

## ДОДАТОК 2

### Основні навігаційні системи координат

Розв'язання будь-яких задач літаководіння вимагає визначення пілотажно-навігаційних параметрів польоту. Для їх кількісної оцінки вводять у розгляд відповідні системи відліку (СК).

Навігаційні СК будують, як правило, так щоб їх характерні точки, лінії, поверхні початку відліку збігались з характерними точками, лініями, поверхнями відповідних фізичних тіл і полів.

Як точки початку відліку частіше всього вибирають:

- точку в центрі Землі (центрі мас Землі) для геоцентричних систем відліку;
- точку на поверхні Землі для геотопічних систем відліку;
- точку на борту ЛА для рухомих (ЛА-центричних) систем відліку.

При виборі СК, яка використовується на борту ЛА для розв'язання задач навігації, необхідно враховувати те, що обрана СК повинна забезпечувати:

- програмування траєкторії польоту ЛА за найменший час;
- охоплення достатньої за площею території для використання єдиної СК;
- розв'язання навігаційних задач із необхідною точністю;
- одержання найбільш простих співвідношень при розв'язанні задач навігації та управління;
- розв'язання спеціальних задач, в інтересах яких виконується політ;
- наочну інформацію про місцезнаходження ЛА відносно ЛЗШ або основних її точок;
- простоту знаходження місцезнаходження ЛА на карті, планшеті або на індикаторі за його координатами, а також просте визначення координат різних об'єктів.

Використання конкретних СК залежить від характеристик точності пілотажно-навігаційного обладнання літака, від методики підготовки обладнання до польоту, від особливостей його роботи в польоті, а також від специфіки використання екіпажем навігаційної інформації.

### Подовження додатку 2

Застосування на борту ЛА різноманітних датчиків пілотажно-навігаційної інформації, а також велика кількість задач, що вирішуються при підготовці до польоту та в польоті, є причиною використання в сучасній ПНК великої кількості різноманітних СК.

У теперішній час на борту ЛА частіше всього використовуються такі СК:

- геоцентричні (геодезична, нормальна сферична, ортодромічна, екваторіальна, горизонтальна);
- геотопічні (полярна (сферична або циліндрична) та прямокутна);
- рухомі СК, у яких початок збігається з центром мас літака, так звані ЛА-центричні СК (нормальна рухома (горизонтована), зв'язана, траєкторна, швидкісна).

Іноді можливе застосування й деяких інших СК, не вказаних у цьому переліку.

Зауважимо, що геодезична СК відносяться до геоцентричних умовно, оскільки геодезична система не має центра. У геодезичній СК положення точки на поверхні земного еліпсоїда визначається двома координатами – широтою  $B$  і довготою  $L$ .

Нормальна сферична СК – це СК на поверхні земної сфери. У цій системі положення точки визначається сферичною широтою  $\varphi$  і сферичною довготою  $\lambda$ . Ця СК застосовується для безпосереднього розв'язання задач навігації. При цьому використовуються формули сферичної тригонометрії.

У деяких випадках нормальна сферична СК є проміжною між геодезичною, яка використовується для складання програми польоту й індикації положення ЛА, і ортодромічними, які більш зручні та природні для деяких датчиків навігаційної інформації (інерціальні навігаційні системи, курсові системи).

Зазвичай, нормальна сферична СК зв'язана зі земною поверхнею й обертається разом з нею з кутовою швидкістю  $\Omega_3$ .

При розв'язанні задач повітряної навігації широко застосовують ортодромічні СК. Ці СК також є сферичними. Особливістю ортодромічних СК є те, що початкові площини відліку в них можливо змінювати відповідно з призначенням навігаційної системи, типом ЛА, характером задачі, яка вирішується у польоті, і т.п.

Дійсно, у ряді випадків зручніше використовувати таку сферичну СК, екватор якої сполучається з заданою лінією шляху або розташовується поблизу неї. Це дає ряд переваг, у тому числі дозволяє скористатися більш простими співвідношеннями для розв'язанні навігаційних задач, дозволяє застосовувати формули плоскої тригонометрії при зберіганні необхідної точності розв'язання задач.

Основними площинами, від яких починається відлік координат місцезнаходження ЛА є площина ортодромічного екватора (площина ортодромії) і площина початкового ортодромічного меридіана (рис.Д2.1).

