

А.О.Корсунь

ВИМІР ЧАСУ

ВІД ДАВНІХ-ДАВЕН
ДО СУЧАСНОСТІ

Київ
“Техніка”
2009

УДК 52
ББК 22.61
К69

Книжка рекомендована до друку Вченою радою
Головної астрономічної обсерваторії НАН України

Рецензенти: доктори фіз.-мат. наук І. А. Климишин, Б. С. Новосядлий, А. І. Яценко;
кандидати фіз.-мат. наук М. М. Ковальчук, Г. У. Ковальчук

Корсунь А. О.

К69 Вимір часу від давніх-давен до сучасності. — К.: Техніка, 2009. — 176 с.
ISBN 978-966-575-164-9

Наведено огляд історії розвитку астрономічних і фізичних систем та шкал часу. Стисло розглянуто деякі аспекти філософських пошуків сутності часу. Основна увага приділена проблемам вимірювання часу від давніх-давен до сучасності, що пов'язані з обертанням Землі навколо своєї осі та навколо Сонця, а також з явищами, зумовленими електромагнітними коливаннями внаслідок квантових переходів електронів у атомах.

Книжка розрахована на широке коло читачів — від науковців до аматорів астрономії, студентів вузів та школярів старших класів.

УДК 52
ББК 22.61

ISBN 978-966-575-164-9

© Корсунь А. О., 2009

ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ 100-Й РІЧНИЦІ
ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ
АКАДЕМІКА ЄВГЕНА ПАВЛОВИЧА ФЕДОРОВА
(1909–1986) —
ВЧЕНОГО, ВЧИТЕЛЯ, ОСОБИСТОСТІ

ВСТУП

Метою цього видання є висвітлення на основі багатьох літературних джерел пошуків сутності часу та методів його вимірювання від давніх-давен до сучасності.

Спочатку нагадаємо визначення слова «час» за Словником української мови (1980): «Час: 1. *філос.* Одна з основних об'єктивних форм існування матерії, яка виявляється в тривалості буття... 2. Тривалість існування явищ і предметів, яка вимірюється століттями, роками, місяцями, годинами, хвилинами і т. ін... 3. Проміжок, відрізок у послідовній зміні годин, днів, років і т. ін., протягом яких що-небудь здійснилося, здійснюється чи здійснюватиметься... 4. Історичний період у розвитку природи і людства; визначена епоха або окремий етап у житті певного народу, держави, суспільства... 5. Сприятливий, потрібний момент... 6. Проміжок у послідовній зміні годин, днів, не зайнятий основною роботою, справами, вивільнений для відпочинку, дозвілля тощо... 7. *лінг.* Граматична категорія, що виражає відношення дії чи стану до моменту мовлення...».

А ось як термін «час» визначається в сучасних довідниках:

«Час — одне із основних понять фізики і філософії, одна з координат простору-часу, вздовж якої протягнуті світові

лінії фізичних (матеріальних) тіл, а також і свідомість.

У класичній фізиці час — неперервна величина, завжди апіорна характеристика світу, нічим не обумовлена. До основи виміру береться якась послідовність подій, яка вважається безсумнівно правильною і яка відбувається через рівні інтервали часу, тобто періодично. На цьому принципі й засновані годинники.

У спеціальній теорії відносності ситуація кардинально змінюється. Час сприймається як частина єдиного простору-часу... Можна казати, що час стає четвертою координатою... «Швидкість течії часу» стає поняттям «суб'єктивним», залежним від системи відліку. Ситуація ускладнюється у загальній теорії відносності, де «швидкість течії часу» залежить також від близькості до тіл, що гравітують.

Попри кардинальні зміни ролі часу у теорії відносності, відповіді на питання «яка природа часу?» немає. Немає також відповіді на питання, чому час безупинний, а не дискретний і чому ми живемо у світі з одновимірним часом. Втім, у сучасній математичній фізиці вже робляться перші спроби відповісти на ці питання» (<http://wikipedia.org/wiki/>).

Отже, стосовно визначення терміну «час» є певна ясність, а щодо визначен-

ня фізичної суті часу (природи часу), то вона ще досі не з'ясована.

Вважається, що час має дві головні властивості: *якісну і кількісну*.

Найважливішою характеристикою першої є його необоротний біг, так звана стріла часу. Час не стоїть, він незмінно плине від минулого через сучасність у майбутнє. Минуле ніколи не повертається, ми не спроможні його зупинити, ми лише можемо впливати на майбутнє. Так, час ділиться на минуле, сучасне і майбутнє і ці три його частини ніколи не існують разом. Це дало підставу Г. Лейбніцу (1646–1716) сказати, що час є *порядок несумісних можливостей*.

Таємниця часу цікавила розум людства з давніх-давен. Проте і досі справедливим є вислів давньогрецького вченого Аристотеля (384–322 рр. до н. е.): *«Серед невідомого в навколишній природі найневідомішим є час, бо ніхто не знає, що це таке і як ним керувати»*. У тій формі, в якій час входить у закони фізики — від класичної до релятивістської та квантової — він не містить у собі різниці між минулим і майбутнім. Справді, в ці закони час входить у вигляді t^2 , а отже, t і $-t$ є симетричними і рівноправними. Але ж ми знаємо, що в усіх явищах минуле і майбутнє відіграють різну роль. Яким же чином стріла часу може виникнути з того, що фізика описує світ симетричним учасі? У цьому і є *парадокс часу*.

Безпосередній вплив астрономії на буденне життя людства виявився в тому, що астрономія надала спосіб вимірювання часу: упродовж майже всієї історії людства вимірювання часу базувалося на астрономічних спостереженнях. *Можна стверджувати, що хоча філософи й досі не з'ясували, в чому ж сутність часу, проте астрономи (а згодом і фізики) навчили людство його точно вимірювати*.

Астрономічні методи визначення часу ґрунтуються на спостереженнях небесних тіл впродовж великого періоду історії людства, фізичні методи лічби часу з'явилися лише в 1955 р.

Кількісна (або метрична) властивість часу описується зазвичай певними одиницями вимірювання (наприклад, секунда, година, рік тощо). Ця властивість часу на сьогодні вже досить добре вивчена, її характеризують системи та шкали часу.

Поділ на системи та шкали часу досить умовний. У деяких наукових джерелах використовують поняття і системи, і шкали часу, в деяких — лише шкали часу. Автор вважає, що поняття системи часу більше характеризує метод визначення часу (астрономічний чи фізичний). Поняття шкали часу як неперервної послідовності інтервалів часу визначеної тривалості, що відраховується від початкового моменту, з'явилося після Міжнародної угоди про всесвітній час у 1884 р. Надалі шкали часу стали визначатися на основі міжнародних угод і є єдиними для користування в науці і техніці в усіх країнах світу.

Виникнення різних шкал часу не є примхою вчених. Кожна шкала часу використовувалася в свою епоху і відіграла певну роль. Нові шкали часу виникали у зв'язку з удосконаленням астрономічних спостережень і теорій, з новим визначенням секунди, але раніш сформовані шкали часу не зникали.

Різні шкали часу базуються на різних фізичних явищах і зберігають свої особливості. *Весвітній час* (UT) відображає обертання Землі навколо своєї осі і визначає ритмічність життя на Землі.

Ефемеридний час (ET), який застосовувався в ефемеридній астрономії в ХХ ст., пов'язаний із динамічною теорією руху тіл Сонячної системи.

Атомний час (АТ) — це суто фізичне визначення часу, яке існує лише з 1955 р. Цей час не пов'язаний з динамікою руху небесних тіл. Атомна секунда в Міжнародній системі одиниць (СІ) є сучасною стандартною одиницею вимірювання часу. В сучасній науці й техніці особливе значення має створення єдиної атомної шкали часу. Саме така шкала часу була прийнята в 70-х роках ХХ ст. згідно з міжнародною угодою і отримала назву *Міжнародного атомного часу* (ТАІ). Введення точної і рівномірної атомної шкали, з одного боку, та тісний зв'язок життя людини з нерівномірним всесвітнім часом, з другого, викликало необхідність знаходження компромісу між атомною і всесвітньою шкалами часу для прийняття його як практичного стандарту в користуванні. Таким компромісом є «гібридна шкала» — *шкала всесвітньо координованого* (узгодженого) *часу*, яка офіційно позначається як UTC (Coordinated Universal Time). В основі цієї шкали лежить атомна секунда, а хода часу узгоджується з всесвітнім часом. Сигнали точного часу передаються саме в шкалі UTC.

Широке застосування штучних супутників Землі, в першу чергу створення таких систем, як Глобальна позиційна система (GPS) та Глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС), спричинило створення атомних шкал на основі бортових атомних годинників: GPS-час та ГЛОНАСС-час. Вимоги до точності цих шкал надзвичайно високі: помилка в одну мільйонну частину секунди на борту одного із супутників збільшить похибку виданих GPS-приймачем координат до 250 м.

У 1984 р. на зміну ефемеридному часу прийшли більш точні релятивістські (динамічні) шкали часу, які визначалися в контексті загальної теорії віднос-

ності як часоподібні аргументи ефемерид руху космічних тіл. До появи загальної теорії відносності час вважали абсолютним та універсальним, однак для кожного спостерігача незалежно від фізичних умов.

Упродовж багатьох років релятивістська теорія «ігнорувалася» в практичній астрометрії, а отже, і при визначенні часу, оскільки її ефекти були занадто малі порівняно з точністю астрометричних спостережень.

Суттєве підвищення точності спостережень завдяки таким методам, як радіоінтерферометрія з наддовгими базами (РНДБ), лазерна локація Місяця і штучних супутників Землі (ШСЗ), радіотехнічні спостереження глобальних систем місцеположення (GPS), космічна астрометрія спонукало до більш точного визначення систем координат і шкал часу на новій сучасній теоретичній базі, яка ґрунтується на загальній теорії відносності в постньютонівському викладі.

Міжнародний астрономічний союз (МАС) своїми резолюціями, затвердженими на Генеральних асамблеях МАС, ввів у використання нові системи відліку та шкали часу. До останніх належать барицентричний динамічний час, барицентричний координатний час, геоцентричний координатний час, земний час.

Що стосується шкали пульсарного часу (PT), в основі якої лежить періодичність випромінювання унікальних небесних тіл — пульсарів, — то вчені поки що не дійшли певного висновку щодо її застосування.

У повсякденному житті ми не помічаємо таємничих викривлень часу, оскільки цей ефект стає помітним лише тоді, коли рух відбувається зі швидкістю, близькою до швидкості світла.

У загальній теорії відносності А. Айнштейн передбачив, що гравітація сповільнює час. Годинник іде швидше на горищі, ніж у підвалі, який ближче до центра Землі і тому зазнає більшого впливу поля земного тяжіння. Аналогічно у космосі годинник іде швидше, ніж на поверхні Землі. Цей спостережуваний ефект незначний, але його можна безпосередньо виміряти точними годинниками. Удосконалення вимірювання часу від примітивних сонячних годинників (гномонів) до атомних значною мірою визначає розвиток цивілізації на Землі. Сучасні високоточні годинники використовуються в більшості електронних пристроїв. Наша залежність від технологій вимірювання часу стала всеосяжною.

Книжка розрахована на широке коло читачів — від студентів, науковців та аматорів астрономії до читачів, яких цікавлять проблеми часу.

Автор щиро вдячний рецензентам: професору, д-ру фіз.-мат. наук І. А. Климишину (Прикарпатський університет ім. В. Стефаника), д-ру фіз.-мат. наук Б. С. Новосядлому та канд. фіз.-мат. наук М. М. Ковальчук (Астрономічна обсерваторія Львівського Національного університету ім. І. Франка), д-ру фіз.-мат. наук А. І. Яценко (завідувачу відділом астрометрії Головної астрономічної обсерваторії НАН України) та канд. фіз.-мат. наук Г. У. Ковальчуку (ст. наук. співроб. цієї ж обсерваторії), а також д-ру фіз.-мат. наук В. С. Кислюку, канд. фіз.-мат. наук О. М. Александрову і канд. фіз.-мат. наук Ю. І. Кудрі за уважне прочитання рукопису та зроблені суттєві зауваження і численні правки.

Автор також вдячний директорів Головної астрономічної обсерваторії НАН України, академікові НАН України Я. С. Яцківу за надану можливість написати цю книгу.

1. ПОШУКИ СУТНОСТІ ЧАСУ (ОГЛЯД УЯВЛЕНЬ ВІД АНТИЧНИХ ДО СУЧАСНИХ)

Що таке час? Я знаю. Якщо ж я захочу пояснити що це, то я не знаю.

Блаженний Августин (XV ст.)

Блаженний Августин намагався пояснити, чому так важко дати визначення часу: «Як можуть існувати два типи часу — минуле і майбутнє — коли першого вже немає, а другого — ще немає».

Науковці і досі прагнуть осягнути таємниці сутності часу. Існує багато гіпотез, проте відповіді немає, а деякі вважають, що її й не буде. В цьому розділі розглянемо лише деякі гіпотези, які, на думку автора, найцікавіші з цитованої літератури (И. Пригожин и др., 2003; Г. Рейхенбах, 1985; Уитроу Дж., 1984; С. Хокінг, 1990; С. Хокинг, Р. Пенроуз, 2000; А. Чернин, 1987; В. Казютинский, 2003; Світ науки, 2003; П. Дейвіс, 2003; Дж. Массер, 2003; К. Еззелл, 2003; В. Ендрюс, 2003; М. Кайку, 2005).

1.1. АНТИЧНІ ДУМКИ

Час за нами, час перед нами, а при нас його немає.

Античні мислителі

Суть часу намагалися пізнати ще в давні часи. Раніше за всіх і найбільш яскраво про час висловився Геракліт (кінець VI — початок V ст. до н. е.). Ось його знамениті думки: «В одну і ту ж річку не можна увійти двічі, бо води в

ній вічно нові», «Все тече, все змінюється», «Світ є сукупністю подій, а не речей». Наведені думки свідчать про розуміння вченим того, що фізичну суть світу складають зміни і розвиток.

У I ст. до н. е. в поемі «Про природу речей» Лукрецій, зокрема, писав: «І неминуче треба визнати, що час ніким відчуватись не може. Час сам по собі, поза рухом тіл і спокою»...

Грецькі філософи сперечалися про початок і кінець часу. Чи був початок часу? Чи закінчиться біг часу в майбутньому? Чи можна час взагалі зупинити?

Загалом у міркуваннях античних мислителів переважав погляд на час як біг по колу. Ось типовий вислів, який приписують античному філософу Проклу (410–485): «Час не подібний до прямої лінії, що безмежно продовжується в обох напрямках. Він обмежений і описує коло. Рух часу об'єднує кінець із початком і це відбувається нескінченно. Завдяки цьому час нескінченний». Така точка зору панувала віки. Її обмеженість передусім у тому, що в нескінченних поворотах часу виключалася будь-яка різноманітність: все, що відбувається тепер, вже колись відбувалося і при тому безліч разів у минулих циклах.

У майбутньому нічого, крім того, що вже відбулося, не слід і чекати. Наводи-

ли навіть оцінку цього, як його називали, «великого року» — 36 тис. років. Це таємниче число є в творах Платона (427–347 до н. е.) й інших великих мислителів. Концепція «великого року» була розповсюджена в давні часи і на Далекому Сході. Але там зазначали триваліший термін: від 8 до 200 тис. млрд. років.

Зрозуміло, чому виникло саме поняття циклічності часу: час сприймався через регулярні зміни неперервно повторюваних земних і небесних явищ. Циклічні астрономічні явища — обертання Землі навколо своєї осі і зміна доби; обертання Землі навколо Сонця і пов'язані з цим зміни пір року — це грандіозні годинники природи. За цими явищами люди в усі часи будували принципи відліку часу.

Упродовж середньовіччя траплялися зіткнення між циклічною концепцією і уявленням про час як лінійну послідовність. Але у середньовічних школах і серед учених, які перебували під впливом астрономії й астрології, все ще приділялася велика увага циклічному уявленню про час.

Проте невдовзі на зміну античним та середньовічним поглядам на час прийшли поняття класичної механіки, введені Г. Галілеєм (1564–1642) та І. Ньютоном (1643–1727).

Значний вплив на розвиток цих уявлень зробив винахід маятникових годинників. З тієї пори людство опанувало точний хід годинників, які могли безперервно «роками відтікувати» час. Це неминуче мало закріпити уявлення про універсальний, однорідний і неперервний час. Саме ґрунтуючись на цьому уявленні, за яким час зіставлявся з безперервною послідовністю моментів (подій), аналогічно геометричній лінії, І. Ньютон і вивів свої знамениті зако-

ни руху та гравітації. При цьому він допустив, що час є не лише універсальним, але й абсолютним за своїм характером, тобто існуючим сам по собі, незалежно від подій і процесів.

1.2. ЧАС У КЛАСИЧНІЙ МЕХАНІЦІ

Час є однорідним і неперервним.

Г. Галілей (1638)

Абсолютний, істинно математичний час, сам по собі і за своєю сутністю, без будь-якого відношення до чого-небудь зовнішнього, плине рівномірно і інакше називається тривалістю.

І. Ньютон (1687)

Як уже згадувалось, перша фізична концепція часу була створена працями Галілея і Ньютона. Нею стала класична механіка — наука про загальні рухи фізичних тіл. У класичній механіці сутність часу проявлялася в русі. В ній час подається як неперервний і рівномірний потік, необмежений в обох напрямках — у минуле і в майбутнє. Швидкість цього потоку вважалася скрізь однаковою і незалежною ні від чого у світі.

Знову нагадаємо визначення часу за Ньютоном з книги «Математичні начала натуральної філософії» (1687): «Абсолютний, істинно математичний час, сам по собі і за своєю суттю, без будь-якого відношення до чого-небудь зовнішнього, тече рівномірно й інакше зветься тривалістю».

Під «істинно математичним часом» Ньютон розумів той час, який фігурує в

математичних формулах законів руху. Абсолютний час служив нібито ідеальною мірою тривалості усіх фізичних явищ. Він ідеальний у тому сенсі, в якому ідеальний і прямолінійний рух. Строго рівномірного руху ми не спостерігаємо через тертя й інші обставини, які можуть вважатися випадковими. Також немає й ідеально рівномірного часу. Той час, який ми можемо реально виміряти, — це лише наближення до ідеального «істинного математичного часу». В цих вимірах нам заважають випадкові обставини, яких остаточно ніяк не позбутися і можна лише намагатися звести їх до мінімуму.

Про цей реальний час з помилками вимірювання Ньютон висловився так: «Відносний, уявний або звичайний час є або точна, або змінна, досягнута почуттями, зовнішня міра тривалості, що відбувається за допомогою будь-якого руху і яка використовується у звичайному житті замість істинного математичного часу, як-от: година, день, місяць, рік».

Ньютон вчив не довіряти такому, здавалося б, точному годиннику, як астрономічний годинник «Земля». Він писав, що ніхто не може поручитися за те, що він іде строго рівномірно. Скоріше навпаки — як і все в природі, обертання Землі не є ідеальним. «Бо природна сонячна доба, яка приймається при звичайному вимірі часу за однаково, насправді не є рівною одна з одною». І взагалі: «Можливо, не існує в природі такого рівномірного руху, яким час можна було б вимірювати з досконалою точністю. Всі рухи можуть прискорюватися або уповільнюватися, абсолютний час змінюватися не може». Навіть якщо нічим його виміряти, абсолютний час все ж існує, змінюється і тече ідеально рівномірно. Усякі виміри лише набли-

жаються певною мірою до абсолютного часу, а той час, який дають реальні годинники з їх зовсім не ідеальною точністю, Ньютон називав «відносним», «уявним», «буденним».

Фізичні тіла рухаються в просторі й часі. Через їх рух проявляються властивості часу.

Властивості часу за класичною механікою:

1. Час існує сам по собі і своїм існуванням не зобов'язаний нічому в світі.

2. Ходу часу підкоряються усі тіла природи, усі фізичні явища. Але самі ці тіла і явища ніяким чином не впливають на перебіг часу.

3. Всі моменти часу між собою рівноправні й однакові: час однорідний.

4. Хід часу всюди і скрізь у світі однаковий.

5. Хід часу однаково рівномірний у минулому, сучасному і майбутньому.

6. Час простягається від сучасного безмежно назад в минуле і безмежно вперед у майбутнє.

7. Час має один вимір.

8. Проміжки часу вимірюються, додаються і віднімаються як відрізки евклідової прямої лінії.

Сучасне розуміння світу набагато ширше і глибше, ніж у часи Ньютона. З'ясувалося, що різні властивості часу і простору, які стверджувалися класичною механікою, підлягають переосмисленню. Проте це не відміння класичну механіку. У своїй царині застосування — величезній, але обмеженій, як тепер розуміється, — вона (класична механіка) була і залишається цілком виправданою і повністю справедливою. Згідно з висловом А. Айнштейна (1879–1955), висновки, яких дійшов Ньютон при сучасному йому стані науки, були єдино можливими і, зокрема, виключно плідними. Класична механіка

як теорія механічних явищ певного кола і масштабу справно служить і до цього часу. Вона дає для повсякденної практики ясну і зручну фізичну концепцію часу.

1.2.1. ЧАС І ПРОСТІР

Простірі час можливі лише як частини ще більшої розмірності.

І. Кант (1755)

Рухатися — означає бути в певному місці і водночас не бути в ньому, — отже, знаходиться в обох місцях одночасно; в цьому полягає неперервність часу і простору...

Г. Гегель (1820)

Серед найважливіших понять, на яких будується вся система знань людства, є поняття простору і часу. Простір має суттєві переваги перед часом.

По-перше, простір можна бачити відразу і скрізь, тоді як час ми не бачимо і не відчуваємо, він нам дається не в цілому. Безпосередньо ми переживаємо лише короткочасну миттєвість, одну лише миттєвість «тепер» із усієї їх сукупності — низки миттєвостей.

По-друге, у просторі можна пересуватися в трьох вимірах. Але немає вільної можливості пересуватися в часі. Ми не можемо за нашим бажанням повернутися в минуле, залишитися назавжди в сучасності, зробити поїздки в майбутнє і повернутися назад.

В античному світі наука про простір сформувалася в III ст. до н. е., в часи Евкліда, і головним чином завдяки йому. Евклідова геометрія — наука про просторові відношення тіл у фізичному світі — і дотепер залишається основою

точних знань. Вона є взірцем ясності й цілісності усіх наук про природу.

Проблеми часу у філософії досліджувалися значно менше, ніж проблеми простору. Час розглядали як деяку впорядковану схему, подібну до простору, але простішу за нього, оскільки він має лише один вимір.

Щоб вказати положення тіла у просторі, потрібно задати його координати — три числа. Щоб вказати момент часу, достатньо назвати одне число. Цим виражається тривимірність простору і одновимірність часу. Реальний чотиривимірний світ фізичних явищ має розмірність $3 + 1$.

Незважаючи на те, що концепція простору і часу як чотиривимірного розмаїття виявилася дуже плідною для математичної фізики, її ефект у теорії пізнання звівся до того, що вона лише заплутала проблему. Називаючи час четвертим виміром, дехто з учених надавав йому риси таємничості.

Як писав німецький філософ Р. Рейхенбах (1881–1953) у книжці «Філософія простору і часу» (рос. переклад 1985 р.), дуже важливо застерегти від такого помилкового трактування математичних понять. Додаючи час до простору як четвертий вимір, ми жодною мірою не позбавляємо його специфічності як часу. Об'єднуючи простір і час у чотиривимірному розмаїтті, ми лише висловлюємо той факт, що для визначення певної світової події потрібно чотири числа, а саме: три числа для просторових вимірів і одне — для часового. Таке упорядкування елементів, кожний з яких задається чотирма умовами (координатами), завжди може бути математично зрозумілим як чотиривимірний многовид.

Сучасні уявлення про простір набагато складніші: фізики-теоретики роз-

глядають можливість існування багатовимірного простору. Такі міркування можна знайти в книжці науковця зі світовим ім'ям М. Кайку «Гіперпростір» (2005). Проте в передмові до цієї книжки відомий український фізик-теоретик, д-р фіз.-мат. наук І. Вакарчук, рекомендує книгу як прекрасний багатоплановий детектив, застерігає молодих учених не починати з «усього» (гіперпростору), не маючи за собою глибоких досліджень бодай в одному-двох напрямках.

Щодо оцінки «Гіперпростору», то про це красномовно свідчать такі слова І. Вакарчука у передмові до названої книги: «Давні прагнення вчених написати теорію “Всього” ґрунтуються на відчутті єдності світу, вони стали можливими після створення загальної теорії відносності та завдяки знахідці фізиків, що фундаментальні сили природи можна об'єднати виходом у гіперпростір, тобто у простір з багатьма вимірами. Саме про це йдеться у книжці “Гіперпростір” американського фізика-теоретика, блискучого популяризатора науки М. Кайку. Автор жваво і колоритно подає історичний нарис розвитку уявлень про вимірність простору та поступове запровадження у фізику ідеї багатовимірності з першою оригінальною вдалою спробою Т. Калуци — М. Клейна 20-х років минулого століття об'єднати п'ятим виміром електромагнітну та гравітаційну взаємодії».

Подальший виклад — це величаво ода квантовій теорії поля в десятих вимірах як найбільш просунутій на час написання книжки, яка об'єднує гравітацію, електромагнетизм, слабку та сильну ядерні взаємодії. Послідовнішою і повнішою є одинадцятимірною теорією, хоча, на наш погляд, теорія

“Всього” не могла б обмежуватися кількістю вимірів, а сховані, компактифіковані вимірності мали б виявляти себе опосередковано тонкими, мерехтливими деталями спостережуваних явищ, які за “кінчик хвоста” можна “витягнути” доступними нам сьогодні інструментальними можливостями».

1.2.2. ЧАС І РУХ

Час — це кількість рухів.

Аристотель (384–322 до н. е.)

Дискусії про зв'язок часу і руху тривають упродовж багатьох століть. Платон вважав, що час і рух, особливо рух небес, — це одне і те саме, що вони тожні один одному. Таку крайню точку зору заперечував Аристотель, найзнаменитіший учень Платона. Він вважав, що час і рух, хоч би і рух усього Всесвіту, — це різні речі. І справді, про час ми робимо висновок через рух, а самі ці рухи відбуваються у часі. Але рух може бути швидким чи повільним, його можна перервати або відновити і зупинити. Тіла можуть рухатися або перебувати у спокої. А час завжди тече, його хід не можна ні перервати, ні знову відновити.

На думку Аристотеля, зв'язок часу і руху такий, що час є мірою руху: «час є кількість руху». Час визначає один за одним послідовні стани руху. Завдяки часу ми маємо кількісну міру руху і можемо, наприклад, з'ясувати, який рух швидший, а який повільніший. Ми б, напевно, сказали про це так: час дає рухові швидкість, і за значенням швидкості, за цим числом, ми робимо висновок про рух, про його швидкість. Через кілька століть після Аристотеля про це писали так: якщо

небеса зупинять рух, але гончарний круг буде продовжувати крутитися, можна сподіватися, що кожний його оберт буде відображати і відмірювати ходу часу. (А. Чернин, 1987).

І в ХХ, і на початку ХХІ ст. думки про сутність часу майже не змінилися. Г. Стікс пише: «Темп життя невпинно зростає, але повне розуміння часових понять нам недоступне». Проте, на його думку, дещо змінилося поняття про одночасність: «Інтернет позбавив нас радостей очікування “прибуття експресу”. У світовій мережі все відбувається одночасно; користувачі в Нью-Йорку чи Даккарі є свідками оновлення веб-сторінки в один і той самий момент часу. По суті час переміг простір» (Г. Стікс, 2003). Все ж це зауваження більше стосується технічних можливостей передавання інформації.

1.3. ЧАС У ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ. СВІТОВА ЛІНІЯ

Люди, як ми, що вірять у фізику, знають: відмінність між минулим, теперішнім і майбутнім — це лише надзвичайно стійка ілюзія.

А. Айнштайн (1948)

Класична механіка зафіксувала і описала ті властивості часу, які піддаються безпосередньому сприйняттю в повсякденному досвіді. Час у класичній механіці — це час макросвіту — світу, мірою і масштабом якого є сама людина і навколишня природа. Мікросвіт, світ атомів і елементарних частинок, був ще недосяжним для науки.

Абсолютний час, не підвладний ніяким впливам, має раз і назавжди заданий темп — це вихідна аксіома класичної механіки. Успіхи класичної механіки в поясненні явищ макросвіту розглядалися як підтвердження аксіоми абсолютного часу.

Властивості часу, які були встановлені і перевірені класичною механікою в русі макроскопічних тіл, не підлягають відміні або перегляду. Та вже основоположники класичної механіки розуміли, як ще дуже далеко до досягнення його глибинного фізичного змісту. Новий крок на цьому шляху зроблено на початку ХХ ст. зусиллями А. Айнштайна та інших фізиків і математиків, праці яких підготували появу теорії відносності, що стала основою сучасного світогляду.

Геніальні праці А. Айнштайна збагатили науку двома фізичними теоріями — спеціальною теорією відносності (СТВ) та загальною теорією відносності (ЗТВ).

Класична механіка діє лише в макросвіті, обсяг її застосування істотно обмежений, бо, по-перше, швидкості рухів, які вона досліджує, мають бути малими порівняно зі швидкістю світла. По-друге, сили тяжіння, що керують рухом тіл, мають бути слабкими, щоб вони не могли розігнати ці тіла до швидкостей, які сумірні зі швидкістю світла.

Теорія відносності вийшла за ці межі, розширила поле діяльності фізики на Мегасвіт. Вона не відкинула класичну механіку, а включила її в себе як часткову теорію, що діє при обмежених швидкостях і силах тяжіння. Теорія відносності виявила нові властивості часу.

Як і в класичній механіці, ці властивості передусім проявляються через рух фізичних тіл. Але тут час виявився тісніше пов'язаним із простором, разом з яким він створює єдиний чотиривимір-

ний світ, в якому відбуваються усі фізичні явища. Ця єдність часу і простору виявляється тоді, коли швидкості тіл наближаються до швидкості світла.

У теорії відносності час не є абсолютним. По-перше, абсолютний зміст втрачає поняття одночасності. В класичній механіці дві події, одночасність яких зафіксована різними годинниками, залишаються такими ж, навіть якщо вони рухаються одна відносно іншої. Теорія відносності стверджує, що це не так: те, що вважається одночасним за одним годинником, не є таким за іншим, якщо годинники рухаються один відносно одного.

По-друге, сам темп часу тепер залежить від руху і тому стає відносним. Годинники, які рухаються відносно нас, завжди здаються нам такими, що відстають. Це означає, що час, який ними вимірюється, уповільнився. Звичайно, в цьому разі ефект буде помічено лише при великих швидкостях.

Нарешті, по-третє, час виявляється таким, що підлягає дії сил тяжіння, які впливають на його темп. Там, де є сили тяжіння, час тече повільніше, ніж за відсутності цих сил. Різниця в темпі часу практично непомітна при земному тяжінні, але вона тим більша, чим сильніше тяжіння. За наявності дуже великого тяжіння, наприклад поблизу чорної діри, темп часу настільки уповільнюється, що час ніби зупиняється.

Теорія відносності дає повне уявлення про те, як і від чого залежить темп часу і хода годинників, якими вимірюють час. Вона уможливила побудови фізико-математичних моделей, що описують час і простір Всесвіту в цілому. На її основі А. Фрідман (1888–1925) передбачив загальну нестатичність Всесвіту, а врахування ним даних астрономії дало змогу встановити, що розширення Все-

світу (*космологічне розширення*) триває близько 15 млрд років.

Так у фізиці з'явилася космологічна шкала часу, яка визначила темп еволюції Всесвіту. Вік нашої Галактики на декілька (3 або 5) мільярдів років менший за вік Всесвіту. Сонце і Земля ще молодші — їм близько 5 млрд років. Всесвіт у цілому старший від галактик, зір, планет, а також і самих атомних ядер і елементарних частинок, з яких складаються всі його тіла і системи.

