

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Кафедра геодезії, землеустрою та геоінформатики**

**Каблак Н.І., Швалагін І.В.**

***Курс лекцій з курсу «сферична астрономія»***

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
*до виконання лабораторних робіт*  
*з курсу сферична астрономія для*  
*студентів спеціальності*  
*193.Геодезія та землеустрій*

**УЖГОРОД - 2022**

Методичний посібник може бути доповненням до підручника “Астрономія” автора І.А.Климишина і допоможе при вивченні курсу глибше розібратися і освоїти суть астрономічних явищ і процесів, що протікають у космічному просторі.

Методичний посібник буде корисним викладачам та студентам.

**Рецензент:** - к.т.н., доцент, зав.кафедри геодезії НТУ «Дніпровська політехніка»

Рекомендовано до друку Вченою радою Географічного факультету ( Протокол № 2 від 17 листопада 2022р.)

Відповідальний за випуск : завідувач кафедри геодезії, землеустрою та геоінформатики доцент Пересоляк В.Ю.

# СФЕРИЧНА АСТРОНОМІЯ. ОСНОВИ СФЕРИЧНОЇ АСТРОНОМІЇ

Сферична астрономія – це розділ астрономії, який розглядає математичні способи вивчення дійсних положень та рухів тіл у космічному просторі на базі їхніх видимих положень та переміщень по небесній сфері.

## 1.1. Небесна сфера

*Небесною сферою* називають уявну сферу довільного радіуса з центром у точці спостереження, на яку спроектовані небесні світила.

*Кутовою відстанню* між двома точками сфери є кут між радіусами, проведеними в ці точки. Зауважимо, що коло, отримане при перетині небесної сфери площиною, яка проходить через центр сфери, називається *великим колом*, а якщо площина не проходить через центр — *малим колом*.

Наслідком обертання Землі навколо своєї осі є видиме обертання небесної сфери у протилежному напрямі. У цьому легко переконатись. Протягом ночі зорі описують дуги концентричних кіл (зі спільною віссю), вісь проходить поблизу зорі Полярної ( $\alpha$  Малої Ведмедиці). Сама ж Полярна зірка залишається майже нерухомою. Щоб вивчити детальніше рух зір, необхідно ознайомитися з основними елементами небесної сфери.

Діаметр небесної сфери, навколо якого здійснюється її видиме обертання, називається *віссю світу* (рис.1).

Вісь світу перетинає небесну сферу в двох точках — *полюсах світу*: північному ( $P$  — поблизу нього видно Полярну) та південному ( $P'$  — поблизу нього яскравих зір нема). У 2000 році кутова відстань між північним полюсом світу та Полярною зорею становила всього 42'. Полярну називають зіркою-компасом, бо вона є орієнтиром, який вказує напрям на північ.

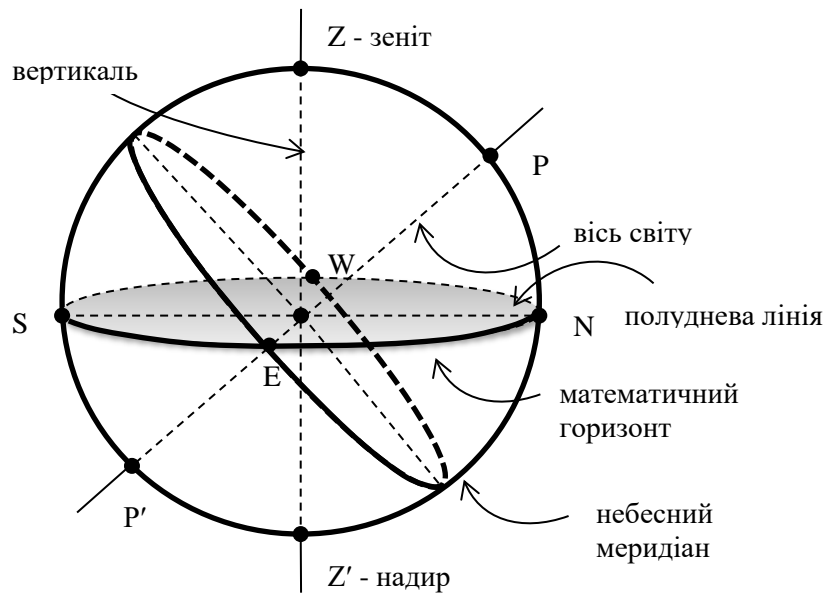


Рис. 1.1. Небесна сфера

*Небесним екватором* називається великий круг небесної сфери, перпендикулярний до осі світу.

Діаметр небесної сфери, вздовж якого діє сила тяжіння і який проходить через точку спостереження, називається вертикаллю, або прямою лінією (ZZ). Точками перетину вертикалі з небесною сферою є *зеніт* і *надир*.

Великий круг небесної сфери, перпендикулярний до вертикалі, називається *математичним*, або *справжнім*, *горизонтом*.

Небесний екватор розділяє небесну сферу на північну та південну півкулі, а горизонт — на видиму та невидиму півкулі. Видиму півкулю небесної сфери ще називають *небосхилом*.

Великий круг небесної сфери, що проходить через полюси світу — зеніт та надир — називається *небесним меридіаном*. Горизонт перетинається з небесним меридіаном у точках півночі (N) та півдня (S), а з небесним екватором — у точках сходу (E) та заходу (W). Діаметр небесної сфери, що сполучає точки півночі та півдня, називається *полудневою лінією* (NS).

Кутова відстань світила від горизонту називається *висотою світила*  $h$ . Наприклад, висота зірки в зеніті дорівнює  $90^\circ$ .

Вісь світу паралельна до осі обертання Землі, а площина небесного екватора паралельна до площини земного.