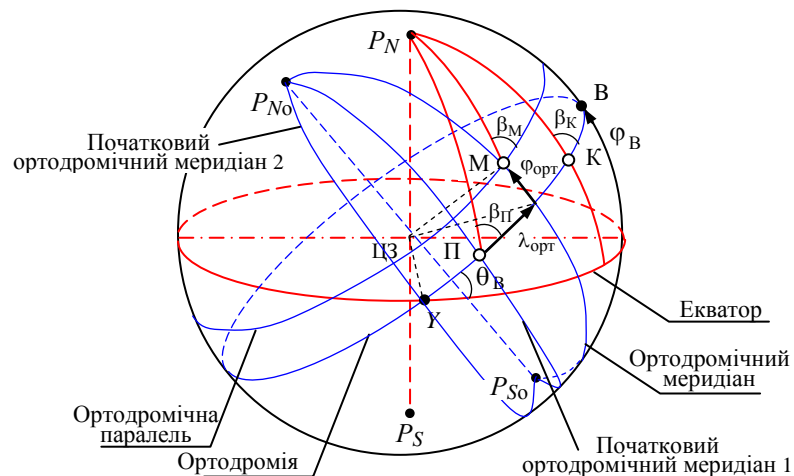


Рис. Д2.1

*Ортодромія* – це плоска крива, яка являв собою дугу великого кола, що утворюється при перерізі сфери площиною, яка проходить через її центр. З цього виходить, що ортодромія – це лінія найкоротшої відстані між двома точками на поверхні сфери, а тому широко застосовується при прокладанні маршруту для польоту між двома точками на поверхні Землі.

Для створення ортодромії на поверхні Землі або карті необхідно задати ортодромічну сферичну СК з початком у центрі Землі.

При цьому визначаються *полюси ортодромії* (північний  $P_{No}$  у північній півкулі, південний  $P_{So}$  у південній півкулі) як кінці діаметра сфери, нормального до основної площини – площини ортодромії.

Умовимося вважати *точкою висхідного вузла ортодромії*  $Y$  – точку, в якій ортодромія переходить у північну географічну півкулю при польоті вздовж ортодромії проти годинникової стрілки, якщо дивитися з точки північного ортодромічного полюса  $P_{No}$ .

*Вертексом* називається точка  $B$  на ортодромії, яка найбільш віддалена від площини географічного екватора.

Ортодромічними координатами точки  $M$  на земній сфері є: *ортодромічна широта*  $\phi_{орт}$  – кут між площиною ортодромії (площиною ортодромічного екватора) і геоцентричною вертикаллю цієї точки; *ортодромічна довгота*  $\lambda_{орт}$  – двогранний кут між площиною початкового ортодромічного меридіана та площиною ортодромічного меридіана точки  $M$ .

Якщо положення початкового меридіана спеціально не оговорено, то ним зазвичай стає ортодромічний меридіан, який проходить крізь точку висхідного вузла ортодромії  $Y$ .

Проте часто за початковий ортодромічний меридіан обирають меридіан, який проходить крізь характерну для даного польоту фіксовану точку ортодромії, наприклад, крізь точку початку  $\Pi$  або кінця  $K$  деякої дуги ортодромії, що збігається з ділянкою маршруту.

При визначенні положення ЛА в ортодромічній СК одночасно, як правило, визначають кутову орієнтацію ортодромічної паралелі відносно географічного меридіана в цій же точці. Ця орієнтація визначається *істинним шляховим кутом ортодромії*  $\beta_{орт}$  ( $\beta_M$ ), який вимірюється в горизонтальній площині й визначається, як кут між проєкціями на горизонтальну площину дотичних до географічного меридіана і ортодромічної паралелі. Позитивний напрямок  $\beta_{орт}$  відлічується за годинниковою стрілкою від північного напрямку дотичної до меридіана.

Різниця значень істинних шляхових кутів ортодромії в двох точках ортодромії називається *кутом сходження меридіанів* на цій ділянці маршруту.

Положення ортодромії на земній сфері частіше всього визначають:

- зазначенням географічних координат двох точок, наприклад, початкової  $P$  і кінцевої  $K$  деякої дуги ортодромії;
- зазначенням географічних координат деякої точки ортодромії  $\Pi$  та істинного шляхового кута ортодромії  $\beta_{орт}$  ( $\beta_{\Pi}$ ) в тій же точці;
- зазначенням координат північного полюса ортодромії  $P_{No}$ ;
- зазначенням довготи висхідного вузла ортодромії  $Y$  та кута похилу ортодромії до площини екватора  $\theta_B$  або широти  $\varphi_B$  точки вертекса  $B$  ортодромії (при цьому  $\theta_B = \varphi_B$ ).

Застосування ортодромічної СК найбільш доцільно у припущенні, що значення ортодромічної широти під час польоту будуть невеликі (менше  $5...10^\circ$ ). У цьому випадку замість кутових ортодромічних координат застосовують лінійні координати: дальність за ортодромією  $y$  та відхід від ортодромії  $x$ .

При цьому

$$x = \varphi_{орт} R; \quad y = \lambda_{орт} R.$$

де  $R$  – розрахункове значення радіуса земної сфери.

