках. Крім того, величина психрометричного коефіцієнта A залежить від швидкості вентиляції, температури та типу психрометра. Величина $A=6,62 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ достовірна для швидкостей вентиляції, що перевищують $3 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$. залежність величини A від швидкості вентиляції наведено в табл.

Таблиця: Залежність величини психрометричного коефіцієнта A від швидкості вентиляції

Психрометричний коефіцієнт $A \times 10^{-4}, \text{K}^{-1}$	Швидкість вентиляції, $\text{м} \times \text{с}^{-1}$
13,0	0,12
9,0	0,50
7,8	1,00
7,1	2,00

6,7	4,00
-----	------

Волосяний гігрометр. Дія приладу ґрунтується на здатності знежиреної волосини змінювати свою довжину зі зміною вологості (рис.). Водяна пара здатна конденсуватися в капілярних порах людської волосини. Збільшення вологості призводить до зменшення угнутої менісків води в порах, завдяки чому волосина видовжується. Видовження волосини відбувається пропорційно логарифму відносної вологості. Схеми типових конструкцій волосяних гігрометрів наведено на рис.

Пучок таких волосин використовують в *гігрографі* – приладі для безперервного запису відносної вологості повітря (рис.). Інші матеріали, що можуть бути застосовані як сенсори в гігрометрах – нейлон, бавовна, кишкова мембрана корови або свині. Перевагою волосяних гігрометрів є незалежність результатів вимірювань від температури – при зміні температури від -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$ величина похибки вимірювань знаходиться в інтервалі $1 \div 3\%$; кишкова мембрана демонструє найбільшу чутливість до зміни вологості. Волосяні гігрометри мають просту конструкцію та невисоку ціну. Недоліком волосяних гігрометрів є збільшення часового проміжку до реакції

залежно від температури. З табл. Видно, що зниження температури призводить до значного збільшення відгуку.

Ще одним недоліком гігрометрів є явище гістерезису – якщо гігрометр зберігають протягом кількох днів у сухому приміщенні, результати вимірювання вологості можуть значно (до 15%) відрізнятися від тих, що отримані за допомогою гігрометра, який тримали в вологому приміщенні. Через це гігрометри такого типу потребують постійного калібрування.

Таблиця: Вплив температури на часовий відгук (в секундах) різних гігрометрів

Тип сенсора	20 °C	10 °C	0 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C
Звичайна волосина	30	40	55	175	400	800
Ламінована волосина	10	10	12	15	20	30
Кишкова мембрана	6	10	20	50	100	200

Ємнісний гігрометр. Основу приладу становить гігроскопічна полімерна плівка, з обох боків якої розташовані пористі металеві електроди. (рис. а), що

утворюють конденсатор ємністю близько 500 пФ. За поглинання плівкою молекул води об'єм плівки збільшується, відстань між електродами також збільшується, що приводить до зміни ємності конденсатора. Зовнішній вигляд ємнісного гігрометра зображено на рис. б. Ємнісний гігрометр застосовується для вимірювання відносної вологості. Перевагою приладу є його компактність (розміри приладу становлять 6 мм²), слабка залежність результатів вимірювання від зовнішньої температури, лінійність шкали в інтервалі 0÷80% відносної вологості, швидкодія, малі значення гістерезису. Недоліком приладу є вплив зовнішніх забруднень на результати вимірювань. Гігрометри цього типу використовують в засобах автоматизованого контролю вологості повітря.

Конденсаційний гігрометр. Один із методів оцінки абсолютної вологості ґрунтується на вимірюванні точки роси. Якщо пласку гладеньку поверхню охолоджувати, можна спостерігати конденсацію вологи на ній. Температура поверхні в цей момент дуже близька до тієї, при якій повітря стає насиченою водяною парою, тобто до точки роси. Залишається тільки точно виміряти цю температуру. На рис. видно, що конденсаційний гігрометр складається з маленького дзеркала, на яке нанесено тонкий

антикорозійний шар золота. Дзеркало охолоджується напівпровідниковим елементом, що працює на основі ефекту Пельтьє, і опромінюється фотодіодом. Коли поверхня дзеркала вкривається росю, вона починає розсіювати оптичне випромінювання; вертикальна компонента розсіяного випромінювання реєструється фотодетектором, електричний сигнал з виходу якого підсилюється й подається на систему підігрівання дзеркала. Нагріте дзеркало знову може бути охолоджене, і процес вимірювань триває. Визначення температури дзеркала за допомогою термодетектора дає змогу оцінити абсолютну вологість повітря. Перевагою приладу є його висока чутливість, можливість вимірювання абсолютної вологості в широкому інтервалі температур ($-80 \div +100^{\circ}\text{C}$) з точністю близько 1°C . Недоліком приладу є спотворення результатів вимірювання при низьких температурах, необхідність контролювання якості поверхні дзеркала, складність конструкції, висока ціна.

Сорбційний гігрометр. В основу дії приладу покладено залежність електропровідності волого сорбуючої плівки від вологості середовища. Для цього використовується *LiCl*.

Вимірювання вологості ґрунту

При вимірюванні вологості ґрунту основними параметрами є:

Вологість щодо сухої маси – це відношення маси води до сухої маси:

$$q_m = \frac{m_b}{m_c} = \frac{P_b b S}{P_c c S} = \frac{P_b b}{P_c c},$$

де - P_b і P_c - густина води і сухого ґрунту ; b – товщина шару ґрунтового розчину; c – товщина шару твердих часток.

Прилади для вимірювання вологості ґрунту

Гравіметричний метод ґрунтується на визначенні маси води та маси сухого ґрунту. Зразок ґрунту нагрівають до 105 °С до отримання сталої ваги; процес триває 10÷12 год. Вологість ґрунту визначають як відношення маси втраченої води до маси сухого ґрунту. Якщо потрібно оцінити об'ємну вологість, останнє відношення множать на відношення об'ємної густини ґрунту до густини води. Перевагою методу є можливість брати зразки безпосередньо з ґрунту за допомогою бура, простота процесу обчислень, невисока вартість обладнання. До недоліків слід віднести

складність визначення води в ґрунті з неоднорідним профілем, потреба у багатьох зразках при дослідженнях залежності вмісту води від часу та простору, довго тривалість методу.

Нейтронний метод використовує оцінку послаблення потоку швидких нейтронів атомами водню, що містяться в ґрунтовій воді. Металевий зонд діаметром близько 40 мм, що містить джерело швидких нейтронів (суміш радону та берилію, 2÷5 мКі або суміш ^{241}Am та берилію, 100 мКі) і детектор повільних нейтронів, занурюють у ґрунт (рис.). Швидкі (4,5÷5,0 MeV або 1÷12 MeV) поширюються радіально у ґрунті. Внаслідок пружних зіткнень з ядрами речовини ґрунту вони втрачають свою кінетичну енергію; рівень послаблення швидких нейтронів пропорційний кількості атомів водню, істотним джерелом яких є ґрунтова вода. Повільні нейтрони (0,025 eV) оточують зонд, деякі з них потрапляють на детектор. Сигнал з виходу детектора через кабель подається на систему реєстрації. Переваги методу – можливість оцінки води в великих ґрунтових об'ємах, можливість оцінки об'ємної вологості ґрунту, швидкість, здатність вимірювати вологість ґрунту протягом тривалого періоду часу. Недоліками є необхідність роботи з радіоактивними джерелами, потреба у калібруванні

приладу, висока вартість обладнання, неточність вимірювань поблизу ґрунтової поверхні.