У різних точках Землі рух зір по небесній сфері виглядає по-різному. Для спостерігача на полюсі нашої планети полюс світу перебуває в зеніті і вісь світу збігається з вертикаллю. Зорі рухаються по колах, паралельних горизонту. Одні світила видно завжди, інші не видно ніколи, тут зорі не сходять і не заходять і їхня висота завжди однакова.[2]

## 1.2. Видимі рухи світил

Спостерігаючи за небом із середніх широт, можна помітити, що одні зорі сходять і заходять, інші — не заходять узагалі. Є також зірки, що не з'являються над горизонтом ніколи.

Зорі, розташовані на небесному екваторі над горизонтом, перебувають стільки ж часу, як і під ним. Сонце рухається серед зір, описуючи лінію, яку називають *екліптикою*. Двічі на рік (навесні — 20-21 березня та восени — 22-23 вересня) перебуває на небесному екваторі у точках весняного та осіннього рівнодень. У цей час день дорівнює ночі.

Кожна зоря за добу двічі перетинає небесний меридіан. Явище проходження світил через небесний меридіан називається *кульмінацією*. У *верхній кульмінації* висота світила найбільша, у *нижній* — найменша (рис. 1.2). Рух світил між сусідніми кульмінаціями триває півдобу. На полюсі висота зорі в обох кульмінаціях однакова. На екваторі видно тільки верхню кульмінацію, але всіх світил. У середніх широтах Землі для навколополярних зір видно (якби не Сонце) обидві кульмінації, для інших (зокрема, для Сонця) — тільки верхню, а для зірок, що не сходять — жодної. Момент верхньої кульмінації центра Сонця називається справжнім полуднем, а нижньої — справжньою північчю. У полудень тінь від вертикального предмета падає уздовж полудневої лінії.

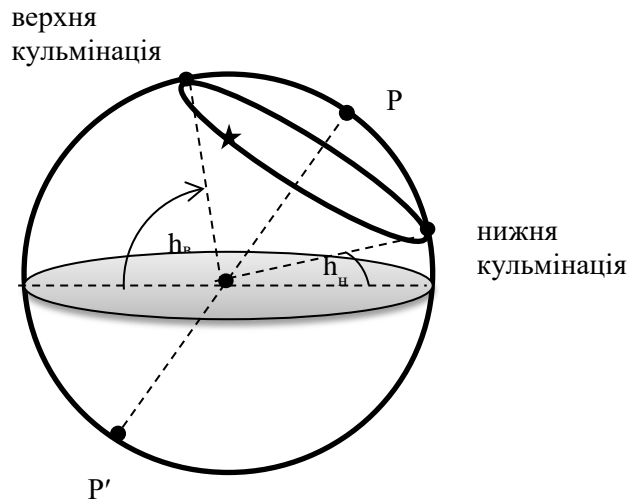


Рис. 1.2. Кульмінація світил:  $h_v$  – висота світила у верхній кульмінації,  $h_n$  – висота світила у нижній кульмінації

Помітити рух Місяця на небі можна вже за 10-15 хв., бо його зміщення серед зір відбувається дуже швидко: за 1 годину він проходить з заходу на схід майже  $0,5^\circ$ . Кутова швидкість Місяця за добу становить від  $11^\circ$  до  $15^\circ$ .

Проміжок часу, за який Місяць, описуючи повне коло на небесній сфері, повертається до тієї самої точки, називається *сидеричним або зоряним місяцем*. Сидеричний місяць дорівнює  $271/3$  доби.

Ретельне вивчення видимого руху Місяця серед зір з нанесенням його шляху на зоряну карту приводить до висновку, що Місяць рухається на небесній сфері по великому колу, нахиленому до екліптики приблизно на  $5^\circ$ , що майже дорівнює 10 його кутовим діаметрам. Поверхня Місяця світиться відбитим сонячним світлом, тому його зовнішній вигляд змінюється залежно від того, яке положення він займає відносно Сонця. Така зміна зовнішнього вигляду Місяця для спостерігача на Землі називається *фазами Місяця*. Розрізняють чотири найголовніші фази: новий Місяць - 1, перша чверть - 3, повня (повний Місяць) - 5, третя (остання) чверть - 7. Однакові фази Місяця повторюються приблизно через кожні  $S = 29,5$  доби, але настають вони в різних точках місячної орбіти - у кожному наступному місяці на  $30^\circ$  східніше порівняно з попереднім.

Земля і Місяць, освітлюючись Сонцем, відкидають тіні у вигляді конусів у бік, протилежний від Сонця. Конус земної тіні довший за місячний, а його діаметр на відстані Місяця перевершує діаметр Місяця більш ніж у 2,5 рази. Рухаючись навколо Землі, Місяць двічі на місяць опиняється на лінії Земля-Сонце. У такі моменти може настати сонячне чи місячне затемнення. - Сонячне затемнення відбувається тоді, коли тінь від Місяця потрапляє на поверхню Землі. Воно спостерігається по-різному в різних точках земної поверхні. Диск Сонця буде повністю закритим тільки для спостерігача, який знаходиться всередині місячної тіні, середнє значення діаметра якої на поверхні Землі дорівнює 100 км. У цій вузькій зоні буде спостерігатись повне сонячне затемнення. На ділянках земної поверхні, куди падає півтінь від Місяця, всередині так званого конуса місячної півтіні, буде спостерігатись часткове сонячне затемнення.