Розрізняють праву та ліву ортодромічні СК. У правій ортодромічній СК ортодромічна широта  $x$  відлічується вправо від напрямку відліку ортодромічної довготи  $y$ , а ортодромічні шляхові кути  $\beta_{орт}$  і ортодромічний курс  $\psi_{орт}$  відлічуються від дордгичної до ортодромічної паралелі (рис. Д2.2, а).

У лівій ортодромічній СК ортодромічна широта відлічується вліво від напрямку відліку ортодромічної довготи, а ортодромічні ШК й ортодромічний курс – від дотичної до ортодромічного меридіана (рис. Д2.2, б).

В окремому випадку, ортодромічний екватор правої ортодромічної СК може бути сполучений з істинним меридіаном деякої точки. Ортодромічну довготу в цьому випадку відлічують або від земного екватора, або від ортодромічного меридіана цієї точки.

Іншим окремих випадком правої ортодромічної СК є так звана *етапно-ортодромічна* СК. У цій системі кожному етапу польоту

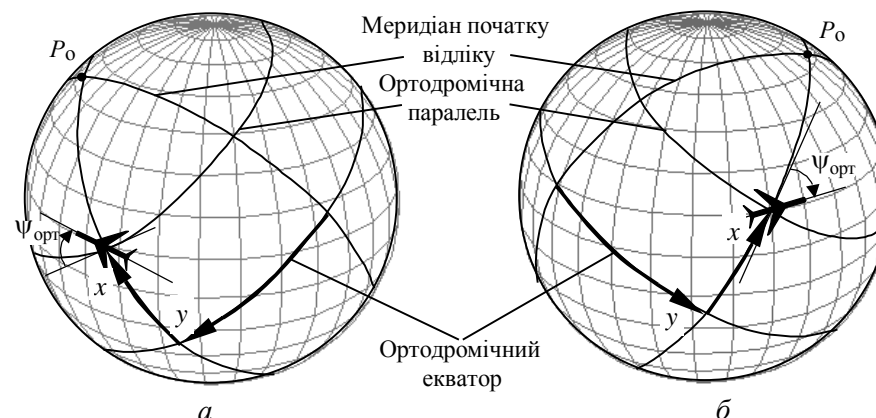


Рис. Д2.2

відповідає своя власна права ортодромічна СК. Це здійснюється за рахунок сполучення ортодромічного екватора з ЛЗШ – ортодромією кожного навігаційного етапу маршруту польоту. Така СК забезпечує простоту та наочність визначення пройденої на етапі відстані та бічного відхилення від ЛЗШ. Ортодромічна довгота в цьому випадку відлічується від точки зламу маршруту (ТЗМ), вона характеризує пройдену відстань від ТЗМ, а ортодромічна широта – величину бічного відхилення ЛА від ЛЗШ.

Ортодромічні СК є основою для квазіортодромічних СК. Такі СК відрізняються від ортодромічних тим, що в них радіус екватора відрізняється від радіусів меридіанів.

Перехід від ортодромічних координат точки до координат у квазіортодромічній СК здійснюється за допомогою таких співвідношень:

$$x = \varphi_{орт} R_x; \quad y = \lambda_{орт} R_y.$$

де  $\varphi_{орт}$ ,  $\lambda_{орт}$  – кутові координати точки в ортодромічній СК, трансформацією якої створюється квазіортодромічна СК;  $R_x$ ,  $R_y$  – величини прийнятих у даній СК радіусів меридіана й екватора, наприклад, радіуса кривизни меридіана та першого вертикала земного еліпсоїда.

Подовження додатку 2

Якщо екватор цієї СК сполучити з істинним меридіаном деякої точки і взяти радіуси  $R_x$  і  $R_y$ , що дорівнюють радіусу кривизни першого вертикала та меридіана, які проходять через цю точку, то в межах деякої області біля цієї точки буде отримана проекція поверхні земного еліпсоїда з достатньо малими спотвореннями. Такою точкою може бути, наприклад, центр району польотів або аеродром вильоту. Характер і величина спотворень у цьому випадку залежать від геодезичної широти обраної точки та розмірів аналізованої (робочої) області.

Сферичними є також *екваторіальна та горизонтальна СК*. Вони застосовуються, наприклад, при застосуванні астрономічних датчиків навігаційної інформації та супутникових навігаційних систем.

До числа геотопічних навігаційних СК відносяться такі СК, початок яких знаходиться й рухомий або нерухомий точці на поверхні Землі.

За нерухомий початок відліку геотопічної СК зазвичай обирають: точку розташування наземних засобів радіотехнічної системи навігації; точку на аеродромі зльоту або посадки; початкові, кінцеві, проміжні пункти маршруту; орієнтири та цілі.