Вимірювання поглинання гамма-випромінювання.

Метод передбачає визначення вологості ґрунту у шарах товщиною 1÷2 см. Принцип методу полягає в оцінці залежності рівня поглинання гамма-випромінювання від вмісту ґрунтової води за умови постійності густини ґрунту. Як джерело гамма-випромінювання використовують ^{137}Cs (25 мКі). Потік випромінювання діаметром близько 4,8 мм формується коліматором. Об'ємну вологість ґрунту визначають за виразом:

$$\theta_v = \ln(N_d / N_g) / md ,$$

де N_d - швидкість обчислення гамма-випромінювання, що утворюється джерелом, N_g - швидкість обчислення гамма випромінювання, що проходить через ґрунт, m – коефіцієнт послаблення гамма-випромінювання водою, d – товщина зразка.

Метод реєстрації поглинання гамма-випромінювання має ті самі переваги та недоліки, що й нейтронний метод. Додатковою перевагою є можливість вимірювань на незначних горизонтальних та вертикальних відстанях; до додаткових недоліків можна віднести вплив неоднорідності ґрунтової густини та вмісту води на роздільну здатність

методу, необхідність збігання двох отворів – від джерела та детектора, висока ціна та трудомісткість процесу вимірювань.

Діелектричний метод ґрунтується на вимірюванні частотної залежності комплексної діелектричної проникності ґрунту $\varepsilon(\omega)$.

Діелектрична проникність речовини характеризує поляризацію діелектриків під впливом зовнішнього електричного поля; вона показує, у скільки разів сила взаємодії між зарядами у вакуумі перевищує силу взаємодії між тими ж зарядами в даному середовищі. Через екранізацію вільних зарядів зв'язаними, що утворюються внаслідок поляризації середовища, виникає ослаблення взаємодії зарядів. Діелектрична проникність води є майже сталою величиною (близько 80), тоді як діелектрична провідність ґрунту дуже чутлива до об'ємної вологості ґрунту. Наприклад, зміні вмісту води у ґрунті від 20% до 21,8% відповідає зміна діелектричної проникності ґрунту від 3 до 5.

На практиці вимірювання діелектричної проникності ґрунту здійснюють за допомогою кількох підходів:

- 1) визначення опору між двома електродами, розміщеними у ґрунті. Сенсор такого типу компактний, але

проблема полягає в тому що опір ґрунту істотно залежить від концентрації іонів в ґрунті, через що процес вимірювань потребує калібрування;

2) вимірювання ємності конденсатора, який утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками (рис.). Цей метод характеризується невисокою вартістю, швидкодією, він може бути застосований в автоматизованих системах вимірювання вологості ґрунту. Недоліком методу є необхідність калібрування.

Діелектричні методи характеризуються здатністю давати абсолютні величини вмісту води у ґрунті, вони можуть постачати інформацією з будь-якої глибини ґрунту з високою точністю.

Квантові детектори. Ці сенсори ґрунтуються на поглинанні енергії фотона, звільненні електронів та утворенні електричного струму. Кінцевим параметром, що реєструється, може бути напруга, зміна швидкості посилення електронів або провідність сенсора. Залежно від цього радіометри з квантовими детекторами поділяють на **фотогальванічні детектори**, в яких реєструється напруга, що виникає на фотоелементі під впливом зовнішнього випромінювання; **фотовипромінювальні детектори**, принцип дії яких полягає в перетворенні енергії оптичного випромінювання в електричну за зовнішнього (фотоелектронні помножувачі) або внутрішнього (фотодіоди) фотоефекту; **фотопровідні детектори**, які використовують аналіз залежності електропровідності матеріалу детектора від потоку випромінювання, що потрапляє на цей матеріал.

Вимірювання прямого сонячного випромінювання.

Для вимірювання прямого сонячного випромінювання використовують піргеліометр, поверхня детектора якого орієнтована перпендикулярно до потоку випромінювання. Прилад складається з металевого циліндра, на дні якого

встановленого детектор (калориметр), системи діафрагм для потрапляння на детектор лише прямого сонячного випромінювання та металевих заслінок. Калориметр обладнаний ванною, по якій циркулює рідина. Вимірювання температури рідини на вході та виході ванни дає змогу оцінити швидкість теплового потоку і, таким чином, поглинуту сонячну енергію. Піргеліометри такого типу використовують як первинні стандарти для вимірювання сонячного випромінювання, оскільки вони мають високу стабільність і відтворюваність результатів; точність вимірювань може досягти $\pm 0,2\%$. Модифікації приладів передбачають застосування термопар або термобатарей як детекторів. Точність цих приладів становить $\pm 0,4 \div 0,5\%$, що зумовлює їх застосування як піргеліометрів першого або другого класів. Витримування часових інтервалів під час користування металевими заслінками, що регулюють рівень опромінювання детектора, з відповідним відліком температури є дуже непростю операцією, яка разом з процедурою калібрування приладу ускладнює технологію випромінювань.

Вимірювання сумарного випромінювання

Для вимірювання сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню з цілої півсфери в межах кута 2π sr, використовують піранометри. Розрізняють два типи таких приладів – з реєстрацією вертикальної теплової різниці між поверхнею детектора та його оточенням або горизонтальної теплової різниці між чорною та білою поверхнями елементів детектора, розміщених в одній площині.

Основним елементом детектора є сукупність термопар “манганін – константан”, з’єднаних у батарею Z- подібного типу. Під впливом оптичного випромінювання на кінцях термобатареї виникає електрорушійна сила, що реєструється. Прилад обладнано двома скляними або кварцовими півсферами для запобігання впливу конвекції (що влітку, при температурі 75°C , може бути істотною), а також для фільтрації випромінювання. Піранометри другого типу містять зіркоподібний детектор, чутливими елементами якого є пофарбовані у чорний та білий колір термопари. Чорні поверхні поглинають сонячне випромінювання більш інтенсивно, ніж білі. Контроль теплообміну між чорними та білими секторами детектора дає змогу оцінити сонячне випромінювання. Прилади

обладнано системою температурної стабілізації, оптичної компенсації зміни показань при відхиленнях відгуку від закону косинуса, набором широкосмугових спектральних фільтрів. Залежно від чутливості піранометри поділяють на класи: перший ($\pm 0,1\%$); другий ($\pm 0,5\%$) та третій ($\pm 1,0\%$). Слід зазначити, що величина електрорушійної сили, індукованої сонячним випромінюванням на кінцях термопар, досягає 10 мВ. Для вимірювання таких величин потрібні чутливі інструменти – електронні потенціометри. Крім того, піранометри слід встановлювати на відкритих місцях або платформах. Перевагою термоелектричних приймачів є їх здатність давати відліки в будь – якій ділянці спектра з постійною чутливістю. Прилади характеризуються високою лінійністю і дають відлік в абсолютних одиницях. До недоліків відносять невисоку чутливість і велику інерційність. Прилади потребують також частого контролю чистоти поверхні півсфер та якості осушувальної рідини між ними.