Місячне затемнення відбувається тоді, коли Місяць потрапляє в конус тіні, відкинутої Землею. Оскільки під час затемнення Місяць насправді позбавляється сонячного світла, то місячне затемнення видно на всій нічній півкулі Землі і для всіх точок цієї півкулі починається і закінчується водночас. Повна фаза затемнення може тривати до 1 год. 40 хв., а все місячне затемнення триває більше трьох годин. Очевидно, що місячні затемнення можуть відбуватись тільки під час повні. Мінімальна кількість затемнень на рік - два (обидва сонячні), максимальна - сім (п'ять сонячних і два місячних, або чотири сонячних і три місячних).

За особливостями свого видимого руху на небесній сфері планети поділяються на дві групи: нижні (Меркурій, Венера) і верхні (Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун і Плутон). Рух верхніх і нижніх планет небесною сферою відбувається по-різному.

Меркурій і Венера перебувають на небі або в тих же сузір'ях, що й Сонце, або в сусідніх. При цьому вони можуть знаходитись як на захід, так і на схід від нього, але не далі  $28^\circ$  (Меркурій) і  $48^\circ$  (Венера).

Найбільше кутове відхилення планети від Сонця на схід називається найбільшою східною елонгацією, на захід - найбільшою західною елонгацією.

Коли верхню планету видно після заходу Сонця на західному небосхилі, вона переміщується серед зір прямим рухом, тобто з заходу на схід, як і Сонце. Але швидкість її руху менша, ніж у Сонця, тому Сонце наздоганяє планету, і вона на деякий час перестає бути видимою.

Потім, коли Сонце випередить планету, вона стає видимою на сході перед появою Сонця. Швидкість її прямого руху поступово зменшується, планета зупиняється, потім починає переміщення зворотним рухом зі сходу на захід, причому її траєкторія нагадує петлю.

В середині дуги свого зворотного руху планета знаходиться в сузір'ї, протилежному Сонцю; таке її положення називається протистоянням.

Через деякий час планета знову зупиняється, змінює напрямок свого руху на прямий, знову з заходу на схід. Згодом її наздоганяє Сонце, вона перестає бути видимою – і цикл руху починається спочатку.[1]

### 1.3. Вимірювання часу

*Час* — одне з основних понять фізики, одна з координат простору-часу, вздовж якої протягнуті світові лінії фізичних тіл. Як фізична величина, час здебільшого позначається літерою  $t$ , проміжок часу – літерою  $\tau$  або  $\Delta t$ .

Одиницею вимірювання часу в системі СІ є *секунда*, проте на практиці для його вимірювання використовується ряд різних систем, що відрізняються вибором одиниць і моментів явищ, які беруться за початок лічби між ними.

Найзручнішими одиницями вимірювання часу є обертання Землі навколо осі, обертання Землі навколо Сонця та електромагнітні коливання, що випромінюють атоми деяких речовин за зміни енергетичного стану.



Атомна секунда дорівнює інтервалу часу, за який здійснюється 9 192 631 770 коливань, що відповідають 33 резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надточної структури основного стану атома цезію при відсутності зовнішнього впливу.

Від секунди утворюються:

— хвилина 1 хв. = 60 с;

— година 1 год. = 60 хв. = 3600 с.

Добою називають тривалість одного оберту Землі навколо осі. Але обертання Землі залежить від цілого ряду факторів, тому тривалість часу, протягом якого Земля здійснює оберт навколо осі неоднакова.

Послідовне проходження відповідної точки небесної сфери через даний меридіан (тривалість одного оберту Землі навколо своєї осі) називається *сонячною добою*, яка є одиницею виміру всесвітнього часу. Щоб мати добу постійної тривалості і в той же час пов'язаною з рухом Сонця, беруть добу в 24 години, яка називається *середньою сонячною добою*. За початок середньої сонячної доби береться нижня кульмінація Сонця на даному меридіані. Середній сонячний час отримують шляхом обчислень за визначеним спостереженнями справжнім сонячним або зоряним часом.

*Зоряною добою* називається проміжок часу між двома послідовними проходженнями точки весняного рівнодення  $\gamma$  через даний меридіан. Тривалість зоряної доби стабільна і дорівнює 23 год. 56 хв. 03,44 с. Зоряна доба менша від сонячної на 3хв. 56 с внаслідок того, що, рухаючись по екліптиці, Сонце за добу зміщується відносно  $\gamma$  на  $1^\circ$ .

Для вимірювання великих проміжків часу використовують *рік* – період обертання Землі навколо Сонця. Відображенням цього є видимий рух Сонця за екліптикою. Проміжок часу між послідовними проходженнями центра Сонця через точку весняного рівнодення  $\gamma$  називають *тропічним роком*.

Проміжок часу, протягом якого центр Сонця у своєму видимому річному русі робить повний оберт навколо Землі і повертається в попереднє положення відносно зірок називають *зоряним роком*.

Тропічний рік – 365,24221 середніх сонячних діб.

Зоряний рік – 365,2564 середніх сонячних діб.[1]

#### 1.4. Основи сферичної тригонометрії

*Сферичною тригонометрією* називають науку, що вивчає співвідношення між дугами та кутами на поверхні сфери.

*Сфера* – це поверхня, всі точки якої знаходяться на однаковій відстані від центральної точки, тобто центра сфери. Основні властивості сфери:

1) площина, яка проходить через центр сфери, ділить її на дві рівні півсфери (півкулі). Лінія перетину сфери цією площиною називається великим колом сфери. Радіус великого кола сфери дорівнює радіусу  $R$  сфери;

2) площини, які перетинають сферу поза її центром, утворюють на поверхні сфери малі кола, радіус  $r$  яких менший за радіус сфери (рис. 1.3);

3) діаметр сфери, перпендикулярний до площини заданого великого чи малого кола сфери, називається віссю сфери, а кінці цієї осі – полюсами великого або малого кола. Для великого кола вони однаково віддалені, а для малого кола сфери слід розрізняти поняття найближчий і найвіддаленіший полюси.