За рухомий початок відліку частіше всього вибирають точку (проекцію ЛА) на поверхні Землі.

Осі *прямокутній* геотопічної СК можуть бути орієнтовані самими різними способами, частіше всього вони орієнтуються таким чином: дві з них лежать у площині горизонту, а третя збігається з місцевою вертикаллю.

Азимутальна орієнтація горизонтальних осей визначається характером вирішуваних задач, складом і призначенням технічних засобів навігації літака. Такі прямокутні СК у випадку фіксованої відносно Землі точки початку відліку називаються нормальними земними СК і позначаються  $O_0X_gY_gZ_g$ . Частіше за все орієнтація горизонтальних осей визначається напрямком географічних або ортодромічних меридіанів і паралелей.

Одночасно з прямокутними геотопічними СК широко використовують полярні (сферичні та циліндричні) системи координат.

Подовження додатку 2

На рис. Д2.3 зображені геотопічна прямокутна (нормальна) земна СК  $O_0X_gY_gZ_g$  та полярні  $O_0NHE$  (сферична та циліндрична) СК з загальним центром у точці  $O_0$  і з орієнтацією горизонтальних осей за напрямком географічної паралелі – вісь  $O_0Z_g$  ( $O_0Z$  – східний напрямок) і географічного меридіана – вісь  $O_0X_g$  ( $O_0N$  – напрямок на північ). Вісь  $O_0Z_g$  ( $O_0H$ ) спрямована за напрямком істинної вертикалі.

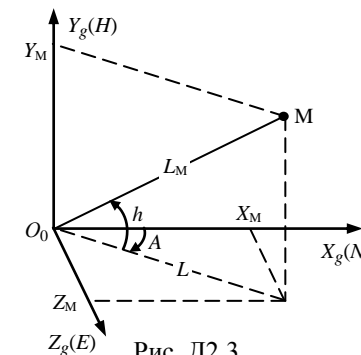


Рис. Д2.3

Координати точки М у цих системах визначаються такими величинами:

- відрізками  $X_M, Y_M, Z_M$  – в прямокутній СК;
- кутами  $A, h$  і відрізком  $L_M$  – у сферичній полярній СК;
- кутом  $A$  та відрізками  $L$  і  $Y_M(H)$  – в циліндричній полярній СК.

При цьому кут  $A$  називається азимутом або істинним пеленгом об'єкта М, в точки  $O_0$  він відлічується в горизонтальній площині від напрямку на північ  $O_0N$  до напрямку на об'єкт  $O_0M'$  за годинниковою стрілкою у межах від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

Кут  $h$  – кутова висота (кутове перевищення) об'єкту відлічується від горизонтальній площини в межах  $-90^\circ$  (нижче площини  $X_gO_0Z_g$ ) до  $+90^\circ$  (вище площини  $X_gO_0Z_g$ ).

Відрізки  $L, L_M, H (Y_M)$  відповідно називаються: дальність (горизонтальна дальність від точки  $O_0$ ), похила дальність і висота об'єкту над горизонтальною площиною  $X_gO_0Z_g$ .

У випадку орієнтації горизонтальних осей геотопічних СК за напрямком ортодромічної паралелі (ортодромічного екватора) від цього напрямку відлічується пеленг  $\Pi$  або умовний азимут об'єкта. Іноді на відміну від азимуту цей кут називають ортодромічним або умовним пеленгом об'єкта.

Рухомими (ЛА-центричними) системами координат прийнято називати навігаційні системи відліку з центром у точці, яка збігається з центром мас ЛА.

Серед рухомих СК координат особливе місце займає зв'язана прямокутна СК  $OXYZ$ , яка створена поздовжньою, нормальною та поперечною осями ЛА. У цій СК початок сполучається з центром мас ЛА, вісь  $OX$  сполучається з напрямком поздовжньої осі ЛА, вісь  $OZ$  спрямована в бік правого півкрила, а вісь  $OY$  перпендикулярна першим двом осям, спрямована вгору і розташована у площині симетрії ЛА.

У зв'язаній з ЛА горизонтованій системі координат (нормальна рухома СК  $OX_gY_gZ_g$ ) початок координат сполучається з центром мас ЛА, вісь  $OX_g$  визначається як проекція поздовжньої осі ЛА на площину істинного горизонту, вісь  $OZ_g$  розташована у площині горизонту і спрямована вправо від осі  $OX_g$ , а вісь  $OY_g$  паралельна нормалі до площини горизонту.

У швидкісній СК  $OX_aY_aZ_a$  швидкісна вісь  $OX_a$  збігається з вектором повітряної швидкості, вісь підйимальної сили  $OY_a$  лежить у площині симетрії, а бокова вісь  $OZ_a$  доповнює систему до правої.