Отже, класична фізика об'єднала час і простір: вона пов'язала їх через рух. Історію руху тіла в просторі можна уявити як сукупність усіх точок на лінії, що проходить через ряд подій, — точок з чотирма координатами. Лінію, яка утворюється усіма подіями-точками, в історії тіла названо *світовою лінією*.

У теорії відносності світова лінія — це геометричний образ траєкторії матеріальної точки в просторі-часі або в еквівалентному йому «просторі Мінковського». Поняття простору-часу було введено в 1908 р. Г. Мінковським (1864–1909). В ньому точки відповідають подіям у спеціальній теорії відносності. Сам вчений писав, що відтепер поняття простору самого по собі і часу самого по собі приречені на відмирання і перетворення у бліді тіні, і лише об'єднання цих двох понять збереже незалежну реальність. Формула світової лінії Мінковського така:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Світова лінія не може повернути з майбутнього назад у минуле або в сучасне. Події минулого і майбутнього розташовані вздовж світової лінії раз і назавжди. Їх порядок, їх проходження одна за одною ніяк не змінити, не повернути, не переплутати.

У жодній системі відліку жодна подія не випадає зі своєї світової лінії, і всі вони зберігають незмінно свою чергу.

Порядок подій на світовій лінії не відносний, а абсолютний. Тому абсолютними є і поділ подій нашої історії на минуле і майбутнє.

Цікаву філософську думку щодо світової лінії кожної людини висловив М. Кайку: «Наша світова лінія не має ні початку, ні кінця». Він також зауважив, що якщо хтось дорікає нам за ледарство (наприклад, не подолали жодної відстані у просторі), то можемо з повним правом відповісти: «Згідно з айнштайновою теорією відносності ми креслимо свою світову лінію в чотиривимірному просторі-часі». Отож, як сказав поет, «спокій нам лише сниться».

1.4. ЧАС У КВАНТОВІЙ ТЕОРІЇ

Час — форма існування матерії, яка проявляється в послідовності зміни і тривалості подій.... Досвід фізики ХХ ст. вчить, що не існує часу «самого по собі». Немає часу, який існував би без зв'язку з тим, що відбувається у світі. Час завжди і скрізь виступає не «взагалі», а конкретно — у кожному фізичному явищі він свій. Це саме той час, який триває упродовж певного явища у певному місці простору. Час несе на собі найважливіші риси цього явища і сам слугує найважливішою його рисою.

А. Д. Чернін (1987)

Квантова теорія, друга велика теорія сучасності, разом із теорією відносності і в поєднанні з нею відкриває новий світ

у поглядах на властивості часу, особливо в мікросвіті.

Класична механіка дала теорію часу для макросвіту, теорія відносності — для мегасвіту, для Всесвіту в цілому. В мікросвіті без квантової теорії не обійтися, адже тут квантові явища відіграють ключову роль.

Роль квантових ефектів саме тоді значна, коли масштаби часу (і простору) є типовими для мікросвіту. Так було в перші миттєвості космологічного розширення, коли вік Всесвіту складав надзвичайно малі частки секунди (близько 10^{-43} с), отже, біг часу на самому початку був, імовірно, не неперервним, а квантовим.

Отже, тоді існували такі найменші його відрізки, що в межах кожного з них неможливо було розглядати інші окремі послідовні частинки. Кожний відрізок часу виникав одразу як ціле, подібно до кванта світла, який випромінюється атомом. Всередині такого «кванта часу» не мають сенсу поняття «раніше» і «пізніше». З початкової космологічної сингулярності час витікав не суцільним потоком, а нібито окремими поштовхами.

І нарешті, квантові ефекти в ході часу змінюють уявлення про причинність. Згідно з теорією відносності, жодна подія у фізичному світі характеризується моментом часу, в який вона трапилася, і трьома просторовими координатами місця, в якому подія відбулася. Ці чотири числа визначають подію як точку в чотиривимірному просторі-часі. Але квантові ефекти не дають змоги вмістити подію в точку. Будь-яка подія, яка розглядається у квантовій теорії, має певну протяжність у часі і просторі — вона не може бути точковою. Точка-подія розмивається в пляму (точніше, в чотиривимірний об'єм), розміри якої диктуються квантовою невизначеністю.

Мабуть, немає нічого дивного в тому, що час мікросвіту відрізняється від звичайного часу. Сам мікросвіт суттєво відрізняється від світу «звичайних» тіл. Час неможливо розглядати незалежно від тих явищ, які описуються за допомогою часу. У властивостях часу відбиваються властивості цих явищ.

Теорія відносності досить повно виявила свої можливості у вивченні часу. Квантова теорія теж зробила немало. Але якщо результати теорії відносності строги, доведені до повної кількісної точності, то висновки квантової теорії щодо властивостей часу мають здебільшого попередній, орієнтовний, якісний характер. Наприклад, все ще немає строгого кількісного формулювання того, що треба розуміти під причинністю в області квантових явищ. А з цим у фізиці пов'язано цілий комплекс складних і глибоких проблем, які ще чекають на своє вирішення.

1.5. ХВИЛІ ЧАСУ? АТОМИ ЧАСУ?

Я впевнений, що наше сучасне уявлення про фізичну реальність, особливо в тому, що стосується природи часу, потребує докорінного перегляду, мабуть, навіть більш радикального, ніж той, що був покликаний до життя сучасною теорією відносності й квантовою механікою.

Р. Пенроуз (2003)

Дві великі фізичні теорії — загальна теорія відносності та квантова теорія — з моменту їх виникнення шукали точ-

ки дотику одна з одною. Перша теорія, як відомо, підходить до фізичного світу з боку найбільших його масштабів, друга — з найменших. Побудова єдиної фізичної картини світу потребує їх об'єднання. Це одне з першочергових завдань сучасної фізики.

Проте досягнення на стику цих теорій все ж існує — це квантова картина гравітаційних хвиль, хвиль простору-часу. Гравітаційні хвилі розповсюджуються з граничною швидкістю — зі швидкістю світла і виникають від переміщення мас. При таких переміщеннях викривлюється простір-час. Ці зміни і передаються, переносяться гравітаційними хвилями — вони «відриваються» від мас, які рухаються, і розходяться в чотиривимірному світі як кола на воді від кинутого каміння. Наведене порівняння образне, не буквальне. Насправді — це поширення збурення метрики простору-часу.

Джерелом гравітаційних хвиль можуть бути потужні космічні вибухи, які супроводжуються переміщенням значних мас. Їх можуть випромінювати і просто подвійні зоряні системи — зв'язані пари зір, кожна з яких обертається навколо спільного центра мас системи, або ж дві нейтронні зорі, що утворюють пару розміром всього 10–20 км. Гравітаційне випромінювання стало можливим для спостереження.

Як відмічають фізики-теоретики, наслідком втрати енергії на гравітаційне випромінювання є зменшення орбітального періоду в системі двох тіл, які обертаються одне навколо одного. Ефект рееструють, зокрема, в русі подвійної зорі, одним з компонентів якої є пульсар PSR 1913 + 16, відкритий та досліджений Р. Хулсом і Дж. Тейлором (Нобелівська премія 1993 р. з фізики). П'ятнадцятирічні спостереження пульсара дали

можливість непрямим чином підтвердити існування гравітаційного випромінювання. Передбачення ЗТВ збігається зі спостереженнями в межах експериментальної похибки (менше 0,5 %).

А тепер уявімо собі, як поводитися б годинники, які опинилися в полі гравітаційної хвилі? На них діяло б періодично змінне поле тяжіння, яке, у свою чергу, змушувало б годинники періодично уповільнювати хід, коли б на них нагромаджувалися один за одним «вали» — максимуми тяжіння у хвилі. При цьому сам хід годинників виявився б хвилеподібним, тобто ми зареєстрували б хвилі часу.

Про атомарність часу говорили і сперечалися ще стародавні мудреці. Щодо атомарності простору, то як масштабну одиницю фундаментальної довжини з тих чи інших міркувань пропонувались 10^{-13} , 10^{-15} , 10^{-18} , 10^{-35} м. Якщо така довжина й існує, то вона мала б бути найменшою із наведених. Підтвердити це можна такими міркуваннями. Вона має впливати із зіставлення трьох найважливіших констант — швидкості світла у вакуумі, гравітаційної сталої Ньютона і квантової сталої Планка.

Фундаментальній довжині, якщо вона існує, має відповідати і граничний проміжок часу. Якщо зупинитися на фундаментальній довжині 10^{-35} м, то відповідний проміжок часу становить 10^{-43} с. Його отримують простим діленням цієї довжини на швидкість світла. Але чи буде це атомом часу? Якщо так, то це означало б, що час плине не плавно і неперервно, а окремими однаковими «поштовхами», як тече кров в артерії. У звичних умовах, а також в умовах мікросвіту ці поштовхи часу невідчутні через їх малу тривалість.

Отже, відповіді щодо реальності дискретності часу досі немає, бо не існує

ніяких шляхів для експериментальної перевірки цієї гіпотези.

В дусі космологічних міркувань «атом часу» треба розуміти як квантову невизначеність у момент початку розширення Всесвіту. Цей найменший відрізок часу має розглядатися як нероздільний — всередині нього неможливо виділити якісь окремі моменти, яким би відповідали певні «проміжні» стани Всесвіту. Хай це і не універсальний «атом часу», але це квантова міра точності, за якою ми можемо уявити інтервали часу в початковому Всесвіті. Початкового нуля часу, у точному значенні цього слова, очевидно, немає, як немає і нуля розміру. Всесвіт розпочався як квантова система, і квантові невизначеності склали саму суть її вихідних фізичних властивостей. Як писав про Всесвіт відомий англійський астрофізик-релятивіст С. Хокінг (1990): «Він просто повинен бути, і все!»

1.6. СТІЛА ЧАСУ? ПАРАДОКС ЧАСУ

Заперечення часу може бути актом відчаю або здаватися тріумфом людської думки, але це завжди заперечення реальності.

І. Пригожин, І. Стенгерс (2003)

Гіпотеза Больцмана. Знаменитий австрійський фізик Л. Больцман (1844–1906) понад 100 років тому висунув гіпотезу, що час і передусім напрямок його течії пов'язані з особливим типом фізичних явищ, які називають незворотними. За його припущенням, незворотні явища охоплюють всі тіла фізичного

світу і весь Всесвіт в цілому; вони вносять у Всесвіт розвиток, створюючи тим самим час і задаючи його ходу і темп, і вказують, в який бік йому плинути. Так виникає безперервний потік часу, який зносить події у минуле і тягне нас у майбутнє.

На думку Л. Больцмана, перехід всього Всесвіту, як цілого, до теплової рівноваги (до «теплової смерті», як почали говорити пізніше) — єдиний напрям його розвитку. І те, що ми називаємо часом, є насправді просто відображенням у навколишньому світі цього нестримного «старіння» Всесвіту, його «прагнення» до свого природного кінця. За 100 років існування гіпотези Больцмана про неї багато думали, писали, сперечалися, але значного розвитку, не кажучи вже про докази, вона так і не отримала.

Гіпотеза Еддінгтона. Вираз «стріла часу» з'явився на початку ХХ ст. завдяки англійському фізику і астроному А. Еддінгтону (1882–1944), автору видатних праць з теорії відносності, космології, фізики зір. Ось міркування вченого: якщо пов'язувати плин часу з будь-яким фізичним явищем, то потрібно обирати явище, яке, з одного боку, має помітно відрізнитися від інших явищ природи, а з другого — повинно мати найзагальніший, всесвітній характер. Таким явищем — єдиним і загальним — є розширення Всесвіту.

Гіпотезу про зв'язок напрямку часу з розширенням Всесвіту висунув саме Еддінгтон. Все ж і проти цієї гіпотези щодо сутності часу є серйозні заперечення, які зводяться до того, що коли якесь явище визначає стрілу часу (тобто задає його хід і напрям), то повинен існувати спосіб «передати» про це інформацію усім без винятку годинникам у світі, явищам та усім процесам

у природі. Проте такого засобу немає, бо немає у світі загального «розтягання» віддалей і довжин. Розміри планет і Сонця, радіус Сонячної системи не зростають з часом — вони ніяк не відчують далеких рухів галактик. Загальне космологічне розширення їм ніяк не передається, воно не впливає на них.

Гіпотеза Лапласа (1749–1828) полягає в тому, що в Т-інваріантному світі попередня подія вважається причиною наступної. А коли такі події міняються місцями, то ланцюжок подій начебто «розмотується» назад (А. Чернин, 1987). Ця гіпотеза не набула визнання.

Сучасні пошуки. Пошуки сутності часу тривають і в наш час. Про один із сучасних варіантів щодо спроби вирішення проблеми часу йтиметься далі.

Відомий англійський астрофізик С. Хокінг у своїй книжці «От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени» (1990) присвятив розгляду питання про стрілу часу окрему 9-ту главу. Зокрема, він пише: «Збільшення хаосу, або ентропії, з плином часу — це одне з визначень стріли часу, тобто можливість відрізнити минуле від майбутнього, визначити напрям часу».

Можна говорити принаймні про три різні стріли часу. По-перше, стріла термодинамічна, що вказує напрям часу, в якому зростає хаос, або ентропія. По-друге, стріла психологічна. Це напрям, в якому ми відчуваємо ходу часу, напрямом, в якому ми пам'ятаємо минуле, але не майбутнє. По-третє, стріла космологічна. Це напрям часу, в якому Всесвіт розширюється, а не стискається».

У цій же главі С. Хокінг, виходячи з умови відсутності меж у Всесвіті, а також із слабого антропного принципу,

намагається довести, що можна пояснити, чому всі три стріли часу мають однаковий напрямок і, більш того, чому взагалі повинна існувати стріла часу.

Велику увагу парадоксу часу та ролі хаосу в його вирішенні приділяв лауреат Нобелівської премії І. Пригожин (1917–2003).

Центральне місце в роботах І. Пригожина стосовно часу (зокрема, в книжці «Квант. Хаос. Время (К решению парадокса времени)», 2003, у співавторстві з І. Стенгерсом) займають питання стріли часу та парадоксу часу, а також ролі нестійких динамічних систем у розв'язанні цих питань.

Розглянемо точку зору І. Пригожина. Він підкреслює, що час — це фундаментальний вимір нашого буття. Проте у тій формі, в якій час входить у закони фізики — від класичної до релятивістської та квантової — він не містить у собі різниці між минулим і майбутнім. Справді, в ці закони входить t^2 , а отже, t і $-t$ є симетричними і рівноправними. Але ж ми знаємо, що в усіх явищах, чи то у фізиці, чи в космології, у хімії, біології чи в історії — минуле і майбутнє відіграють різну роль.

І. Пригожин розмірковував над проблемою так: «Яким чином стріла часу може виникнути з того, що фізика описує світ симетричним у часі? В цьому є парадокс часу...» Він вважав формулювання названого парадокса «яскравим проявом творчості і уяви». Ці обставини, відзначені І. Пригожиним, добре відомі фізикам. Їх неодноразово обмірковував А. Айнштайн, з котрим І. Пригожин увесь час полемізував. Наука звела час до геометричного параметра, писав І. Пригожин. Точку зору Айнштайна він цитував із великим жалем і розцінював як заперечення часу.

Для розв'язання парадокса часу І. Пригожин обрав шлях, який назвав «радикальним розривом із минулим». Він запропонував переглянути поняття фундаментальних законів природи. На його думку, поняття закону науки дісталося нам від XVII ст. Воно було сформульовано на основі вивчення простих систем, точніше «систем із періодичною поведінкою» (наприклад, рух маятника або планети). Але для сучасної науки цей закон можна розглядати лише як окремий випадок. Оскільки картина світу включає в себе нестійкість, сенс законів природи «корінно змінюється» порівняно з класичною наукою. Тепер вони виявляють потенційні можливості, або ймовірність.

Динамічний опис природи має бути доповнений статистичним. Класична механіка, вважає І. Пригожин, неповна, тому що не охоплює незворотні процеси, які пов'язані зі зростанням ентропії. В її концептуальній каркас треба включити нерівновагу: «У підсумку з'являться ньютонівські внески, що безперечно включаються в динаміку на рівні статистичного опису».

При такій інтерпретації симетрія між минулим і майбутнім зникає і на фундаментальному рівні стає зрозумілою природа стріли часу. Відкидається уявлення, що стріла часу має лише суб'єктивний характер. «Всі ми насправді діти стріли часу, еволюції, а не її творці», — писав І. Пригожин. В його міркуваннях про час є ще один суттєвий аспект. І. Пригожин ставить питання, яке розглядає як «глибоку дилему для всього людства»: чи майбутнє задано, чи воно у процесі безперервного становлення? Він обирає другу з названих альтернатив. Ймовірний характер майбутнього, тобто відсутність жорсткої визначеності явищ, впливає на розуміння свободи

людини, бо обґрунтовує для кожного з нас можливість вибору.

Сформульовані І. Пригожиним ідеї дали змогу йому говорити про «перевідкриття» поняття часу сучасною наукою. Час перестає бути просто деяким геометричним параметром. Незворотні процеси відіграють у природі не тільки дезорганізуючу, але і конструктивну роль. Як можна примирити подію Великого Вибуху із законами природи, які зворотні в часі і детерміновані, запитує І. Пригожин. Ось його думки з цього приводу: *«Всесвіт заглиблено в квантовий вакуум, і його народження відповідає не детерміністичному закону, а реалізовує деяку “можливість”»*.

Нізвідки не випливає, що відповідно до законів квантової гравітації не могла б відбутися множина інших можливостей. І. Пригожин вважав, що народження нашого Всесвіту більше не асоціюється із сингулярністю, а зумовлене нестійкістю — флуктуацією квантового вакууму «за наявності гравітаційних взаємодій». Великий Вибух — незворотний процес у повному розумінні цього слова.

Отже, Всесвіт за І. Пригожиним — це сильно невірноважена термодинамічна система з нестійкостями. Багато дослідників Всесвіту, обґрунтовуючи теорію Великого Вибуху, доходили висновку, що час повинен мати початок і, ймовірно, кінець. Та І. Пригожин думав інакше. Мегавсесвіту, локальну область якого утворює наш Всесвіт, потрібно, на його думку, приписати нескінченний час, кінець має лише вік нашого власного Всесвіту.

І. Пригожин не погоджувався з ідеєю С. Хокінга про те, що на початковому етапі розвитку Всесвіту втрачалася різниця між простором і часом, причо-

му час був «опросторованим». Після робіт Г. Мінковського ми знаємо, що І. Пригожин вважав так: простір і час не є незалежними сутностями. Та це зовсім не виключає наявність стріли часу, яка існувала ще до народження нашого Всесвіту і буде, на думку І. Пригожина, існувати вічно. Відомий вислів І. Пригожина: *«Час передує буттю»*.

Отже, парадокс часу почали осмислювати ще на початку ХХ ст. До цього часу закони динаміки сприймалися як ідеал об'єктивного знання. А оскільки з цих законів випливала еквівалентність між минулим і майбутнім, то будь-яка спроба надати стрілі часу певне фундаментальне значення наштовхувалася на опір як на загрозу ідеалу об'єктивного знання.

«Проте розділяти цю точку зору сьогодні неможливо», — вважав І. Пригожин. Наприкінці ХХ ст. народилася нова наука — фізика нерівноважних процесів, пов'язана з такими поняттями, як самоорганізація і дисипативні структури. Неможливо уявити собі життя в світі, в якому відсутні взаємозв'язки, що утворюються незворотними процесами. Отже, стверджувати, що нібито стріла часу усього лише зумовлена особливостями нашого опису природи, з наукової точки зору є абсурдним.

Парадокс часу не існує сам по собі. З ним тісно пов'язані два інші парадокси, які мають безпосереднє відношення до заперечення стріли часу: *«квантовий парадокс»* і *«космологічний парадокс»*. Далі процитуємо деякі висновки І. Пригожина та І. Стенгерс (2003):

«У квантовій механіці фундаментальний опис дається в термінах “хвильових функцій”. Принципова різниця між класичною динамікою і квантовою ме-

ханікою полягає в тому, що класичні траєкторії безпосередньо відповідають “спостережним”, тоді як квантово-механічні хвильові функції відповідають амплітудам імовірності. Щоб отримати самі ймовірності, потрібен допоміжний “колапс” (лат. *collapsus* — занепад) хвильової функції, який не входить до фундаментального рівняння квантової механіки (мається на увазі рівняння Шредингера, яке відіграє в квантовій механіці роль, подібну до тієї, яку рівняння Ньютона виконують у класичній динаміці).

Подвійність структури квантової механіки — хвильова функція і її колапс — спричинює концептуальні труднощі і суперечності, які продовжуються з моменту виникнення квантової механіки протягом багатьох років. Хоч квантову механіку вважали найбільш успішною з усіх існуючих фізичних теорій, їй так і не вдалося з’ясувати фізичну природу колапсу.

Багато фізиків дійшли висновку, що відповідальність за колапс несуть спостерігач і виміри, які він здійснює. В цьому й полягає *квантовий парадокс*, який вводить суб’єктивний елемент в наше описування природи.

Між парадоксом часу і квантовим парадоксом існує тісна аналогія. Обидва парадокси приписують нам вельми дивну роль. Людина відповідає і за стрілу часу, і за перехід від квантової «потенційності» до «квантової актуальності», тобто за всі особливості, пов’язані зі становленням і подіями в нашому фізичному описі.

Третій парадокс — космологічний. Сучасна космологія приписує нашому Всесвіту вік близько 15 млрд років. Всесвіт народився в результаті Великого Вибуху. Зрозуміло, що це була подія. Але в традиційне формування законів

природи подія не входить. Траєкторії або хвильові функції не починаються і не закінчуються. Ось чому гіпотеза Великого Вибуху поставила фізику «перед її найбільшою кризою».

С. Хокінг та інші космологи припустили, що Великий Вибух міг мати чисто геометричний характер. У геометричному Всесвіті час був би «акцидентом» (випадком). Космологічний час був би ілюзією; різниця між часом і простором, яка впливала із ЗТВ, виключалася шляхом введення «уявного» часу, який можна було б розглядати як реальний. Саме це мають на увазі, коли говорять про космологічний парадокс. Такий підхід привів би до остаточної ліквідації всякого зв’язку між буттям і становленням. Доречно знову згадати вислів С. Хокінга про Всесвіт: «Він просто повинен бути, і все!»

Щоб розв’язати проблему вказаних парадоксів, І. Пригожин і І. Стенгерс вводять поняття хаосу, який привносить імовірність у класичну динаміку. (Теорія хаосу, початок якої заклав А. Пуанкаре, була розвинута А. Колмогоровим). У такому контексті ймовірність виступає не як породження нашого незнання, а як неминуче визнання хаосу.

З точки зору динаміки область хаосу надзвичайно розширюється і містить в собі широкий клас класичних та квантових систем, в дійсності — всіх систем, які відповідають фундаментальному опису природи в термінах полів, що взаємодіють. Саме область хаосу, на думку І. Пригожина та І. Стенгерс, утворює основу для об’єднання властивостей мікросвіту і макросвіту, оскільки ця область вводить незворотність у фундаментальний опис природи: «Хаос привносить до включення стріли часу в фундаментальний динамічний опис».

1.7. МАШИНА ЧАСУ (ДЕЩО З ЦІКАВИХ МІРКУВАНЬ)

Відчуття часу включає в себе деяке розуміння не лише тривалості в часі, але також і різницю між минулим, сучасним і майбутнім. Існує певне свідчення на користь того, що сприйняття нами різних станів є однією з найважливіших психічних властивостей людини, яке відрізняє її від усього іншого живого світу. Бо ми маємо сильний доказ для припущення того, що всі представники живого світу, за виключенням людства, живуть у тривалій сучасності.

Дж. Уітроу (1979)

1.7.1. НАЙПРОСТІШІ МІРКУВАННЯ

Чи можливо побачити минуле? Чи здатні ми зазирнути в майбутнє? Здається, очевидно є негативна відповідь. А чи так все просто?

Ось з цього приводу найпростіші думки.

Ми бачимо різне минуле. Картину Сонця бачимо із запізненням на 8 хв, далекі квазари спостерігаємо такими, якими вони були майже 7–10 млрд років тому, коли ще не було ні Землі, ні Сонця... Чим далі від нас перебуває джерело світла, тим далі у глибину часу проникаємо поглядом. Сучасний телескоп, який дає змогу бачити далеке минуле нашого світу, — є наче справжньою «машиною часу».

А як же поринути у майбутнє? Одна з думок така: якщо ми кудись і рухаємося, то лише в майбутнє. Потік часу нестримний і він захоплює за собою все.

Ми можемо проникати у майбутнє — саме це ми постійно і робимо!

Розглянемо тепер серйозніші міркування щодо машини часу.

1.7.2. ЧИ МОЖЛИВА ПОДОРОЖ У ЧАСІ?

Зробити це нелегко, але... можливо.

П. Дейвіс (2003)

Переміщення в часі неможливе хоча б тому, що в нас немає нашестя туристів із майбутнього.

С. Хокінг (1990)

Якщо подорож у часі можлива, то закони причинності перестануть діяти. Вся відома нам теорія може теж втратити сенс.

М. Кайку

Подорож у часі — популярна науково-фантастична тема від 1895 р., коли Г. Уеллс написав роман «Машина часу». Але чи можна цього досягнути насправді? Довгий час ця тема не була предметом дослідження серйозної науки. Віднедавна вона стала популярною серед фізиків-теоретиків.

Наведемо деякі з міркувань П. Дейвіса, фізика-теоретика Австралійського центру астробіології при Університеті Маквері в Сідней, автора багатьох науково-популярних книжок з квантової теорії поля, проблем чорних дір і походження Всесвіту (П. Дейвіс, 2003).

Завдяки спеціальній теорії відносності А. Айнштейн виявив, що вимірвальний інтервал часу між двома подіями залежить від того, як рухається спостерігач. Інакше кажучи, два спостерігачі, які рухаються з різними швид-

костями, зафіксують різні тривалості часових інтервалів між двома однаковими подіями.

Цей ефект часто описують за допомогою «парадокса близнят». Один із близнів сідає в космічний корабель і летить до сусідньої зорі зі швидкістю, близькою до швидкості світла, розвертається і прямує назад до Землі. Припустимо, що його подорож тривала один рік, але коли він повернувся і вийшов з космічного корабля, то з'ясувалося, що на Землі минуло 10 років. А отже, його брат, який залишився на Землі, став на 9 років старший. Цей приклад наводять як ілюстрацію висновку одного з варіантів мандрівок у часі.

Ефект, відомий у науці як «розтягнення часу», можна спостерігати щоразу, коли два спостерігачі рухаються один відносно одного. У повсякденному житті ми не помічаємо таємничих викривлень часу, оскільки цей ефект стає помітним лише тоді, коли рух відбувається зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Навіть швидкість літака настільки мала, що сповільнення часу впродовж звичайного авіаперельоту не перевищує кількох наносекунд. Проте атомні годинники достатньо точні, щоб зафіксувати цей зсув і підтвердити, що в русі час справді скорочується. Тому подорож у майбутнє, навіть якщо воно й надзвичайно близьке, — доведений факт.

Щоб спостерігати помітні викривлення часу, потрібно вийти за межі повсякденного досвіду. Наприклад, деякі космічні промені зазнають значних викривлень у часі. Ці частинки рухаються зі швидкостями, настільки близькими до швидкості світла, що на «їхній погляд» вони перетинають Галактику за хвилини, хоча в системі відліку Землі їхня подорож триває де-

сятки тисяч років. Якби не було сповільнення часу, ці частинки ніколи не досягли б Землі.

Отже, швидкість — один зі способів стрибнути в майбутнє. Інший спосіб — гравітація. У загальній теорії відносності А. Айнштайн передбачив, що гравітація сповільнює час. Годинник іде швидше на горищі, ніж у підвалі, який ближче до центра Землі й тому розташований у полі більшого земного тяжіння. Аналогічно, годинник у космосі йде швидше, ніж на поверхні Землі. І знову ж таки спостережуваний ефект незначний, але його можна безпосередньо виміряти точними годинниками.

На поверхні нейтронної зорі гравітація настільки сильна, що час сповільнюється відносно земного на 30 %. Спостерігачеві на поверхні такої зорі події на Землі нагадували б прискорене відео.

Чорні діри — граничний варіант викривлення часу. На поверхні діри час для земного спостерігача застигає. Це означає, що, падаючи у чорну діру, мандрівник дуже швидко досяг її поверхні. Натомість у Всесвіті мине ціла вічність. Тому для стороннього спостерігача у зовнішньому Всесвіті ділянка всередині чорної діри лежить поза часовими межами. Якби астронавт зміг наблизитися досить близько до чорної діри і повернувся неушкодженим (фантастична перспектива!), то зробив би стрибок у далеке майбутнє.

Питання подорожі у минуле значно проблематичніше. Вважають, що сам А. Айнштайн не заперечував того, що розроблена ним теорія за певних обставин дає змогу подорожувати в минуле. Сучасні вчені намагаються розглянути це питання. Так, у 1948 р. відомий математик К. Гудель з Інституту перспективних досліджень у Пристоні (штат

Нью-Джерсі) розв'язав айнштайнівські рівняння для гравітаційного поля, що описували Всесвіт, який обертається. У цьому Всесвіті астронавт міг би подорожувати у просторі так, щоб опинитися у своєму минулому. Це відбувається внаслідок впливу гравітаційного поля на електромагнітні хвилі. Обертання Всесвіту примусило б світло (а відтак і причинні зв'язки між об'єктами) також обертатися. Це зумовило б рух матеріальних об'єктів по замкнених петлях у просторі, що були б водночас і часовими петлями, але так, що у безпосередній близькості до об'єкта швидкості в жодному разі не перевищували б швидкість світла. Розв'язок К. Гуделя сприймали як математичний курйоз. Зрештою, спостереження не дали жодних підтверджень обертання Всесвіту як єдиного цілого. Проте розв'язок продемонстрував, що теорія відносності не заперечує зворотного руху в часі.

Відомо з літературних джерел, що наприкінці життя А. Айнштайну подарували збірку статей про нього, серед яких був також і нарис К. Гуделя, де автор змалював космологічну модель, в якій людина могла б відправитися назад у своє минуле. Ця модель не викликала у А. Айнштейна особливого ентузіазму і у своїй відповіді він зазначав, що не може повірити в те, що кому-небудь пощастить «зателефонувати у своє минуле». Отже, для А. Айнштейна виявилася неприйнятною модель К. Гуделя, яка радикально підтверджувала саме його, А. Айнштейна, погляди.

М. Кайку пише: «Щоб повернути час у зворотний напрямок, потрібна така величезна концентрація матерії-енергії, що загальна теорія відносності перестає працювати і квантові поправки домінують над відносністю. Отже, остаточний вирок щодо подорожі в часі не може

бути винесений на підставі айнштайнівських рівнянь, які не діють у надзвичайно потужних гравітаційних полях, де квантова теорія могла б домінувати».

Подорож у минуле може мати чудернацькі наслідки, про що писали не лише фантасти, а й науковці. Створення машини часу могло б відкрити скриню Пандори причинно-наслідкових парадоксів. Наприклад, мандрівник у часі вирушає в минуле і випадково вбиває свою матір, коли та була ще маленькою дівчинкою. Чи має це сенс (додамо, що з усіх точок зору)?