Вимірювання сумарного випромінювання можна здійснювати піранометрами, що містять квантові детектори. Класичним прикладом такого детектора є **кремнієвий фотодіод**. Принцип дії цього детектора полягає в

перетворенні енергії оптичного вимірювання в електричну завдяки внутрішньому фотоефекту. Перевагами фотодіодів є невисока вартість, стабільність показників та їх слабка залежність від температури. Точність вимірювань піранометрів з квантовими детекторами - $\pm 5\%$.

Вимірювання дифузного сонячного випромінювання.

Вимірювання дифузного сонячного випромінювання реалізується за допомогою рухомих дисків або циліндрів, здатних утворити тінь на детекторі піранометра. Ці захисні системи мають рухатися навколо осі, перпендикулярної земній поверхні, для врахування обертання Сонця.

Вимірювання альбедо

Альбедо є часткою сумарного випромінювання, що відбивається природною поверхнею. Для вимірювання альбедо необхідно два піранометри – один спрямований догори і вимірює сумарне випромінювання, тоді як інший

спрямований до земної поверхні для вимірювання відбитого випромінювання. Конструктивно обидва піранометри можуть бути об'єднані на одній механічній оправі. Така система називається альбедометром (або балансометром). Детектор цього приладу містить термобатарей. Для запобігання впливу роси й вітру детектор обдувають повітряним потоком за допомогою вентилятора. Звичайно альбедометри розміщують на висоті 1÷2 м над земною поверхнею.

Іонізаційні випромінювання класифікуються:

Іонізуюче випромінювання – це потоки частинок і електромагнітних квантів, взаємодія яких з середовищем зумовлює іонізацію його атомів і молекул. Іонізуюче випромінювання має достатньо енергії для віддалення електронів з орбіт, внаслідок чого атом набуває заряду і стає іонізованим. До іонізуючого випромінювання можна віднести потоки α – частинок, електронів, позитронів, протонів, нейтронів, рентгенівське та γ – випромінювання, космічні промені.

α – частинки – це ядра гелію ${}^4\text{He}$, що містять 2 протони і 2 нейтрони;

β – частинки – електрони й позитрони, що посиляються атомними ядрами під час бета-розпаду;

рентгенівське випромінювання – електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між γ - та ультрафіолетовим випромінюванням у межах довжин хвиль $10^{-14} \div 10^{-7}$ м;

γ – випромінювання – короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі, меншою ніж $2 \cdot 10^{-10}$ м;

космічні промені – потік елементарних частинок високої енергії, переважно протонів, що надходять на Землю ізотропно з усіх напрямків космічного простору, а також вторинне випромінювання, що утворюється за взаємодії протонів з атомними ядрами повітря.

Енергія іонізуючих випромінювань

Тип випромінювання	Частота Гц	Енергія, моль ⁻¹	кДж·
частинки			
α - частинки		$4,1 \cdot 10^8$	
β - частинки		$1,5 \cdot 10^7$	
Електромагнітне випромінювання			

Рентгенівське випромінювання	$3 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^5$
γ - випромінювання	$3 \cdot 10^{20}$	$1,2 \cdot 10^8$
Космічні промені	$6 \cdot 10^{21}$	$2,4 \cdot 10^9$

Дозиметрія іонізуючих випромінювань

Вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань під час їх взаємодії з середовищем, від яких залежать радіаційні ефекти в об'єктах живої та неживої природи, що опромінюються, становить суть дозиметрії.

Доза – це енергія іонізуючого випромінювання, яка поглинається речовиною, що опромінюється. Доза залежить від типу випромінювання, його інтенсивності, тривалості опромінювання та складу речовини, що опромінюється. Розрізняють такі дози:

Поглинута доза – це розрахована на одиницю маси речовини, що опромінюється, поглинута енергія випромінювання:

$$D_n = \frac{dE}{dm},$$

де dE – середня поглинута енергія, dm – маса речовини.

Одиниці поглинутої дози: $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$; $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$. (термін “рад” походить від англійської фрази “Radiation Adsorbed Dose”

Приріст поглинутої дози за одиницю часу називають потужністю поглинутої дози:

$$P_n = \frac{dD_n}{dt} .$$

Одиниця вимірювання поглинутої дози - $\text{Гр} \cdot \text{с}^{-1}$, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$.

Експозиційна доза визначається як відношення сумарного заряду всіх іонів одного знака, утворених у повітрі вторинними частинками (електронами й позитронами, що утворюються в елементарному об’ємі під час їх повного гальмування) до маси повітря в цьому об’ємі :

$$X = \frac{dQ}{dm} ,$$

де dQ – сумарний заряд всіх іонів одного знака, dm – маса повітря.

Одиниці експозиційної дози: $1 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$; позасистемна одиниця – рентген: $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$ або $1 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$. Доза в 1 Р відповідає утворенню $2,08 \cdot 10^{-4}$ пар іонів в 1 см^3 повітря при 0° С та 760 мм рт. ст.

Приріст експозиційної дози за одиницю часу називають потужністю експозиційної дози:

$$P_e = \frac{dD_e}{dt},$$

Одиниця випромінювання потужності експозиційної дози – $\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Еквівалентна доза – це поглинута енергія випромінювання, біологічно еквівалентна одному рентгену. Під час опромінювання живих організмів, зокрема людини, можуть виникати несприятливі наслідки, що визначають рівень радіаційної безпеки. Біологічні ефекти залежать не тільки від дози, а й типу іонізуючого випромінювання. Наприклад, при однаковій дозі α - частинки призводять до біологічних руйнувань в десятки разів менших, ніж при дії

рентгенівського випромінювання. Таким чином знання поглинутої дози недостатньо для оцінки радіаційно – індукованого ефекту. Біологічні ефекти зумовлені, зумовлені будь – яким іонізаційним випромінюванням, прийнято порівнювати з біологічними ефектами, що виникають під впливом рентгенівського випромінювання з граничною енергією 250 кеВ. Це порівняння здійснюється за допомогою коефіцієнта якості випромінювання k , що визначається як кількість рад рентгенівського або γ – випромінювання і викликає такі самі біологічні пошкодження, як і 1 рад даного іонізуючого випромінювання. Для рентгенівського і γ – випромінювання $k= 1,0$, α -частинок – 20, β – частинок і електронів – 1,0, нейтронів – 10, важких іонів – 20.