Траекторна СК  $OX_kY_kZ_k$  – це рухома система координат, вісь  $OX_k$  якої збігається з напрямком вектора земної швидкості (швидкість ЛА відносно земної поверхні), а вісь  $OY_k$  спрямована уверх від поверхні Землі й лежить у вертикальній площині, яка проходить крізь вісь  $OX_k$ . При відсутності вітру вісь  $OX_k$  траекторної СК сполучається з віссю  $OX_a$  швидкісної системи координат.

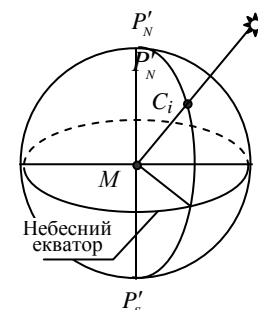
ЛА-центричні (рухомі) навігаційні СК використовуються, як правило, для отримання інформації за допомогою деяких систем і засобів, які знаходяться на борту ЛА, наприклад, РЛС, оптичних візирів, гіроскопічних систем.

Часто при вирішенні задач навігації з'являється необхідність переходу з однієї СК в іншу. Такий перехід виконується за допомогою матриць переходу (матриць напрямляючих косинусів).

### Астрономічні системи координат

Принципи побудови астрономічних навігаційних систем для визначення координат місцезнаходження та курсу ЛА засновані на геометричному або аналітичному моделюванні положення небесних тіл відносно навігаційної СК. Оскільки літакові астрономічні пристрої пеленгують природні небесні тіла – світила, то з'ясування змісту такого моделювання передбачає знання основ авіаційної астрономії й зокрема астрономічних СК і задач вимірювання часу.

В авіаційній астрономії відстані до небесних світил не представляють інтересу, важливі тільки їхні кутові положення. Тому для зручності розв'язання координатних задач використовується поняття небесної сфери довільного радіуса з центром у точки  $M$  місцезнаходження ЛА (рис.Д2.4). Точки  $P'_N$  і  $P'_S$ , що лежать на осі, паралельної осі власного обертання Землі, називаються північним і південним полюсами світу, а саму цю вісь – віссю світу. Вводиться також поняття площини небесного екватора, яка паралельна площині земного екватора. Усі світила проектуються на небесну сферу в точках  $C_i$  із дотриманням їх відносної кутової орієнтації.



У ряді випадків центр небесної сфери зручніше сполучати із центром Землі, а саму небесну сферу – із землею, що цілком припустимо через віддаленість світил і як правило використовується в авіаційній астрономії. У цьому випадку точку  $C_i$  називають *географічним місцем світила*.

Залежно від розв'язуваних задач використовують горизонтальну і екваторіальні (рухомі і нерухомі) системи астрономічних координат. Центр небесної сфери екваторіальних систем зазвичай сполучають із центром Землі.

*Екваторіальна нерухома система* (рис.Д2.5, а), яка не обертається в інерціальному просторі, зручна для вивчення відносного положення світил. Площинами відліку кутових координат є площина небесного екватора і *коло схилення світила* – площина, яка проходить через світило  $C$  і вісь світу і співпадає з площиною меридіана світила.

Згідно з назвою цієї СК положення зірок у ній незмінні, в той час як Сонце в наслідок річного руху Землі робить оборот по окружності, площина якої – *екліптика* – нахилена до площини екватора на кут  $23^{\circ}27'$ . Точка перехрещення цієї окружності з екватором при переході Сонця в північну півсферу (21 березня) називається *точкою весняного рівнодення* і позначається символом  $\Upsilon$ .

Положення світила в нерухомій екваторіальній системі координат визначається кутами  $\alpha$  і  $\delta$ . Кут  $\alpha$  – *пряме сходження*, вимірюється дугою небесного екватора від точки  $\Upsilon$  до кола схилення. Позитивний напрям відліку показаний стрілкою (див. рис. Д2.5,а). Кут  $\delta$  – *схилення* вимірюється дугою кола схилення від небесного екватора до світила. При знаходженні світила в північній півсфері кут  $\delta$  вважається позитивним. Природно, що координати  $\alpha$  і  $\delta$  можна визначати також відповідними центральними кутами.

*Екваторіальна рухома СК* (рис.Д2.5, б) зв'язана з Землею й обертається відносно нерухомої системи з кутовою швидкістю  $\Omega$  власного обертання Землі. Вона дозволяє визначати положення світил відносно навігаційних СК. Крім кута  $\delta$ , координатою світила в цієї СК стає *годинний кут*  $t$ . Початком відліку  $t$  служить *небесний меридіан*, площина якого збігається з меридіаном точки  $M$  місця об'єкта. Кут  $t$  вимірюється між площинами небесного меридіана і кола схилення світила в напрямку, протилежному власному обертанню Землі. Зауважимо, що проходження світила через небесний меридіан, коли значення  $t = 0$ , називається *верхньою кульмінацією*.