4) при перетині будь-якого діаметра сфери перпендикулярними йому площинами на поверхні сфери утворюється одне велике коло, якщо його площина проходить через її центр, і низка малих кіл, площини яких паралельні великому;

5) два великих кола сфери завжди перетинаються в двох діаметрально протилежних точках, бо площини цих кіл перетинаються по діаметру сфери;

6) через дві діаметрально протилежні точки сфери можна провести безліч великих кіл (рис. 1.4);

7) через дві точки на поверхні сфери, які не лежать на одному діаметрі, можна провести одне велике коло сфери через те, що третьою точкою положення її площини є центр сфери (інші кола будуть малими) (рис. 1.5);

8) дуга великого кола є найкоротшою відстанню на поверхні сфери між кінцевими точками цієї дуги (рис. 1.6). Її називають геодезичною лінією. Іншими словами можна сказати, що відстані між точками на поверхні сфери вимірюються дугами великих кіл, які виражаються в градусній мірі ( або в одиницях часу).

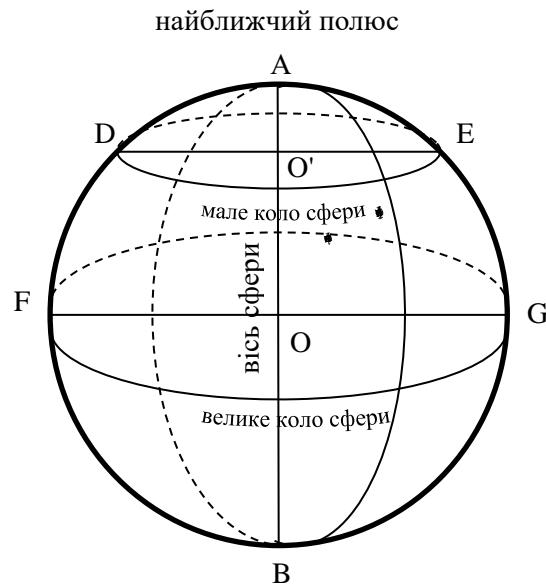


Рис. 1.3. Сфера та її елементи

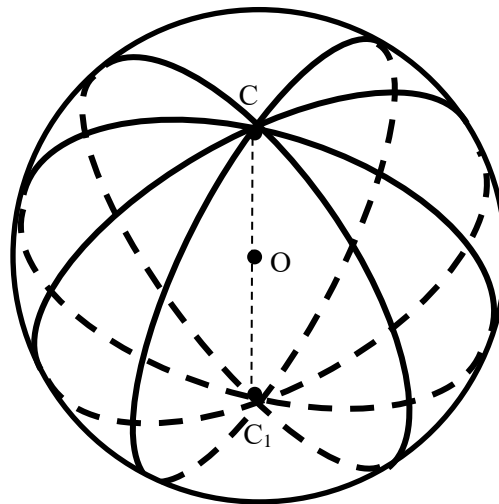


Рис. 1.4. Великі кола сфери

*Сферичний радіус малого кола сфери* – це найкоротша відстань на поверхні сфери від найближчого полюса А заданого малого кола до будь-якої

точки цього кола (рис. 1.3). У наведеному рисунку дуга AC великого кола є сферичним радіусом малого кола DOE'.

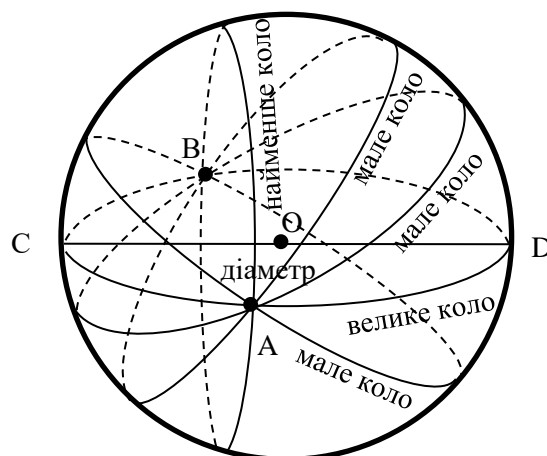


Рис. 1.5. Великі та малі кола сфери

*Сферичний кут* на поверхні сфери утворюється двома дугами великих кіл, які виходять з однієї точки – вершини сферичного кута  $C$  або  $C_1$  (рис. 1.6). Дуги великих кіл, які утворюють сферичний кут, називаються його *сторонами*. Сферичний кут вимірюється в градусах або радіанах. Сферичний кут  $ACB$  можна виміряти плоским кутом між прямими  $k$  і  $l$ , дотичними до сторін сферичного кута в його вершині  $C$ . Сферичний кут  $ACB$  вимірюється і центральним кутом  $AOB$ , тобто лінійним кутом двогранного кута  $CC'AB$ . Сферичний кут також можна виміряти дугою великого кола  $AB$ , полюсом якого є вершина сферичного кута  $C$ .

*Сферичний трикутник* – це фігура на поверхні сфери, утворена дугами трьох великих кіл, які проходять через три точки сфери – вершини сферичного трикутника (рис. 1.6).

Співвідношення між сторонами та кутами в планіметрії (або тригонометрії на площині) відрізняються від таких в сферичній тригонометрії. Так, якщо в плоскій тригонометрії сума кутів у трикутнику дорівнює  $180^\circ$ , то в сферичній вона завжди більша, ніж  $180^\circ$ .