Одиниці еквівалентної дози – зіверт: $1\text{Зв} = 1\text{ Дж/ кг}$; $1\text{Зв} = 100\text{ бер}$ Добуток поглинутої дози в радах на величину k , а саме $D(\text{рем}) = D(\text{рад}) \cdot k$ отримав назву рем від англійської фрази “Radiation Equivalent in Man”.

Вимірювання іонізуючих випромінювань

Основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань ґрунтуються на: збиранні і реєстрації електронів та іонів, що вивільнюються в процесі іонізації; обстеженні флуоресценції речовини, що поглинає іонізуюче випромінювання; використанні та аналізі хімічних реакцій, що викликаються іонізуючим випромінювання; вимірюванні тепла, яке утворюється за поглинання іонізуючого випромінювання. Серед параметрів іонізуючого випромінювання, що реєструються, слід виділити тип випромінювання, енергію квантів або частинок, величину потоку або швидкості зміни потоку квантів або частинок, часовий або просторовий розподіл іонізуючого випромінювання. Розглянемо основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань.

Заповнені газом детектори. В основі роботи детекторів цього типу лежить прикладання напруги до просторово розділених електродів, розташованих у камері, заповненій слабо іонізуючим газом. Позитивні іони та електрони, що утворюються в камері, збираються на електродах і спричиняють появу електричного струму або імпульсів. Кількість пар “ іон – електрон” прямо

пропорційна енергії випромінювання. Серед основних типів заповнених газом детекторів можна виділити іонізаційну камеру, пропорційні лічильники та лічильник Гейгера – Мюллера. Різниця між цими детекторами залежить від іонів, що збираються на електродах, від прикладеної напруги. Ця напруга викликає конкуренцію між втратою іонних пар за рекомбінації та їх збиранням на електродах. Збільшення напруги приводить до збільшення швидкості руху іонів, зменшення часу, потрібного на рекомбінацію, через що заряд на електродах є пропорційним кількості іонних пар, що утворюються в міжелектродному просторі. За цим принципом працює іонізаційна камера. Подальше збільшення напруги супроводжується тим, що електрони, які утворюються за первинних іонізаційних процесів, беруть участь у додатковій іонізації. Заряд на електродах у даній ситуації прямо пропорційний прикладеній напрузі. Використання цієї залежності лежить в основі пропорційного лічильника. Подальше збільшення напруги дає змогу отримати ситуацію, коли заряд на електродах не залежить від прикладеної до них напруги. Ця ситуація реалізується в лічильниках Гейгера – Мюллера.

Іонізаційна камера – детектор, дія якого ґрунтується на здатності заряджених частинок викликати іонізацію газу. Принциповою перевагою детектора цього типу є можливість отримання безпосередньої інформації щодо експозиційної або поглинутої дози. Справді, оскільки рентген є одиницею експозиційної дози і відповідає кількості зарядів, що утворюється іонізуючим випромінюванням в 1 см^3 повітря за нормальних умов, саме іонізаційна камера дає змогу оцінювати іонізуюче випромінювання в одиницях. Утворення кожної іонної пари супроводжується втратою енергії близько 34 еВ ($1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$). Якщо припустити, що іонізуючі частинки проходять через камеру зі швидкістю $N \text{ (с}^{-1}\text{)}$ і кожна з них втрачає енергію $E \text{ (МеВ)}$, то величину заряду, що збирається на електродах за одиницю часу, можна визначити за виразом:

$$Q(\text{Кл} \cdot \text{с}^{-1}) = NEe \cdot 10^6/34.$$

Прикладання напруги величиною кількесот вольт дає можливість збирати на електродах всі електрони й позитивні іони.

Пропорційний лічильник утворює сигнал, амплітуда якого пропорційна енергії, що виділяється в його об'ємі частиною, що реєструється. Конструкція детектора передбачає наявність центрального електрода, до якого прямують електрони, що вивільняються завдяки іонізації. Напруженість поля E , що утворюється на відстані r від електрода, дорівнює:

$$E = U / [r \ln (d_1/d_2)],$$

де U – прикладена напруга (В), d_1 – діаметр лічильника, d_2 – діаметр центрального електрода.

Поблизу електрода напруженість електричного поля настільки велика, що первинні електрони набувають енергії, достатньої для вторинної іонізації. Внаслідок цього на центральний електрод надходить лавина електронів. Відношення повної кількості зібраних на електроді електронів до їх первинної кількості називають коефіцієнтом газового підсилення; величина його може сягати $10^2 \div 10^4$.

Лічильник Гейгера – Мюллера - газорозрядний детектор, що працює при проходженні через нього

заряджених частинок. До електродів прикладають напругу величиною кількисот вольт. За проходження іонізуючі частинки в газі утворюють вільні електрони, що рухаються до центрального електрода. Поблизу електрода напруженість електричного поля збільшується, електрони прискорюються наскільки, що починають у свою чергу іонізувати газ. Виникає коронний розряд, що поширюється вздовж електрода. В зовнішньому ланцюзі утворюються електричні імпульси, що відповідають спалахам розряду. Кількість цих імпульсів за одиницю часу дорівнює кількості іонізуючих частинок.

Сцинтиляційний лічильник — детектор, основними елементами якого є речовина, що люмінесціює під впливом заряджених частинок, та фотоелектронний помножувач. Заряджена частинка проходить крізь речовину, викликаючи не лише іонізацію атомів і молекул, а й їх збудження. Перехід атомів і молекул із збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням кванта видимого або ультрафіолетового діапазону. Кожний такий світловий спалах, що називають сцинтиляцією, реєструється фотоелектронним помножувачем, електричні імпульси з

виходу якого подаються на систему реєстрації. Типовими матеріалами для сцинтиляційних лічильників є кристали $\text{ZnS}(\text{Ag})$, $\text{NaI}(\text{Tl})$, $\text{CsI}(\text{Tl})$ (у дужках указано активатор, що викликає сцинтиляції в кристалі), кадмієві та кальцієві солі вольфрамової кислоти, галіди літію, а також органічні сцинтилятори – антрацен $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$, стильбен $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$, розчини толуену, ксілену, фенілциклогексану. Перевагою такого лічильника є висока чутливість (через високу густину робочої речовини), особливо до γ -випромінювання, швидкодія та здатність визначати енергію частинки або кванта випромінювання.

Напівпровідниковий лічильник – в основі лежить іонізація атомів твердого тіла, за якої утворюються вільні електрони в зоні провідності і дірки у валентній зоні. Частинка, що проникає в кристал, генерує в ньому додаткові електронно – діркові пари. Носії заряду (електрони і дірки) під впливом прикладеного електричного поля переміщуються до електродів, завдяки чому в електричному ланцюзі утворюється електричний імпульс, який підсилюється і реєструється. Ширина забороненої зони – $2 \div 3 \text{eV}$ ($1 \text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$); отже і енергія, необхідна для утворення пари електрон-дірка, є величиною такого ж

порядку (в газових іонізаційних камерах для утворення пари іонів потрібна енергія 34 еВ (для повітря). Таким чином, напівпровідникові лічильники на порядок чутливіші, ніж газові. Типовими матеріалами напівпровідникових лічильників є германій, кремній, CdTe, Hgl.