Саме такі наслідки змусили деяких науковців повністю відкинути думку про реалізацію подорожі у минуле. С. Хокінг висунув гіпотезу «захисту хронології», яка забороняє виникнення причинно-наслідкових петель. Оскільки теорія відносності, як згадано, дозволяє такі петлі, то захист хронології вимагатиме втручання іншого фактора, що заважатиме подорожам у минуле. Що може ним стати? Можливо, тут будуть задіяні квантові процеси. Існування машин часу дасть змогу частинкам потрапляти у їхнє минуле. Математичні розрахунки підказують, що подальше збурення стане ланцюговим, створюючи неконтрольовану хвилю енергії, яка зруйнує тунель. Такий просторово-часовий тунель вперше описав у 1985 р. К. Саган у романі «Контакт». На відміну від чорної діри, яка пропонує подорож лише в один кінець, тунель має як вхід, так і вихід. У науково-популярній літературі такі тунелі іноді називають зоряними воротами. Просторово-часові тунелі природно вписуються в загальну теорію відносності, згідно з якою гравітаційне поле викривляє не лише час, але і простір.

Захист хронології все ще залишається гіпотезою, тому подорож у часі ніби-

то можлива. Ймовірно, остаточно цю проблему буде розв'язано після успішного об'єднання квантової механіки і теорії гравітації з використанням теорії струн та її доповнення (М-теорії).

Про тунельні машини часу пишуть і фізики, і фантасти, зокрема, П. Дейвіс (2003), М. Кайку (2005). Але, як влучно відмітив С. Хокінг: «Замість того, щоб сполучати теперішнє з минулим за допомогою тунелів, краще сполучити наш Всесвіт із безмежною кількістю паралельних всесвітів».

1.8. ПИТАННЯ Є, А ВІДПОВІДЕЙ НЕМАЄ (ПЛИН ЧАСУ, ЙОГО НЕЗВОРОТНІСТЬ)

На майбутнє ми надіємося, сучасне зневажаємо, ми прагнемо того чого немає, нехтуємо тим, що існує, так ніби те, що минає, може вернутися назад або напевно му- сить здійснитися сподіване.

Г. Скворода (1761)

У сучасній фізиці немає відповідника до перебігу часу. Навпаки, фізики наполягають на тому, що час узагалі не пливе, він просто існує. А деякі філософи стверджують, що саме поняття перебігу часу — абсурд, і розмови про ріку часу або його потік породжені непорозумінням.

П. Дейвіс (2003)

Спробуємо з круговерті цитованих думок стосовно сутності часу зробити деякі висновки.

Кожний історичний період має свої типові завдання, свого роду віхи, що вказують на невирішені проблеми.

Час має такі властивості, які заводять у глухий кут як теорію відносності, так і квантову теорію. Вони не можуть відповісти на дуже просте запитання: чому час плине?

Теорія відносності стверджує, що плин часу залежить від фізичних явищ, а квантова теорія доводить, що спостережуваний потік часу складається з окремих поштовхів.

Але що є причиною руху часу? Найімовірніше, вона не пов'язана ні з рухом тіл, ні з їх тяжінням.

Плин часу незворотний. Він має один напрям — від минулого в майбутнє, і ніякі фізичні дії на нього не можуть повернути час назад. Виникає питання: звідки така асиметричність? У жодних законах природи, які нам відомі серед «звичайних» тіл, таке не спостерігається. Здавалося б, має рацію І. Пригожин, думка якого була наведена вище. Проте існують і протилежні думки.

Зокрема, фізик-теоретик (Сідней) П. Дейвіс у журналі «Scientific American» (в українському перекладі «Світ науки», № 3–4 (19–20), 2003) висловив такі міркування: «Від усталеного минулого через чуттєво-осяжне теперішнє і далі, до невизначеного майбутнього, — у нас виникає відчуття, ніби час невблаганно пливе вперед. Але це відчуття оманливе... У сучасній фізиці немає відповідника перебігу часу. Навпаки, фізики наполягають на тому, що час узагалі не плине, він просто існує».

Ще одне цікаве запитання стосується числа вимірів часу. Як уже відзначалося, для задання положення тіла в просторі треба вказати три числа — його координати. Щоб визначити мо-

мент часу, достатньо назвати одне число. Звідси реальний чотиривимірний світ фізичних явищ має розмірність $3 + 1$. Проте чому простір тривимірний, а час одновимірний? Виявляється, якщо б просторових координат було не 3, а 4, то не існувало б замкнутих орбіт планет і Сонячна система не могла б утворитися. Вчені з'ясували, що тривимірність простору суттєво важлива для існування реального світу, в якому ми живемо. Це також стосується і структури атомів.

В одній із своїх статей А. Айнштайн писав, що коли математик чує про «чотиривимірне», його охоплює містичне почуття, подібне до того, яке збуджується театральними діями. І далі доповнює, що все ж не може бути нічого банальнішого, ніж думка про чотиривимірність світу. Чотиривимірність не означає нічого іншого, окрім того, що світ фізичних явищ складається з окремих подій, кожна з яких описується чотирма числами.

Число просторових змінних — виятково важливий факт природи. Це ж стосується і розмірності часу. Його одновимірність є важливим фундаментальним фактом. Правда, А. Еддінгтон висловив сміливу гіпотезу про те, що одновимірність часу — це властивість близької до нас частини світу. Він вважав можливим, що у віддалених від нас частинах світу час може виявитися не одновимірним, а, наприклад, двовимірним.

Історики науки відшукали в рукописах І. Канта вираз, співзвучний новим ідеям: «Простір і час можливі тільки як частини ще більшої розмірності». Про можливість багатовимірності простору розповідає в літературі захоплюючі розповіді (наприклад, наукова одіссея крізь паралельні світи в книжці М. Кай-

ку «Гіперпростір»), але про багатовимірність часу — уявлення значно обмеженіші.

Аристотель у своїй праці «Фізика», розмірковував про дивовижність часу, яка стосується того, що минуле вже пройшло, майбутнє ще не наступило, а сучасне не має тривалості, — що ж тоді залишається від часу? І ось як він закінчує свої міркування: «А що таке час і яка його природа, однаково не ясно як з того, що нам передано від інших, так і з того, що нам прийшлося розібрати».

А. Д. Чернін (1987) пише: «...ми все ж знаємо про час значно більше, ніж Аристотель. І наші знання безперервно розширюються. Вони будуть зростати і далі з проникненням фізики в усі більш тонкі і глибші властивості природи. Сама ж природа багатоманітна, змінна і невичерпна, разом з нею невичерпний за своїми проявами і час. Так що остаточної відповіді на питання “Що таке час?” не існує — і, звичайно, не може існувати».

Цитовані літературні джерела в основному підтверджують цю думку.

Цікаво зауважити, деякі вчені вважають, що час взагалі не існує як окрема субстанція. Наведемо цитату з книги А. Бича «Основы теории времени» (2005): «Есть изменяемость мира, порождающая различные длительности (предвремя) различных событий, обусловленные конкретными причинами: интенсивностью, мощностью, последовательностью и характером определенных взаимодействий. И есть время — как отражение (сосчитывание) этих длительностей. Нет времени-субстанции, нет и времени самостоятельного физического объекта. В этом нет никакой необходимости у природы, а значит, не должно быть и у нас — наблюдателей природы».

2. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ

Початок наукового мислення, яке вивело людину з тваринного стану, пов'язане з виміром часу.

*Г. Дільс, історик античної техніки
(2003)*

Невизначеність сутності часу не заважає людству вимірювати його з великою точністю. Діапазон визначення фізичного часу досить значний: від планківського часу 10^{-43} с, що вважається найкоротшим, до 10^{17} – 10^{18} с (десятки мільярдів років), з яким стикаються в космології.

З цього діапазону нас цікавить лише невелика частина, яка досяжна точному вимірюванню. Конкретніше, вона охоплює період від 10^{-15} с, що асоціюється з атомними стандартами, до періоду 10^{11} с, протягом якого велись астрономічні спостереження. Ці періоди пов'язані як з лабораторними експериментами, так і з динамічною астрономією, котрі в свою чергу, потребують часових стандартів, точніше, часової метрології.

Про історію становлення і розвиток цієї науки йтиметься далі.

При вимірюванні часу виникає два питання: яка тривалість проміжку часу між двома подіями і коли відбулася дана подія?

Щоб відповісти на перше запитання, потрібна одиниця часу, досить незмінна і зручна для користування. Це галузь *метрології часу*, до якої належать системи та шкали часу.

Щоб відповісти на друге запитання, потрібна постійно діюча система відліку проміжків часу від деякої початкової події до інших конкретних подій з оди-

ницею вимірювання, яка повторюється. Це галузь *хронології*, до якої належать календарі, епохи, ери.

Система лічби часу визначається астрономічним або фізичним явищем, на базі якого лічать час.

Астрономічна система лічби часу базується на спостереженнях астрономічних явищ (наприклад, у класичній астрометрії спостереження проходжень зірок через меридіан, затемнень тощо; в сучасній астрометрії — радіоінтерферометричні дослідження позагалактичних джерел випромінювань, лазерні вимірювання відстаней до Місяця і штучних супутників Землі, радіотехнічні методи, вивчення пульсарів тощо).

Фізична система лічби часу базується на фізичних явищах, зумовлених електромагнітними коливаннями внаслідок квантових переходів електронів у атомах.

Шкали часу задають міру і одиниці для вимірювання інтервалів часу (рік, місяць, доба, година, хвилина, секунда, частина секунди) у певній його системі.

Міжнародний консультативний комітет з питань радіо (International Radio Consultative Committee — CCIR) визначив шкалу часу як упорядкований набір шкалових маркерів разом із відповідною нумерацією («a time scale as an ordered set of scale»).

Відповідно до міждержавного стандарту (ГОСТ 8.567–99) шкала часу ви-

значається як «безперервна послідовність інтервалів часу певної тривалості, яка відраховується від початкового моменту. Для шкали часу встановлюється умовний нуль, одиниця величини і порядок коригування».

В Україні діє Державний стандарт України ДСТУ 2870–94 «Вимірювання часу і частоти (терміни та визначення)». У ньому дається таке визначення шкали часу: «Неперервна послідовність інтервалів часу визначеної тривалості, яка відраховується від початкового моменту».

Кожна система має відповідну їй шкалу часу. У книжці розглядаються ті шкали, які приймалися за Міжнародними угодами і є загальними у використанні в науці, техніці тощо.

Поділ визначень часу на «системи» та «шкали» досить умовний. У деяких наукових джерелах використовують поняття «системи часу», в деяких — «шкали часу» (Жаров, 2004). Ми вважаємо, що поняття «шкали часу» з'явилося після Міжнародної угоди про всевітній час у 1884 р., і надалі шкали часу стали визначатися на основі міжнародних угод.

Саме поняття «шкали часу» широко використовується в метрології та в наукових дослідженнях.

2.1. АСТРОНОМІЧНІ СИСТЕМИ ЛІЧБИ ЧАСУ

Ми сприймаємо час так, як його вимірюємо.

В. Ендрюс (2003)

Для вимірювання часу людство здавна використовує такі природні явища, як обертання Землі навколо своєї осі та обертання Землі навколо Сонця. З пер-

шим пов'язані вимірювання малих проміжків часу — доби (похідні — година, хвилина і секунда), з другим — вимірювання тропічного року.

Внаслідок обертання Землі навколо своєї осі через небесний меридіан проходять зорі, Сонце, будь-які об'єкти небесної сфери. Вимірювання часу зводиться до вимірювання кута між площиною небесного меридіана і колом схилення небесного тіла, тобто годинного кута. Вимірювання годинного кута точки весняного рівнодення Υ визначає зоряний час. Якщо спостерігається Сонце, то час, який визначається з цих спостережень, називається сонячним часом.

Оскільки і зоряний, і сонячний час залежать від обертання Землі, то ці системи часу пов'язані одна з одною точним математичним співвідношенням. Основним недоліком цих систем є їх нерівномірність як наслідок нерівномірності обертання Землі.

2.1.1. ЗОРЯНИЙ ЧАС

При вирішенні астрономічних задач зручно користуватися зоряним часом. *Зоряна доба* — це проміжок часу між двома послідовними верхніми кульмінаціями на одному і тому ж географічному меридіані однієї і тієї ж зорі або точки весняного рівнодення. За початок зоряних діб для кожного меридіана приймається момент верхньої кульмінації точки весняного рівнодення (точка Овна Υ).

Місцевий зоряний час s у даний момент дорівнює годинному куту t_{Υ} точки весняного рівнодення відносно меридіана місця.

Оскільки точка весняного рівнодення (або точка весни) Υ нічим на небі не

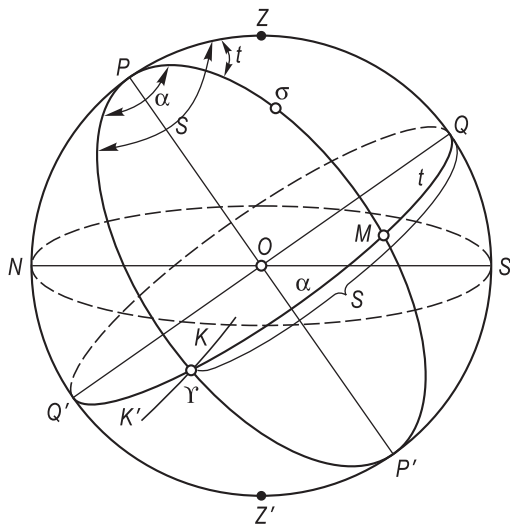


Рис. 2.1. Схема визначення зоряного часу $s = \alpha + t$ в екваторіальній небесній системі координат:

α — пряме піднесення світила σ ; t — його годинний кут; QQ' — небесний екватор; P — полюс світу; $P\sigma P'$ — меридіан світила; $PZQP'$ — небесний (астрономічний) меридіан

позначена, практично зоряний час вимірюють як суму прямого піднесення α будь-якої зорі та її годинного кута t (рис. 2.1):

$$s = t_{\gamma} = \alpha + t.$$

Місцевий зоряний час в один і той же фізичний момент для різних пунктів на Землі є різним, і це спричинює певні незручності при астрономічних спостереженнях та дослідженнях.

Виявилось зручним визначати зоряний час відносно одного і того ж меридіана, наприклад гринвіцького. Місцевий зоряний час гринвіцького (нульового) меридіана позначається S_0 (Greenwich Sidereal Time — GST). Взаємозв'язок місцевого зоряного часу s на довготі λ і S_0 описується таким співвідношенням: $S_0 = s \pm \lambda$.

Гринвіцький зоряний час S_0 на початок доби наводиться у всіх «Астрономіч-

них календарях» та «Астрономічних щорічниках».

Отже, відповідно до визначення зоряний час на меридіані Гринвіча дорівнює годинному куту t_{γ} точки весняного рівнодення:

$$S_0 = GST = t_{\gamma}. \quad (2.1)$$

Умовно точки весняного рівнодення (точки весни) поділяють на справжню та середню.

Справжня точка весни здійснює складний рух: вона переміщається в площині екліптики* зі швидкістю $50.26''$ за рік внаслідок загальної прецесії* по довготі і одночасно періодично коливається внаслідок нутації*.

Середня точка весни має лише прецесійний рух (нутація враховується) і визначає середнє рівнодення дати.

Відповідно до вищесказаного розрізняють типи зоряного часу справжній і середній (apparent and mean sidereal time). *Справжній зоряний час* на меридіані Гринвіча позначають GST (Greenwich Apparent Sidereal Time), *середній зоряний час* — GMST (Greenwich Mean Sidereal Time).

Різниця між справжнім і середнім зоряним часом називається рівнянням рівнодень (англ. «equation of the equinoxes», або скорочено « Q_{eq} »), ця назва також аналогічна назві «нутація за прямим піднесенням». Взаємозв'язок між справжнім і середнім зоряними часами такий:

$$GAST = GMST + Q_{eq}.$$

Зоряна доба поділяється на 24 зоряні години, година — на 60 зоряних хвилин, хвилина — на 60 зоряних секунд.

* Тлумачення слів, помічених зірочкою, наведено в «Словничку астрономічних термінів» у кінці книжки.

Тривалість 24 зоряних годин дорівнює 23 год 56 хв 04.091 с середнього сонячного часу. Із зоряних діб складається *зоряний рік*.

Зоряний час і годинні кути однаково відлічують від положення верхньої кульмінації точки весняного рівнодення.

Для вимірювання зоряного часу використовують зоряні годинники, які відрегульовані так, що кожну сонячну добу випереджають звичайні годинники на 3 хв 56 с.

2.1.2. СОНЯЧНИЙ ЧАС

Система сонячного часу визначається за допомогою геоцентричного годинного кута Сонця t_s . Розрізняють справжній і середній сонячний час (apparent, mean solar time). Вони пов'язані з добовим рухом центра диска справжнього (видимого) Сонця і деякої фіктивної точки, яка рівномірно рухається по екватору із середньою швидкістю видимого Сонця за рік по екліптиці. Ця точка називається *середнім екваторіальним Сонцем* або просто *середнім Сонцем*.

СПРАВЖНИЙ СОНЯЧНИЙ ЧАС

Місцевий справжній сонячний час m_s дорівнює геоцентричному годинному куту центра видимого диска Сонця t_s , який відлічується відносно меридіана місця спостереження, плюс 12 год:

$$m_s = t_s + 12 \text{ год.}$$

Момент верхньої кульмінації центра видимого диска Сонця на даному меридіані називається справжнім полуднем, а момент нижньої кульмінації — справжньою північчю.

Проміжок часу між двома послідовними нижніми кульмінаціями центра видимого диска Сонця називається справжньою сонячною добою. Подібно до того, як зоряний час вимірюють годинним кутом точки весняного рівнодення, справжній сонячний час вимірюють годинним кутом центра видимого диска Сонця.

Справжні сонячні доби не однакові. Це пояснюється, по-перше, тим, що Сонце рухається нерівномірно. Це є відображенням нерівномірного руху Землі навколо Сонця по еліптичній орбіті. По-друге, Сонце рухається по екліптиці, а годинний кут Сонця вимірюють по екватору.

Усе це спричиняє те, що справжні сонячні доби помітно різняться між собою. Різниця між найдовшою (23 грудня) і найкоротшою (16 вересня) справжньою добою досягає 51 с, і неможливо так відрегулювати годинник, щоб він точно показував справжній сонячний час. Тому і виникла потреба запровадити більш сталу одиницю часу, яка пов'язана із Сонцем і мало відрізняється від справжньої сонячної доби, оскільки все практичне життя людей залежить саме від сонячної доби. Так з'явилося поняття «середній сонячний час».

До 1925 р. справжню сонячну добу вимірювали від моменту верхньої кульмінації центра видимого Сонця на місцевому меридіані, а після 1925 р. її вимірюють від моменту його нижньої кульмінації.

СЕРЕДНІЙ СОНЯЧНИЙ ЧАС

При встановленні тривалості середньої сонячної доби замість центра справжнього Сонця використовують точку, яка рівномірно рухається по небесному екватору і одночасно з центром справжнього Сонця проходить точку весняного

рівнодення. Якщо n — середня кутова швидкість руху по кеплерівському еліпсу, L_0 — середня довгота Сонця в момент t_0 , то на момент t середня довгота

$$L = L_0 + n(t - t_0).$$

За центр середнього екваторіального Сонця приймається точка, яка рухається по небесному екватору так, що її пряме піднесення α_{mS} дорівнює довготі Сонця:

$$\alpha_{mS} = L = L_0 + n(t - t_0). \quad (2.2)$$

Повний оберт по екватору середнє екваторіальне Сонце робить за той же проміжок часу, що і Сонце по екліптиці. Аналогічно до справжньої доби визначається і середня сонячна доба.

Проміжок часу між двома послідовними нижніми кульмінаціями середнього екваторіального Сонця називається середньою сонячною добою. Час, який вимірюють зміною годинного кута середнього Сонця, називається середнім сонячним часом. Середню сонячну добу вимірюють від нижньої кульмінації середнього Сонця.

Середній сонячний час m на даному меридіані — це годинний кут t_s середнього екваторіального Сонця плюс 12 год:

$$m = t_s + 12 \text{ год.}$$

Середнє екваторіальне Сонце — це фіктивна точка, пряме сходження якої обчислюється за формулою (2.2), координати ж справжнього Сонця визначаються на основі теорії руху Землі і планет.

Система середнього сонячного часу використовувалася при складанні усіх астрономічних ефемерид до 1960 р. Особливу роль при цьому відігравав середній сонячний час нульового (гринвіцького) меридіана M , який отримав назву всесвітнього часу:

$$M = m + \lambda.$$

РІВНЯННЯ ЧАСУ

Різниця між справжнім m_s і середнім m сонячним часом називається рівнянням часу (equation of time):

$$\eta = m_s - m = \begin{cases} t_s + 12 - t_m, & \text{до 1925 р.} \\ t_s - t_m, & \text{після 1925 р.,} \end{cases}$$

де t_s , t_m — геоцентричні годинні кути відповідно видимого і середнього Сонця. Графік варіацій часу впродовж року на рис. 2.2.

Чотири рази на рік (приблизно 15 квітня, 15 червня, 1 вересня і 25 грудня) величина η стає рівною нулеві, змінюючись у межах від -14 хв близько 11 лютого до $+15$ хв близько 3 листопада.

Рівняння часу з точністю до $\pm 0,15$ хв можна записати так:

$$\eta = 9.5^m \sin 2L - 7.7^m \sin(L + 78^\circ),$$

де $L = 280^\circ + 0.9856^\circ N$ — середня довгота Сонця; N — кількість днів після 1 січня.

Наближена величина η складається з двох синусоїд: перша відтворює вплив нахилу екліптики і має піврічний період; друга, з річним періодом, пов'язана з нерівномірним обертанням Землі на орбіті.

З точністю $\pm 0.1^s$ на інтервалі 1900–2100 рр. рівняння часу η в хвиликах можна визначити за формулою (Ephemerides Astronomiques, 2001; Труды ИПА РАН, № 10, 2004, с. 64):

$$\begin{aligned} \eta = & -7.362 \sin g + 0.144 \cos g - \\ & - 8.955 \sin 2g - 4.302 \cos 2g - \\ & - 0.288 \sin 3g - 0.133 \cos 3g - \\ & - 0.131 \sin 4g - 0.167 \cos 4g - \\ & - 0.009 \sin 5g - 0.011 \cos 5g - \\ & - 0.001 \sin 6g - 0.006 \cos 6g, \end{aligned}$$

де g — середня аномалія Землі на її орбіті навколо Сонця; $g = 6.240\,060 + 6.283\,019\,552\,n$ рад; $n = (\text{JD} -$

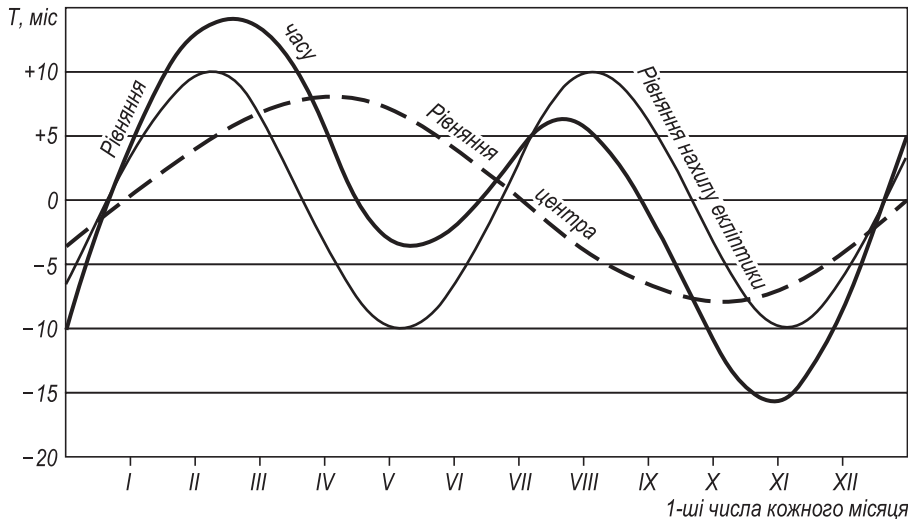


Рис. 2.2. Графік рівняння часу і його складові

$- 2\,451\,545) / 365.25$; JD — юліанські дні (так називаються дні, що рахуються від 1 січня 4713 р. до н. е.; 2 451 545 — кількість юліанських днів станом на 1 січня 2000 р. за григоріанським календарем).

На практиці η можна обчислити як різницю між справжнім сонячним часом і видимим прямим піднесенням (середнього) Сонця.

Якщо відомо рівняння часу, то можна перейти від середнього сонячного часу до справжнього і навпаки:

$$m = m_s - \eta, \quad m_s = m + \eta.$$

2.1.3. ТРОПІЧНИЙ І ЗОРЯНИЙ РІК

Для вимірювання тривалих проміжків часу крім діб (сонячних або зоряних) була введена ще одиниця часу — рік, яка пов'язана з рухом Сонця відносно зір.

Тропічний рік (від грец. τροπικος — повернення) — це проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра диска Сонця через середню точку весняного рівнодення Υ . Астрономічними спостереженнями встановлено, що тропічний рік дорівнює 365 дням 5 год 48 хв 46 с, або становить 365,2422 середніх сонячних діб. Тривалість його не залишається сталою, але змінюється вона несуттєво — всього лише на одиниці секунд за декілька тисячоліть.

Тривалість тропічного року визначається середньою довготою Сонця [див. рівняння (2.2)], яка відраховується по екліптиці від середньої дати весняного рівнодення. Вперше вираз для L отримав С. Ньюком у 1895 р. на основі аналізу близько 40 000 спостережень за Сонцем, виконаних протягом 140 років:

$$L = 279^\circ 41' 48.04'' + 129602768.13'' T + 1.089'' T^2, \quad (2.3)$$

де T вимірюється в юліанських століттях по 36 525 середніх сонячних діб від фун-

даментальної епохи JD(ET)2415020.0 = 1900, січень 0,12 год ET (ET — ефемеридний час*).

Згідно з (2.3) С. Ньюком (1835–1909) отримав вираз для прямого піднесення середнього екваторіального Сонця, яке задавало систему середнього сонячного часу:

$$\alpha_{mS} = 18^h 38^m 45.836^s + 8640184.542^s T + 0.0929^s T^2. \quad (2.4)$$

Проте вираз (2.4) через деякі припущення С. Ньюкома (він не замінив квадратичний член в α_{mS} при переході на систему астрономічних сталих 1897 р.) не відповідав ні середньому руху Сонця, ні рівномірному руху фіктивної точки на середньому екваторі, яка відповідала б рівномірній системі середнього сонячного часу.

У 1982 р. коефіцієнти формули С. Ньюкома для α_{mS} були змінені. Проте різниця старих і нових виразів залишається суттєво малою протягом декількох століть.

Використовуючи рівняння (2.3), можна отримати тривалість тропічного року. Початок цієї шкали відповідає моменту часу, коли середня довгота Сонця L , яка відраховувалася від дати середнього рівнодення, дорівнювала $279^\circ 41' 48.04''$. Оскільки протягом тропічного року середня довгота Сонця змінюється рівно на $360^\circ = 1\,296\,000''$, то, приймаючи, що швидкість зміни L дорівнює dL/dT в секундах дуги за секунду, можемо отримати тривалість тропічного року в секундах:

$$T_{tr} = \frac{1\,296\,000'' \cdot 36\,525.86\,400^s}{dL/dT} \approx \\ \approx 31\,556\,925.9747^s - 0.530332^s T.$$

При $T=0$ для епохи 1900 січень 0,12 год тривалість $T_{tr} = 31\,556\,925.9747^s \approx 365.242\,198\,79^d$.

Відповідно до залежності L від квадратичного члена $1.089'' T^2$ тривалість тропічного року повільно змінюється. Наприклад, для 2007 р.

$$T_{tr} = 365.242\,189\,93^d - 0.000\,006\,14^d T.$$

(«Астрономический ежегодник», 2007.)

Зоряний рік — проміжок часу, за який Сонце робить повний оберт по екліптиці відносно напрямку, що є нерухомим в інерціальній системі відліку. Назва цього проміжку часу «зоряний рік» пов'язана з тим, що зорі до XVIII ст. вважалися нерухомими.

Середня тривалість зоряного року дорівнює приблизно 365,256 36 середніх сонячних діб. Як одиниця для вимірювання часу зоряний рік не використовується.

ТРИВАЛІСТЬ ТРОПІЧНОГО РОКУ В СОНЯЧНИХ ТА ЗОРЯНИХ ДОБАХ

Оскільки за добу Сонце зміщується по екліптиці в середньому на 0.986° (тобто $360^\circ/365.2422$), то сонячна доба довша від зоряної на 3 хв 56.555 с. За рік ця різниця становить добу: у тропічному році налічується 365.2422 середніх сонячних діб і 366.2422 зоряних діб.

На рис. 2.3 показано добовий і річний рух Сонця, які мають протилежні напрямки, внаслідок чого зоряних діб у році на одну більше від сонячних.

Зміна зоряного часу за одну середню сонячну добу дорівнює щодобовому збільшенню прямого сходження середнього Сонця. Якщо, наприклад, 21 березня середнє Сонце і точка весняного рівнодення кульмінують на будь-якому меридіані одночасно, то за середню добу Сонце переміститься відносно зір назустріч добовому руху небесної сфери, тобто на схід, і буде кульмінувати пізніше точки весняного рівнодення. Щоб

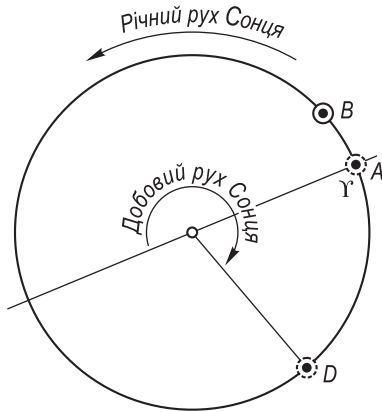


Рис. 2.3. Добовий і річний рухи Сонця

відбулася кульмінація середнього Сонця, Земля повинна зробити ще один поворот. Цей поворот відбувається за 3 хв 56.555 с зоряного часу. Іншими словами, середня сонячна доба, яка виражена в зоряному часі, на 3 хв 56.5555 с довша за зоряну.

Отже:

1 середня сонячна доба =
= 1.002 737 909 35 середніх зоряних діб = 24 год 03 хв 56.555 с середнього зоряного часу;

1 середня зоряна доба =
= 0.997 269 566 33 с середніх сонячних діб = 23 год 56 хв 04.090 с середнього сонячного часу;

1 середня сонячна година =
= 1 год 00 хв 09.856 47 с зоряного часу;

1 середня сонячна хвилина =
= 1 хв 00.164 27 с зоряного часу;

1 середня сонячна секунда =
= 1.002 74 с зоряного часу;

1 зоряна година = 59 хв 50.170 44 с середнього сонячного часу;

1 зоряна хвилина = 59.836 17 с середнього сонячного часу;

1 зоряна секунда = 0.997 27 с середнього сонячного часу.

Узагальнюючи, можна навести формули для коефіцієнтів переходу від проміжків середнього сонячного часу до зоряного часу (k), і навпаки, — для переходу від зоряного часу до середнього сонячного часу (k'):

$$k = 366.242\ 20 / 365.242\ 20 = 1.002\ 738;$$

$$k' = 365.242\ 20 / 366.242\ 20 = 0.997\ 270.$$

Таким чином, якщо проміжок часу в середніх сонячних одиницях дорівнює m , а в зоряних s , то $s = km$, $m = k's$.

На основі цих співвідношень складаються таблиці, за якими будь-який проміжок часу в одних одиницях можна визначити в інших одиницях.

ЗВ'ЯЗОК СЕРЕДНЬОГО СОНЯЧНОГО ЧАСУ ІЗ ЗОРЯНИМ ЧАСОМ

Як уже відмічалось, час на різних меридіанах земної кулі є різним. Зоряний час s , середній сонячний час m та справжній сонячний час m_s на даному меридіані називаються відповідно місцевим зоряним, місцевим середнім сонячним та місцевим справжнім сонячним часом.