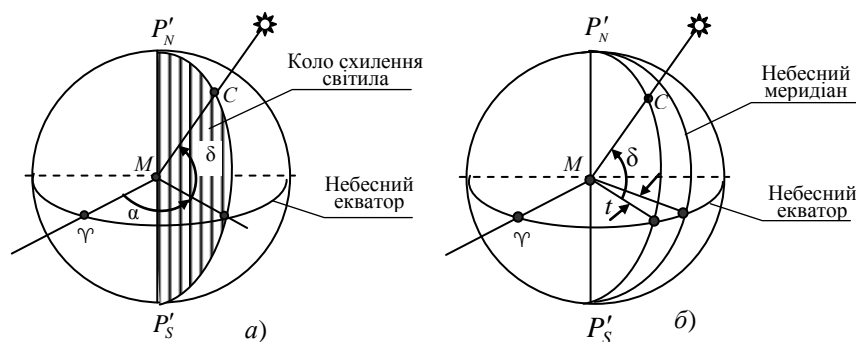


Рис.Д2.5

Місцевий  $t$  і грінвічський  $t_{\text{Гр}}$  годинні кути взаємозалежні

$$t = t_{\text{Гр}} + \lambda, \quad (\text{Д2.1})$$

де  $\lambda$  – східна довгота місця.

Зауважимо, що годинникові кути зірок, Сонця і планет змінюються з різними кутовими швидкостями.

Оскільки значення  $t_{\text{Гр}}$  залежить не тільки від часу, але і змінюється від світила до світила, то табулювання  $t_{\text{Гр}}$  для великої кількості навігаційних зірок нерационально. Для цього замість (Д2.1) доцільно використовувати іншу форму виразу  $t$  з урахуванням зв'язку між рухомою і нерухомою системами екваторіальних координат, що пояснюється рис. Д2.6. Цей зв'язок визначається *зоряним часом*  $S$ , під яким розуміється годинний кут точки весняного рівнодення. З визначення  $S$  впливає залежність

$$S = t + \alpha \quad (\text{Д2.2})$$

За аналогією з (Д2.1) можна записати

$$S = S_{\text{Гр}} + \lambda \quad (\text{Д2.3})$$

де  $S_{\text{Гр}}$  – грінвічський зоряний час.

З (Д2.2) і (Д2.3) випливає

$$t = S_{\text{Гр}} + \lambda - \alpha. \quad (\text{Д2.4})$$

Такий вираз зручний для практичного використання, оскільки значення прямого сходження зірок  $\alpha$  незмінні протягом багатьох років, а  $S_{\text{Гр}}$  табульовано у функції грінвічського часу.

У горизонтальній системі координат положення світила визначається висотою  $h$  та азимутом  $A$  світила (рис.Д2.7, а). Висота являє собою кут між горизонтальною площиною та напрямком на

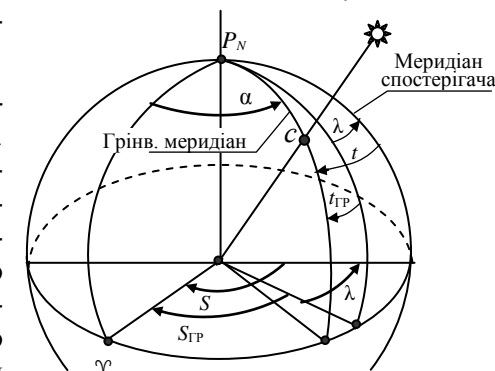


Рис.Д2.6

Подовження додатку 2

світило, а азимут – кут, вимірюваний від північного напрямку меридіана до горизонтальної проекції напрямку на світило. Для встановлення залежностей між екваторіальними та горизонтальними координатами останні зображують також на небесній сфері з центром у точці  $M$  місця розташування (рис. Д2.7, б). Площинами відліку кутів  $A$  і  $h$  є горизонтальна площина і вертикал світила – вертикальна площина, що містить точку  $C$ . Точка  $Z$  вертикалі місця  $Z'Z$  називається *зенітом*. Площина небесного меридіана, яка прохо-