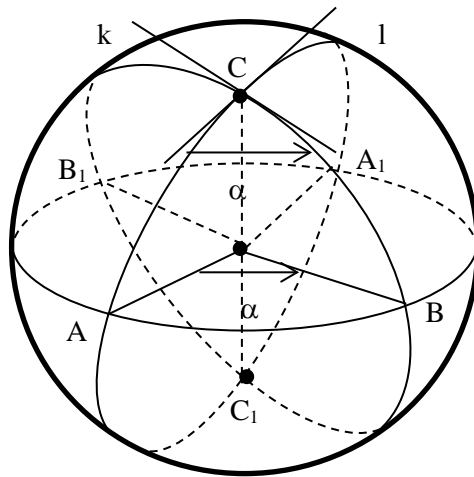


Рис. 1.6. Сферичний кут

Співвідношення між сторонами та кутами сферичного трикутника, які називаються елементами сферичного трикутника, відображають основні формули сферичної тригонометрії: формула синусів, формула косинусів, формули п'яти і чотирьох елементів. Для виведення цих формул, зазвичай, розглядають сферичний трикутник, у якого всі сторони та кути менші, ніж  $180^\circ$ , такі трикутники називають трикутниками Ейлера. Для трикутника Ейлера (з кутами  $A, B, C$  та сторонами  $a, b, c$ ) мають місце такі твердження:

1. сума двох сторін більша за третю, різниця двох сторін менша за третю:

$$a + b > c, a - b < c;$$

2. сума двох кутів менша, ніж третій кут, збільшений на  $\pi$ :

$$A + B < C + \pi;$$

3. найбільша сторона лежить проти найбільшого кута:

$$a < b, \text{ якщо } A < B; a = b, \text{ якщо } A = B;$$

4. сума кутів знаходиться в межах від  $\pi$  до  $3\pi$ , сума сторін – від 0 до  $2\pi$ :

$$\pi < A + B + C < 3\pi, 0 < a + b + c < 2\pi.$$

Таким чином, сума кутів сферичного трикутника завжди більша за  $180^\circ$ .

**Формула синусів.** Ця формула виражає залежність між сторонами сферичного трикутника і протилежними до них кутами:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} = n. \quad (1.1)$$

Формулюється вона так: в сферичному трикутнику відношення синуса сторони до синуса протилежного до неї кута є величина стала або синуси сторін сферичного трикутника пропорційні синусам протилежних до них кутів.

Формули синусів можуть бути надані у такому вигляді:

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A; \quad (1.2)$$

$$\cos b = \cos a \cdot \cos c + \sin a \cdot \sin c \cdot \cos B; \quad (1.3)$$

$$\cos c = \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b \cdot \cos C. \quad (1.4)$$

**Формула п'яти елементів.** Ця формула пов'язує три сторони і два кути сферичного трикутника. Вона формулюється так: добуток синуса сторони на косинус прилеглого кута дорівнює добутку косинуса протилежної цьому куту сторони на синус третьої сторони мінус добуток синуса протилежної цьому куту сторони на косинус третьої сторони і на косинус кута між ними.

Для сторони  $a$  і прилеглих до неї кутів  $B$  і  $C$  формулу п'яти елементів у двох можливих варіантах наведено нижче:

$$\sin a \cdot \cos B = \cos b \cdot \sin c - \sin b \cdot \cos c \cdot \cos A; \quad (1.5)$$

$$\sin a \cdot \cos C = \cos c \cdot \sin b - \sin c \cdot \cos b \cdot \cos A. \quad (1.6)$$

За аналогією можна скласти такі формули для сторін  $b$  і  $c$  та прилеглих до кожної з них кутів. Таким чином, утворюється 6 формул. Аналогічним чином можна сформулювати другу групу цих формул, що відображує зв'язок між трьома кутами і двома сторонами. Наприклад, формули (1.7 і 1.8), які складені для кута  $A$  і прилеглих до нього сторін  $b$ , і  $c$  пов'язують між собою три кути і дві сторони:

$$\sin A \cdot \cos b = \cos B \cdot \sin C + \sin B \cdot \cos C \cdot \cos a; \quad (1.7)$$

$$\sin A \cdot \cos c = \cos C \cdot \sin B + \sin C \cdot \cos B \cdot \cos a. \quad (1.8)$$

Для різних кутів і прилеглих до них сторін також можна одержати 6 формул.[3]

## 1.5. Атмосферна рефракція та аберація світла, паралактичне зміщення

Атмосферна рефракція – явище заломлення світлового променя від прямолінійного напрямку при його проходженні через атмосферу Землі.

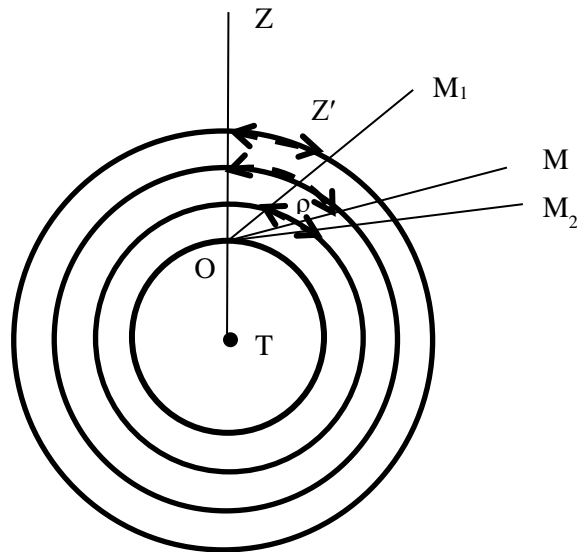


Рис. 1.7. Атмосферна рефракція

Кут  $\angle M_1OM_2$  – кут рефракції, кут  $\angle ZOM_1$  – видима зенітна віддаль світила  $Z'$ , кут  $\angle ZOM_2$  – істинна зенітна віддаль  $Z$ .

$$Z - Z' = \rho \text{ або } Z = Z' + \rho. \quad (1.9)$$

Істинна зенітна віддаль світила більша видимої зенітної віддалі на величину рефракції  $\rho$ .