Різниця місцевих зоряних, середніх сонячних або середніх справжніх часів двох меридіанів в один і той же момент дорівнює різниці довгот цих меридіанів:

$$\left. \begin{aligned} \Delta s &= s_1 - s_2 \\ \Delta m_{sn} &= m_{s1} - m_{s2} \\ \Delta m &= m_1 - m_2 \end{aligned} \right\} = \lambda_1 - \lambda_2,$$

де λ — географічна довгота пункту, додатна на схід від Гринвіча.

Місцевий середній сонячний час гринвіцького меридіана називається всевітнім часом UT . Місцевий середній сонячний час будь-якого пункту

$$m = UT \pm \lambda.$$

ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ТРОПІЧНОГО РОКУ

Припустимо, що для меридіана точки M потрібно визначити місцевий зоряний час s , який відповідав би моменту t середнього місцевого часу. Для цього потрібно із «Астрономічного щорічника» взяти зоряний час S_0 на Гринвічі у північ на початок даної доби. Через рух Сонця S_0 рівномірно зростає на $3^m56.555^s$ за середню добу. Нехай довгота точки M відома і дорівнює λ . Це означає, що північ у точці M наступить на λ годин раніше і величину S_0 треба зменшити на $3^m56.555^s(\lambda/24)$. Тому місцевий зоряний час у північ

$$s_0 = S_0 - (\lambda/24)3^m56.555^s.$$

До цієї величини потрібно додати час t , виражений у зоряних одиницях, тоді отримаємо зоряний час s , який відповідає моменту t :

$$s = S_0 - (\lambda/24)3^m56.555^s + kt.$$

Для середнього сонячного часу за відомим місцевим зоряним часом s на основі аналогічних міркувань або за t , визначеним із попередніх співвідношень, отримаємо формулу

$$m = \left[s - S_0 - (\lambda/24)3^m56.555^s \right] k'.$$

Для наближених розрахунків середнього місцевого часу за даним місцевим зоряним часом або навпаки — зоряного за даним середнім можна скористатися зоряним часом у середню північ:

День року	Зоряний час	День року	Зоряний час
22 вересня	0 год	23 березня	12 год
22 жовтня	2 год	23 квітня	14 год
22 листопада	4 год	23 травня	16 год
22 грудня	6 год	22 червня	18 год
21 січня	8 год	23 липня	20 год
21 лютого	10 год	22 серпня	22 год

За наведеними даними можна переводити середній час у зоряний і навпаки з помилкою не більше як 5 хв (К. Куликов, 1974 р.).

Річний рух Сонця по екліптиці, зміни пір року. Як уже зазначалося, тривалість тропічного року не стала, хоча зміни її незначні — всього лише на одиниці секунд за декілька тисячоліть.

Змінною є і швидкість руху Землі по орбіті: одну половину свого шляху, з 21 березня по 23 вересня, Земля проходить за 186 днів, а другу, з 23 вересня по 21 березня, — за 179 днів.

Щорічний рух нашої планети навколо Сонця називається річним рухом Сонця. Він спричиняє зміни пір року. Головні моменти річного руху Сонця такі (рис. 2.4):

20, 21 (у другій половині ХХІ ст. 19) березня — весняне рівнодення. Сонце перетинає небесний екватор у точці γ , переходячи з південної півкулі неба в північну. В північній півкулі Землі — початок астрономічної весни (наближені координати Сонця $\alpha = 0^\circ$, $\delta = 0^\circ$);

21, 22 червня — літне сонцестояння, початок літа в північній півкулі. Сонце досягає найбільшого північного схилення і протягом кількох днів його висота опівдні залишається майже однаковою. В північній півкулі — найдовші дні, в південній — найкоротші (наближені координати Сонця $\alpha = 90^\circ$, $\delta = +23,5^\circ$);

22, 23 вересня — осіннє рівнодення. Сонце перетинає екватор у точці осіннього рівнодення і переходить у південну півкулю. Це початок осені для північної півкулі (наближені координати Сонця $\alpha = 180^\circ$, $\delta = 0^\circ$);

21, 22 грудня — зимове сонцестояння, початок зими. Сонце досягає найбільшого південного схилення, у північній півкулі найкоротші дні (наближені координати Сонця $\alpha = 270^\circ$, $\delta = -23,5^\circ$).

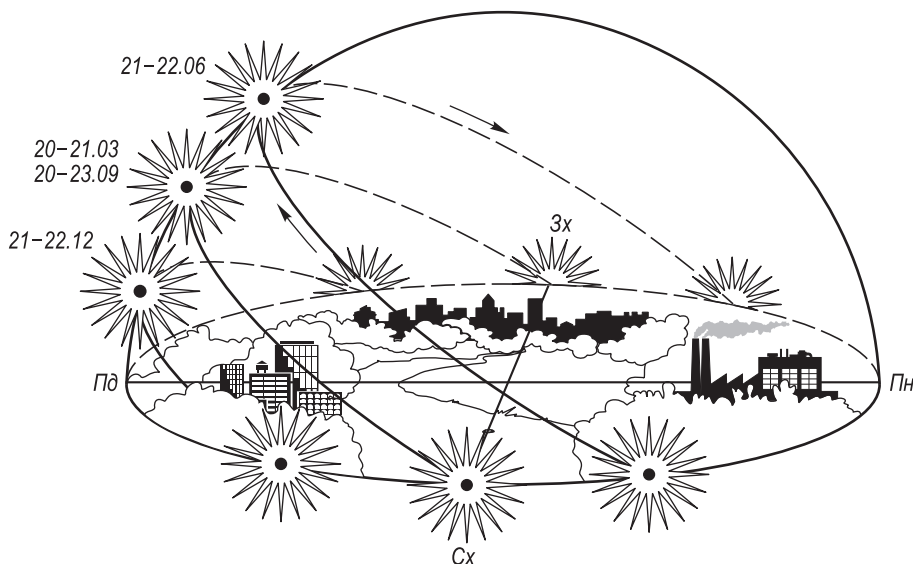


Рис. 2.4. Видимий рух Сонця в дні сонцестоянь і рівнодень

Річний рух Сонця на різних широтах відбувається по-різному. *На полюсі* Сонце перебуває над горизонтом увесь той час, поки воно знаходиться над екватором. Наприклад, на північному полюсі Сонце сходить близько 21 березня, досягає найбільшої висоти ($23^{\circ}27'$) 22 червня і близько 23 вересня заходить. При цьому воно весь час внаслідок добового руху описує кола, майже паралельні горизонту, отже, його видимий шлях по небу півроку має вигляд гвинтоподібної лінії. Таким чином, на полюсі день триває півроку, друге півріччя — ніч.

На екваторі всі світила, в тому числі і Сонце, впродовж доби перебувають 12 год над горизонтом і 12 год під горизонтом. Отже, 23 вересня Сонце опівдні буває в зеніті. Найменша його полуденна висота $90^{\circ} - 23^{\circ}27' = 66^{\circ}33'$. Вона спостерігається 22 червня (на північ від зеніту) і 22 грудня (на південь від зеніту).

На північному полярному колі (широта $\varphi = +66^{\circ}33'$) світила із схиленням

$\delta > 90^{\circ}$, $-\varphi = 90^{\circ} - 66^{\circ}33' = +23^{\circ}27'$ не заходять. Світила ж, що мають схилення $\delta < -23^{\circ}05'$, не сходять. Але це є якраз найбільше і найменше схилення Сонця. Отже, на полярному колі в день літнього сонцестояння Сонце не заходить. Опівночі воно лише дотикається до горизонту в точці півночі. В день же зимового сонцестояння воно не сходить, з'являючись лише опівдні на горизонті біля точки півдня.

У місцях, що лежать за полярним колом, літнє Сонце залишається світилом, яке не заходить тим довше, чим місце ближче до полюса. Проте в міру наближення до полюса збільшується і полярна ніч, упродовж якої Сонце зовсім не сходить. У південній полярній зоні явища відбуваються так само.

На північному тропіку (широта $\varphi = +23^{\circ}27'$) Сонце в день літнього сонцестояння проходить через зеніт. У день зимового сонцестояння воно опівдні буває в зеніті на південному тропіку.

У місцях, що лежать між тропіками, Сонце опівдні перебуває в зеніті двічі на рік, у ті дні, коли його схилення дорівнює широті місця.

Всі згадані явища відбувалися б точнісінько так, як описано, якби Сонце було точкою, а не диском, і коли б земна атмосфера не заломлювала і не відбивала світлових променів. Насправді ж ці явища відбуваються дещо інакше.

Внаслідок заломлення променів світла в атмосфері — атмосферної рефракції — світила, особливо поблизу горизонту, видно вище від їхнього справжнього (геометричного) положення. Крім того, Сонце — диск, і за момент його сходу й заходу природно приймати появу і зникнення верхнього краю диска Сонця. Саме тому Сонце на полюсі видно вже за кілька днів до 21 березня і ще кілька днів після 23 вересня. Так само на полярних колах Сонце у дні сонцестоянь опівдні (зимове сонцестояння) й опівночі (літнє) залишається над горизонтом (у північній півкулі).

Земля є кулею, поверхня її опукла. Тому Сонце освітлює вершину гори протягом кількох хвилин після того, як воно зайшло для спостерігача, який перебуває біля підніжжя гори. Ще довше Сонце освітлює верхні шари земної атмосфери, тому після заходу Сонця настає не повна ніч, а лише присмерки. Повна темрява буде, коли Сонце опуститься за лінію горизонту приблизно на 17° . Явище присмерків продовжує денну частину доби за рахунок нічної ще більшою мірою, ніж рефракція.

Знаки зодіаку і рух Сонця через зодіакальні сузір'я. Зодіак (від грец. ζῳδιακος — коло із зображенням тварин) — пояс небесної сфери, середньою лінією якого є екліптика. Зодіак містить 12 зодіакальних сузір'їв, через які пролягає річний рух Сонця, а також рухаються планети Сонячної системи і Місяць.

У різних народів кількість сузір'їв, що належать до зодіаку, як і їхні назви, були неоднаковими. У Давній Греції

2.1. Дати перебування Сонця у знаках зодіаку і в зодіакальних сузір'ях у наш час

Сузір'я	Позначення сузір'я	Сонце в знаках зодіаку	Сонце в зодіакальних сузір'ях у наш час
Овен	♈	21.III — 21.IV	18.IV — 14.V
Телець	♉	22.IV — 21.V	14.V — 21.VI
Близнята	♊	22.V — 21.VI	21.IV — 20.VII
Рак	♋	22.VI — 22.VII	20.VII — 11.VIII
Лев	♌	23.VII — 23.VIII	11.VIII — 17.IX
Діва	♍	24.VIII — 23.IX	17.IX — 31.X
Терези	♎	24.IX — 23.X	31.X — 22.XI
Скорпіон	♏	24.X — 22.XI	22.XI — 18.XII
Стрілець	♐	23.XI — 21.XII	18.XII — 19.I
Козеріг	♑	22.XII — 20.I	19.I — 16.II
Водолій	♒	21.I — 18.II	16.II — 12.III
Риби	♓	19.II — 20.III	12.III — 18.IV

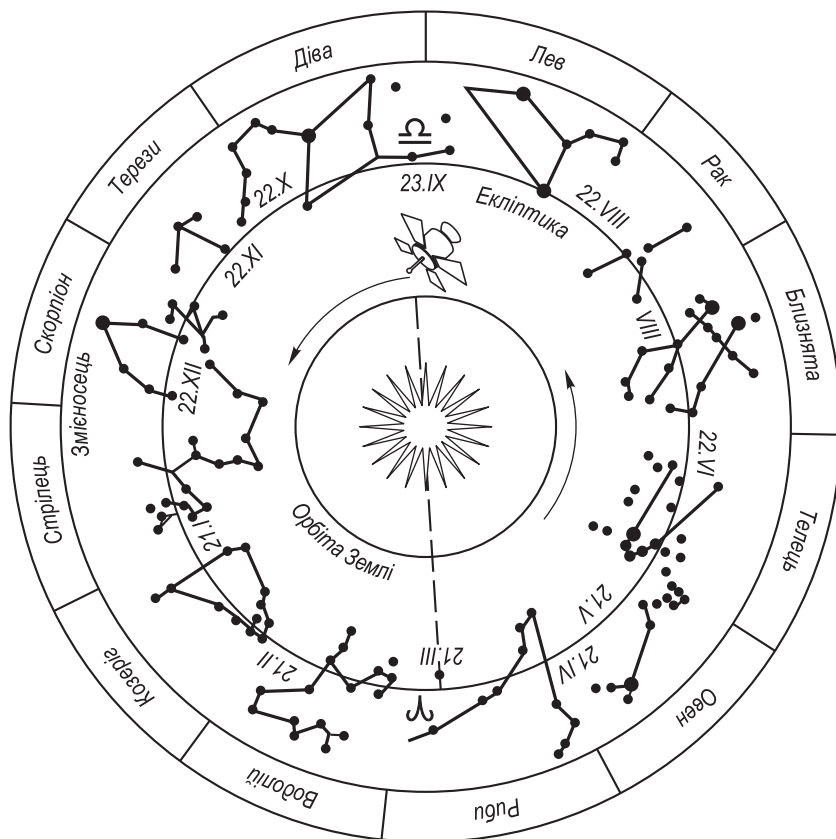


Рис. 2.5. Рух Сонця через зодіакальні сузір'я

12 зодіакальних сузір'їв було виділено в окремі групи і кожне з них позначено окремим знаком. Було прийнято також ділити екліптику на 12 однакових частин по 30° і кожну таку дугу позначати певним знаком зодіаку. Назви знаків і сузір'їв у ті часи збігалися.

У зв'язку з безперервним зміщенням унаслідок прецесії точки весняного рівнодення (приблизно 1° за 70 років) у наш час знаки зодіаку не збігаються з однойменними сузір'ями. Ці дуги змістилися із сузір'їв приблизно на 30° , проте присвоєні їм близько 2000 років тому позначення збереглися, їх використовують в

астрономічних щорічниках, календарях. Отже, конкретні знаки зодіаку накладаються на зодіакальні сузір'я, які розміщені на одну позицію праворуч. Знак Овна — на зодіакальне сузір'я Риби, знак Тельця — на зодіакальне сузір'я Овна і т. ін. У табл. 2.1 наведено дати перебування Сонця у знаках зодіаку і в зодіакальних сузір'ях у наш час.

Варте уваги те, що з 30 листопада по 18 грудня Сонце перебуває у сузір'ї Змієносець, яке не належить до числа зодіакальних.

Рух Сонця через зодіакальні сузір'я показано на рис. 2.5.

2.1.4. РОЗМАЇТТЯ АСТРОНОМІЧНИХ ВИЗНАЧЕНЬ МІСЯЦЯ ТА РОКУ

У буденному житті людство користується в основному календарними поняттями доба, місяць, рік. В астрономії таких понять значно більше. Про сонячну і зоряну добу та про тропічний і зоряний рік уже розповідалося раніше (розд. 2.1.1—2.1.3).

Розглянемо одиниці вимірювання, що пов'язані з рухом Місяця навколо Землі та обертанням Землі навколо Сонця, які використовуються в астрономії, небесній механіці та в літочисленні (в календарях) деяких народів. Розмаїтість одиниць вимірювання пояснюється тим, що за початок відліку часу приймаються різні точки (або небесні об'єкти) на небесній сфері, різні астрономічні епохи. Розрізняють сидеричний, синодичний, тропічний, аномалістичний і драконічний місяці (табл. 2.2).

Сидеричний (зоряний) місяць — період одного повного оберту Місяця навколо Землі відносно напрямку на одну і ту саму зорю.

Синодичний (лунація) — проміжок часу між послідовними однойменними фазами Місяця (наприклад, молодиками; молодик — новий Місяць).

Тропічний — проміжок часу між послідовними проходженнями центра Місяця через точку весняного рівнодення.

Аномалістичний — проміжок часу між послідовними проходженнями центра Місяця через перигей його орбіти.

Драконічний — проміжок часу між послідовними проходженнями центра Місяця через висхідний вузол його орбіти на екліптиці (застосовується в теорії сонячних і місячних затемнень).

З видимим рухом Сонця відносно Землі по екліптиці пов'язана одиниця

часу — рік. В астрономії застосовують декілька річних періодів різної тривалості: сидеричний, тропічний, аномалістичний, драконічний, бесселів і юліанський роки.

Сидеричний (зоряний) рік — період повного оберту Сонця навколо Землі відносно напрямку на одну і ту ж зорю.

Тропічний — проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра диску Сонця через точку весняного рівнодення. Цей рік покладено в основу григоріанського календаря.

Аномалістичний — період між двома послідовними проходженнями центра диску Сонця через перигей його видимої геоцентричної орбіти.

Драконічний — період між двома послідовними проходженнями центра Сонця через висхідний вузол орбіти Місяця на екліптиці. Застосовується в теорії сонячних і місячних затемнень.

Юліанський рік — рік, який є основою юліанського календаря і дорівнює 365.25 середньої сонячної доби.

В астрономічних задачах використовують поняття *епохи*, тобто моменту часу, який править за хронологічні посилення для фіксації значень координат небесних тіл або елементів їх орбіт, а також для характеристики змін у часі опорних систем небесних координат у зоряних каталогах («Астроном. ежегодник», 2007).

Наведені в табл. 2.2 тривалості різних типів місяців і років широко застосовуються в задачах ефемеридної астрономії та небесної механіки. Про тропічний і зоряний рік (сидеричний) детально розповідалося раніше у розд. 2.1.3 і пояснюється це тим, що саме тропічний рік є основою григоріанського календаря, який використовується майже в усіх країнах світу. Про зоряний рік розповідається в основному для його порівнян-

2.2. Тривалість різних астрономічних місяців і років*

Назва місяця або року	Тривалість (середня доба — d)	
	місяця	року
Сидеричний	$27.321\ 661\ 6^d + 0.000\ 000^d\ 2T$	$365.256\ 363\ 31^d + 0.000\ 000^d\ 12T$
Тропічний	$27.321\ 582\ 2 + 0.000\ 000\ 2T$	$365.242\ 189\ 93 - 0.000\ 006\ 14T$
Аномалістичний	$27.554\ 549\ 9 - 0.000\ 001\ 0T$	$365.259\ 635\ 35 + 0.000\ 003\ 25T$
Драконічний	$27.212\ 220\ 8 + 0.000\ 000\ 4T$	$365.620\ 031 + 0.000\ 032T$
Синодичний	$29.530\ 588\ 9 + 0.000\ 000\ 3T$	—
Бесселів	—	$365.242\ 119\ 88 - 0.000\ 007\ 85T$
Юліанський	—	365.25

* Величина T в століттях по 36 525 діб від 2000 січень 0,12 год ТТ (ТТ — земний час з 1991 р.).

ня з тропічним. Як уже раніше відмічалось, зоряний рік як одиниця часу не застосовується.

Після того, як задана тривалість року, будь-яку подію можна визначити номером року, місяцем і днем, або номером року і дробовою його частиною, наприклад 1999.2435. Треба відмітити, що до 1976 р. для запису року з дробовою частиною використовувався бесселів рік, з 1976 р. — юліанський рік. Про ці роки детальніше далі.

БЕССЕЛІВ РІК

Початок календарного року не може бути віднесеним до єдиного для всієї Землі фізичного моменту часу, тому що середня північ на одному меридіані не збігається з моментом середньої півночі на іншому. Проте для досліджень, пов'язаних з астрономічними редукаціями зоряних положень, які визначені в різні епохи, зручно використовувати єдиний початок тропічного року для всієї Землі.

За пропозицією німецького астронома Ф. Бесселя (1784–1846) було введено фіктивний рік (*annus fictus*), який отримав назву *бесселів рік*. Початок бесселевого

року не залежить від способу і методу вимірювання часу і на всіх меридіанах настає в один і той самий момент.

За початок бесселевого року приймають момент, для якого пряме піднесення середнього екваторіального Сонця з урахуванням аберації має точне значення, а саме 18 год 40 хв, тобто коли довгота середнього екліптичного Сонця, зменшена на величину сталої аберації і відрахована від точки весняного рівнодення, дорівнює 280° . Бесселів рік коротший за тропічний на 0.148 с. З достатньою точністю для практичних цілей здебільшого вважають тривалості тропічного і бесселевого року однаковими.

Початок бесселевого року, який відповідає певному календарному року N , позначається номером цього року і супроводжується нулем десятих і символом «В», наприклад В1950.0. Цей початок не збігається з початком календарного року. Визначити зміщення f початку бесселевого року відносно календарного року N в частинках доби можна за формулою

$$f = 0.81352^d - 0.0312^d [(N - 1900)/4] + 0.2422^d x + y,$$

де $x = N - N_0$, N_0 — найближчий до N попередній високосний рік (юліанського календаря), d — доба; $y = 1$ при $x = 0$ та $y = 0$ при $x \neq 0$ (Лукашова, Свешников, 2004).

Формула справедлива для всіх $N > 1900$. Початок бesselевого року BY в юліанських днях визначається за співвідношенням

$$BY = 2\,415\,020.313\,52 + 365.242\,198\,781 (N - 1900.0),$$

де перший доданок — це кількість юліанських днів на початок 1900 р.

До 1984 р. у фундаментальних формулах для урахування прецесії використовували тропічне століття (як одиницю часу) і початок бesselевих років $B1900.0$, $B1950.0$ і $B1975.0$ (як стандартні епохи). З 1984 р. відповідно до резолюції Генеральної Асамблеї МАС (1977) про введення нової стандартної епохи прийнято:

нова стандартна епоха (позначається $J2000.0$), вона дорівнює даті 2000 січень 1.5, що збігається з $JD^* 2\,451\,545.0$ (J — юліанська епоха, JD — юліанські дні);

за одиницю часу для формул урахування прецесії прийнято юліанське століття (36 525 діб);

епохи початку років відрізняються від стандартної на величини, які кратні юліанському року (365.25 доби).

На Генеральній Асамблеї Міжнародного астрономічного союзу (МАС) у 1994 р. визначення епохи $J2000.0$ було уточнено: $J2000.0 = 2000$ січень 0,12 год ТТ (ТТ — земний час, див. підрозд. «Шкали часу»).

Нова стандартна епоха віддалена точно на одне юліанське століття від епохи 1900 січень 0,12 год ЕТ, яка була прийнята раніше в теоріях С. Ньюкома як фундаментальна епоха. Будь-яка інша епоха може бути обчислена в новій сис-

темі з символом J , який є ознакою юліанської епохи:

$$J[2000.0 + (JD - 2451545.0)/365.25].$$

Якщо потрібно скористатися бesselевою системою, що базується на тропічному році епохи 1900.0 як одиниці вимірювання часу, то маємо для тієї ж заданої юліанської дати такий вираз:

$$B\left(1900.0 + \frac{JD - 2415020.31352}{365.242198781}\right),$$

де символ B означає належність до бesselевої епохи.

Нижче наведено кількість юліанських днів на початок бesselевих (B) та юліанських (J) епох:

Епоха	Кількість днів	Епоха	Кількість днів
B1850.0	2396758.203	J1850.0	2396757.50
B1900.0	2415020.313	J1900.0	2415020.00
B1950.0	2433282.423	J1950.0	2433282.50
B1975.0	2442413.478	J1975.0	2442413.75
B2000.0	2451544.533	J2000.0	2451545.00
B2025.0	2460675.588	J2025.0	2460676.25
B2050.0	2469806.643	J2050.0	2469807.50

ЮЛІАНСЬКИЙ ПЕРІОД. ЮЛІАНСЬКА ДАТА

У 1583 р. французький вчений Ж. Скалігер (1540–1609) запропонував для визначення проміжків часу між подіями застосувати безперервний відлік днів від 1 січня 4713 р. до н. е. (–4712, січень 1). Як вчений розраховував вказану дату, пояснимо далі. Це був умовний початок великого періоду в 7980 років, який Ж. Скалігер назвав юліанським на честь свого батька Юлія, а дні цього періоду називаються юліанськими днями і починаються в середній гринвіцький полудень. До 1925 р. астрономічний відлік доби почи-

нався в середній полудень. З 1925 р. початок доби відраховується від півночі, але в юліанських днях було вирішено залишити середній гринвіцький полудень як початок юліанських діб.

Юліанський період є добуток трьох менших періодів:

періоду 28 років, через такий час повторюється розподіл днів семиденного тижня за числами місяців у році;

періоду 19 років, через цей період повторюється розподіл фаз Місяця за днями року (метонів цикл);

періоду 15 років, що використовувався у римській податковій системі.

Ж. Скалігер, виходячи з прийнятих на той час номерів років у цих трьох періодах, розрахував, що перші номери всіх трьох циклів збігалися з 1 січня 4713 р. до н. е.

Резолюція, прийнята на XXII Генеральній Асамблеї МАС, рекомендувала продовжити використання юліанських днів як основи для ефемеридних обчислень, архівних даних і перерахування календарних епох.

Для позначення юліанських днів використовується аббревіатура «JD». Для зручності обчислень застосовуються також модифіковані юліанські дні MJD, в яких за нуль-пункт прийнято дату 1968 травень 23, 12 год ТТ:

$$MJD = JD - 240\,000.5.$$

Треба зауважити, що юліанські дати відраховуються від полудня, а модифіковані — від півночі.

В усіх астрономічних щорічниках є таблиці для переведення календарних дат в юліанські дні (див. додаток Д5).

В онлайн-режимі можна, наприклад, скористатися програмою для переобчислення дат, яка розроблена Військово-морською обсерваторією США (USNO): <http://aa.usno.navy.mil/data/does/JulianDate.html>.

2.3. Тривалості* доби і року на планетах Сонячної системи за земним виміром

Планета	Доба	Рік
Меркурій	58.646 діб	88 діб
Венера	243.1 діб	224.7 діб
Земля	24 год	365–366 діб
Марс	24 год 37 хв	686.972 діб
Юпітер	~ 10 год	11.862 років
Сатурн	~11 год	~ 29 років
Уран	~17 год	~ 84 років
Нептун	~16 год	~164 років
Плутон (з 2006 р. не вважається планетою)	~ 6 діб	~ 248 років

* Тривалості наведено в земних роках, добах, годинах і хвиликах.

Для відомої юліанської дати JD юліанська епоха дорівнює

$$2000.0 + (JD - 2\,451\,545.0) / 365.25.$$

Юліанський рік = 365.25 діб.

Детальніші відомості стосовно систем відліку дат опубліковані в літературі (Труди ИПА РАН, № 10, 2004; Жаров, 2006; Астроном. ежегодник на 2007).

Відзначимо, що в цивільному житті використовують календарний рік. На відміну від наведених вище астрономічних визначень року, календарний рік складається з цілого числа діб і місяців. Він має зручні проміжні періоди. Саме такими зараз прийняті семиденний тиждень і місяць, тривалість якого становить 28–31 день. Оскільки тропічний рік не містить цілого числа ні днів, ні тижнів, ні синодичних місяців, то виникають певні труднощі при складанні точного цивільного календаря (детальніше в підрозд. «Календарні системи»).

Для порівняння із Землею та ілюстрації в табл. 2.3 наведено тривалості доби і року на планетах Сонячної системи.

2.1.5. ПОЯСНИЙ ЧАС. ЛІТНИЙ ЧАС. ДЕКРЕТНИЙ ЧАС. ЛІНІЯ ЗМІНИ ДАТ

Місцевий та поясний час. У точках земної поверхні, що лежать на різних меридіанах, одне й те ж світило кульмінує в різні моменти. Тому і лічба часу на різних меридіанах неоднакова — кожен меридіан має свій місцевий час.

Коли в Києві полудень, то на протилежному боці земної кулі, тобто на 180° на захід або схід від Києва в цей момент буде північ. Упродовж однієї години небесна сфера у своєму видимому русі повертається на $1/24$ частину повного оберту, що в кутових одиницях відповідає $360^\circ : 24 = 15^\circ$ (рис. 2.6). Тому місцевий час двох пунктів на Землі, які мають різницю довгот 15° , відрізняється на 1 год. Якщо від початкового місця спостереження пересуватися вздовж довгот, наприклад, на 30° (тобто на 2 год) на схід або захід, то в першому випадку Сонце, очевидно, пройде через меридіан нового місця спостереження на 2 год раніше, а в другому випадку, навпаки, на 2 год пізніше, ніж у початковому пункті. Отже, різниця географічних довгот двох меридіанів, виражена в годинній мірі, кількісно дорівнює різниці місцевого часу цих меридіанів (зоряного або середнього). Таким чином, визначення різниці довгот двох точок земної поверхні зводиться до обчислення різниці їх місцевого часу.

Очевидно, що місцевий середній сонячний час M_λ для спостерігача на географічній довготі λ пов'язаний з місцевим середнім сонячним часом початкового (гринвіцького) меридіана M_0 так:

$$M_\lambda = M_0 + \lambda.$$

Проте в недалекому минулому не існувало початкового меридіана, а кож-

ний пункт на Землі мав свій місцевий час. За початковий меридіан у різних країнах використовувався свій меридіан (наприклад, в Англії — гринвіцький, у Франції — паризький, в Росії — пулковський). Місцевий час у кожному пункті Землі та відсутність загального нульового меридіана створювали значні незручності у практичному житті, особливо для транспорту і зв'язку.

У 1881 р. на Міжнародному географічному конгресі в Антверпені для визначення довгот було визнано за необхідне введення єдиного для всіх країн нульового меридіана. Після деяких дискусій за нульовий вирішено прийняти гринвіцький меридіан. Проте остаточне рішення затверджене лише у жовтні 1884 р. на Вашингтонській Міжнародній меридіанній конференції. На цій же конференції було ухвалено рішення про введення поясного часу (ZT-Zonal Time).

Такий час ще в 1878 р. запропонував канадський інженер С. Флемінг. За ідеєю С. Флемінга вся поверхня земної кулі умовно поділяється на 24-годинні пояси протяжністю кожний 15° (1 год) по довготі. В усіх точках кожного годинного поясу встановлюється час, який відповідає середньому меридіану даного поясу. Різниця поясного і місцевого часу не перевищує півгодини.

Середнім меридіаном початкового або нульового поясу був прийнятий, як уже відзначалося, гринвіцький меридіан — той меридіан, який служить початковим і для лічби довгот. Нульовий годинний пояс відповідно простягається за довготою на $7,5^\circ$ на захід і стільки ж на схід від гринвіцького меридіана.

Очевидно, в усіх поясах годинники показують одні і ті ж хвилини та секунди і тільки кількість годин різна: у 1-му

поясі на годину більша від нульового, у 2-му — на дві години і т. д., тому номер поясу вказує і різницю (в годинах) часу даного поясу, і гринвіцького.

Середній сонячний час нульового поясу назвали всесвітнім часом. За всесвітнім часом звичайно вказуються астрономічні дані, що подаються в астрономічних щорічниках.

Цікаво, що в резолюції Вашингтонської конференції зазначалося, що від нульового меридіана довгота повинна відраховуватися у двох напрямках до 180°: на схід зі знаком плюс, а на захід зі знаком мінус. Проте ця рекомендація відносно знаків не виконувалася. До 1982 р. довготи в астрономії рахувалися додатними на захід.

Практичні міркування змушують проводити межі годинних поясів не точно вздовж меридіанів, а по державних кордонах, по границях окремих областей, річках тощо. Наприклад, майже вся Україна лежить у 2-му годинному поясі, середній меридіан якого проходить через Київ ($\lambda \approx 30^\circ$). Україна живе за *київським часом*.

З появою шкали всесвітнього координованого часу UTC, яка погоджена зі шкалою всесвітнього часу UT1 (див. розділ «Шкали часу») з точністю, достатньою для повсякденного життя, ця шкала покладена в основу поясного часу:

$$ZT = UTC + dZ.$$

Величина dZ називається *поясною поправкою*, що визначається довготою поясу, в якому перебуває даний географічний пункт, відносно меридіана Гринвіча.