Термолюмінесцентні детектори використовують процес люмінесценції при нагріванні речовини, що попередньо збуджується випромінюванням. Під час нагрівання речовини електрони, що захоплюються уловлювачами, вивільнюються і переходять на рівні з меншою енергією, посилаючи квант світла. Складаються термолюмінесцентні детектори з камери, зв'язаної з системою нагрівання, фотоелектронним помножувачем, підсилювачем та термопарою для вимірювання температури.

Трекові детектори – в основі роботи лежить іонізація атомів або молекул речовини; іони, що утворюються, реєструються завдяки конденсації пересиченої пари (камера Вільсона), пароутворенню перегрітої рідини (бульбашкова камера), утворенню розрядів у газах (іскрова камера).

Фотографічне детектування ґрунтується на використанні плівок, в яких шар емульсії (бромисте срібло на желатиновій основі) має в десятки разів більшу товщину, ніж у звичайних фотоплівках, що підвищує ефективність взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Механізм цієї взаємодії полягає в поглинанні іонізуючого випромінювання речовиною за фотоелектричного процесу, завдяки якому енергія випромінювання передається електрону. Цей електрон іонізації утворює інші вільні електрони, що взаємодіють з позитивними іонами срібла і змінюють їх розподіл на плівці. Рівень потемніння плівки оцінюється за допомогою денситометра за виразом:

$$D = \lg(I_0/I),$$

де D – густина срібла на плівці, I_0 – інтенсивність випромінювання, що падає на плівку, I – інтенсивність випромінювання, що пройшло через плівку. Величина $D = 2$ відповідає затемненій плівці, через плівку з $D = 1$ можна читати текст.

Принципи γ – спектроскопії

Оскільки γ – випромінювання – це електромагнітне випромінювання з дуже короткими ($< 2 \cdot 10^{-10}$ м) хвилями, на перший план виступають корпускулярні властивості. Розглянемо основні процеси, що відбуваються під час взаємодії γ – випромінювання з речовиною.

Фотоелектричне поглинання супроводжується перенесенням всієї енергії γ – випромінювання на внутрішні електронні орбіти атома, внаслідок чого електрон залишає атом, а γ – випромінювання зникає. Але вакантне місце на внутрішній орбіті займає електрон із зовнішньої орбіти; цьому переходу відповідає вивільнення певної енергії у вигляді кванта рентгенівського випромінювання. Цей квант називається характеристичним, оскільки він характеризує речовину, що поглинає γ – випромінювання. Фотоелектричний ефект відбувається при дії зовсім малих (десятки кеВ) енергій.

Комптонівський ефект полягає в пружному розсіюванні квантів рентгенівського або γ – випромінювання на вільних або зовнішніх, слабо пов'язаних з атомом електронах. У цьому разі квант передає частину своєї енергії електрону і змінює напрямок руху, тобто

розсіюється; зменшення енергії означає збільшення довжини хвилі розсіяного випромінювання. Сумісне рішення рівнянь, що виражають закони збереження енергії та імпульсу під час комптонівського ефекту, дають рівняння для зсуву довжини хвилі (формула Компотна):

$$\Delta\lambda=\lambda_p-\lambda=\lambda_o(1-\cos\theta),$$

де λ_p – довжина розсіяного випромінювання, λ – довжина падаючого випромінювання, $\lambda_o=h/m_0c$ - комптонівська довжина хвилі електрона, m_0 - маса спокою електрона, θ – кут розсіювання.

Утворення пар – процес, що відбувається за достатньо високих рівнів енергії, при яких γ – квант поглинається атомним ядром речовини. За цього поглинання утворюється пара “ електрон – позитрон”. Це той самий випадок, коли енергія перетворюється на масу. Для утворення пари (згідно з співвідношенням $E=mc^2$) необхідна енергія 1,022 MeV. Позитрон живе не довго, оскільки при зустрічі з електроном він поглинається останнім, посилаючи два кванти з енергією 0,51 MeV.

Атмосферні опади

Атмосферні опади – це тверді або рідкі продукти конденсації водяної пари, що падають з хмар чи осаджуються з повітря на земну поверхню.

Параметри опадів:

Кількість опадів, що випали, вимірюють товщиною (в міліметрах) того шару, який би утворився на земній поверхні, коли б опади не стікали, не випаровувалися і не просочувалися в ґрунт.

Інтенсивність опадів відповідає кількості опадів у міліметрах, що випадає за одну хвилину. За інтенсивністю опади поділяються на слабкі, сильні і помірні. Якщо інтенсивність опадів перевищує 1мм за 1 хв, такі опади відносяться до злив.

Тривалість опадів – параметр, що характеризує, як довго тривають опади.

Треба розрізняти ці параметри – помірний дощ протягом доби може дати 120 мм опадів, тоді як під час зливи цю кількість опадів можна зареєструвати за 20 хв. Отже, кількість опадів у розглянутих двох прикладах однакова, а інтенсивність і тривалість – різні.

Вимірювання опадів

Дощомір складається з ємності, відкритої зверху, що містить два елементи – колектор і приймач (рис.). Колектор має циліндричну або конусоподібну форму; площа отвору його близько 400 см^2 . Приймач обладнано шкалою для вимірювання зібраної води. Для запобігання випаровуванню на поверхню води наносять шар нафти товщиною 5 мм.

Нахилені черпаки використовують на автоматизованих станціях за спостереженням погоди. Вони складаються з двох черпаків трикутної форми, з'єднаних з одного боку. Вся конструкція може обертатися навколо горизонтальної осі (рис.). Під час дощу один з черпаків заповнюється водою та перекидається; з цього моменту починає заповнюватися інший черпак. Невеликий магніт виконує функції контакту, що замикає електричний ланцюг. Кількість опадів відповідає кількості замикань ланцюга, тоді як час між двома замиканнями дає змогу оцінити інтенсивність дощу.

Сифонний дощомір – циліндричний резервуар, обладнаний поплавком, з'єднаний з пером самопису (рис.). За допомогою сифона резервуар звільнюється від води,

коли кількість її сягає певного рівня, і перо самопису повертається в початковий стан.

Ваговий опадомір ґрунтується на постійному контролі ваги води, зібраної в контейнері за допомогою вимірювальної системи. Цей тип приладу використовується для оцінки твердих опадів.

Температура

Основні визначення

Температура – фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Кількісне вимірювання температури можливе завдяки впровадженню температурних шкал. Одна з них, *міжнародна стоградусна температурна шкала (Цельсія)* використовує як 0°C температуру плавлення льоду і як 100°C температуру кипіння води при нормальному тиску. Інша – *термодинамічна температурна шкала (Кельвіна)* – використовує потрійні точки речовини – точки на діаграмі стану, що відповідають рівноважному існуванню трьох фаз речовини. Так, потрійна точка води дорівнює 273,15 К, а температура кипіння води 373,15 К. Між двома шкалами існує зв'язок:

$$t_{\text{eC}} = T - 273,15.$$

На сьогоднішній день прийнято *міжнародну температурну шкалу (МТШ)*, яка ґрунтується на

використанні певної кількості станів рівноваги, що відтворюються, або фіксованих точок (табл.).