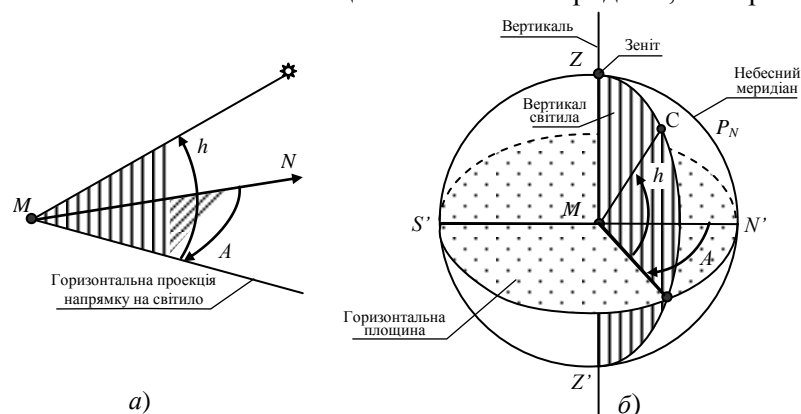


Рис. Д2.7

дить за визначенням через точки  $Z$  і  $P_N$ , перетинає горизонтальну площину в точках півночі  $N'$  і півдня  $S'$ . Очевидно, що азимут  $A$  може бути визначений також як кут між площиною небесного меридіана і вертикалом. Дуга  $ZC$ , що дорівнює  $90^\circ - h$ , називається *зенітною відстанню*.

Приведемо також стислі відомості щодо виміру часу.

Зоряний час відповідно до свого визначення змінюється з кутовою швидкістю власного обертання Землі. *Зоряна доба* – проміжок часу між двома послідовними верхніми кульмінаціями точки весняного рівнодення (час одного оберту Землі навколо своєї осі) – коротше сонячних приблизно на 4 хвилини через річний руху Землі. Врахування зоряного часу дуже важливо в астронавігаційних системах, що пеленгують зірки.

У повсякденному житті, зазвичай, використовується так званий *сонячний час*. Одиниця його виміру – секунда, яка визначається

Подовження додатку 2

як  $1/86400$  середньої сонячної доби, що дорівнює проміжку часу між двома послідовними кульмінаціями так званого середнього Сонця – фіктивної точки, яка рівномірно рухається за екватором (тривалість істинної сонячної доби не постійна). Інше визначення секунди це  $1/31556925,9747$  частина тропічного року (для 1900 р.), що відповідає осередненню даних спостереження за 300 років. Точність такого еталона часу порядку  $10^{-11}$ . У зв'язку з підвищенням вимог до точності виміру часу в 1965 р. був прийнятий атомний еталон секунди, і вона визначається як час, за котрий відбувається 9192631770 переходів між двома надтонкими рівнями основного стану атома Cs 133, що дає точність порядку  $5 \cdot 10^{-13}$ .

Початок відліку сонячного часу – північ (момент нижньої кульмінації Сонця, коли його годинний кут дорівнює  $\pi$ ) – залежить від меридіана місця. Тому місцевий час  $T_M$ , що залежить від довготи  $\lambda$ , не використовується на практиці. Для зручності прийнятий *поясний час*  $T_P$ , який розрізняється на 1 годину відносно сусідніх поясів (всього 24 пояса), а на території СНГ уведений *декретний час*  $T_D$ , який більше поясного на 1 годину ( $T_D = T_P + 1$ ).

При астрономічних вимірах за  $T_D$  з урахуванням номера  $N$  поясу визначають *грінвичський час*  $T_{Гр} = T_D - N - 1$ .

За  $T_{Гр}$  для дати вимірювання з Авіаційного астрономічного щорічника відшуковують  $t_{Гр}$  і  $\delta$  Сонця та планет і єдине  $S_{Гр}$  зірок.

**Зв'язок між астрономічними та навігаційними системами координат**

Усі методи визначення координат місця розташування та курсу ЛА шляхом астрономічних вимірів базуються на залежностях між астрономічними і навігаційними СК. При цьому основний є взаємозв'язок геоцентричної (географічної) і астрономічних – екваторіальної (рухомої) і горизонтальної – координатних систем, що пояснюється для сферичної моделі Землі на рис. Д2.8, а (див. також рис. Д2.5, б і Д2.7). Вертикаль  $ZM$  вважається геоцентричної, а напрямки на світило з точки  $M$  і центра  $O$  Землі – паралельними.

Подовження додатку 2

Тоді сферичні трикутники  $ZP'_N C$  на небесній сфері і  $MP_N C'$  на

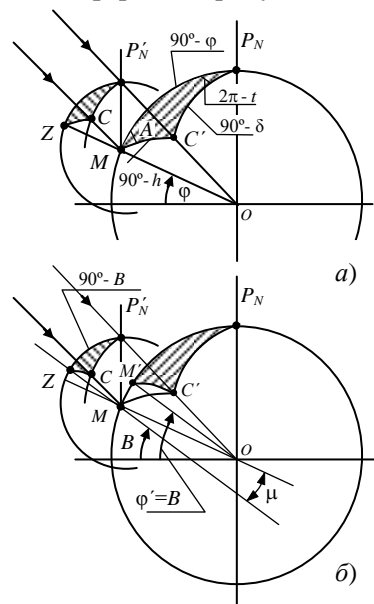


Рис. Д2.8

Землі будуть подібні (трикутник  $ZP'_N C$  має назву *паралактичний*).