Прийнято такі міжнародні позначення: годинний пояс Гринвіча позначають буквою Z (нуль-пункт); годинні пояси на схід від Гринвіча — буквами A, B, \dots, M (включаючи J) і, відповідно, поправка dZ на-

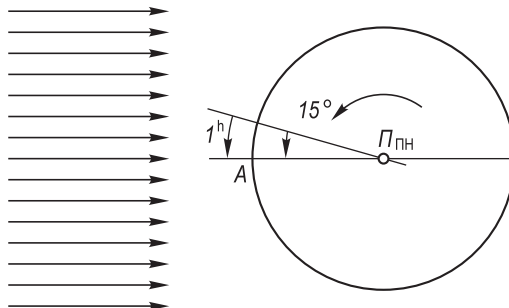


Рис. 2.6. Повний оберт (360°) Землі за 24 год і поворот за 1 год на 15° (П_{пн} — північний полюс Землі)

буває для них значення $+1, +2, \dots, +12$; пояси на захід від Гринвіча — буквами N, O, \dots, Y , їм відповідають значення dZ від -1 до -12 .

Існують області на Землі (внутрішні райони Гренландії, Антарктида), щодо яких не прийнято ніякої домовленості про введення поясного часу. Домовленість про використання поясного часу у відкритому морі була досягнута лише в червні 1917 р. на англо-французькій конференції в Лондоні.

Частина годинних поясів має власні назви часу (табл. 2.4, рис. 2.7).

Літній час. З 1916 р. в ряді країн періодично урядовою постановою вводиться літній час, який відрізняється на 1 год від поясного часу:

$$T = ZT + 1 \text{ год.}$$

В Україні літній час запроваджено згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 509 від 13 травня 1996 р. В останню неділю березня о 03.00 год ночі стрілка годинника переводиться на 1 год вперед. Перехід на зимовий час здійснюється в останню неділю жовтня о 04.00 год ночі переведенням стрілки годинника на 1 год назад.

Відповідно до директиви Об'єднаного Європейського парламенту від 30 травня

2.4. Власні назви годинних поясів*

Пояс	ΔZ , год	Назва часу
<i>Пояси Європи і Америки</i>		
<i>X</i>	-11	Час 13-го поясу
<i>W</i>	-10	Фернбенський (Fernbensk time)
<i>V</i>	-9	Юконський (Ukon time)
<i>U</i>	-8	Тихоокеанський (Pacific time)
<i>T</i>	-7	Гірський (Mountain time)
<i>S</i>	-6	Центральний (Central time)
<i>R</i>	-5	Східний, вашингтонський (Eastern time)
<i>Q</i>	-4	Атлантичний (Atlantic time)
<i>P</i>	-3	Час 21-го поясу
<i>O</i>	-2	Час 22-го поясу
<i>N</i>	-1	Ісландський (Iceland time)
<i>Z</i>	0	Всесвітній час, гринвіцький, лондонський, західноєвропейський (Universal, Greenwich time)
<i>A</i>	+1	Середньоєвропейський, центральноєвропейський (Central European time)
<i>B</i>	+2	Східноєвропейський (East European time)
<i>Пояси Російської Федерації</i>		
<i>B</i>	+2	Московський
<i>C</i>	+3	Волзький
<i>D</i>	+4	Уральський
<i>E</i>	+5	Західносибірський (омський)
<i>F</i>	+6	Єнісейський (красноярський)
<i>G</i>	+7	Іркутський
<i>H</i>	+8	Амурський (читинський)
<i>I</i>	+9	Приморський (хабаровський)
<i>K</i>	+10	Охотський (магаданський)
<i>L</i>	+11	Камчатський
<i>M</i>	+12	Чукотський (анадирський)

* За матеріалами зб. «Труды РАН», 2004, № 10.

1994 р. літній час введено в багатьох країнах з 1996 р.

Літній час був запропонований лондонським будівельником У. Уїллетом у 1907 р. У брошурі, яку він розіслав багатьом членам парламенту і різним організаціям, ще він відмічав, що введення літнього часу крім поліпшення самопочуття приведе до скорочення витрат електроенергії. У. Уїллетт помер у 1915 р., так і не дочекавшись втілення своїх ідей у життя в 1916 р. в Англії (Д. Хауз, 1983).

Декретний час. У деяких державах з економічних причин видавалися декрети про переведення стрілок годинників на 1 год і навіть на декілька годин вперед відносно поясного часу. Такий час, встановлений урядовим декретом, називається декретним часом. Оскільки переведення стрілок робиться завжди на ціле число годин, то декретний час можна розглядати як видозмінений поясний час. Наприклад, у колишньому СРСР декретний час було введено в 1930 р. переведенням стрілок на 1 год вперед відносно поясного. Цей час називався московським часом, і діяв він до 1 квітня 1981 р.

З 1981 р. на території СРСР вводився літній час, що випереджав поясний ще на 1 год в порівнянні з декретним часом. У період з 1982 по 1986 рр. рішенням уряду СРСР декретний час було скасовано в 30 областях та автономних республіках РРФСР, в республіках Прибалтики. В 1990 р. за рішенням місцевих рад його скасували в Україні, Білорусії, Молдові, Грузії та Азербайджані. На всій території СРСР декретний час було скасовано Постановою Кабінету Міністрів СРСР від 04.02.1991 р. № 20.

Лінія зміни дат. На будь-якому меридіані середня доба починається в момент нижньої кульмінації середнього

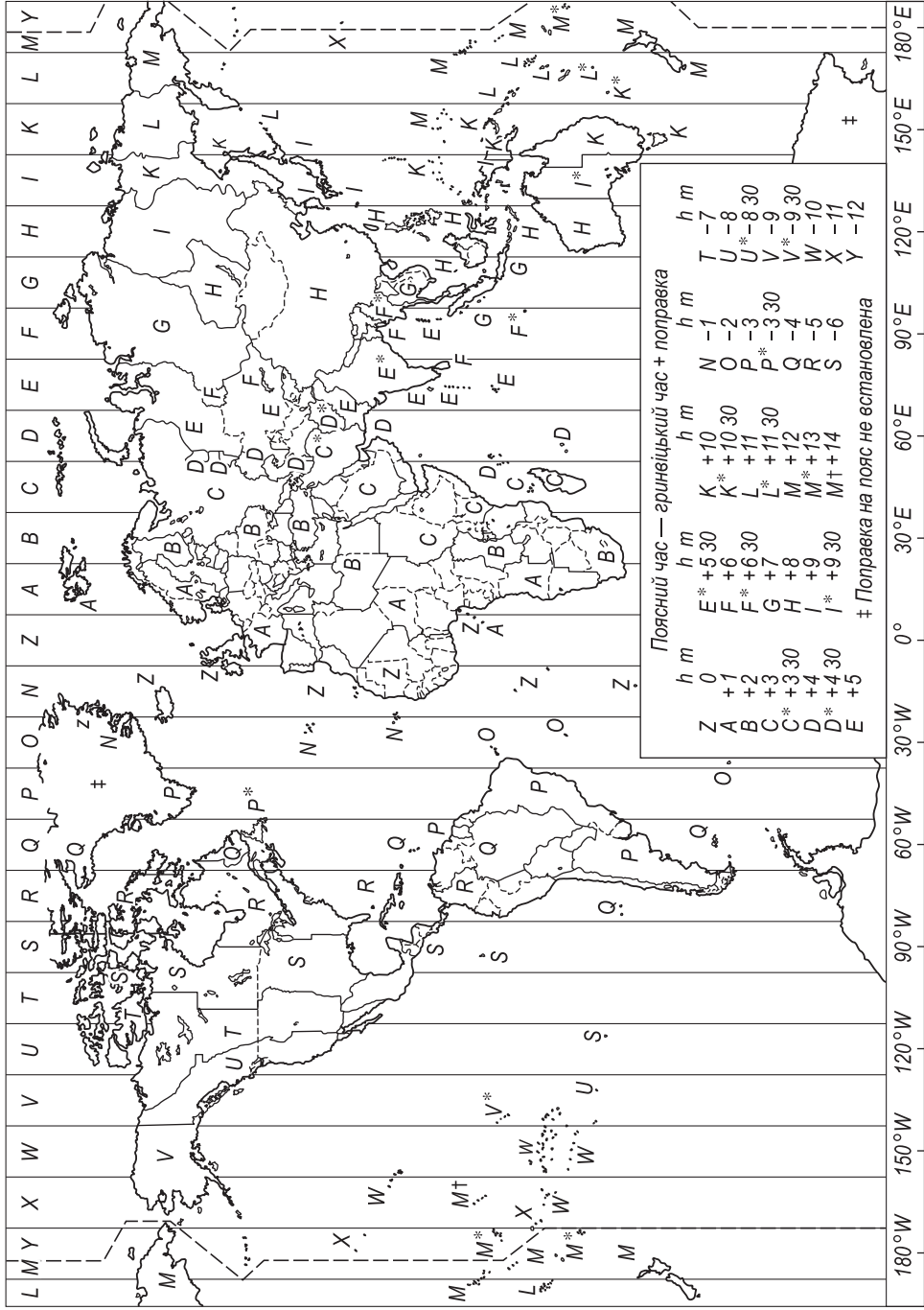


Рис. 2.7. Карта годинних поясів Землі

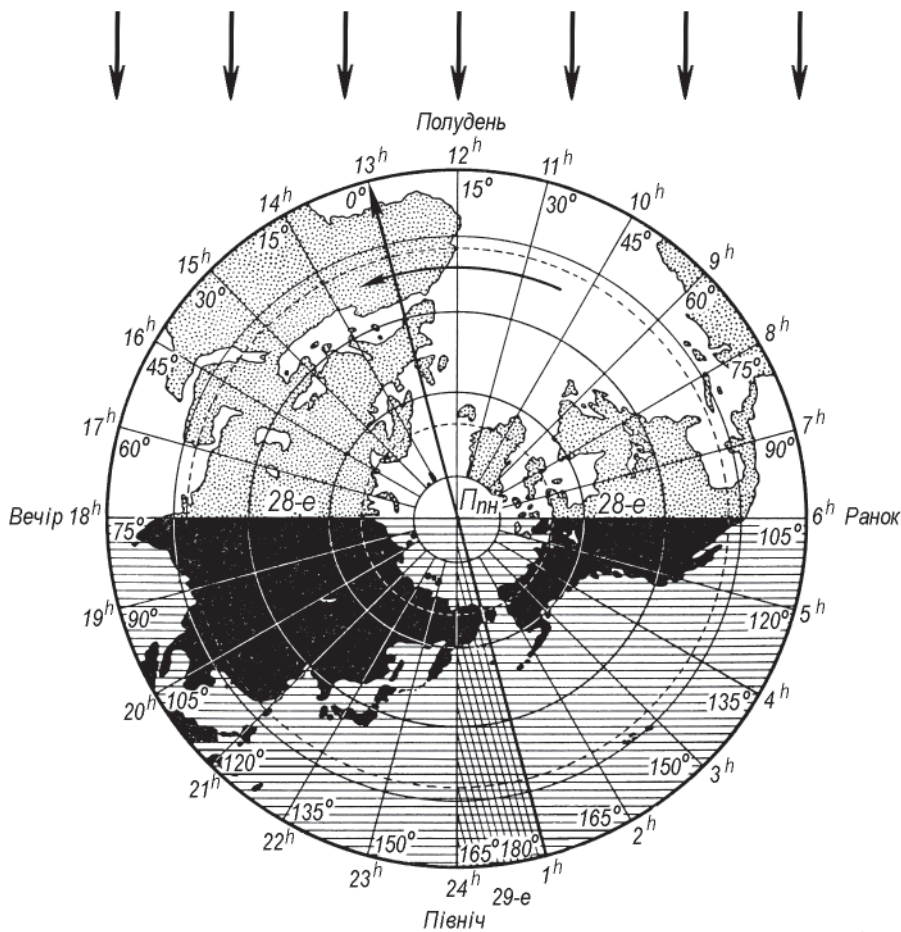


Рис. 2.8. Зміна дат на Землі

Сонця. Якщо від даного меридіана пересуватися на схід, то доба починатиметься раніше, а якщо на захід — то пізніше, ніж на вихідному меридіані (рис. 2.8).

При переміщенні на схід на 180° доба почнеться на 12 год раніше, а якщо обігнути Землю, рухаючись на схід, доба почнеться раніше на 24 год. Цим пояснюється «виграш» або «втрата» доби при кругосвітній подорожі з безперервною лічбою днів.

Оскільки для всіх годинних поясів запроваджено єдину календарну лічбу днів, потрібно домовитися, на якій лінії вважати початок кожної доби. Ця лінія проведена приблизно уздовж меридіана 180° від Гринвіча і називається лінією зміни дат. Точне її положення визначається Міжнародною угодою так, що лінія дат ніде не проходить по суші, крім Антарктиди (лінія проходить від Північного полюса Землі до Південного через Берінгову протоку і водами Ти-

хого океану). Той, хто перетинає цю лінію із сходу на захід, повинен змінити дату на наступну, а той, хто перетинає із заходу на схід, — на попередню. Проте, щоб не змінювати календарну дату серед доби, діють так: до 12-ї години ночі своєї лічби часу дату зберігають, а потім пропускають один день при прямуванні з Америки в Азію або лічать один і той же день двічі при прямуванні з Азії в Америку.

Відсутність домовленості про лінію зміни дат призводило до курйозів, особливо при навколосвітних подорожах. Наприклад, старанний літописець плавання Пігафетт каравели «Вікторія» — єдиної з 5 каравел флотилії Фернандо Магеллана (близько 1480–1521), яка повертаючись в 1522 р. з навколосвітнього плавання в Іспанію зі сходу, зупинилась в бухті Сант'яго острова Зеленого Мису, виявив розходження в один день між своїм рахунком днів (який він вів у корабельному журналі) і тим рахунком, який вели місцеві жителі. Секрет такої «втрати» полягав у тому, що флотилія зробила навколосвітню подорож у напрямі, протилежному обертанню Землі навколо своєї осі. Рухаючись зі сходу на захід при поверненні в початковий пункт, мандрівники були в дорозі на один день менше (тобто побачили на один сонячний схід менше), ніж пройшло днів у початковому пункті. Якщо зробити навколосвітню подорож із заходу на схід, то для мандрівників пройде на один день більше, ніж у початковому пункті.

Ось як писав про цей курйоз у серії історичних мініатюр «Зоряні часи людства» Стефан Цвейг: «Яким короткочасним і небезпечним не було б перебування біля Зеленого Мису, проте саме там старанному літописцю Пігафетту вдалося пережити одне з тих чудес, заради яких він вирушив у путь, бо на Зелено-

му Мисі він першим спостерігав явище, новизна і значимість якого буде хвилювати і привертати увагу всього століття... Ця пізнана істина — у різних частинах світу час не збігається».

Висновок щодо лінії зміни дат: команда корабля, який перетинає лінію зміни дат із заходу на схід, повинна один і той же день враховувати двічі, щоб не з'явилась зайва доба. І навпаки, при перетині цієї лінії зі сходу на захід потрібно пропустити один день, щоб не втратити однієї доби.

2.1.6. АСТРОНОМІЧНИЙ ТА ІСТОРИЧНИЙ ВІДЛІК РОКІВ

Відлік часу можна вести порядковими і кількісними числівниками. Перші використовують у повсякденному житті та в історії, другі — в астрономії.

У повсякденному житті ми говоримо: «У 1968-му році, 22 серпня, о 20-й хвилині на 9-ту...», тобто зазначаємо, у який рік, місяць, число і час доби сталася подія. Астрономічний запис цієї фрази такий: «1968 р., серпень 22; 8 год 20 хв». Він вказує, скільки років, місяців, діб, годин і хвилин пройшло від умовного початку відліку до певного явища або події.

Аналогічно тому, як 20 хв на 1-шу годину астроном запише 0 год 20 хв, так і 48 хв на 5-ту годину 1 січня він повинен записати так: січень 1, 4 год 48 хв або січень 1.2. Початок лічби доби у січні потрібно відмітити як січень 0.0, що тотожне моменту 0.0 грудня 31. Аналогічно лютий, 0.0 є тотожним даті січень 31.0 і т. д.

Ще у 1627 р. французький учений П. Петавій (Пето) запропонував продовжити шкалу нашого літочислення у ми-

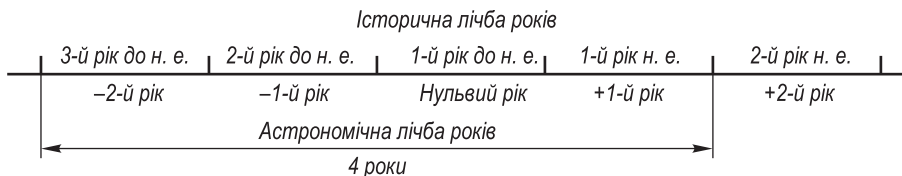


Рис. 2.9. Відмінність між історичною та астрономічною лічбою років

нуле на роки до «нашої ери». Та лише у XVIII ст. наша ера (яка була введена римським монахом Діонісієм Малім) була розширена і для відліку років до Різдва Христового. При цьому було прийнято, що 1-й рік до н. е. безпосередньо межує з 1-м роком нашої ери, а число років до нашої ери зростає у міру віддалення у минуле, проте місяці, числа в них і дні тижня рахують вперед, як і у роках нашої ери.

Отже, межею між 1-м роком до нашої ери і 1-м роком нашої ери є лише «мить», яка розділяє 31 грудня 1-го року до нашої ери і 1-м січня нової ери. Високосними до нашої ери, є ті роки, число яких при діленні на 4 дає в остачі 1, наприклад 9-й, 13-й і т. ін.

Такий спосіб відліку років прийнято називати *історичним* або *хронологічним*.

Відсутність «нульового року» часто призводить до помилок при лічбі інтервалів часу між подіями, одна з яких відбувалася до, інша — після початку лічби років у нашій ері. Наприклад, у 1937 р. в Італії та Німеччині відзначили 2000-річчя з дня народження імператора Августа. Але Август народився у 63 р. до н. е., отже, до 1-го року н. е. йому виповнилося 62 (а не 63) роки, а 2000-річчя цієї події настало у 1938 р. Аналогічно в 1945 р. замість 1946 р. відмічалось 2000-річчя з дня смерті давньоримського поета і філософа Лукреція, який помер у 55 р. до н. е.

Обчислюючи моменти сонячних і місячних затемнень, що траплялися в минулому, появу комет тощо, астрономи вибрали власну систему лічби років, яку вперше використав у 1740 р. французький вчений Жак Кассіні (1677–1756) у своїх працях «Елементи астрономії» та «Астрономічних таблицях». Він запропонував умовно називати рік, який передує 1-му р. н. е., *нульовим*; а той, що передує нульовому, — мінус 1-м і так далі (рис. 2.9). Такий відлік років, на відміну від історичного, отримав назву *астрономічного відліку*.

Рік нульовий астрономічний дорівнює 1-му року до н. е., 1-й астрономічний дорівнює 2-му року до н. е., 2-й астрономічний дорівнює 3-му року до н. е. і т. ін. (рис. 2.9).

Таким чином, 63 рік до н. е. — це мінус 62 роки. Тому проміжок часу, який розділяє 63 рік до н. е. і 1937 р. н. е., дорівнює $1937 - (-62) = 1937 + 62 = 1999$.

І при астрономічній лічбі років місяці і дні, як і в «додатних» роках, рахуються вперед. Наприклад, астрономи встановили, що комету Галлея було видно на небі в $-1161,3$ року астрономічного числення. Переведемо цю дату на історичне літочислення. Перш за все: мінус 0,3 року — це 0,7 попереднього, мінус 1162 р. (причому 0,7 року відповідає даті, близькій 14 вересня). У свою чергу, мінус 1162 рік — це 1163 р. до н. е. Таким чином: $-1161,3 = -14$ вересня мінус 1162 р. = 14 вересня 1163 р. до н. е. (Климишин, 2002).

Незнання «правила Кассіні» часто приводило до помилкових визначень пам'ятних дат подій, які відбулися до нашої ери.

Як в астрономічних, так і в хронологічних розрахунках часто використовують неперервний відлік днів, починаючи від 1 січня 4713 р. до н. е. Це так званий юліанський період, про який розповідалося в розд. 2.1.4. Про роль такої системи відліку в хронології влучно сказав німецький астроном, спеціаліст із хронології Христіан-Людвік Іделер (1766–1846): «Можна з повним правом вважати, що лише після введення юліанського періоду в хронології настали світло і порядок».

Дещо про «вікові роки» і святкування їх початку.

Віковими роками називають роки з двома кінцевими нулями; їх ще вважають ювілейними, виходячи з психологічних особливостей людського сприйняття. І не дивно, адже порядковий номер століть пов'язується з комбінацією перших цифр: так, дев'ятнадцяте століття позначається першими цифрами 18, а двадцяте — цифрами 19, двадцять перше — цифрами 20 і т. ін.

І кожний раз виникає питання — коли святкувати прихід нового століття.

Не винятком було і настання XXI століття. На сторінках мережі ІНТЕРНЕТ, виділених для Центру з проблем тисячоліття (Center for Millennial Studies — CMS) відзначалось, що нове тисячоліття офіційно починається 1 січня 2001 р., але святкування почнеться 1 січня 2000 р. На цих же сторінках була вміщена інформація про різні проекти зустрічі нового тисячоліття і століття. Один з них мав назву «Гринвіч-2000». За цим проектом із 1 січня 2000 р. відносно нульового

(гринвіцького) меридіана починалася одісея нового тисячоліття на земній кулі, тобто почалися заходи щодо урочистої зустрічі XXI сторіччя та третього тисячоліття.

Відмітимо також, що слова «2007 р. від Різдва Христового» неточні, оскільки Різдво Христове відноситься до 25 грудня 1-го р. до н. е. Зазначене вказує на умовність поняття «початок віку». Тому в астрономічних обчисленнях це поняття не використовується.

2.1.7. КАЛЕНДАРНІ СИСТЕМИ

День за днем, вони вже зветься — дати.

Л. Костенко

Система лічби великих проміжків часу з поділом їх на короткі періоди (роки, місяці, тижні, дні) називається календарем.

Слово «календар» походить від латинських «caleo» — проголошую і «calendarium» — боргова книга. В Стародавньому Римі початок кожного місяця (і року) жерці проголошували окремо, про це нагадує перше слово. Друге — що першого числа місяця (особливо — року) там було прийнято сплачувати борги.

Воснові будь-якого календаря лежать головні природні періоди — доба, місяць, рік. Оскільки вони не узгоджуються між собою (тривалість синодичного місяця дорівнює закруглено 29,53 доби, а тропічного року — 365,2422 доби), то проблему вимірювання часу різні народи вирішували (ще й досі вирішують) порізно. Тому існує три системи календарів: сонячний, місячний і місячно-сонячний.

Загалом у сучасну епоху налічується близько 40 різних видів календарів відповідно до цих трьох систем (Астроном. календар, 2004; Климишин, 1981, 2002). Відмітимо лише деякі з них.

СОНЯЧНІ КАЛЕНДАРИ

У сонячному календарі узгоджено рік і добу, тому він добре відстежує зміну пір року, але фази Місяця «мандрують» по датах.

Одним з перших сонячних календарів вважається єгипетський, створений у четвертому тисячолітті до н. е. Рік у давньоєгипетському сонячному календарі складався з 365 діб. Початком року вважали день першого в даному році передранкового (геліакічного) сходу зорі Сіріус, з яким в той час було пов'язане настання літнього сонцестояння.

В єгипетському сонячному календарі рік ділився на 12 місяців по 30 діб в кожному. В кінці кожного року до нього додавалося 5 додаткових діб, а кожний місяць складався з трьох великих по 10 або з 6 малих тижнів по 5 днів у кожному і називалися вони, відповідно, декадами і пентадами. Рік поділявся на три сезони по 4 місяці в кожному. Оскільки рік цього календаря був коротшим тропічного року на 0.2422 середніх сонячних діб, то за 1460 років різниця досягла одного року.

Строго кажучи, в основу лічби часу в сонячних календарях покладено тропічний рік — 365,2422 середніх діб. Проте людство живе за календарними роками, які містять ціле число діб (365 або 366). Тому доводилося вводити певні правила вставки додаткового дня в окремих роках, а ще змушені були здійснити згодом календарну реформу для усунення похибок, які нагромадилися. Прикладом таких реформ є прийняття юліан-

ського, а згодом — григоріанського календарів.

Юліанський календар (старий стиль). Походить від римського календаря. Спочатку римляни 354 дні ділили на 12 місяців. Через те, що рік був на 11 днів коротшим від тропічного року, для узгодження календарних чисел з порами року через кожні два роки вставлявся додатковий місяць, що мав 22 або 23 дні. Ця вставка вносила великий розлад у все життя країни, бо робилась вона не за якимись правилами, а на розсуд верховного жерця.

Дуже точну характеристику римського календаря тих часів дав Ф. Вольтер (1694–1778): «Римські полководці завжди перемагали, але ніколи не знали, в який день це сталося».

Безладдя римського календаря було усунено реформою Юлія Цезаря, проведеною за участю єгипетського астронома Созігена. Указом 46 р. до н. е. тривалість року була встановлена 365 днів, але до кожного четвертого року (високосного) додавали один зайвий день, тобто високосний рік дорівнював 366 дням.

Походження слова «високосний» таке. Високос (лат. bissectus — двічі шостий) — стародавні римляни останні дні тижня лічили від першого числа наступного місяця, так що, наприклад, 25 лютого за нашою лічбою у них називався «шостий (Sextus)» день перед березневими календами (лат. calendae — назва першого дня кожного місяця в Стародавньому Римі). 366-й день вставлявся перед 24-м числом лютого і називався «двічі шостий» — «бісектус». Саме від цього слова і походить назва «високосний» рік.

Щодо початку лічби років, то римляни лічили їх від заснування міста Рима. Згодом початок лічби років було змінено: римський монах Діонісій Малий

запропонував 753 р. від заснування Рима вважати за 532 р. від Різдва Христового.

Нововведення Діонісія спочатку не привернуло до себе уваги, і відлік років від Різдва Христового почали вести лише з XV ст., а широке застосування в усьому світі воно отримало в XVII ст. замість старого відліку від створення світу. Це і є *наша ера або нова ера*.

Як уже відмічалось, система лічби часу, коли послідовно рахуються усі дні підряд, називається системою юліанських дат (JD). Цю систему лічби часу не можна вважати календарем, але вона дуже зручна для астрономічних і календарних розрахунків, для хронології. Нульова юліанська дата почалася о 12-й годині (опівдні) за всесвітнім часом у понеділок 1 січня 4713 р. до н. е. за юліанським календарем. Номер юліанського дня — це кількість днів, що минули від початкової епохи (див. «Юліанський період» в підрозд. 2.1.4).

Григоріанський календар (новий стиль). Юліанський рік довший від тропічного на 0,0078 року або на 11 хв 14 с. Середня тривалість юліанського року дорівнює 365 днів 6 год.

Поступово нагромаджуючись, ця різниця становитиме за 400 років уже більше трьох днів. Тому рівнодення і сонцестояння поступово зміщуються на все більш ранні числа: кожні 400 років на три дні. Так, у рік Нікейського собору (325 р. н. е.), на якому були встановлені правила християнського літочислення, весна починалась 21 березня, а на середину XVI ст. рівнодення пересунулося вже на 11 березня. Тому папа Григорій XIII вирішив реформувати календар і указом (буллою) від 1 березня 1582 р. провів у життя проект, запропонований у 1576 р. італійським лікарем Луїджі Ліліо. Цей ка-

Kalendarij nuper restituti pro Festivitatibus S. R. E. suo tempore celebrandis, divinisque itidem officiis recitandis approbatio, & veteris Kalendarii abolitio.

GREGORIUS PAPA XIII.

SERVUS SERVORUM DEI

Ad perpetuam rei memoriam.

Inter gravissimas Pastoralis officii vestri curas, ea postrema non est, ut quæ a Sacro Tridentino Concilio Sedi Apostolicæ reservata sunt, illa ad finem optatum, Deo adiutore, perducantur.

§.1. Sane eiusdem Concilii Patres, cum ad reliquam cogitationem, Breviarii quoque curam adiungerent, tempore tamen exclusi, rem totam ex ipsius Concilii decreto ad auctoritatem, & Judicium Romani Pontificis retulerunt.

§.2. Duo autem Breviario præcipue continentur, quorum unum, preces laudesque divinas festis pro festis diebus perfolendas complectitur, alterum pertinet ad annuos Paschæ, festorumque ex eo pendentes recursum, Solis, & Lunæ motu metiendos.

§.3. Atque illud quidem fel. rec. Pii V. Prædecessor noster absolvendum curavit, atque edidit.

Рис. 2.10. Частина папської булли про введення григоріанського календаря (оригінал зберігається в архіві Ватикану)

лендар отримав назву *григоріанський* (рис. 2.10). Медаль на честь введення григоріанського календаря показана на рис. 2.11. Напис на її лицевій стороні «Gregorius XIII pont (ifex) opt(imus) maximus» означає «Григорій XIII найкращий верховний жрець». На звороті — знак сузір'я Овна і напис: «Anno restituto MDLXXXII», тобто «Рік виправлення 1582».

Реформа календаря була такою:

1) наказано після 4 жовтня 1582 р. вважати відразу не 5 жовтня, а 15 жовт-



Рис. 2.11. Медаль на честь введення григоріанського календаря

ня. Цим була виправлена помилка, що нагромадилася за 1200 років, і початок весни в наступному році знову повернувся на 21 березня;

2) щоб запобігти нагромадженню помилки в майбутньому, було вирішено кожні 400 років вилучати з лічби ті три дні, на які за цей час юліанський календар розійдеться з положенням Сонця. Для цього довелося трохи змінити правило чергування високосних років, і воно набрало такої форми: високосним вважається рік, число якого ділиться на чотири, за винятком років цілих століть (1700, 1800, 1900 і т. д.). Ці останні роки вважаються високосними лише тоді, коли число століть ділиться на чотири. Отже, роки 1600 і 2000 залишаються високосними, а роки 1700, 1800, 1900 стають простими.

Григоріанський календар було названо *новим стилем*, юліанський — *старим*. Різниця між новим і старим стилями становила в XVI ст. 10 днів; у 1600 р. вона не змінилася, бо цей рік був високосним за обома календарями. Але в 1700 р. різниця досягла 11 днів, бо в лютому цього року за старою лічбою було 29 днів, а за новою — 28. З цієї ж причини в 1800–1899 рр. різниця зросла до 12 днів, а з 1900 р. до 2009 р. становить 13 днів (детальніше — в додатку Д2.)

Варто підкреслити, що ця різниця зростає на одну добу з 1 березня столітнього року юліанського календаря. Григоріанський календар відразу прийняли всі католицькі держави. У протестантських ця реформа була проведена набагато пізніше. На теренах України новий стиль було запроваджено 4.10.1582 р. (західні області) та 28.02.1918 р. (на всій території). Більш детальна інформація про введення григоріанського календаря у різних країнах світу наведена в додатку Д6.

Григоріанський календар, як і юліанський, не зовсім точний, проте його неточність становить лише 2 год 53 хв за 400 років, а тому різниця в 1 день може нагромадитися лише за 3300 років.

В літературі часто для років юліанського та григоріанського календарів уживають позначення А.Д., що перекладається як «Року Божого». Наприклад, 2005 А.Д.

Що ж до календарної системи в Україні, то в тій частині України, яка згідно з Люблінською унією між Польщею і Литвою 1569 р. входила до складу Речі Посполитої (а це Галичина, Волинь, Східне Поділля, Київщина та частина Лівобережжя), для цивільного вжитку використовувався григоріанський календар з 4 жовтня 1582 р. (тобто

в цю дату наступило 15 жовтня 1582 р.) з відліком початку року за християнською ерою від 1 січня.