Таблиця. *Фіксовані точки МТШ на вторинні опорні точки*

Стан рівноваги	Температура, К	Температура, °С
Потрійна точка аргону	83,798	-189,352
Потрійна точка води	273,16	+0,01
Кипіння води при нормальному тиску	373,15	100
Плавлення олова при нормальному тиску	505,078	+231,958
Температура сублімації двоокису вуглецю при нормальному тиску	194,674	-78,476

Плавлення ртуті при нормальному тиску	234,288	-38,862
Плавлення льоду при нормальному тиску	273,15	0,0
Потрійна точка де фенілового ефіру	300,02	26,87

Вимірювання температури

Розглянемо прилади для вимірювання температури, в основі яких лежить теплове розширення газів (газовий термометр), рідин (рідинний термометр) або твердих тіл (біметалевий термометр).

Газовий термометр, дія якого ґрунтується на залежності тиску (при сталому об'ємі) від температури згідно з законом ідеального газу ($pV = RT$). Залежність тиску від температури лінійна:

$$dp/dT = \beta p_0,$$

де β - коефіцієнт об'ємного розширення газу, p_0 - початковий тиск.

Газовий термометр (рис.) використовується як первинний термометричний прилад для визначення фіксованих точок МТШ. Інтервал температур, що вимірюється газовим термометром становить $2 \div 300$ К. Гранична точність залежно від температури, що вимірюється, може сягати $3 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2}$ К. Газові термометри досить складні в експлуатації через необхідність враховувати не ідеальність газу, зміну об'єму з температурою, наявність у газі домішок, взаємодію газу зі стінками балона, залежність показань приладу від початкового та атмосферного тисків. Прилади такого типу використовуються рідко.

Рідинний термометр – прилад для вимірювання температури, заснований на тепловому розширенні рідини. Явище теплового розширення рідини описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T,$$

де β - коефіцієнт об'ємного розширення рідини; ΔV - зміна об'єму; ΔT - зміна температури.

Рідина в термометрі підіймається завдяки тому, що коефіцієнти об'ємного розширення β рідини та скла значно відрізняються: $1,81 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$ у ртуті; $10,6 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$ у спирту; $9,16 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$ у толуена; $0,25 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$ у скла.

Рідинний термометр складається з тонкостінного скляного резервуара, сполученого з скляним капіляром; для вимірювання температури термометр обладнаний шкалою. Частина простору в капілярі, не зайнята рідиною, заповнена сухим інертним газом, що запобігає розриву рідини. В капілярі може біти також внутрішнє розширення (скорочувальна камера), що дає можливість скоротити довжину капіляра; ще одне розширення капіляра (розширювальна камера) у кінці захищає термометр від перегрівання. Зовнішній вигляд рідинного термометра показано на рис. . Процес вимірювання температури полягає в зануренні термометра у рідину; це занурення може бути частковим, повним або абсолютним (рис.). Більшість термометрів використовуються у режимі повного занурення, коли одна частина термометра знаходиться в рідині, а інша – в повітрі.

Робочою рідиною в термометрах такого типу є ртуть, спирт або толуен. Ртуть використовують найчастіше, оскільки вона існує у чистій формі, не погіршується з часом і не взаємодіє зі склом. Діапазон температур, в межах якого можливе застосування ртуті, становить $-38,8 \div 356,9^{\circ}\text{C}$. При вимірюванні низьких температур перевагу мають спирт ($-117,3 \div +78,5^{\circ}\text{C}$) або толуен ($-95,1 \div +110,5^{\circ}\text{C}$). Проте останні

речовини не такі стійки, як ртуть, і можуть повільно розкладатися на сонці.

Ртутний термометр, конструкцію якого наведено на рис. , має капіляр діаметром 0,004 см та колбу діаметром 0,25 см. Знайти зміну висоти стовпчика ртуті в капілярі, якщо температура змінилася на 30 °С. Тепловим розширенням скла можна знехтувати.

Розв'язок

Об'єм колби знаходимо з виразу:

$$V = 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3.$$

Зміна об'єму зі зміною температури описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T = 1,82 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 436 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3.$$

Об'єм капіляра дорівнює:

$$V_{\text{цил}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h.$$

Звідси знаходимо зміну висоти стовпчика ртуті:

$$h = \frac{V_{\text{цил}} \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{\Delta V \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{436 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,004^2} = 3,4 \text{ см}.$$

Біметалевий термометр ґрунтується на тепловому розширенні твердих тіл, зокрема на деформації біметалевої пластини (наприклад, інвар і сталь) під впливом температури (рис.). Оскільки метали мають різні значення коефіцієнтів об'ємного розширення, пластина при зміні

температури деформується. Переміщення вільного кінця Δx під час зміни температури Δt описується формулою:

$$\Delta X = K \Delta t,$$

де K – коефіцієнт пропорційності, що залежить від розмірів пластини та коефіцієнтів об'ємного розширення металів.

Як бачимо, залежність переміщення кінця біметалевої пластини від температури лінійна, а шкала приладу – рівномірна. Схемц типового термографа наведено на рис.

Термометри опору – прилади, принцип дії яких ґрунтується на властивості матеріалів змінювати електричний опір під впливом температури. Провідники в таких вимірюваннях називаються *терморезисторами*, а напівпровідники – *термісторами*.

Для провідників залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T),$$

де R - опір провідника при температурі T ; R_0 - опір при температурі T_0 ; α – температурний коефіцієнт опору провідника; $\Delta T = T - T_0$ (де $T_0 = 273,16$ K).

Для терморезисторів використовують платину, нікель, мідь. Платина характеризується стабільністю параметрів в умовах корозії, дії хімічних сполук. Вона не окислюється, піддається механічній обробці, має високу температуру

плавлення й відрізняється високим рівнем чистоти. Всі ці фактори впливають на стабільність залежності опору платиного провідника від температури. Перевагою мідних терморезисторів є широкі зміни опору при зміні температури та практично лінійний відгук на температуру. Нікель має нелінійний характер залежності опору від температури. Нікель і мідь характеризуються меншою вартістю порівняно з платиною. Основні параметри цих металів подано в табл.