Природно, що дуги  $ZP'_N(MP_N)$ ,  $P'_N C(P_N C')$  і  $ZC(MC')$  рівні відповідно  $(90^\circ - \varphi)$ ,  $(90^\circ - \delta)$  і  $(90^\circ - h)$ , кути при вершинах  $Z(M)$  і  $P'_N(P_N)$  – азимуту  $A$  та  $(2\pi - t)$ .

Для кожного з цих трикутників, наприклад,  $MP_N C'$ , можна записати рівняння, використовуючи формули сферичної тригонометрії, які встановлюють зв'язок між геоцентричними (географічними) координатами  $\varphi$ ,  $\lambda$  точки  $M$  й астрономічними координатами світила. За теоремою синусів одержимо

$$\frac{\cos \delta}{\sin A} = -\frac{\cosh}{\sin t}$$

або, з урахуванням (Д2.4),

$$\sin A = -\frac{\cos \delta \sin t}{\cosh} = -\frac{\cos \delta \sin(S_{\text{Гр}} + \lambda - \alpha)}{\cosh} \quad (\text{Д2.5})$$

Згідно з теоремою косинусів, можна записати

$$\begin{aligned} \sin h &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t = \\ &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(S_{\text{Гр}} + \lambda - \alpha) \end{aligned} \quad (\text{Д2.6})$$

У рівняннях (Д2.5) і (Д2.6) параметри  $\alpha$ ,  $\delta$  і  $S_{\text{Гр}}$  заздалегідь відомі (задані). Отже, при відомих широті  $\varphi$  і довготі  $\lambda$  точки  $M$  розв'язком рівнянь є азимут  $A$ , використовуваний для визначення курсу. Рівняння (Д2.5) необхідно тільки для обчислення  $A$ , значення якого можна відразу ж знайти з нього при відомій довготі  $\lambda$  у випадку безпосереднього виміру  $h$ . Основна навігаційна задача визначення координат місця розташування може бути розв'язана

Подовження додатку 2

при вимірі висот двох світил  $C_1$  і  $C_2$ , якщо, аналогічно (Д2.6), одержимо систему двох рівнянь:

$$\begin{aligned} \sin h_1 &= \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos(S_{\text{Гр}} + \lambda - \alpha); \\ \sin h_2 &= \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos(S_{\text{Гр}} + \lambda - \alpha), \end{aligned} \quad (\text{Д2.7})$$

де індекси «1» і «2» відповідають номерам світил. З цих рівнянь можна знайти значення  $\varphi$  і  $\lambda$ .

Можливі й інші форми запису тригонометричних рівнянь зв'язку навігаційних і астрономічних координат, еквівалентні приведеним вище, а також різні методи розв'язання цих рівнянь.

Зробимо тепер важливе зауваження щодо залежності розв'язку навігаційної задачі за допомогою астрозасобів від виду використовуваної в них вертикалі. Справа в тім, що часто астрономічні виміри базуються не на геоцентричній, а на астрономічній (істинній) вертикалі, яка апроксимується геодезичної. У цьому випадку трикутник  $ZP'_N C$  зміниться, оскільки точка зеніту  $Z$  зміститься, так, що дуга  $ZP'_N$  стане рівної  $90^\circ - B$ , де  $B$  – геодезична широта (див. рис. Д 2.8, б, де для наочності розходження між кутами  $B$  і  $\varphi$  перебільшене). Трикутник  $MP_N C'$  вже не буде подібний трикутнику  $ZP'_N C$ . Для збереження подоби достатньо, очевидно, замінити точку  $M$  точкою  $M'$ , зміщеною до півночі на кут  $\mu$ .

$$\mu = B - \varphi$$

Для кожного з отриманих таким чином подібних трикутників можна записати, замінюючи  $\varphi$  на  $B$ , систему рівнянь, аналогічних розглянутим. Отже, при вимірі висот світил  $h_1$  і  $h_2$ , які відлічуються від площини істинного (точніше, геодезичного) горизонту, рівняння (Д2.7) безпосередньо визначають геодезичні координати точки  $M$ : широту  $B$  і довготу  $L = \lambda$ . Величина  $B$ , яка задається на еліпсоїді, в даному випадку через застосування сферичних побудов (для «земного» трикутника  $MP_N C'$ ) чисельно дорівнює її геоцентричному куту  $\varphi' = B$ . З (Д2.5) при цьому визначається азимут світила, який декілька відрізняється від кута  $A$ , одержуваного для геоцентричної вертикалі.