Згідно з Брестською унією 1596 р. православна церква на території Речі Посполитої об'єдналася з католицькою в уніатську церкву, проте і після цього уніатська церква використовувала і продовжує використовувати юліанський календар.

Після війни (1648–1654 рр.), яку очолював Богдан Хмельницький, значна частина України (Лівобережжя, Київщина, Запоріжжя) була приєднана до Росії і в цій частині земель літочислення велось за правилами, прийнятими в Росії. Згідно з цими правилами в Росії лише з 1492 р. (7000 р. від «створення світу») початок нового року було офіційно перенесено на 1 вересня. Майже через 200 років, 19 грудня 7208 р. від «створення світу», був виданий Указ Петра I про реформу календаря в Росії, за яким з цього числа для світського вжитку Росії було введено юліанський календар, а початок нового року почали відзначати 1-го січня 1700 р. від Різдва Христового.

А далі, за перебігом історичних подій в Україні та Росії було так...

У радянській Росії григоріанський календар введено Декретом Раднаркому від 31.01.1918 р., тобто в цю дату наставо 14.02.1918 р. Новий стиль в Україні (УНР) був заведений Центральною Радою 1 березня 1918 р. для світського вжитку (різниця між старим і новим стилем становила 13 днів) і таким чином 1-ше березня 1918 р. стало 14-м березня. В радянській Україні (1919–1991 рр.), а згодом і в незалежній Українській державі було збережено відлік часу за григоріанським календарем.

Як уже відзначалося, оскільки відлік років «нашої ери» починається не з нульового, а з першого року, спеціалісти з

проблем календаря одноставні в тому, що «вікові» роки, наприклад, 1600, 1700, 1800 і т. д. належать до попередніх століть, а нові століття відліковуються відповідно від 1 січня 1601 р., 1 січня 1701 р., 1 січня 1801 р. і т. д. Проте через психологічні властивості людського сприйняття настання нових століть на практиці регулярно відмічалось разом з настанням «вікових» років. Історія знає багато таких прикладів. Так, за наказом Петра I прихід XVIII ст. відмічався в Москві 1 січня 1700 р. дуже урочисто (ілюмінацією, церковними передзвонами, гарматною пальбою). Архівні газетні матеріали свідчать, що в багатьох країнах світу (особливо в США) відбувалися великі святкові дійства в зв'язку з настанням як 1900 р., так і 2000 р.

МІСЯЧНІ КАЛЕНДАРИ

У місячному календарі узгоджено тривалість місяця та доби. У ньому фази Місяця завжди припадають на одні й ті ж числа місяця, але календар не узгоджується з порами року. Місячний календар є найстарішою системою відліку часу. Він з'явився за декілька тисячоліть до нашої ери.

В основі місячного календаря лежить проміжок часу між двома послідовними однаковими фазами Місяця — синодичний місяць. Проте за своєю тривалістю синодичний місяць є дробовим числом. Було встановлено, що в синодичному місяці 29,530 588 середніх сонячних діб. І щоб упродовж року початок кожного місяця збігався з новим Місяцем, непарні місяці року мають складатися з 30, а парні — з 29 діб. Таким чином, місячний рік складався з 354 діб, тобто він був на 11,25 доби коротшим, ніж сонячний.

Місячний календар отримав особливо велике розповсюдження у країнах

Ближнього і Середнього Сходу (Афганістан, Пакистан, Іран, Туреччина та в інших мусульманських країнах, де за початок літочислення прийнято «гіджру» (араб. хіджра — переселення пророка Мухаммеда з міста Мекки до Медини, яке відбулося 16 липня 622 р.).

Основним недоліком місячного календаря є складність узгодження його з порами року, тривалість яких зумовлена тропічним роком, яка дорівнює 365 добам 5 год 48 хв 46,1 с. Це значення не ділиться без залишку на тривалість синодичного місяця. В деяких країнах для узгодження місячного календаря з порами року вводили до нього допоміжні поправки, що значно ускладнювало користування таким календарем.

З фазами Місяця пов'язано і походження семиденного тижня, який є проміжною одиницею між місяцем і добою при вимірюванні часу і приблизно відповідає чверті синодичного місяця в усіх календарях.

Помітивши, що кожна фаза Місяця триває близько семи діб, люди розділили місяць на чотири тижні. З розвитком астрології дням тижня, які в ті часи починалися з суботи, надали назви семи небесних планет. Суботу нарекли днем Сатурна, понеділок — днем Місяця, вівторок — днем Марса, середу — днем Меркурія, четвер — днем Юпітера, п'ятницю — днем Венери і неділю — днем Сонця. Більшість цих назв збереглася до наших часів у мовах європейських країн (французькій, італійській, англійській, німецькій та ін.).

У багатьох слов'янських народів назви днів тижня пов'язані з їх порядковими номерами і деякими релігійними звичаями. Наприклад, неділя — день, в котрий не працювали. За неділею йшов понеділок — перший день після неділі, вівторок — другий день, серeda — се-

редній день, четвер — четвертий, п'ятниця — п'ятий, а назва суботи походить від давньоєврейського слова «шаббот», що означає «відпочинок», «спокій». Ці назви прийшли в українську та інші слов'янські мови з Болгарії.

Мусульманські календарі. У них використовуються лише зміни місячних фаз. Коран категорично забороняє додавання допоміжних місяців до року і днів до місяців для узгодження з тривалістю сонячного року. Мусульманські календарі складні за своєю структурою. Мусульманська ера — гіджра, а за її початок різні ісламські календарі використовують різні етапи події переселення пророка Мухаммеда з Мекки до Медини. У деяких країнах (наприклад, в Ірані, Афганістані, Туреччині) має широке розповсюдження «гіджра сонячна», в якій за початок року прийнята дата весняного рівнодення. Крім того, місячні календарі базувалися або на 8-річній («Турецький цикл»), або на 30-річній («Арабський цикл») періодичностях.

Багато мусульманських календарів побудовані на візуальних спостереженнях нового Місяця. Все це зумовлює розбіжність дат у місячних календарях деяких мусульманських країн. Наприклад, 1-ше рамадана 1383 р. гіджра приходить в Афганістані на 15 січня 1964 р., у Саудівській Аравії — на 16, а в Ірані — на 17 січня.

Перехід дат від гіджри до григоріанського стилю досить складний. Для наближеного переходу з помилкою ± 1 рік можна використати формули

$$\begin{aligned}G &= M + 622 - M/33, \\M &= G - 622 - (G - 622)/32,\end{aligned}$$

де G , M — номери років за григоріанським і мусульманським календарями (І. А. Климичин, 2002, Астроном. календар, К., 2004–2007).

Арабський календар. Відповідно до релігійних канонів араби починають новий місяць із першої видимості місячного серпа після настання фази нового Місяця. Для громадянського календаря використовують таблиці, в яких фази Місяця апроксимовано обчисленнями. У цьому календарі використовується семиденний тиждень, кожна доба в якому починається заходом Сонця. П'ятий день Jum'f починається із заходу Сонця у четвер і нагадує день Sabbath у євреїв, але не є днем відпочинку. Початок відліку — п'ятниця, 16 липня 622 р. за старим стилем. Цей день — початок першого року ери гіджри (А. Н. І). Для календарних обчислень можна вважати, що доба розпочинається у той момент, коли після півночі минуло 18 год.

В арабському календарі 12 місяців. Усі непарні місяці мають 30 днів, парні — 29. Простий рік містить 354 доби, високосний — 355 діб. Система високосних років ґрунтується на 30-річному циклі, в якому роки 2-, 5-, 7-, 10-, 13-, 16-, 18-, 21-, 24-, 26-, 29-й є високосними.

Тридцятилітній цикл містить 10 631 добу, а середня тривалість року становить 354,366 66 доби, що лише на 0,000 42 доби менше за тривалість 12 синодичних місяців (354,367 08 доби). Такий календар добре відстежує зміну фаз Місяця, але зовсім не враховує зміну пір року.

МІСЯЧНО-СОНЯЧНІ КАЛЕНДАРИ

Календар, який узгоджує всі три періодичності (добу, місяць, рік), називається місячно-сонячним. Цей календар з'явився досить рано в Давньому Китаї, а на початку першого тисячоліття до н. е. — в Давній Греції.

Будова місячно-сонячного календаря досить складна. В його основі лежить

тропічний рік, рівний 356,242 20 доби, і синодичний місяць, що дорівнює 29,530 59 доби, тобто в календарі узгоджується рух Місяця з річним рухом Сонця.

У місячно-сонячному календарі рік складається з 12 синодичних місяців по 29 або 30 діб у кожному, а для врахування руху Сонця періодично вводяться «високосні роки», які мають додатковий 13-й місяць. Вводиться він так, щоб початок кожного календарного року, по можливості, збігався б, наприклад, з рівноденням. У цьому календарі прості, 12-місячні, роки мають по 353, 354 і 355 днів, а високосні — по 383, 384 і 385 днів, тому майже точно збігаються 1-ше число кожного місяця з новим Місяцем, а середня тривалість календарного року протягом циклу (сума деяких чисел цілих місяців) наближена до тривалості тропічного року.

Місячно-сонячний календар застосовувався у Вавілоні, Іудеї, Древньому Римі, а тепер використовується і в християнському церковному календарі при обрахуванні Пасхи і пов'язаних з нею релігійних свят (пасхалій), а також в Ізраїлі (Климишин, 2003).

Календар Київської Русі. До прийняття християнства і довгий час після цього у Київській Русі використовувався місячно-сонячний календар, про що свідчать особливості записів у літописах про окремі історичні події. В українських назвах місяців в основному відображено сезонні зміни.

Серед небагатьох пам'яток писемності, які дійшли до наших часів, особливо цікавими є «Повість временних літ» — велика збірка історичних хронік, актів, повчань та розповідей, складена близько 1113 р. Нестором — монахом Печерського монастиря в Києві, «Остромирове євангеліє», написане

у 1057 р., а також деякі пізніші літописні зведення.

Наші предки, як і предки інших народів світу, тісно пов'язували своє літочислення зі зміною фаз Місяця. Записи в літописах свідчать, що з давніх-давен за фазами Місяця на Русі спостерігали дуже уважно. Наприклад, описуючи затемнення Сонця, літописці часто порівнюють серп Сонця з виглядом Місяця. Ці порівняння настільки точні, що дають можливість визначати, в якій місцевості спостерігалось те чи інше затемнення Сонця.

Про велику увагу, яка приділялася спостереженням за Місяцем, свідчать і давньоруські назви місячних фаз: новий місяць називався «межі», молодий серп — «новець», перша чверть — «новий перекрый», фаза близько 10 днів — «підповня», повний місяць — «повня», фаза близько 17 днів — «ущерб», остання чверть — «ветхий перекрый», старий серп — «ветох». Отже, короткі проміжки часу — місяці — у Київській Русі обчислювали за зміною фаз Місяця.

Але наші предки займалися в основному хліборобством, тобто виробничим життям було тісно пов'язане з сезонними змінами пір року. Це змушувало їх у своїх календарних обчисленнях враховувати річний сонячний цикл з його рівноденнями і сонцестояннями. Тому потрібно було регулярно виправляти місячний календар, узгоджувати його зі змінами пір року, вставляючи час від часу 13-й місяць. Початок нового року пов'язувався на Русі з фазами Місяця (з новим Місяцем), а облік часу протягом року зводився до лічби місяців. Вставляли 13-й місяць сім разів протягом 19 років, в середньому через кожні два роки, очевидно взимку, в період поганої погоди, бездоріжжя.

Самобутніми, тісно пов'язаними з природними явищами та господарськи-

ми роботами у різні пори року, були на Русі назви місяців. В календарях українською мовою ці назви збереглися без змін до сьогодні.

«Січень» очевидно походить від слова «сікти» — рубати ліс (а може «січе» сніг, мороз);

«лютий» — місяць найлютіших морозів і завірюх;

«березень» — час, коли зрубане взимку дерево, в основному березу, спалювали на золу, а можливо, під цією назвою розуміли пору, коли розвивається береза і з неї точать сік;

«квітень» і «травень» — пора цвітіння і буйного росту трав;

«червень» — пора цвітіння червоних квітів, червоніння ягід, у цей час люди збирали гусениць і черв'яків;

«липень» — пора цвітіння лип;

«серпень» — пора жнив, у ті часи жали серпом;

«вересень» — час цвітіння вересу;

«жовтень» і «листопад» — назви двох місяців, що припадають відповідно на час жовтіння листя та опадання його з дерев;

«грудень» походить від замерзлих грудок, що утворюються у цей час на дорогах.

Освічена верхівка давньоруської держави разом із християнством та юліанським календарем прийняла римські назви місяців. Саме ними користувався автор «Повісті временних літ» та інші літописці.

Варто зазначити, що на Русі у давні часи (до XIII ст.) не було поняття доби як одиниці обліку часу. Літописці лічили час днями. Ніч розділялася «днесь» і «заутро» і належала до «днесь», яке минуло. Рахунок годин (відповідно до церковної традиції) розпочинався зранку, так що південь відповідав шостій годині.



Рис. 2.12. Древній китайський зодіак

Індійський календар. Починає свій відлік від ери Сака. Перший рік ери Сака A. S. 1 почався у день весняного рівнодення A. D. 79. Перший день A. S. 1879 відповідає 22 березня 1957 р. Індійський календар багато дечого перейняв від григоріанського календаря. Наприклад, система високосних років у них однакова. Для визначення високосного року за індійським календарем потрібно до його номера додати 78, а вже потім до утвореного числа застосовувати правила високосності григоріанського календаря.

Місяці індійського календаря мають 30 або 31 добу. Початок доби збігається

з її початком за григоріанським календарем. Використовується семиденний тиждень.

Китайський календар. Не має початкової епохи для відліку років. Роки рахують 60-річними циклами, усередині них кожен рік має назву, яку утворюють від назви одного з десяти «небесних коренів та від назви однієї з дванадцяти «земних гілок». Кожна із «земних гілок» має «свою» тварину-представника: миша (або пацюк), бик, тигр, заєць, дракон, змія, кінь, вівця, мавпа, птах (курка або півень), собака, свиня (рис. 2.12). Показані на рис. 2.12

ієрогліфічні знаки 12 тварин використовували для позначення місяців, 12 подвійних годин в добі, а також років у 60-літньому циклі.

Початком доби є північ. Першою добю календарного місяця вважається та доба, на яку припадає настання фази нового Місяця.

Для узгодження року та місяця комбінуються прості роки (з 353, 354, 355 добами) та високосні (з 383, 384, 385 добами). Високосний рік має додатковий місяць.

Китайський календар використовують в основному для датування свят, сільськогосподарської діяльності. Державним календарем у Китаї є григоріанський.

Єврейський календар (іудейський). Один із найскладніших календарів. За початкову епоху в ньому прийнято дату створення світу, або «ера Адама». У ньому використовується семиденний тиждень, в якому починає доба позначається номером і починається при заході Сонця. Доба, яка починається звечора в п'ятницю, має номер 7 і назву Sabbath.

Роки відраховуються від створення світу (А. М.), що відповідає моментові 23 год 11 хв 20 с 6 жовтня 3761 р. до н. е. Рік містить 12 або 13 місяців. Додатковий місяць встановлюють у 3-, 6-, 8-, 11-, 14-, 17- і 19-му році 19-літнього циклу. У такому циклі налічується 235 місяців. Простий рік може мати 353, 354 або 355 дб, високосний — 383, 384 або 385 дб. Роки, які мають 353 або 383 доби, називаються неповними, 354 або 384 доби — звичайними, 355 або 385 дб — повними.

Щодо переобчислення дат різних календарів. Для взаємного переобчислення дат різних календарних стилів зручно використовувати безперервний рахунок днів — юліанські дні.

Більш детальний опис різних календарів і таблиць переходу на григоріанський календар можна знайти в «Астрономічному календарі» (Українська астрономічна асоціація та Головна астрономічна обсерваторія НАН України в Києві) та в інших виданнях, а також у книжках І. А. Климишина (1981, 1990, 2002, 2003 рр.).

ПРОЕКТИ НОВОГО КАЛЕНДАРЯ

Григоріанський календар, який є найпоширенішим, відрізняється порівняно високою точністю, але має і низку недоліків. Так, тривалість календарних місяців різна (28, іноді 29, 30 і 31 день); місяці різної тривалості чергуються безладно; початок нового року не пов'язано з будь-яким природним явищем; квартали (чверті року) мають тривалість від 90 до 92 днів; перше півріччя завжди менше за друге (на три дні в простому і на два дні у високосному році); дні тижня не збігаються з будь-якими постійними датами; 10–11 тижнів «розщеплені» — частина їх належить одному місяцю, частина іншому; місяці починаються з різних днів тижня. Число робочих днів у різних місяцях одного і того ж року різне (від 23 до 27 при шестиденному і від 19 до 23 при п'ятиденному тижні). Все це вносить ускладнення в роботу фінансових та інших органів, затруднює складання звітів тощо. Крім того, доводиться друкувати календарі щорічно.

Першою сміливою спробою реформи календаря було створення календаря Французької революції. Нове літочислення, яке було введено за цим календарем у 1793 р. в річницю перемоги революції, було простішим за інші. Скрізь, де можливо, відлік здійснювався десятками. В місяці було три декади

або 30 днів (в кінці року додавалися 5 або 6 днів, які не належали до місяців). День складався з 10 год, година — зі 100 хв, хвилина — зі 100 с.

Але традиції виявилися сильнішими за нововведення. До старих відліків годин повернулися через два роки після введення нового календаря, а до старого календаря — через 13 років. Залишилася лише метрична система мір і ваг, яка згодом набула всесвітнього визнання.

Наступна спроба реформування григоріанського календаря відбулася у першій половині ХІХ ст. У 1834 р. італійський аббат М. Мастрофіні запропонував 365-й день у році не позначати числом, тобто виключити його із днів тижня, і тоді кожний рік складався б із 52 семиденних тижнів.

У 80-х роках минулого століття Г. Армелін (Франція) запропонував проект Всесвітнього календаря, в якому перший місяць кожного з чотирьох кварталів мав би 31 день, а два інших 30 — днів, і 365-й день у році залишався б без позначення дня тижня. Цей проект календаря свого часу отримав 1-шу премію Французького астрономічного товариства.

З розширенням культурних і економічних зв'язків між різними державами недоліки григоріанського календаря стали особливо відчутними. Не дивно, що в багатьох країнах, починаючи з перших років ХХ ст., неодноразово розглядали питання про поліпшення внутрішньої будови календаря і створення єдиного для всіх часів і народів Всесвітнього незмінного календаря.

У 1923 р. в Женеві при Лізі Націй був створений Міжнародний комітет для підготовки Світового незмінного календаря. За час свого існування Комітет розглянув і оприлюднив декілька со-

тень проектів календарів, які надходили з різних країн світу.

У 1931 р. відбулася міжнародна нарада з питань календарної проблеми. Була створена Всесвітня асоціація з проблем календаря, яка стала видавати спеціальний журнал — «Journal of Calendar reforme», в якому висвітлювалися різні аспекти календарної реформи.

Комітет з реформи календаря, розглянувши різні проекти, виніс у 1937 р. на обговорення два з них: французький 12-місячний і швейцарський 13-місячний календарі. У швейцарському проекті рік складався з 13 місяців по 28 днів і по чотири тижні в кожному, а один день в кінці року і ще один день в середині високосного року залишалися без числа, поза місяцями і днями тижня. Суттєвим недоліком такого календаря є нерівність (точніше, відсутність) кварталів у році. Швейцарський проект при голосуванні не отримав жодного голосу і був відкинутий. Заперечення Ватикану і Друга світова війна взагалі стали на перешкоді проведенню календарної реформи.

Проект французького 12-місячного календаря в принципі схвалили уряди 70 країн, а ще раніше, в 1922 р., проект такого календаря було схвалено Міжнародним астрономічним союзом.

Потім питання про реформу календаря обговорювалось у комісіях і радах ООН. Так, на Економічній і Соціальній радах ООН знову обговорювався 13-місячний календар, усі місяці якого починалися б у неділю і закінчувалися б суботою, з тими ж правилами вставки допоміжних днів. Ці дні планувалося оголосити міжнародними святами. День в кінці року можна було б назвати Днем миру і дружби народів. Другий додатковий день — в середині року — пропонували назвати Днем високосного року.

2.5. Проект усеусвітнього календаря (Климишин, 2002)

День тижня	Січень Квітень Липень Жовтень	Лютий Травень Серпень Листопад	Березень Червень* Вересень Грудень**
Неділя	1 8 15 22 29	5 12 19 26	3 10 17 24
Понеділок	2 9 16 23 30	6 13 20 27	4 11 18 25
Вівторок	3 10 17 24 31	7 14 21 28	5 12 19 26
Середа	4 11 18 25	1 8 15 22 29	6 13 20 27
Четвер	5 12 19 26	2 9 16 23 30	7 14 21 28
П'ятниця	6 13 20 27	3 10 17 24	1 8 15 22 29
Субота	7 14 21 28	4 11 18 25	2 9 16 23 30

* Після 30 червня День високосного року.

** Після 30 грудня День миру і дружби народів — щорічне міжнародне свято.

Противники 13-місячного календаря вказували на те, що наявність 13-го місяця призведе до плутанини в обчисленні різних історичних дат. Тому вони пропонували проекти інших календарів, в яких рік складався з 12 місяців. Основою календаря мав бути тропічний рік, в ньому зміна пір року пов'язана з відносним положенням Землі і Сонця. В 1949 р. питання про реформу календаря знову розглядалося в ООН і знову рішення не було прийняте.

У 1953 р. за ініціативою Індії знову в ООН повернулись до питання про реформу календаря. В 1954 р. проект нового календаря (табл. 2.5) був схвалений 18-ю сесією Економічної і Соціальної ради ООН і рекомендований Генеральній Асамблеї ООН. В ньому зберігався тропічний рік, котрий ділився на чотири квартали по 91 дню в кожному. Такий календар простий за своєю арифметичною основою. В ньому кожен квартал складався з трьох місяців, причому перший місяць кварталу мав 31, а два інших місяці по 30 днів.

Внутрішня структура запропонованого календаря порівняно з григоріан-

ським мала незначні зміни: лютий збільшувався на два дні, березень, травень і серпень скорочувалися кожен на один день, квітень отримував зайвий день. День після 30 грудня було запропоновано назвати Днем миру і дружби народів. Перше число кожного року завжди випадало на неділю і кожний квартал, який складався з 13 тижнів, починався з неділі і закінчувався суботою. В кожному місяці 26 робочих днів. Перевагою такого календаря є те, що він спрощує повсякденне життя.

Прийняття 12-місячного календаря, який був схвалений СРСР, Індією, Китаєм, Францією, Чехословаччиною, Югославією і багатьма іншими державами Європи, Азії і Латинської Америки, не пов'язане з будь-якою корінною перебудовою нашого літочислення, тому він може швидко увійти в побут усіх народів і легко замінити діючий у багатьох країнах григоріанський календар. Проте новий календар можна ввести лише після схвалення його всіма державами за загальнообов'язковою міжнародною угодою. Саме в цьому питанні досягнення загального схвалення виявилися великі

труднощі. Вони пояснюються впливом церкви в деяких державах, яка за будь-яких умов відстоює збереження григоріанського календаря і виступає проти будь-яких календарних реформ. Уряди США, Великобританії, Нідерландів, Індонезії і деяких інших країн при обговоренні проекту нового календаря відмовились прийняти його, мотивуючи своє рішення релігійними міркуваннями.

2.1.8. ЕРИ. ЕПОХИ

Побудова календарних систем тісно пов'язана з такими поняттями, як ера та епоха.

Ера (від лат. *aera* — початкове число) — система лічби років. Її могли вести як від події реальної, так і вигаданої. Існує припущення, що слово «аера» складається з перших літер фрази «*ab exordio regni Augusti*» — «від початку царювання Августа», римського імператора Августа Октавіана, за якого римська держава

з республіки перетворилася в імперію. Тоді було прийнято датувати офіційні документи роком правління імператора.

Епохою (від грец. *Εποχ* — зупинка) називають початкову точку відліку певної ери. В астрономії епохою вважають момент часу, для якого задають положення світил на небі, орієнтацію координатної системи, значення будь-яких змінних у часі величин.

Календарні ери. Вже в перших століттях нашої ери деякі християнські письменники й історики намагалися «перекинути» хронологічний місток від подій, описаних у Біблії, до тих, що відбувалися на їхніх очах. Вони і почали підраховувати числа поколінь «від Адама до Авраама», «від Авраама до Давида» і т. д. Так і було створено близько 200 ер «від створення світу», за якими проміжок часу «від створення світу» і «до Різдва Христового» налічував від 3483 до 6984 років.

Нижче наведено епохи найважливіших календарних ер:

Дата	Ера
1 вересня 5509 р. до н. е.	Візантійська «від створення світу»
1 березня 5508 р. до н. е.	Давньоруська «від створення світу»
1 вересня 4713 р. до н. е.	Юліанського періоду (ера Скалігера)
7 жовтня 3761 р. до н. е.	Єврейська «від створення світу» («від Адама»)
2397 р. до н. е.	Китайська циклічна ера
1 липня 776 р. до н. е.	Від початку перших олімпійських ігор
1 січня 1 р. н. е.	Християнська ера «від втілення Ісуса Христа» введена у 525 р. Діонісієм Малім (<i>наша ера</i>)
16 липня 622 р. н. е.	Мусульманська ера «гіджра», від дати переїзду Мухаммеда з Мекки до Медини
4 жовтня 1957 р.	Космічна від дня запуску першого штучного супутника Землі (СРСР). Ця подія відзначена Постановою Міжнародної федерації астронавтики у вересні 1967 р. у Белграді

Стосовно *астрономічних епох*, то слід відмітити, що бesselеву епоху на юліанську дату вимірюють у роках з дробовою частиною, визначеною в частинах тропічного року від початку бesselевого року (див. підрозд. 2.1.4) за виразом

$$1900.0 + \frac{(JD - 2\,415\,020,31\,352)}{365.242\,198\,781},$$

тут число в знаменнику — тривалість тропічного року в 1900.0 році, а в чисельнику *JD* — юліанські дні на початок бesselевого року 1900.0.

Оскільки елементи, що фіксують координатну систему на небі, не є сталими, то для координат світила на небі треба завжди зазначати, якому моменту часу відповідає ця система координат. Для переведення системи координат з початкової епохи на поточну використовують точні формули.

Є загальновідомі астрономічні епохи, для яких положення систем координат і світил задають у цих системах (стандартні епохи). Ними до 1984 р. були початки бesselевих років 1900.0; 1925.0; 1950.0; 1975.0; 2000.0. Дробова частина (нуль) означала, що момент віднесено до початку бesselевого року. Цей початок не збігається з 0 год 1 січня, а змінюється за певним правилом. Після 1984 р. за стандартну епоху беруть 0 год 1 січня. Її позначають, наприклад, J2000.0, на відміну від бesselевої, для якої тепер прийнято позначення B2000.0.

Нагадаємо також широко вживані в астрометрії стандартні епохи: 1900 січень 0,12 год ET — фундаментальна епоха; 2000 січень 1.5 — стандартна епоха (с. 107); 1980 січень 6.0 — GPS- епоха (с. 93).

Юліанську епоху, яку використовують після 1984 р., обчислюють для відомої юліанської дати JD за виразом

$$J\left(2000.0 + \frac{JD - 2\,451\,545.0}{365.25}\right),$$

де число в знаменнику — середня тривалість юліанського календарного року, а в чисельнику — JD 1 січня 2000.

Епохи в астрономії розрізняють також такі: *епоха спостереження* — момент проведення астрономічних спостережень; *епоха каталогу* — середня епоха спостереження зір каталогу; *епоха рівнодення* — момент часу, на який фіксується положення небесного екватора та екліптики. Наприклад, епохою

космічного каталогу HIPPARCOS є епоха J1991.25, а положення у просторі площини екватора задається на момент J2000.0.

Цікаву і детальну розповідь щодо проблем хронології можна знайти на сторінках книжки І. А. Климишина «Календар і хронологія» (2002), яка вже неодноразово цитувалася. Пригадаємо дещо з цієї книжки (Ч. 4 «На роздоріжжі історії»).

І. А. Климишин відзначає, що з плином часу події, які відбувалися у будь-якій країні, рядок за рядком вкладалися на сторінки єдиної всесвітньої історії. Перші ж її сторінки нещадно пошматував вітер часу, безжально розсіявши їх. Тисячі років вони були невідомі людям. Лише недавно деякі з них вдалося зрозуміти, розшифрувавши дивні клинописні знаки та ієрогліфи. Тут не обійшлося і без допомоги астрономів, які дали історикам таблиці усіх затемнень, що спостерігалися на Землі за останні 3500 років, і фізиків, які методом радіоактивного аналізу визначили вік викопних залишків з похибкою ± 200 років.

У наш час між календарною і хронологічною лічбою часу є певна гармонія. Наш рік, яким користуємося в щоденному житті, з достатньою точністю узгоджений зі зміною пір року, тобто з астрономічною лічбою часу. Проте такої гармонії не було в далекому минулому. Причина цього — передусім недосконалість календарів як «інструментів» для лічби проміжків часу.

Взагалі календарний стиль — це певна традиція вести лічбу років від якоїсь конкретної календарної дати. Відносно цього в середньовічній Європі панувало найжахливіше безладдя: різні країни в різний час (а іноді й одночасно) починали відрахунок днів

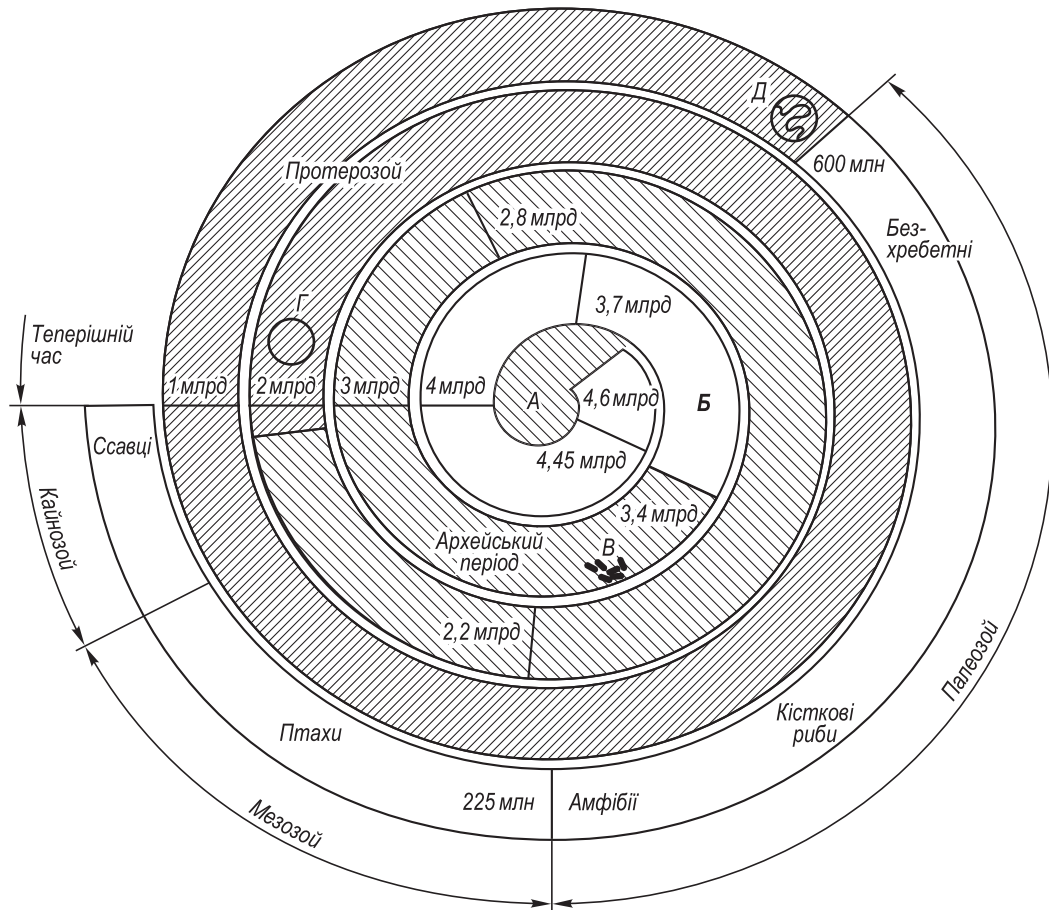


Рис. 2.13. Спіральний годинник еволюції Землі. Літерами позначено час виникнення: А — найстаріших місячних порід; Б — земних порід; В — найперших викопних клітин; Г — решток фотосинтезуючих рослин; Д — докембрійських безхребетних риб (Климишин І. А., Тельнюк-Адамчук В. В., 1990)

нового року від 25 грудня, 1 січня, 1 березня, 25 березня, з дня Пасхи і від 1 вересня...