Основні параметри металів, що використовуються як терморезистори

Параметр	Платина	Мідь	Нікель
Коефіцієнт теплового розширення $\beta, (^{\circ}\text{C})$	$0,00385 \div 0,003927$	0,0042	0,0067
Питомий опір, Ом·м	$9,81 \cdot 10^{-6}$	$1,529 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$
Лінійність залежності опору від температури	Відмінна	Відмінна	Слабка

Діапазон температур	-260÷+800°C	-100+150°C	-100÷+500°C
---------------------	-------------	------------	-------------

Конструкція терморезистора (рис.) складається з чистого платинового провідника діаметром 0,1 мм і довжиною приблизно 2 м, який намотаний у вигляді спіралі навколо слюдяного каркасу, що розміщується у скляній трубці. Тиск усередині трубки дорівнює 0,5 атм. Загальна довжина терморезистора становить 1 м. Зміна температури впливає на величину опору $R_{\text{сенси}}$; змінюючи опір реостата R_p , досягають нульового значення на шкалі гальванометра і визначають величину опору сенсора за виразом:

$$R_{\text{сенси}} = (R_A / R_B) R_p$$

Термоелектричні термометри використовують термоелектричні явища, що виявляються у взаємозв'язку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним з таких термоелектричних явищ є *ефект Зеєбека* – виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти яких мають різну температуру (рис.).

Для однорідних провідників A і B , що складають термопару, ЕРС визначається за виразом:

$$E_3 = \int_{t_1}^{t_2} \alpha_A dt + \int_{t_2}^{t_1} \alpha_B dt = \int_{t_1}^{t_2} (\alpha_A - \alpha_B) dt ,$$

де α_A і α_B - коефіцієнти Зеєбека для провідників A і B відповідно.

На практиці не використовують абсолютні значення коефіцієнтів Зеєбека; замість цього визначають ці коефіцієнти щодо певного опорного матеріалу (наприклад, платини):

$$\alpha_{A,Pt} = \alpha_A - \alpha_{Pt}$$

та

$$\alpha_{Pt,B} = \alpha_{Pt} - \alpha_B .$$

Звідси

$$\alpha_{A,B} = \alpha_{A,Pt} + \alpha_{Pt,B} = \alpha_A - \alpha_B$$

де $\alpha_{A,B}$ — відносний — коефіцієнт Зеєбека термопари A, B .

Електрорушійна сила в цьому разі визначається так:

$$dE = \alpha_{A,B} dt .$$

Звідси

$$\alpha_{A,B} = \frac{dE_3}{dt} .$$

Залежність електрорушійної сили Зеєбека від температури визначається за виразом:

$$E_3 = \alpha t + \frac{1}{2} \beta t^2 ,$$

звідки

$$\alpha_{A,B} = \alpha + \beta t.$$

Значення коефіцієнтів α і β для типових металів знаходять з табл.

Недоліком термопар є невеликі значення електрорушійної сили, що виникає в електричному ланцюзі. Подолати цей недолік можна за послідовного з'єднання кількох термопар, що утворюють у цьому разі термобатарею.

Таблиця. *Значення коефіцієнтів α і β для типових металів*

Метал	α , мкВ (°C) ⁻¹	β , мкВ·(- C) ⁻¹
Залізо	+ 16,7	-0,0297
Мідь	+2,7	+0,0079
Константа н	-34,6	-0,0558

Оптична пірометрія ґрунтується на використанні залежності випромінювальної здатності розжареного тіла від температури. Спектральну залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного ($\varepsilon = 1$), сірого ($\varepsilon = 0,9$) та інших тіл наведено на рис. Отже, визначити температуру будь-якого тіла можна шляхом порівняння

інтенсивності його випромінювання на певній довжині хвилі з інтенсивністю стандартного випромінювання.

Оптичний пірометр складається з джерела випромінювання та оптичної системи, до якої входить мікроскоп, калібрована лампа та фільтр з вузькою смугою пропускання. Принцип дії оптичного пірометра зображено на рис., а конструкцію — на рис.

Процедура вимірювання температури передбачає порівняння яскравості тіла, що досліджується, та каліброваної лампи. Вимірювання проводять на довжині хвилі 655 нм. За допомогою регулювання струму, що проходить через нитку розжарювання лампи, зрівноважують яскравості тіла та лампи. У результаті цього зображення нитки зникає на фоні яскравості тіла (рис.). Ручка потенціометра, що регулює величину струму, прокалібрована в одиницях температури.

Оскільки для не абсолютно чорних тіл температура, що реєструється оптичним пірометром, завжди менша, ніж справжня температура, необхідно вводити поправки. Відповідно до даних табл., наприклад, випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла має бути в 2,3 рази більшою, ніж вольфраму і в 3,3 рази більшою, ніж платини при однаковій температурі. Тобто, якщо температура абсолютно чорного

тіла становить 2000 °С, то їй відповідають 2323 °С для платини і 2238 °С для вольфраму (табл.).

Таблиця. *Випромінювальна здатність деяких матеріалів ($\lambda = 650$ нм)*

Матеріал	Випромінювальна здатність ($\lambda = 650$ нм)
Кобальт	0,36
Мідь	0,10
Золото	0,14
Залізо	0,35
Марганець	0,59
Молібден	0,37
Нікель	0,36
Платина	0,30
Срібло	0,07
Тантал	0,49
Титан	0,63
Вольфрам	0,43
Ванадій	0,35
Сталь	0,35
Константан	0,35

Радіотермометри використовуються для вимірювання температури природних поверхонь. Відомо, що енергетична яскравість природної поверхні визначається за виразом:

$$L_e = \frac{\varepsilon \sigma T_s^4}{\pi},$$

де ε — випромінювальна здатність поверхні ($0 < \varepsilon < 1$), σ — стала Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$), T_s — температура поверхні.

Отже, вимірювання енергетичної яскравості природної поверхні дає змогу оцінити її температуру. На практиці вимірюють енергетичну яскравість у смузі довжин хвиль, звичайно в інтервалі $8 \div 3 \text{ мкм}$, де спостерігається вікно прозорості атмосфери і випромінювальна здатність тіл максимальна. Через це температура атмосфери не впливає на результати вимірювань температури поверхні, а випромінювання Сонця цілком поглинається атмосферою і також не заважає вимірюванням. Радіометри складаються з оптичної системи (лінзи, дзеркала, фільтри), що фокусує потік випромінювання певної довжини хвилі на детектор — термістор або термобатарею. Цей потік підвищує температуру детектора, електричний сигнал з виходу якого проградуєований в одиницях температури. Для обмеження

сигналу, що відповідає власній температурі детектора, використовують інший компенсаційний детектор і систему диференційного підсилення та порівняння сигналів з виходу двох детекторів (рис.,а). Підвищити чутливість вимірювальної системи можна за рахунок модулювання оптичного випромінювання (рис.,б). Застосування інфрачервоної відеокамери, здатної реєструвати спектральний розподіл температури (рис.), дає можливість утворювати теплові зображення об'єкта, що досліджується.

Кварцовий п'єзоелектричний термометр — це цифровий прилад, в основі дії якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристалу. Кожний кристал має свою власну резонансну частоту, що залежить від температури. Прилади такого типу характеризуються високою чутливістю та роздільною здатністю (10^{-4}°C). Діапазон температур, що вимірюються, становить $-40 \div 230^{\circ}\text{C}$. До недоліків можна віднести складність електронної системи та високу вартість приладів.

Вимірювання температури повітря

Для вимірювання температури повітря необхідно забезпечити стан рівноваги між детектором і повітрям.