Всі промені  $OM_1$ ,  $OM$ ,  $OM_2$  лежать в одній площині, тому рефракція не змінює азимута світил, і крім цього дорівнює нулю, якщо світило знаходиться в зеніті.

Якщо світило знаходиться в кульмінації, то рефракція змінює лише його схилення (на ту ж величину, що й зенітну віддаль), бо площини годинникового і вертикального кіл співпадають.

У решта випадках ці площини перетинаються під кутом, а тому рефракція змінює і схилення, і пряме сходження світил.

При тискові  $P$  мм.рт.ст. і температурі  $t^\circ\text{C}$  наближене значення рефракції  $\rho$ :

$$\rho = 60,25'' \cdot \frac{P}{760} \cdot \frac{273^\circ}{273^\circ + t} \cdot \operatorname{tg} Z'. \quad (1.10)$$

З (1.10) при  $t=0^\circ\text{C}$  і тиску  $P=760$  мм.рт.ст.:

$$\rho = 60,25'' \cdot \operatorname{tg} Z'. \quad (1.11)$$

За формулами (1.10), (1.11) обчислення проводиться для  $Z' < 70^\circ$ . При  $Z' > 70^\circ$  формули дають похибку  $> 1''$ , яка при прямуванні до горизонту йде до нескінченості; але в дійсності величина рефракції на горизонті  $\rho \approx 35'$ . Тому рефракція ( $Z' > 70^\circ$ ) визначається шляхом поєднання теорії зі спеціальними спостереженнями.

Внаслідок рефракції спостерігається зміна форми дисків Сонця і Місяця при їх сході і заході. Рефракція нижніх країв дисків цих світил біля горизонту майже на  $6''$  більша рефракції верхніх країв, що спричиняє овальну форму видимих дисків.

Заломлення променів зірок в неспокійній атмосфері з різкими змінами густини відбувається в різних напрямках, внаслідок чого промені світла доходять до ока спостерігача різними шляхами, а тому сприймаються як зміни блиску і кольору зір. Це явище називається мерехтінням зір. Мерехтіння планет майже непомітне.

Закони геометричної оптики справедливі при умовах: світло поступає в систему у вигляді параксіальних (приосевих) пучків, показник заломлення однаковий для променів усіх довжин хвиль (кольорів). На практиці умови ці виконуються не завжди і тому виникають *аберації*.

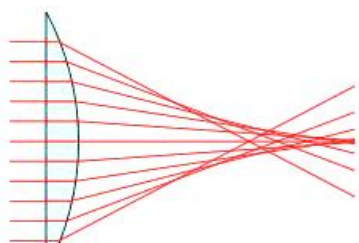


Рис. 1.8

*Аберації оптичних систем* – похибки зображень, які дають оптичні системи. Виявляються в тому, що оптичні зображення в ряді випадків не цілком чіткі, не точно відповідають об'єкту або

виявляються забарвленими.



*Сферична аберація* – порушення геоцентричності пучків від точкових джерел (рис. 1.8). Причиною є те, що промені в центрі та на краях лінзи заломлюються по-різному.

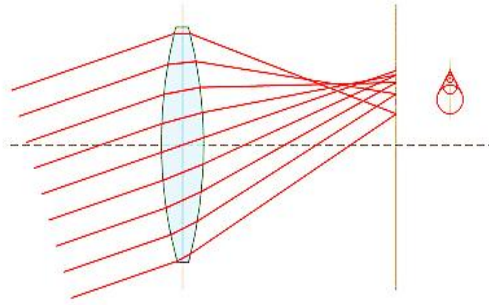


Рис. 1.9

повна симетрія відносно оптичної осі, а для нахиленого до оптичної осі пучка такої симетрії немає. Внаслідок цього верхні і нижні його промені заломлюватимуться по-різному.

*Кома* – це аберація широкого пучка променів, нахилених до оптичної осі (рис. 1.9). Основною причиною цієї аберації є кривизна заломлюючої поверхні. Для осьового пучка при його заломленні існує

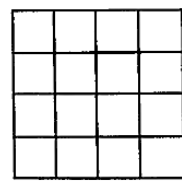


Рис. 1.10

різних ділянок площини зображень неоднакове. Зображення прямокутної сітки може стати подушкоподібне або бочкоподібне (рис. 1.10). Дисторсію особливо слід враховувати в оптичних вимірювальних приладах, а також в об'єктивах фотографічних та картографічних приладів.

*Дисторсія* – це вид аберації, що виявляється в порушенні подібності зображення і предмета. Причина виникнення її полягає в тому, що поперечне збільшення для

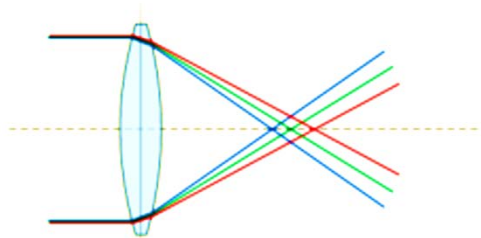


Рис. 1.11

барвленим.

*Хроматична аберація.* Показник заломлення оптичного скла для світла різних довжин хвиль відрізняється, тому сині та фіолетові промені заломлюються в лінзі сильніше, ніж червоні (рис. 1.11). Зображення точки буде нечітким і забарвленим.

Виправлення аберацій в оптичних системах досягають комбінуванням лінз різної форми та зі скла з різним показником заломлення. Виправлення аберацій представляє складну задачу.