Так, лічбу днів у році від «Різдва Христового» (від 25 грудня) в Римі вели з IV ст. н. е., у Франції — з VIII і до кінця X ст., в Німеччині — з IX ст., причому в масштабах усієї країни початок року на 25 грудня було перенесено у 1310 р.

Крім календарних існують також наступні поняття ери.

Геологічна ера — великий історичний період в історії Землі як планети. Ця ера поділяється на окремі періоди; декілька геологічних ер об'єднуються в еон геологічний (еон — грец. αἰών — вік, епоха). Еон — етап в історії розвитку Землі тривалістю близько 1 млрд років. На діаграмі, яку називають спіральним годинником (рис. 2.13), виділяють кілька еонів. Один оберт стрілки такого «годинника» відповідає 1 млрд років.

На рис. 2.13: *A* — 4,5 млрд років тому — вік найстаріших місячних порід; *B* — 3,5 млрд років тому — вік знайдених найстаріших земних порід; *B* — 3, 4 млрд років тому — вік найстаріших викопних рослин; *Г* — 2 млрд років тому — вік найстаріших фотосинтезуючих рослин; *Д* — 0,6 млрд років тому — поява перших безхребетних.

Космологічна ера — до цього поняття можна віднести уявлення про початок розвитку Всесвіту, що пояснює його еволюцію і властивості від Великого Вибуху (народження Всесвіту із сингулярності або просторово-часової піни). В табл. 2.6 (М. В. Сажин, 2002) наведено основні епохи еволюції Всесвіту.

Наведемо деякі короткі коментарії до таблиці, що базуються на сучасних космологічних моделях.

Через 10^{-42} с після народження класичного простору-часу у Всесвіті наступила інфляційна стадія. Вона характеризується гранично сильним від'ємним тиском, при якому змінюються самі закони звичайної гравітаційної фізики. Речовина стає не джерелом притягування, а джерелом відштовхування. Під час цієї стадії об'єм Всесвіту збільшується на багато порядків.

Далі за класичною схемою Великого Вибуху до 10^{-36} с тривала стадія, протягом якої головну роль відіграло народження речовини. З так званого «кваркового супу» (кварки і глюони), починають утворюватися протони і нейтрони. У вільному стані у звичайних умовах кварки і глюони не можуть існувати як вільні частинки. Це явище називають «невилітом кварків» або конфайментом. Взаємодію кварків один з одним здійснюють глюони. Між двома кварками при взаємодії утворюється «струна» з глюонів, яка утримує їх від занадто близького наближення один до одного і від занадто великого віддалення.

2.6. Основні епохи еволюції Всесвіту

Назва епохи і фізичні процеси на той час	Час від Великого Вибуху	Температура, К
Народження класичного простору-часу	10^{-43} с	10^{32}
Стадія інфляції	$\sim 10^{-42}$ – 10^{-36} с	Змінюється в дуже широких межах
Народження речовини	10^{-36} с	$\sim 10^{29}$
Народження баріонного надлишку	10^{-35} с	$\sim 10^{29}$
Електрослабкий фазовий перехід	10^{-10} с	$\sim 10^{17}$ – 10^{16}
Конфаймент кварків або невиліт кварків	10^{-4} с	$\sim 10^{12}$ – 10^{13}
Первинний нуклеосинтез	1–200 с	~ 10 – 10^{10}
Початок епохи домінування темної матерії	70 000 років	8813
Рекомбінація водню	379 000 років	2943
Сучасна епоха	13 700 000 000 років	3

Після епохи утворення протонів і нейтронів найбільш значимою є епоха нуклеосинтезу. В цей період синтезуються легкі ядра з атомною вагою ($A < 5$), більш важкі ядра синтезуються пізніше в зорях.

Наступна епоха, яка відіграє важливу роль в космології, — епоха домінування маси. Природа маси досі невідома.

В космології розрізняють два види темної матерії: HDM (Hot Dark Matter) — гаряча темна матерія і CDM (Cold Dark Matter) — холодна темна матерія.

Услід за епохою домінування скритої маси настає епоха рекомбінації водню. До рекомбінації у Всесвіті існувала гаряча плазма, яка складалася з частин темної матерії, протонів, електронів, фотонів і деякої кількості легких ядер. Під час рекомбінації протони і електрони об'єднуються і утворюють водень — один з найпоширеніших елементів у Всесвіті. Епоха рекомбінації збігається з епохою прозорості Всесвіту.

Між епохою рекомбінації і нашим часом лежить ще одна важлива епоха — утворення великомасштабної структури Всесвіту.

Детальніше про космологічну еру можна дізнатися з літератури (М. В. Сажин, 2002; Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, 1975; А. Д. Долгов, Я. Б. Зельдович, М. В. Сажин, 1988).

2.2. ФІЗИЧНА СИСТЕМА ЛІЧБИ ЧАСУ

Час — це фізична величина, котру можна точно виміряти сучасними методами: найкращі годинники мають тепер точність близько 10^{-14} або 10^{-15} , а в найближчому майбутньому очікується досягнення точності 10^{-16} .

Ж. Ковалевський (1994)

З 1955 р. у зв'язку з появою високо-стабільних еталонів частоти, які базуються на фізичних явищах квантових переходів між енергетичними рівнями атомів і молекул, стало можливим формування нової системи часу — атомного часу, не пов'язаної з явищем добового або орбітального руху Землі. Атомний час позначається АТ і ТА відповідно

англійськими і французькими дослідниками.

За рішенням XIII Генеральної конференції мір і ваг (1967) за одиницю атомного часу було прийнято *СІ (SI)-секунду* — «тривалість 9 192 631 770 періодів, які відповідають резонансній частоті квантового переходу між рівнями ($F = 4$, $V = 0$) і ($F = 3$, $V = 0$) надтонкої структури основного стану $^2S_{1/2}$ атома цезію ^{133}Cs на рівні моря».

(Щоб виключити неоднозначне трактування терміну «рівень моря», Консультативний Комітет з визначення секунди (CCDS) у 1980 р. рекомендував використовувати термін «геоїд, що обертається». В стандартах Міжнародної служби обертання Землі (IERS) з 1996 р. використовується геоїд, який відповідає геопотенціалу $W_0 = 62\,636\,856,85\text{ м}^2\text{с}^{-2}$. З 2000 р. значення W_0 перевизначено (с. 104).

Тривалість ефемеридної та СІ-секунди була узгоджена на основі експерименту, який провели спільно Лабораторія Військово-Морських сил США (спостереження Марковицем покриття зір Місяцем) і Національної фізичної лабораторії в Теддінгтоні, Великобританія (роботи Холла, Ессена, Парі стосовно аналізу ЕТ-АТ). Нуль-пункт атомної шкали було обрано так, щоб її показник збігся з UT1 на дату 1958 січень 1,0 год. Атомна секунда була визначена з точністю $2 \cdot 10^{-9}$ відносно ефемеридної секунди.

В атомних годинниках частота цезієвого (Cs) випромінювання використовується для контролю кварцевого кристала, який керує годинником. Таким чином, кожний атомний годинник задає свою власну систему часу. Інші ізотопи дають теж достатньо стабільне випромінювання для того, щоб створити атомні годинники. Зокрема, використовується рубідій (Rb), коли потрібна

простота і портативність, а вимоги до стабільності не настільки високі (менше 3 днів), тоді як, наприклад, водневі (H) мазери мають найбільшу короткочасну стабільність. Розробляються економічно виправдані водневі мазери з безперервною роботою упродовж декількох років.

Цезієві і водневі стандарти складають основу національних еталонів часу і використовуються для формування Національних і Міжнародних шкал часу.

При інтегруванні частоти початок шкали атомного часу не визначено, тому нуль-пункти різних шкал атомного часу можуть не збігатись. Крім того, різниця нуль-пунктів шкал може змінюватися як через випадкові, так і через систематичні похибки (або варіації ходи) атомних стандартів частоти. З випадковими і систематичними варіаціями частоти пов'язані дві найважливіші характеристики атомних годинників: *нестабільність і точність*.

Нестабільність частоти визначається дисперсією Аллана

$$\sigma^2 y(\tau) = (y_{k+1} - y_k)^2 / 2,$$

де y_{k+1} , y_k — частоти генератора на відповідних інтервалах; τ — тривалість між інтервалами.

Зі збільшенням τ до певної величини випадкові флуктуації частоти усереднюються і дисперсія Аллана зменшується. Проте подальше збільшення τ приводить до систематичного збільшення шумів, отже, до збільшення дисперсії Аллана.

Нестабільність кращих цезієвих стандартів становить 10^{-14} при усередненні за декілька діб. Водневі стандарти мають найкращу з усіх короткочасну нестабільність близько 10^{-15} на інтервалі 100–1000 с.

Нестабільність нових цезієвих годинників Паризької обсерваторії, принцип дії яких базується на використанні фон-

танного ефекту, досягає 10^{-16} на інтервалі усереднення близько декількох діб.

Ідеальний стандарт частоти буде генерувати сталу в часі частоту. Проте якщо величина частоти відрізнятима від номінальної (9 192 631 770 Гц), то шкала цього стандарту буде рівномірно розходитися з Міжнародною атомною шкалою (ТАІ).

Відмінність реальної частоти стандарту від номінальної називається його *точністю*. Точність секунди Міжнародної атомної шкали дорівнює приблизно $5 \cdot 10^{-14}$. Це означає, що шкала ТАІ розходиться з ідеальною шкалою часу приблизно на 1 мкс в рік. Докладніше про шкалу часу ТАІ, атомні стандарти й атомні годинники розповідається в інших розділах книги (див. с. 85, 143–146).

У сучасну епоху для відтворення і збереження атомного часу використовують первинні і комерційні цезієві стандарти. Первинні стандарти відтворюють секунду з високою точністю і стабільністю (10^{-14} – 10^{-15}).

Комерційні стандарти доступніші для реалізації, стабільніші за частотою, хоча їх особливістю є деякі відхилення від точного визначення секунди (див. с. 146).

Перші первинні незалежні стандарти з'явилися в 1955 р. в таких обсерваторіях і лабораторіях: Національному бюро стандартів США, Національній науково-дослідній раді Канади, Військово-морській обсерваторії США, Невшательській обсерваторії (Швейцарія), Національному фізико-технічному інституті ФРН, Гринвіцькій обсерваторії (Англія) і Паризькій обсерваторії.

З часом кількість лабораторій, які визначали власні атомні шкали часу, значно збільшилась — до 65 (300 атомних стандартів) у 2008 р. Ці локальні шкали атомного часу позначаються АТ(k), де k — індекс лабораторії.

Сучасні методи синхронізації шкал часу на великих відстанях (такі, як LORAN-C, GPS-супутники, телебачення) створили умови для побудови Міжнародної атомної шкали часу шляхом осереднення показань атомних годинників лабораторій різних країн світу. Саме таку функцію визначення Міжнародної шкали виконувало Міжнародне бюро часу (МБЧ) з 1912 до 1988 р. У 1958–1968 рр. МБЧ визначало атомну шкалу, яка позначалася АЗ, на основі фазових вимірів частотних сигналів від лабораторій, що мали атомні годинники. За початок відліку шкали АЗ обрано момент 0 год UT2 1 січня 1958 р.

У 1969 р. було створено атомну шкалу часу АТ на основі порівняння сигналів часу (а не частоти) таким чином, щоб забезпечити неперервність зі шкалою АЗ. А вже в 1972 р. введено Міжнародну шкалу атомного часу ТАІ, яка утворювалася усередненням показань годинників багатьох країн. Точністю цієї шкали виявилася досить високою. Відхилення шкал окремих обсерваторій від атомної шкали у 1970–1971 рр. не перевищувало 50 мс. Перехід від шкали АЗ до шкал АТ і ТАІ не вніс змін у вибір початку відліку (Tomas, Wolf, 1992; Audoin, Guinot, 1998). З 1988 р. функції Міжнародної служби часу перейшли до Секції часу Міжнародного бюро мір та ваг.

Введення атомного часу суттєво змінило структуру і завдання Служб часу. Рівномірність атомної шкали часу неможливо контролювати за допомогою астрономічних спостережень, оскільки їх точність значно нижча через похибки спостережень і неврахованих флуктуацій в обертанні Землі.

Життя на Землі тісно пов'язане з її обертанням, тобто із всесвітнім часом, тому значне розходження атомного часу

із всесвітнім, астрономічним може призвести до цілого ряду труднощів у вирішенні проблем геодезії, геофізики, астрономії. Ця обставина змусила використовувати при передаванні сигналів точного часу деяку компромісну шкалу часу, яка отримала назву всесвітньої координований час (див. с. 89).

Використання атомних еталонів привело до розділення Служб часу на лабораторії, які зберігають шкалу атомного часу, і на астрономічні служби, що займаються вивченням особливостей обертання Землі. Це знайшло також відображення в розділенні функцій Міжнародного бюро часу: з 1988 р. астрономічні аспекти вивчення особливостей обертання Землі (в тому числі визначення всесвітнього часу) є завданням Міжнародної служби обертання Землі (IERS), а питання визначення Міжнародного атомного часу і розповсюдження сигналів точного часу перейшло до функцій Секції часу Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM) (див. с. 124).

До атомних шкал часу належать космічні навігаційні шкали GPS-час і ГЛОНАСС-час (див. с. 92–94).

До шкал часу, що базуються на СІ-секунді, належать також релятивістські шкали ефемеридної астрономії (теоретичні шкали, див. с. 95–96).

Цезієві (Cs), водневі (H) та рубідієві (Rb) атомні стандарти частоти, які складають основу Національних еталонів часу і використовуються для формування Національних і Міжнародної шкали атомного часу, розглянуто далі (с. 125).

Проблеми щодо атомних шкал часу детально проаналізовано в літературі (К. Одуан, Б. Гіно, 2002), а інформацію щодо ходу атомних годинників, які використовуються для обчислення шкали ТАІ, — на сайті Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM): (<http://www.bipm.fr>).

3. ШКАЛИ ЧАСУ

*Тоді пізнається цінність часу,
коли він утрачений.*

Г. Сковорода (1761)

Загальноприйнято, що будь-яке явище чи подію можна зафіксувати трьома просторовими і однією часовою координатами. Для вимірювання часу використовують періодичні процеси, а шкала часу є часовою віссю обраної системи координат.

Нагадаємо відомі визначення шкал часу.

Міжнародний консультативний комітет з питань радіо (International Radio Consultative Committee — CCIR) у своїх рекомендаціях (1990) визначив *шкалу часу як упорядкований набір шкалових маркерів разом з відповідною нумерацією*.

Відповідно до міждержавного стандарту (ГОСТ 8.567–99) *шкала часу — це безперервна послідовність інтервалів часу певної тривалості, яка відраховується від початкового моменту*. Для шкали часу встановлюється умовний нуль, одиниця величини і порядок коригування.

Державним стандартом України ДСТУ 2870–94 «Вимірювання часу та частоти» дається таке визначення шкали часу: *шкала часу — це неперервна послідовність інтервалів часу визначеної тривалості, яка відраховується від початкового моменту*.

Відповідно до того, як системи часу (див. підрозд. 2) поділяються, в основному, на дві групи, перша з яких базується на астрономічних спостереженнях за обертанням Землі навколо своєї

осі і навколо Сонця, а друга — на явищах квантових переходів між енергетичними рівнями атомів і молекул, так і шкали часу діляться, в основному, за цим же принципом на групи.

Основною відмінністю поняття «шкала часу» від поняття «система часу» є те, що шкали часу встановлюються за Міжнародною угодою і є єдиними для користування в науці і техніці. Системи часу визначають метод отримання шкали часу: астрономічний чи фізичний.

До першої групи, що базується на обертанні Землі, належать шкали всесвітнього часу (UT) та ефемеридного часу (ET). До другої — шкали Міжнародного атомного часу (TAI), GPS-часу та ГЛОНАСС-часу, а також комбінована шкала часу — всесвітній координований час (UTC), — яка узгоджує всесвітній і атомний час.

До другої половини ХХ ст. існували лише шкали, які побудовані за законами обертання Землі як навколо своєї осі, так і навколо Сонця.

Нові високоточні методи практичних вимірювань і досконалість теоретичних досліджень сприяли появі нових шкал часу, назва яких ще остаточно «не узаконена»: їх називають «релятивістськими» (В. Брумберг, 2004), «релятивістськими динамічними» (К. Одуан, Б. Гіно, 2002) або просто «динамічними» (В. Жаров, 2006). Тут обрано назву «релятивістські

шкали часу» насамперед тому, що вони визначаються з урахуванням релятивістських теорій, а також щоб відрізнити їх від першої динамічної шкали — ефемеридного часу класичної механіки.

Отже, релятивістськими шкалами часу є *барицентричний динамічний час (TDB)*, *барицентричний координатний час (TCB)*, *земний динамічний час (TDT)*, *геоцентричний координатний час (TCG)* та *земний час (TT)*. Вони є теоретичними шкалами часу і безпосередньо базуються на теорії руху тіл Сонячної системи (з одиницею вимірювання часу СІ-секундою), яка визначається законами гравітації і залежить від значення гравітаційної сталої (тому такі теоретичні шкали ще називають гравітаційними). Існує думка, що ці шкали еквівалентні, проте це справедливо лише у тому разі, коли фундаментальні фізичні сталі не змінюються з часом (К. Одуан, Б. Гіно, 2002).

Введення шкал часу регулюється рекомендаціями Генеральних асамблей Міжнародного астрономічного союзу і є обов'язковим для використання в наукових дослідженнях у всіх країнах.

3.1. ХРОНОЛОГІЯ ВВЕДЕННЯ ШКАЛ ЧАСУ

Час для нас є уявленням, що залишається в пам'яті низкою подій, які, як ми впевнені, відбуваються послідовно.

П. Лаплас (1820)

1884 р. — на Міжнародній конференції у Вашингтоні прийнято визначення нульового меридіана, яким став Гринвіцький меридіан, введено поняття поясного часу, а також прийнято се-

редню гринвіцьку добу (GMT) за всесвітню добу. Земна куля була поділена на 24 годинних пояси, час яких відрізняється один від одного на одну годину. Було прийнято, що відлік довгот ведеться так: від'ємні довготи — на схід, додатні — на захід від нульового меридіана.

1900 р. — ухвалена фундаментальна епоха для астрономічних обчислень: 1900 січень 0,12 год ефемеридного часу ET.

1912 р. — Бюро довгот скликало в Парижі Міжнародну конференцію з метою створення єдиної системи часу для всіх країн.

1919 р. — створення Міжнародного астрономічного союзу (МАС), у складі якого було визначено понад 40 комісій із різних галузей астрономії. Комісія № 31 відповідала за проблеми, пов'язані з визначенням та зберіганням часу.

1920 р. — з 1 січня згідно з рішенням Комісії № 31 МАС почало діяти Міжнародне бюро часу (МБЧ) в Парижі. Завдання МБЧ — обчислення всесвітнього часу UT на основі спостережень світової мережі обсерваторій та розповсюдження сигналів всесвітнього часу.

1925 р. — з 1 січня відлік всесвітньої доби стали вести від півночі: 1925 січень 1,0 UT = 1924 грудень 31.5 GMT. До цієї дати відлік всесвітньої доби вели від півдня.

1928 р. — на III з'їзді МАС (Лейден) були прийняті деякі уточнення стосовно визначення всесвітнього часу UT, зокрема, затверджено, що Гринвіцький середній сонячний час є всесвітнім часом і що його можна визначити через місцевий середній сонячний час M за формулами:

$$UT = M + \lambda \quad (\text{на захід від Гринвіча}),$$

$$UT = M - \lambda \quad (\text{на схід від Гринвіча}).$$

1952 р. — на VIII з'їзді МАС було ухвалено рішення про введення в ефе-

меридній астрономії замість всесвітнього часу ефемеридний час.

1955 р. — перші дослідження для введення поняття атомного часу і створення відповідної шкали.

1956 р. — відкриття сезонної нерівномірності обертання Землі (М. Стойко).

1956 р. — МБЧ ввело нові форми шкали всесвітнього часу: UT0, UT1, UT2.

1958 р. — Міжнародне бюро часу почало обчислювати атомну шкалу АЗ на основі фазових вимірів частотних сигналів різних лабораторій, яка проіснувала до 1969 р.

1960 р. — згідно з рішенням VIII з'їзду МАС (Рим, 1952) XI Генеральна конференція мір і ваг затвердила замість шкали нерівномірного всесвітнього часу UT шкалу ефемеридного часу ET. Ця ж конференція ухвалила рішення про встановлення єдиної системи одиниць і, зокрема, затвердила визначення секунди як $1/365.242\ 198\ 781\ 77$ тропічного року епохи 1900.0.

1961 р. — МБЧ ввело для передавання радіосигналів часу всесвітній координований час UTC.

1967 р. — VIII Генеральна конференція мір і ваг прийняла рішення про визначення атомної секунди як одиниці часу в міжнародній системі СІ.

1969 р. — МБЧ створило атомну шкалу АТ на основі порівняння сигналів часу різних лабораторій. Вона була продовженням шкали АЗ. Шкала атомного часу замінена у 1972 р. шкалою Міжнародного атомного часу ТАІ.

1970 р. — Міжнародний комітет мір і ваг затвердив рекомендації щодо визначення шкали Міжнародного атомного часу ТАІ. Було прийнято, що початок ТАІ збігається з UT1 1 січня 0^h, 1958 р.

1972 р. — МБЧ ввело у користування шкалу атомного часу ТАІ.

1972 р. — прийнято рішення, що узгодження шкали часу UTC зі шкалою UT1 проводиться стрибками на 1 с (leap second).

1979 р. — Міжнародне бюро часу ввело шкалу UT1R (всесвітній регуляризований час) — це всесвітній час, в якому враховані відхилення, пов'язані з впливом короткоперіодичних членів припливу (від 35 діб).

1982 р. — XVIII з'їзд МАС (Патри) ухвалив рішення про зміну відліку довгот: на схід — додатні, на захід — від'ємні.

1982 р. — з'явилося поняття «пульсарний час».

1984 р. — згідно з рекомендаціями XVI і XVII з'їздів МАС (Гренобль, 1976, і Монреаль, 1979) було відмінено шкалу ET і введено шкали барицентричного динамічного часу (TDB) і земного динамічного часу (TDT).

1988 р. — функції МБЧ були розділені на дві частини: визначення параметрів обертання Землі відійшло до Міжнародної служби обертання Землі (IERS), а суто технічні питання визначення атомного часу — до Секції часу Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM).

1991 р. — XXI з'їзд МАС (Буенос-Айрес), прийнявши загальну теорію відносності за теоретичну основу для визначення часу, ввів нові шкали координатного часу: TT — земний час, TCB — барицентричний координатний час, TCG — геоцентричний координатний час.

1993 р. — на супутникових навігаційних системах введено атомні шкали GPS-час, ГЛОНАСС-час.

1997 р. — вирішено запровадити з 1 січня 1998 р. нові системи відліку координат — Міжнародну небесну референсну систему (ICRS) та Міжнародну земну референсну систему (ITRS).

2000 р. — введення нової стандартної епохи 2000 січень 1.5.

2000 р. — на XXIV з'їзді МАС (Манчестер) були прийняті резолюції щодо уточнення систем відліку, шкали ТТ, введення поняття кута обертання Землі ($\theta = kUT_1$), а також уточнення різниці шкал TCG—ТСВ. Була створена робоча група МАС для вирішення питання щодо подальшого використання шкали UTC.

2003 р. — запровадження Небесного проміжного полюса (CIP), Небесного (СЕО) і Земного ефемеридних (ТЕО) як початків відліку, а також поняття не-обертового початку. Прийнята нова версія астрономічних сталих (IERS Conventions, 2003; IERS Technical Note 32, 2003) (www.maia.unso.navy.mil, www.iers.org).

2006 р. — на XXVI з'їзді МАС (Прага) ухвалена резолюція щодо переви-значення барицентричного динамічного часу TDB.

Слід відзначити, що нові шкали часу утворювалися відповідно до нових потреб науки і практики, і це було тісно пов'язано з новим визначенням секунди. Проте раніш сформовані шкали часу не зникали. Це можна пояснити їх історичною роллю. Вони використовувалися для датування подій і послідовно залишалися в архівах. Природно, є всі підстави зберігати такі архіви в їх первісній формі. Це справедливо для астрономічних спостережень, датованих у відповідному часі тих місць, де вони проводилися. Якщо потрібно їх використати, значення дат можна перетворити у всесвітній час або ефемеридний час. Що стосується атомного часу, то він запроваджений лише в 1955 р.

Інша причина існування різних шкал полягає в тому, що шкали базуються на різних фізичних явищах і зберігають притаманні їм значення. Всесвітній час «віддзеркалює» обертан-

ня Землі. Ефемеридний час і різні координатні часи (відповідно до загальної теорії відносності) є незалежними аргументами ефемерид і рівнянь руху небесних тіл.

3.2. ШКАЛИ ЧАСУ КЛАСИЧНОЇ МЕХАНІКИ

3.2.1. ШКАЛА ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ UT

КЛАСИЧНА КОНЦЕПЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ

У 1884 р. на Вашингтонській конференції було прийняте рішення про вибір за нульовий (початковий) меридіан Гринвіцької обсерваторії та запровадження поясного часу і всесвітньої доби. Це дало змогу ввести упорядковану систему відліку часу в повсякденному житті (замість місцевого часу було введено поясний) і для науково-технічних потреб, а також застосувати єдиний у багатьох країнах світу гринвіцький середній сонячний час (GMT — Greenwich Mean Time), який згодом отримав назву всесвітнього часу (UT — Universal Time).

Нагадаємо сучасне визначення всесвітнього часу («The Astronomical Almanac for the year 2006»): *Всесвітній час* UT — міра часу, що найбільш наближено відповідає середньому добовому руху Сонця і служить основою всіх цивільних систем вимірювання часу. Час UT формально визначається за допомогою математичної формули як функція зоряного часу. Таким чином, час UT визначається зі спостережень добового руху зір і відображає нерівномірне обертання Землі навколо своєї осі.

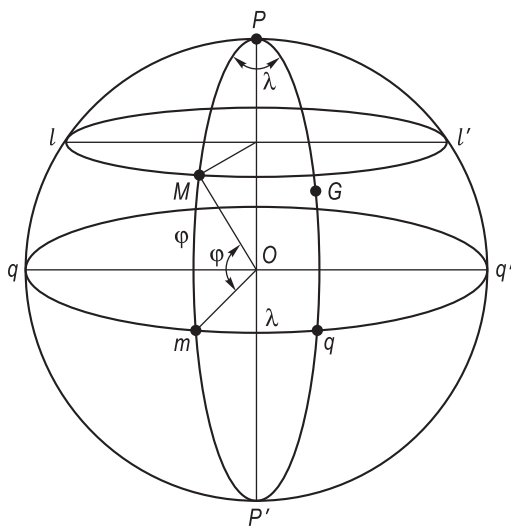


Рис. 3.1. Схема визначення всесвітнього часу $UT = M \pm \lambda$ в географічній системі координат:

qq' — земний екватор; PGP' — початковий меридіан, який проходить через Гринвіч G ; PMP' — меридіан пункту M (його координати φ — широта, λ — довгота, M також тут позначено місцевий середній сонячний час)

Всесвітній час можна визначити за моментами перетину Сонцем місцевого небесного меридіана з врахуванням довготи місця. Проте на практиці спостереження Сонця для визначення часу UT не проводилися як через складність, так і через невисоку точність. Для цього використовувалися спостереження зір у меридіані.

Всесвітній і зоряний час — еквівалентні форми часу, між якими існує строге співвідношення, один час визначає інший. Використання одного часу замість другого є лише предметом угоди, але саме зоряний час визначається із спостережень зір і може бути відслідкованим у минуле до тих пір, з яких існували спостереження (Г. Моріц, А. Мюллер, 1992).

Як уже зазначалося, коли в місці спостереження за допомогою математичних співвідношень за зоряним часом розраховують місцевий середній сонячний час M , то врахувавши довготу λ місця спостереження, можна отримати всесвітній час (рис. 3.1):

$$UT = M + \lambda .$$

До 1925 р. застосовувалося дві системи середнього сонячного гринвіцького часу:

середній гринвіцький час GMT , який відлічували від середнього гринвіцького полудня і використовували при астрономічних спостереженнях. Він мав назву астрономічного часу ($GMAT$) на відміну від цивільного часу;

середній цивільний гринвіцький час GCT , який відраховували від середньої гринвіцької півночі і використовували в цивільному житті, причому

$$GCT = GMT + 12 \text{ год.}$$

З 1 січня 1925 р. астрономічний відлік часу було приведено у відповідність до прийнятого в цивільному житті, і середній сонячний гринвіцький час, який вимірювали від півночі, отримав назву всесвітній час UT . Таким чином,

$$\begin{aligned} 1924, \text{ грудень } 31.5 GMT &= \\ &= 1925, \text{ січень } 1,0 UT. \end{aligned}$$

Назва всесвітній час — UT була остаточно затверджена за гринвіцьким середнім сонячним часом лише у 1928 р. на III Генеральній асамблеї МАС в Лейдені.

Ще на початку ХХ ст. із порівнянь значень всесвітнього часу, отриманих зі спостережень в окремих обсерваторіях, була виявлена їхня розбіжність (близько 1 с). Щоб одержати точніші значення всесвітнього часу та поширити його споживачам за допомогою радіосигналів, у 1920 р. було створено Міжнарод-

не бюро часу (МБЧ) в Парижі. Функції бюро полягали в тому, щоб на основі обробки місцевих визначень всесвітнього часу обчислювати найімовірніші його значення (див. розд. «Служби часу»).

Оскільки шкала всесвітнього часу UT виявилася нерівномірною через варіації обертання Землі, МБЧ ввело з 1 січня 1956 р. нові форми шкал всесвітнього часу, які враховували поправки на рух полюсів Землі та сезонні варіації швидкості обертання Землі:

UT0 — всесвітній час, який безпосередньо визначається з астрономічних спостережень добових рухів зір, тобто час на миттєвому гринвіцькому меридіані, положення якого залежить від миттєвих положень полюсів Землі;

UT1 — всесвітній час середнього гринвіцького меридіана, який визначається середнім положенням полюсів Землі; його отримують виправленням значень UT0 на рух полюсів Землі введенням поправки $\Delta\lambda$:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda ,$$

де $\Delta\lambda$ — поправка довготи, яка залежить від координат миттєвого полюса x_p, y_p ; $\Delta\lambda = -(x_p \sin\lambda + y_p \cos\lambda) \operatorname{tg}\varphi$, φ — широта місця спостереження;

UT2 — квазірівномірний всесвітній час — всесвітній час середнього гринвіцького меридіана UT1, який звільнено від впливу сезонних періодичних варіацій кутової швидкості обертання Землі ΔT_S ,

$$UT2 = UT1 + \Delta T_S = UT0 + \Delta\lambda + \Delta T_S .$$

Значення сезонної поправки розраховано за формулою

$$\Delta T_S = 0.022^S \sin 2\pi\theta - 0.012^S \cos 2\pi\theta - 0.006^S \sin 4\pi\theta + 0.007^S \cos 4\pi\theta,$$

$\theta = 2000 + (\text{JD} - 2451\,544.533) / 365.2422$ — момент часу, виражений у частинах бсселевого року.