Якщо T_T — температура сенсора, а T_n — температура повітря, то умова рівноваги визначиться за допомогою такого рівняння:

$$C_K(T_T - T_n) = (1 - a)E_c + \varepsilon(E_d - \sigma T_T^4),$$

де C_K — коефіцієнт, що враховує теплообмін сенсора з навколишнім середовищем за конвекції, a — альбеда (частка відбитого сонячного випромінювання), ε — випромінювальна здатність земної поверхні, E_S — енергетична освітленість сенсора сонячним випромінюванням, E_d — енергетична освітленість сенсора довгохвильовим випромінюванням довкілля.

Різниця між температурою, що показує термометр, та температурою повітря (тобто похибка вимірювання) визначається так:

$$(T_T - T_n) = (1 / C_K) [(1 - a)E_c + \varepsilon(E_d - \sigma T_T^4)].$$

Зменшити цю різницю можна за мінімізації правої частини останнього рівняння, що здійснюється практично за допомогою екрану, який не заважає циркуляції повітря поблизу сенсора, але запобігає проникненню прямого та розсіяного випромінювання до сенсора. Крім того, можна збільшити величину коефіцієнта C_K за вимушеної конвекції, тобто вентиляції.

Вимірювання температури ґрунту

Для вимірювання температури ґрунту термометри розміщують на глибині 0,1, 0,2, 0,5 та 1,0 м. На глибині 0,1 м використовують горизонтально розташований термометр, головка якого знаходиться в боксі з кришкою (рис.). На більших глибинах застосовують прямокутні термометри або звичайні термометри, розміщені в футлярі (рис.).

Сонячне випромінювання

Параметри сонячного випромінювання

Сонце є основним зовнішнім джерелом світла й енергії для Землі та її атмосфери, завдяки якому існує життя на планеті. Сонце має вигляд розжареної кулі радіусом $6,96 \cdot 10^8$ м, маса якої становить $1,991 \cdot 10^{30}$ кг. Відстань між Сонцем і Землею — $1,496 \cdot 10^{11}$ м. Склад сонячного середовища — водень (64%), гелій (32%) і суміш важких елементів (4%). Температура Сонця у центрі — $2 \cdot 10^7$ °С, на поверхні — 6000 °С. За такої високої температури відбувається іонізація молекул сонячного середовища та ядерні реакції. Ці процеси супроводжуються виділенням великої кількості енергії. Щорічна енергія Сонця, що приймається Землею, становить $5,5 \cdot 10^{24}$ Дж; потужність — $1,5 \cdot 10^{18}$ кВт за годину. Сонце можна порівняти з абсолютно чорним тілом, температура якого дорівнює 6000 К. Спектральна область сонячного випромінювання становить 200÷5000 нм; максимум випромінювання припадає на 500 нм. Спектр сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, складається з ультрафіолетової (200÷400 нм), видимої (400÷700 нм) та інфрачервоної (>700 нм) частин. На ультрафіолетову частину спектра припадає 5%, видиму

— 35% і на інфрачервону — 60% сонячного випромінювання. Спектр сонячного випромінювання поза атмосферою та на земній поверхні зображено на рис. З рисунка видно, що спектр зовнішнього сонячного випромінювання нагадує спектр випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 6000 К з максимумом близько 0,5 мкм; після проходження крізь земну атмосферу сонячне випромінювання істотно поглинається на певних довжинах хвиль (озоном у ультрафіолетовій області спектра, водяною парою та двоокисом вуглецю — в інфрачервоній). На зміну характеру сонячного спектра впливають також процеси розсіювання світла малими за розмірами молекулами повітря (*розсіювання Релея*) та великими частинками пилу, диму та аерозолів (*розсіювання Мі*). Крім того, на характер спектра сонячного випромінювання впливають висота стояння Сонця, хмарність неба, склад атмосфери. Спектри сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, відбивається від неї та хмар, наведено на рис.

Сонячне випромінювання розподіляється таким чином: близько 17% поглинається хмарами, водяною парою, двоокисом вуглецю, що сприяє безпосередньому нагріванню атмосфери; близько 30% відбивається від хмар,

атмосферних газів та частинок; близько 53% досягає земної поверхні: дві третини у вигляді прямого сонячного світла, одна третина у вигляді розсіяного світла.

Випромінювальні властивості Сонця описуються рівнянням:

$$E_{C\downarrow} = E_C \cos \Theta + E_{D\downarrow},$$

де $E_{C\downarrow}$ —сумарна енергетична освітленість сонячним випромінюванням земної поверхні, $E_C \cos \Theta$ — енергетична освітленість земної поверхні прямим сонячним випромінюванням, а $E_{D\downarrow}$ — дифузним сонячним випромінюванням.

Середні значення сумарної енергетичної освітленості та за рахунок дифузного сонячного випромінювання становлять: $E_{C\downarrow} = 900 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$;

$E_{D\downarrow} = 200 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (чисте небо); $E_{C\downarrow} = 800 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$; $E_{D\downarrow} = 350 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (небо наполовину вкрите купчастими хмарами); $E_{C\downarrow} = E_{D\downarrow} = 300 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (небо повністю вкрите хмарами). Сонце характеризується постійністю своїх випромінювальних властивостей. Отже, можна казати про сонячну сталу ($1368 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) — інтенсивність сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні. З врахуванням загальної площі земної поверхні середня інтенсивність сонячного

випромінювання дорівнює $342 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. В Україні інтенсивність сонячного випромінювання варіює від $115\div 14.5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ на Поліссі до $185\div 215 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ у Криму.

Прилади для вимірювання параметрів сонячного випромінювання

Такі прилади називають радіометрами. Сенсори радіометрів можна поділити на два типи: теплові та квантова ні детектори.

Теплові детектори. В основі дії сенсорів цього типу лежить поглинання випромінювання та його перетворення на теплову енергію такої форми, яку можна вимірювати. До основних типів теплових детекторів відносять *калориметри*, в яких реєструються зміни температури матеріалу детектора; *термопары* та *термобатареї*, в яких реєструється електрорушійна сила (напруга) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти яких мають різну температуру; *болометри*, принцип дії яких полягає в

реєстрації залежності опору провідника, напівпровідника або надпровідника від температури; *піроелектричні детектори*, в основі яких лежить використання залежності поляризації піроактивного кристалу від зміни його температури при опромінюванні; струм, що проходить через кристал, реєструється.

Радіометри з тепловими детекторами класифікуються так:

піргеліометри — прилади для вимірювання прямого сонячного випромінювання за нормального падіння;

піранометри — прилади для вимірювання сонячного випромінювання, що надходять з цілої півсфери (кут зору 2π ср);

піргеометри — прилади для вимірювання низхідного (атмосферного) або висхідного (земної поверхні) довгохвильового випромінювання в межах цілої півсфери;

піррадіометри — прилади для вимірювання сумарного випромінювання (коротко- та довгохвильового), що проходить крізь горизонтальну площину.