Припустимо, що в деякий момент часу центр окуляра телескопа знаходиться в точці А. Якщо встановити трубу телескопа за напрямком падаючих променів АВ, то зображення зірки буде зміщено відносно центру окуляра в сторону руху Землі, так як за час  $t$ , протягом якого промені йдуть вздовж труби телескопа ВА, весь телескоп зміститься на відстань  $vt$  і окуляр попаде в точку  $A_1$ . Щоб спостерігати зірку в центрі окуляра, потрібно нахилити трубу в напрямку руху Землі на кут  $\alpha$ . Так як переміщення променів світла ВА дорівнює  $ct$ , де  $c$  — швидкість світла, то кут  $\alpha$  визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \alpha = vt / ct = v / c. \quad (1.12)$$

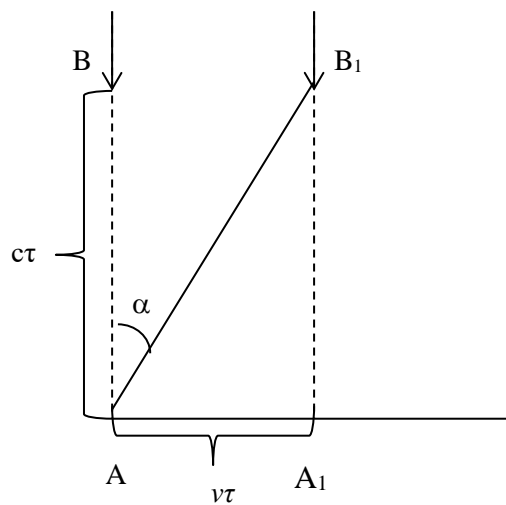


Рис.1.12. Абераци́йне зміщення зірок

Швидкість Землі  $v$  приблизно дорівнює 30 км/с, швидкість світла 300 000 км/с. Тому  $\operatorname{tg} \alpha = 0,0001$  і  $\alpha = 20,47''$ . Величина  $\alpha$  — стала абераци́ї — не залежить від відстані до зірки.

Порівняємо абераци́йне зміщення зірки з її паралактичним зміщенням. Якщо зірка знаходиться в полюсі екліптики, то за рахунок паралактичного зміщення вона описує протягом року коло, радіус якого тим менший, чим далі зірка знаходиться від Сонця. У результаті абераци́йного зміщення зірка, яка знаходиться поряд полюсу екліптики, описує коло, кутовий радіус якого рівний  $\alpha = 20,47''$  і завжди сталий, тобто не залежить від відстані до зірки.

Паралактичне зміщення внаслідок великих відстаней до зірок значно менше абераційного зміщення. Внаслідок паралактичного зміщення положення зірки на небесній сфері зсувається в напрямку до Сонця (рис. 1.13). Внаслідок абераційного зміщення зірка зсувається в сторону руху Землі (рис.1.14).

Таким чином, абераційне зміщення зірки ніби відстає в порівнянні з паралактичним зміщенням на  $90^\circ$ . Якщо зірки розташовані не біля полюсу екліптики, то в результаті аберації зірки на небесній сфері описують еліпси, великі осі яких паралельні до екліптики.

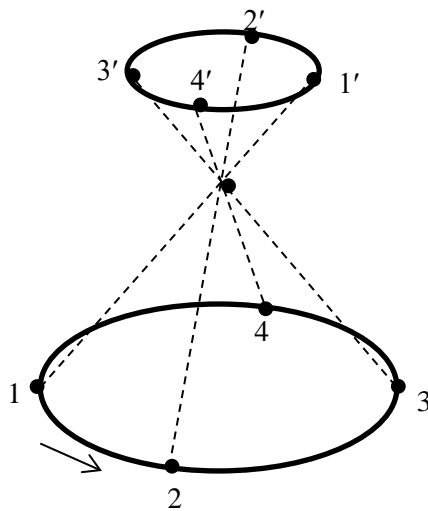


Рис. 1.13

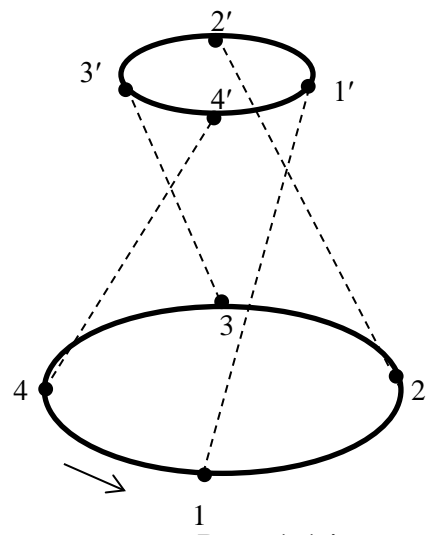


Рис. 1.14

Якщо зірки знаходяться в площині екліптики, то абераційні еліпси вироджуються в прямі. Великі півосі всіх абераційних еліпсів дорівнюють  $\alpha = 20,47''$  незалежно від відстані до зірки.

Паралактичне і абераційне зміщення зірок відбуваються та спостерігаються одночасно. Щоб визначити паралактичне зміщення, наперед із спостережень виключають абераційне зміщення зірки.

Паралактичне та абераційне річне зміщення зірок є наслідком обертання Землі навколо.[2]

## 1.6. Прецесія і нутація

У II ст. до н.е. Гіппарх зробив відкриття: полюс світу повільно змінює своє положення серед зірок. Англійський вчений Ньютон пояснив причину цього явища, виходячи з того, що Земля стиснута біля полюсів і дещо витягнута біля екватора. Внаслідок цього Місяць, який рухається не в площині земного екватора, сильніше притягує екваторіальну частину Землі, яка до нього є ближчою. При цьому Місяць начебто прагне перевернути земну кулю так, щоб земний екватор співпав з площиною земної орбіти. В результаті складання цього обертання з обертанням земної кулі навколо осі земна вісь описує в просторі конус.

Сонце також впливає на рух земної осі, але внаслідок того, що Місяць до Землі знаходиться ближче, вплив Місяця значно більший за вплив Сонця. Рух земної осі, який називають прецесійним, відбувається дуже повільно – один оберт продовжується близько 26 000 років. Внаслідок прецесійного руху полюс світу змінює своє положення серед зір і за 26 000 років описує на небі коло з центром у полюсі екліптики і радіусом  $23,5^\circ$ . В наш час північний полюс світу знаходиться поблизу  $\alpha$  Малої Ведмедиці. Через 12 000 років за розрахунками полярною зорею буде Вега ( $\alpha$  Ліри).

Положення небесного екватора із зміною напрямку осі світу також змінюється, а разом з ним змінюється і положення точки весняного рівнодення. Дві тисячі років тому ця точка знаходилася у сузір'ї Овна. Саме тоді було прийнято позначати її знаком цього сузір'я  $\Upsilon$ . Це позначення залишилося до наших днів, хоча за 2 000 років у результаті прецесії точка весняного рівнодення змістилася у сузір'я Риб.

Дія Сонця і Місяця викликає місячно-сонячну прецесію. Існує ще і прецесія від планет. Хоча притягання планет досить мале, але все ж воно теж впливає на рух Землі навколо Сонця і змінює положення екліптики. Місячно-сонячна прецесія зміщує точку весняного рівнодення на захід на  $50,37''$  за рік, а планетарна прецесія зміщує цю ж точку на  $0,13''$  за рік у зворотному напрямку. В результаті загальна річна прецесія виявляється рівною  $50,24''$ . З цього числа приблизно  $16''$  припадає на Сонце і  $34''$  на Місяць. Внаслідок

прецесії відбувається повільна зміна вигляду зоряного неба, яка не помітна при відносно невеликих проміжках часу. Але за відрізки часу порядку декількох тисяч років ці зміни будуть досить відчутними.

У 1747 році англійський астроном Джеймс Брайлей встановив, що полюс світу володіє не тільки столітнім рухом – прецесією, але і періодичним, який було названо нутацією. Під нутацією у наш час прийнято розуміти ряд більш дрібних коливань земної осі коротких періодів. Найголовніше з цих коливань має період 18,6 років і досягає 9" в той чи інший бік. Нутація також впливає на прямі сходження і схилення світил.

Якщо не враховувати нутаційних коливань, а обмежитись тільки розглядом прецесійного руху полюсу, то такий полюс називається середнім полюсом світу, а його екватор і точка весняного рівнодення – середнім екватором і середньою точкою весняного рівнодення. Якщо нутаційні коливання враховувати, то відповідні точки і лінії називають істинним полюсом світу, істинним екватором та істинною точкою весняного рівнодення. Оскільки зоряний час визначається як годинний кут точки весняного рівнодення, то в астрономії розрізняють середній зоряний час та істинний зоряний час в залежності від того, яку точку весняного рівнодення прийнято для відліку годинних кутів – середню чи істинну. Врахування впливу прецесії та нутації на положення світил, а також питання, що пов'язані з обчисленням істинного та середнього зоряного часу, розглядаються в спеціальних курсах сферичної астрономії, призначених для спеціалістів. [1]

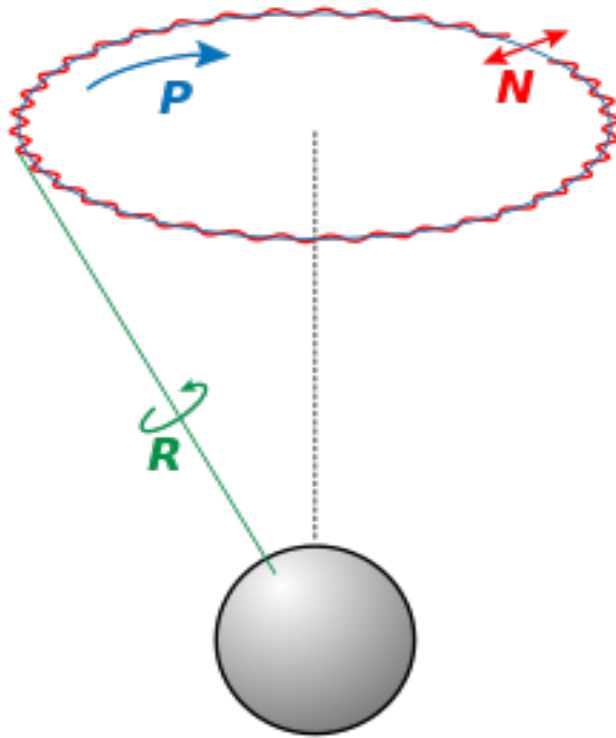


Рис. 1.15. Прецесійно-нутаційні рухи: P – прецесійний рух полюса, N – нутаційні коливання, R – радіус обертання Землі

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Черняга П.Г., Бялик І.М., Янчук Р.М. Супутникова геодезія. Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. – Рівне: НУВГП, 2009. – 150 с.
2. Лекції [Електронний ресурс] / Астрономічний сайт ІФМІ. – Текст. і граф. дані. – Режим доступу: <http://astro-ifmi.in.ua/content/view/2/3/>.(13.11.16) – Заголовок з екрану.
3. Конспект лекцій з астрономії [Електронний ресурс] / Кафедра агрометеорології та агрометпрогнозів ОДЖУ. – Текст. і граф. дані. – Режим доступу: [http://agrometeo.od.ua/articles.php?cat\\_id=9](http://agrometeo.od.ua/articles.php?cat_id=9).(13.11.16) – Заголовок з екрану.