UT1R — всесвітній час, регуляризований з урахуванням поправок на зональні припливи з гармоніками від 5,5 до 35 діб. З 1979 р. Міжнародне бюро часу стало вводити ці поправки для забезпечення більшої рівномірності шкали всесвітнього часу.

Найбільш важливою є шкала UT1, яка віддзеркалює дійсне обертання Землі. Шкали UT0 і UT2 тепер практично не використовуються. Раніше час UT0 визначався незалежно Службами часу, а потім виправлявся з урахуванням руху полюса в центрах обробки. Тепер UT1 визначається, в основному, із спостережень радіоінтерферометрами. Перетворення миттєвих координат радіотелескопів і визначення часу виконуються послідовністю поворотів матриць, в які UT0 у явному вигляді не входить.

Шкала UT2 цікава, головним чином, з історичної точки зору. Ця шкала більш стабільна, ніж UT1, оскільки в ній враховані сезонні варіації обертання Землі. Спочатку, коли наприкінці 50-х рр. XX ст. з'явилися перші атомні стандарти частоти і часу, шкала UT2 використовувалася для підгонки до неї атомної шкали часу.

ОДИНИЦЯ ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ

За одиницю часу шкали UT спочатку була обрана середня сонячна доба. Але згодом такою одиницею стала *секунда*, якою до 1960 р. була $1/86\,400$ частина середньої сонячної доби. Цікаво відмітити, що це визначення секунди часу, яке утрималося до 60-х років XX ст., ніколи не було офіційно ратифіковано організаціями, що відповідали за світову метрологію, починаючи з метричної конвенції 1875 р.

Астрономи оцінили, що точність шкали UT становила 10^{-10} . Через невисоку

точність і нестабільність одиниці всесвітнього часу вона була замінена у 1960 р. ефемеридною секундою, а у 1967 р. — атомною секундою в Міжнародній системі СІ. Про значення цих секунд розповідається у підрозд. 3.12 і 3.13.

Шкала всесвітнього часу тепер в основному використовується для вивчення змін швидкості обертання Землі (див. с. 150–157).

ЗВ'ЯЗОК ЗОРЯНОГО І ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ

Всесвітній і зоряний час визначаються обертанням Землі відносно, відповідно, Сонця і точки весняного рівнодення. Отже, в рівняння зв'язку входять параметри руху Сонця по небесній сфері.

Всесвітній час UT1 (середній сонячний час на меридіані Гринвіча) визначається із спостережень, і оскільки він відображає нерівномірне обертання Землі, то також є нерівномірним і його неможливо прогнозувати з великою точністю.

Зоряний час на меридіані Гринвіча GST (Greenwich Sidereal Time) дорівнює годинному куту t_{γ} точки весняного рівнодення відносно Гринвіча: $\text{GST} = t_{\gamma}$. В цьому рівнянні точка γ відноситься до рівнодення дати, але нутація може бути врахована або не врахована. Якщо нутація врахована, тобто спостереження віднесені до справжнього рівнодення, то зоряний час називається справжнім і позначається GAST (Greenwich Apparent Sidereal Time). В астрономічних щорічниках він частіше позначається літерою S . Якщо точка γ віднесена до середнього рівнодення, то час визначають як середній зоряний час GMST (Greenwich Mean Sidereal Time), який в астрономічних щорічниках позначають S^m_0 .

Зоряний час будь-якого світила (у тому числі й Сонця)

$$s = \alpha + t,$$

де α — пряме піднесення зорі; t — її годинний кут.

Для середнього екваторіального Сонця відносно гринвіцького меридіана середній зоряний час

$$\begin{aligned} S^m_0 &= \text{GMST} = t_s + \alpha_{mS} = \\ &= \text{UT1} - 12 \text{ год} + \alpha_{mS}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де t_s — годинний кут Сонця; α_{mS} — пряме сходження середнього екваторіального Сонця, яке відраховується від середнього рівнодення (або середньої точки весни (див. підрозд. 2.1.2)).

Вираз для α_{mS} (2.4) отримав ще Ньюком, але у 1983 р. коефіцієнти формули Ньюкома були замінені через ревізію астрономічних констант (система МАС, 1976 р.). С. Аокі і Г. Кіношита (1983) отримали співвідношення для обчислення гринвіцького середнього зоряного часу в 0 год UT1. Уточнена ними формула була рекомендована резолюціями XXIII і XXIV Генеральних асамблей МАС (Киото, 1997, Манчестер, 2000) для використання в національних щорічниках. Отже,

$$\begin{aligned} \text{GMST}|_{0 \text{ год UT1}} &= S^m_0 = \\ &= 6^h 41^m 50.5493835^s + \\ &+ 8640184.794535^s T_U + \\ &+ 0.09311181^s T_U^2 - \\ &- 6.229^s \cdot 10^{-6} T_U^3 + \\ &+ 1.2547^s \cdot 10^{-6} T_U^4, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $T_U = (\text{JD} - 2451545.0)/36525$; T — інтервал часу, який вимірюється в юліанських століттях (36525 діб у шкалі всесвітнього часу) від 2000 року, 1 січня, 12^h UT1 (JD 2451545.0) з врахуван-

ням прийнятого $\Delta T(A) = 66^s$ (Астроном. ежегодник на 2007 г.).

Нове співвідношення всесвітнього і зоряного часу зберігає неперервність шкали UT1, яка складає основу світової системи цивільного часу. Час формально вже не пов'язаний з поняттям фіктивного середнього Сонця (як це було за виразом Ньюкома) і відображає, таким чином, незалежність добового обертання Землі від її руху по орбіті навколо Сонця.

Зауважимо, що згідно зі старою класичною концепцією, всесвітній час відповідав досить близько добовому руху Сонця. Видимий добовий рух Сонця відображає як нерівномірне добове обертання Землі навколо своєї осі, так і рух Землі по її орбіті навколо Сонця (J. Kovalevsky, P. Seidelman, 2004).

Проте різниця прямих сходжень ньюкомового середнього екваторіального Сонця і точки, яку визначає рівняння (3.2) для формування UT1, залишається суттєво малою протягом багатьох століть (М. Лукашова, М. Свешников, 2004).

Зв'язок між гринвіцьким середнім зоряним часом S_0^m і гринвіцьким справжнім зоряним часом S визначається рівнянням

$$S = S_0^m + Q_{eq},$$

де Q_{eq} (анг. «equation of the equinoxes») — рівняння рівнодень з урахуванням теорії нутації МАС (1980) і сталих прецесії. Числовий вираз рівняння рівнодень, яке було ухвалено резолюцією XXII Генеральної асамблеї МАС (1994), має вигляд

$$Q_{eq} = (\Delta\psi + d\psi)\cos\varepsilon_0 + 0.00264''\sin\Omega + 0.000063''\sin 2\Omega, \quad (3.3)$$

де $(\Delta\psi + d\psi)$ — сума довгоперіодичних і короткоперіодичних членів нутації у виразі для довготи; ε_0 — середній нахил ек-

ліптики до екватора, $\varepsilon_0 = 84\ 381.448'' - 46.840\ 24''T - 0.000\ 59''T^2 + 0.001\ 813''T^3$; Ω — середня довгота висхідного вузла орбіти Місяця на екліптиці.

Рівняння (3.3) не містить вікового члена — $0.00388''T$, отже, воно складається лише з періодичних членів.

Слід відмітити, що вплив нутації на зв'язок справжнього і середнього зоряного часу був зрозумілим давно і відповідна поправка, яка була змінною за величиною, обчислювалась за рівнянням рівнодень (аналогічно для різниці справжнього і середнього сонячного часу за рівнянням часу). Проте оскільки при цьому враховувався лише член $(\Delta\psi + d\psi)\cos\varepsilon_0$, то замість назви «рівняння рівнодень» почали використовувати термін «нутація в прямому піднесенні».

Вперше вираз для рівняння рівнодень з урахуванням менших членів другого порядку був отриманий Вулардом у 1953 р.:

$$Q_{eq}^W = (\Delta\psi + d\psi)\cos\varepsilon_0 + 0.00265''\sin\Omega + 0.00008''\sin 2\Omega,$$

з віковим членом — $0.00493''T$.

Новий вираз (3.3) для Q_{eq} введено МАС для використання з 27 лютого 1997 р. При цьому дата введення нового виразу для Q_{eq} вибрана так, щоб мінімізувати розрив при обчисленні UT1.

Надлишок числа секунд зоряного часу в одній добі всесвітнього часу — $\Delta s'$ — можна отримати диференціюванням виразу (3.2) по T і діленням отриманих коефіцієнтів на 36 525:

$$\Delta s' = 236.555\ 367\ 406\ 871^s d + 5.098\ 525^s \cdot 10^{-6} T - 5.116^s \cdot 10^{-10} T^2 + 1.374^s \cdot 10^{-10} T^3,$$

де d — число діб від епохи J2000.0 до гринвіцької півночі дати, що розгля-

дається; T — час в юліанських століттях від епохи JD2451545.0 (Астроном. ежегодник на 2007 г.).

Звідси можна отримати співвідношення тривалості інтервалу часу в шкалі UT1 і тривалості того ж інтервалу в одиницях середнього зоряного часу, який позначається через $(1 - \nu)$ і становить

$$(1 - \nu) = 0.997269566329084 - 5.8684 \cdot 10^{-11} T + 5.9 \cdot 10^{-15} T^2,$$

де $\nu = 0.0027304336...$

Обернене співвідношення (одиниць зоряного часу до одиниць UT1) позначається $(1 + \mu)$,

$$(1 + \mu) = 1.002737909350795 + 5.9006 \cdot 10^{-11} T - 5.9 \cdot 10^{-15} T^2,$$

де $\mu = 0.0027379093...$

Цей вираз відповідає значенню кутової швидкості обертання Землі в епоху J2000.0, $\omega = 7.2921151467 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$.

Введення в ефемеридну астрономію поняття «необертовий початок (non-rotating origine)» призвело як до формальної зміни зв'язку між S^m_0 і UT1, так і до зміни фізичної суті цього співвідношення (IERS Convension, 2003).

НОВА КОНЦЕПЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ

Нова концепція всесвітнього часу пов'язана з новим визначенням референсної системи координат і фіксованої точки відліку довгот.

Передусім нагадаємо, що зв'язок між Земною TRS (Terrestrial reference system) і Небесною CRS (Celestial reference system) опорними системами координат описується співвідношенням

$$[CRS] = Q(t) R(t) W(t) [TRS], \quad (3.4)$$

де $Q(t)$ — прецесійно-нутаційна матриця; $R(t)$ — матриця, яка пов'язана з обертанням

Землі навколо осі; $W(t)$ — матриця, яка описує рух полюса.

Класична концепція зв'язку TRS і CRS базується на спільному вивченні добового і орбітального руху Землі (екватора і нуль-пункту, який визначається точкою весняного рівнодення), що призводило до труднощів при її використанні.

Проблема ускладнювалася ще й тим, що існуючі на той час зоряні опорні системи координат, в яких вивчався рух тіл Сонячної системи, не були вільними від залишкового загального обертання системи як цілого. Це, зокрема, проявлялося в надлишковому, порівняно з теорією, русі точки весняного рівнодення. Крім того, класичний опис обертання Землі відносно обраної опорної системи координат, пов'язаної із зорями, потребує знання параметрів із теорії прецесії та нутації і гринвіцького зоряного часу.

Наприкінці 70-х рр. ХХ ст. В. Гіно (1979) запропонував ідею використання замість точки весняного рівнодення деяку опорну точку на екваторі Землі, щоб усунути недоліки, які були притаманні класичному опису обертання Землі, а саме такі:

єдиний процес руху полюса по небесній сфері штучно розділявся на прецесію і нутацію, що вже неможливо зробити при точності понад тисячну частину секунди дуги; рух точки весняного рівнодення залежав як від орбітального руху Землі навколо Сонця, так і від обертального руху навколо осі; вираз залежності гринвіцького зоряного часу GST від всесвітнього часу UT1 не був лінійним і залежав від прийнятої теорії прецесії та нутації.

Після багаторічної дискусії, в якій брали участь Н. Капітен, Ж. Ковалевський, Д. Маккарті, Т. Фукушіма, К. Зейдельман, на ХХІV Генеральній Асамблеї МАС (Манчестер, 2000) були ухвалені резолюції, що стосувалися систем координат та переходу від небесної до земної системи координат. Зокрема, в Резолюції В1.3 визначалися барицентрична (BCRS) і геоцентрична (GCRS) небесні системи координат, які мають використовуватися при обчисленні чотиривимірних координат об'єктів при спостереженні з барицентру Сонячної системи і з центру Землі.

Системи BCRS і GCRS задаються метричними тензорами, на основі яких отримано формули перетворення просторових координат і часу.

Для розв'язування астрометричних задач достатньо скористатися Міжнародною небесною системою координат (ICRS) і Міжнародною землею системою координат (ITRS), запропонованими Міжнародною службою обертання Землі (IERS), та їх реалізацією як системи відліку (відповідно ICRF та ITRF). Проте виявилось, що для зв'язку цих систем потрібно ввести ще проміжну систему. Вона реалізується, як показано в (3.4), через трансформацію матриць $W(t)$ та $R(t)$ (IERS Convenson 2003, p. 33).

Фізично Міжнародна небесна референсна система відліку (ICRF) визначається списком прямих сходжень і схилень 600 квазарів, які опубліковані Міжнародною службою обертання Землі. Невизначеність координат складає від $0.0002''$ до $0.0005''$.

Фізична реалізація просторових координат у геоцентричній системі, що називається Міжнародною землею референсною системою відліку (ITRF), включає в себе список координат для фіксованої референсної дати і швидкості приблизно 200 пунктів на Землі. Невизначеність координат вимірюється сантиметрами. Як уже відзначалося, обидві системи відліку як ICRF, так і ITRF встановлюються Міжнародною службою обертання Землі (К. Одуан і Б. Гіно, 2002).

У Резолюції B1.6 MAC2000 рекомендувалося, починаючи з 1 січня 2003 р., використовувати теорію прецесії і нутації MAC2000 замість теорії MAC1980. З цього ж моменту Резолюцією B1.7 вводилася проміжна система, полюс якої називається «Небесним проміжним полюсом» (Celestial Intermediate Pole, CIP), замість небесного ефемеридного полюса (Celestial Ephemeris Pole, CEP).

Рух проміжної системи координат відносно ICRF визначається прийнятою теорією прецесії-нутації MAC2000, а рух відносно ITRF — параметрами обертання Землі. Небесний проміжний полюс CIP було визначено таким чином, щоб розділити рух осі OZ на дві частини:

1) в інерціальній системі (прецесія і нутація), де рух осі OZ позначається як рух CIP в ICRF, включаються всі гармоніки з періодами (в небесній системі), більшими за 2 доби (тобто з частотами в діапазоні від $-1/2$ до $+1/2$ циклу за добу);

2) у земній системі (рух полюса Землі), в якій визначається рух CIP в ITRF, включаються всі гармоніки з частотами, меншими за $-3/2$ і більшими за $1/2$ циклу за добу.

Замість точки весняного рівнодення за початок відліку довгот у небесній і земній системах координат вводиться поняття «необертовий початок» відліку (NRO — Non-rotating origin). Отже, для відліку довгот у небесній і земній системах координат введені точки — нові початки відліку, які були названі небесним ефемеридним початком для відліку CEO небесної системи і земним ефемеридним початком відліку TEO для земної системи (Резолюція B1.8, MAC2000). У Резолюції визначається також кут обертання Землі θ , який дорівнює двогранному куту між початками CEO і TEO і вимірюється вздовж екватора, що відповідає небесному проміжному полюсу CIP. Всесвітній час UT1 є лінійно пропорційним куту θ .

Загалом ця концепція отримала назву «необертовий початок».

Детальніше про концепцію «необертового початку» можна дізнатися з таких публікацій: В. Guinot, 1979, 2000; S. Aoki, Н. Kinoshita, 1983; N. Capitaine, В. Guinot, D. McCarthy, 2000; D. McCarthy, 2000; IERS Convenson, 2003; V. Kovalevsky and P. Seidelmann, 2004; Труды ИПА РАН № 10, 2004; В. Жаров, 2006).

Зоряний кут θ (або кут обертання Землі). Як уже відзначалося, разом з поняттям «необертового початку» за пропозицією Б. Гіно було введено поняття геоцентричного зоряного кута θ , який відповідає сидеричному обертанню Землі, а його похідна дає можливість розрахувати кутову швидкість обертання Землі.

На рис. 3.2 показано CEO (σ), TEO (ω) і зоряний кут θ . Геоцентричний кут θ , який дорівнює дузі $\sigma\omega$, називається зоряним кутом або, за термінологією Резолюції MAC, кутом обертання Землі (Earth rotation angle).

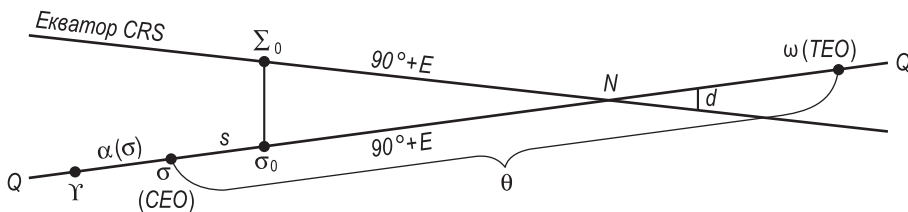


Рис. 3.2. Схема визначення CEO (σ), TEO (ω) і зоряного кута θ

Отже, кут обертання Землі θ вимірюється в Небесній проміжній Референсній Системі (Celestial Intermediate Reference System) уздовж екватора цієї системи (справжній екватор дати) між земним проміжним (TIO — Terrestrial Intermediate Origin) і небесним проміжним (CIO — Celestial Intermediate Origin) початками.

Згідно з резолюцією XX Генеральної асамблеї IAU зоряний кут θ і UT1 пов'язані таким співвідношенням (IERS Convention, 2003):

$$\theta(T_u) = 2\pi (0.779\,057\,273\,2640 + 1.002\,737\,811\,911\,354\,48T_u) \text{ рад,}$$

де $T_u = \text{JD}(\text{UT1}) - 2451545.0$, $\text{UT1} = \text{UTC} + (\text{UT1} - \text{UTC})$.

Числові значення коефіцієнтів з точністю 1 $\mu\text{ас}$ підбрані так, щоб забезпечити неперервність за фазою і швидкістю зі значеннями UT1, які використовувалися раніше. Це означає, що початок відліку UT1 такий, що на 12 год UT1 в деяку епоху збігається з гринвіцьким середнім полуднем, а коефіцієнт пропорційності такий, що доба UT1 за великий проміжок часу залишається приблизно у фазі із середньою сонячною добою.

Треба мати на увазі, що кут θ за визначенням є лінійною функцією від нерівномірної шкали часу UT1 ($\theta = k\text{UT1}$) і тому θ є нелінійною величиною при його визначенні в будь-якій рівномірній шкалі часу (IERS Conventions, 2003). Введення кута θ сприяло уточненню фізичного змісту UT1 — це ейлеровий кут обертання Землі.

Порівняння класичних і нових визначень референсної системи і фіксованої точки для розрахунку всесвітнього часу.

У табл. 3.1 наведено порівняння деяких характеристик за новою (кінематичною) і класичною (динамічною) системами визначення (Guinot B., IERS Technical Note 29, 2002). Нова система, яка є кінематичною, ґрунтується на Міжнародній Небесній референсній системі координат (ICRS) і резолюції XXIV Генеральної асамблеї IAU та є логічним розвитком класичної системи, що базувалася на динаміці тіл Сонячної системи і руху близьких зір. Класична концепція зв'язку Земної референсної системи (TRS) та Небесної референсної системи (CRS) побудована на спільному вивченні добового та орбітального рухів Землі (екватора та нуль-punkту, який визначається точкою весняного рівнодення), що спричиняє ускладнення при її застосуванні. Проблема ускладнювалася ще й тим, що існуючі на той час зоряні опорні системи координат (FK5), в яких вивчався рух тіл Сонячної системи, не були вільні від залишкового загального обертання систем як цілого. Крім того, класичний опис обертання Землі відносно обраної опорної системи координат потребує знання параметра $s = \sigma - \sigma_0$ (рис. 3.2), який залежить від прецесійно-нутаційної моделі.

Найбільш важливою перевагою переходу до необертового початку вважалась незалежність від складної динаміки Сонячної системи, відсутність обертання точки відліку на рухомому (справжньому) екваторі, передбачувана поведінка CEO на мікросекундному рівні на тривалих інтервалах часу і лінійна пропорційна залежність між зоряним кутом і UT1.

Проблеми нової концепції. Згідно з рекомендацією IAU введення нової системи — необертового початку — мало було здійснюватися з 1 січня 2003 р. Проте процес втілен-

3.1. Деякі характеристики кінематичної і динамічної систем

Об'єкт	Визначення за системами	
	кінематичною	динамічною
Опорна точка	СЕО	Υ , точка рівнодення
Опорна площина	Справжній екватор t	Справжній екватор t
Полос	CIP	CEP
Концепція	Включає лише обертання Землі	Включає обертання Землі та її орбітальний рух
Підхід	Кінематичний: не враховується обертання CIP навколо осі z	Динамічний (за перетином справжнього екватора і прийнятої екліптики)
Параметри	Введено параметр s (шляхом інтегрування X, Y вздовж траєкторії CIP)	Класичні прецесія та нутація
Обертання Землі	θ , кут обертання Землі	GST, гринвіцький зоряний час
Залежність θ від UT1	Лінійна $\theta = kUT1$	Не пропорційна
Чутливість до моделі прецесії й нутації	s практично не чутлива (1 μ as до 2100 р.)	Для GST — велика

ня NRO дещо загальмувався через неясність деяких положень нової концепції. Частково це пов'язано з перевіркою доцільності заміни динамічного підходу до формування систем відліку кінематичним. З одного боку, виключення екліптики усуває деяку невизначеність у встановленні нуль-пункту при використанні точки весняного рівнодення. З іншого боку, введення NRO, спрощення процесу визначення нуль-пункту не є дуже суттєвим. Головний компонент руху рівнодення по екватору, пов'язаний з прецесією і нутацією, не усувається, а лише формально переноситься на обчислення параметра s . Новий підхід в цілому не підвищує точність редукційних обчислень, тому що його точність, як і у випадку класичного підходу, обмежена недосконалістю прецесійно-нутаційної моделі.

Крім того, слід врахувати зауваження Фукушими про можливий рух СЕО відносно інерційної референсної системи ICRS (Fukushima, 2001). Фукушіма застерігає, що вибір небесного і земного ефемеридних початків для відліку довгот у небесній і

земній системах координат є далеким від ідеального. З цією точкою зору погоджуються і російські дослідники (Тр. ИПА РАН, 2004). Справа в тому, що вибір необретового початку призводить до вікового зміщення системи. Це відбувається тому, що за визначенням «необретовий початок» СЕО не має обертового руху відносно миттєвого полюса. Але якщо полюс має віковий рух відносно інерційної системи, то природно, що і СЕО матиме віковий рух у просторі. Інакше кажучи, віковий рух системи — це плата за вибір СЕО як початок. Швидкість обертання небесного ефемеридного початку досить велика: приблизно — 4.15"/рік. Все сказане стосується і земного ефемеридного полюса, який має віковий рух поряд з чандлеровою і річною гармоніками.

Винятковий випадок відсутності вікового руху СЕО реалізується лише тоді, коли полюс не рухається відносно інерційної системи, що буває дуже рідко. Отже, приймаючи концепцію СЕО (кінематична концепція), треба працювати з системами відліку,

які обертаються, що значно ускладнює рівняння динаміки, зокрема, рівняння небесної механіки (Жаров, 2006).

Проте Гіно (IERS Technical Note 29, 2002) відмічає, що віковий рух СЕО з річною швидкістю $4.15''$ практично не впливає на s : швидкість СЕО в системі ICRS перпендикулярна до екватора СІР, який близький до екватора ICRS. Саме через це вікова складова в s мала, її порядок $70 \mu as$ в сторіччя (до 2100 р.).

У деяких національних щорічниках перехід до практичної реалізації нової концепції планувався з 2005 р. Проте Лабораторія реактивного руху (JPL, Pasadena, USA), в якій розроблена теорія руху тіл Сонячної системи серії DE, готова підтримати і стару (класичну) систему.

ЗВ'ЯЗОК ЗОРЯНОГО КУТА θ І ЗОРЯНОГО ЧАСУ GST

Гринвіцький зоряний час GST в системі небесного ефемеридного початку СЕО на рівні дугової мікросекунди задається таким числовим виразом (IERS Conventions, 2003):

$$\begin{aligned} GST = & 0.014506'' + \theta + 4612.15739966''t + \\ & + 1.39667721''t^2 - 0.00009344''t^3 + \\ & + 0.00001882''t^4 + \Delta\psi \cos \varepsilon_A - \sum_k c'_k \sin \alpha_k - \\ & - 0.0000087''t \sin \Omega, \end{aligned}$$

$t = (\text{ТТ} - 2000 \text{ січ. } 1, 12 \text{ год ТТ}) / 36\,525$; ТТ — земний час (див. с. 101); два останніх члени

$$-\sum_k c'_k \sin \alpha_k - 0.0000087''t \sin \Omega$$

є допоміжними. Вони додаються до поточного «рівняння рівнодень»;

$\Delta\psi \cos \varepsilon_A = \Delta\psi \sin \varepsilon_A \cos \chi_A - \Delta\varepsilon \sin \chi_A$ — член, який забезпечує співвідношення між GST і θ з мікросекундною точністю (тут ε_A — прецесійна поправка нахилу

до екліптики на дату; χ_A — планетарна прецесія вздовж екватора).

Значення амплітуд C''_k вказано на сайті IERS (<http://iers.org>).

Гринвіцький середній зоряний час GMST можна обчислити з наведеного вище рівняння без урахування рівняння рівнодення Q_{eq} :

$$\begin{aligned} GMST = GST - Q_{eq}^{ST} = & 0.014506'' + \theta + \\ & + 4612.15739966''t + 1.39667721''t^2 - \\ & - 0.00009344''t^3 + 0.00001882''t^4. \end{aligned}$$

Треба відмітити, що наведені співвідношення для GST і GMST базуються на моделі прецесії і нутації MAC2000, в яку включені поправки на століття до прецесії MAC1979 в довготі $\delta\psi_A$, і в нахилі $\delta\varepsilon_A$:

$$\delta\psi_A = (-0.29965 \pm 0.00040)''/\text{ст.}, \quad (3.5)$$

$$\delta\varepsilon_A = (-0.02524 \pm 0.00010)''/\text{ст.} \quad (3.6)$$

Це приводить до такої різниці між старим $GMST_{1982}$ і новим $GMST_{2000}$ визначенням гринвіцького середнього зоряного часу (IERS Convention, 2003):

$$\begin{aligned} d GMST = GMST_{2000} - GMST_{1982} = & \\ = & 0.014\,506'' - 0.274\,950\,12''t + \\ & + 0.000\,117\,21''t^2 - 0.000\,000\,44''t^3 + \\ & + 0.000\,018\,82''t^4. \end{aligned}$$

Приклад обчислення GST і GMST на заданий момент можна знайти в «Трудах ИПА РАН», № 10, 2004, а також в «Астрономическом ежегоднике на 2007 г.».

ЗВ'ЯЗОК УТІ

ЗІ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ ω

1. Якщо вектор швидкості обертання Землі є $\omega(t)$ з довжиною $\omega(t)$, то можна записати

$$d(UT1)/dt = -\omega(t)/\omega_0, \quad (3.7)$$

де ω_0 — стала кутова швидкість обертання Землі, якій відповідає $d(UT1) = dt$.

В інтегральній формі це означає

$$[UT1](t) = [UT1](t_0) + (1/\omega_0) \int_{t_0}^t \omega(t) dt. \quad (3.8)$$

Розглянемо деякі інші співвідношення, які використовуються. Оскільки величини UT1 в основному публікуються у формі поправок до шкали Міжнародного атомного часу TAI (див. підрозділ 3.2.3) як функції значень TAI (або UTC), то співвідношення (3.8) можна записати у вигляді

$$[UT1 - TAI](t) = [UT1 - TAI](t_0) + \int_{t_0}^t (\Delta\omega(t)/\omega_0) dt,$$

де $\Delta\omega(t) = \omega - \omega_0$.

Значення $\omega(t)$ можна отримати за значеннями різниць UT1 – TAI, які публікуються в бюлетенях Міжнародної служби обертання Землі (IERS) і на сайті (<http://www.iers.org/documents/publication>):

$$\omega(t) = [1 + d(UT1 - TAI)/d(TAI)]\omega_0.$$

Це співвідношення відповідає значенню кутової швидкості обертання Землі в епоху J2000.0 (Audoin C., Guinot B., 2001):

$$\omega = 7.292115146706 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}.$$

2. Замість різниць UT1 – TAI здебільшого використовують величину ΔLod (Length of Day — довжина доби). Кутова швидкість обертання Землі $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t)$ означає поворот Землі на $\omega(t)$ радіан за секунду. Отже, число секунд у радіані дорівнює $1/[\omega_0 + \Delta\omega(t)]$. Число секунд, необхідних для повороту Землі на 360° ,

$$Lod(t) = 2\pi/\omega(t) = \sim (2\pi/\omega_0)(1 - \Delta\omega(t)/\omega_0),$$

якщо $(\Delta\omega(t)/\omega_0) < 1$.

Зміна тривалості доби

$$\Delta Lod(t) = Lod(t) - Lod_0 = -Lod_0[\Delta\omega(t)/\omega_0],$$

де $Lod_0 = 2\pi/\omega_0 = 86\,400$ атомних секунд (про атомну секунду див. с. 65).

Далі можна отримати

$$\Delta Lod(t)/Lod_0 = -\Delta\omega(t)/\omega_0. \quad (3.9)$$

Нагадаємо, що всесвітній час UT1 являє собою годинний кут середнього екваторіального Сонця відносно гринвіцького меридіана плюс 12 год. Тому UT1 можна знайти за моментами перетину центром Сонця місцевого небесного меридіана. Проте внаслідок нерівномірного обертання Землі ці моменти, які реєструються атомними годинниками, неоднакові в різні дні. Спостереження Сонця з метою визначення UT1 не проводяться через складність і невисоку точність. Для цього використовують спостереження зір у меридіані. Високоточні спостереження зір із метою визначення варіацій UT1 здійснюють вже понад 50 років. Проте можна простежити за зміною обертання Землі протягом останніх тисячоліть. В цьому допомагають записи про час сонячних затемнень, які вели жерці Давнього Єгипту, Вавилону, Греції, Китаю. Знаючи точні ефемериди Сонця та Місяця, а також сучасну швидкість обертання Землі, можна обчислити часи затемнень у давньому світі. Різниця між записаним і обчисленим часом пояснюється уповільненням обертання Землі.

З рівняння (3.9) можна отримати

$$\begin{aligned} & (-1/\omega_0)d(\Delta\omega)/dt = \\ & = (1/Lod_0)d(\Delta Lod)/dt \approx \\ & \approx (2 \text{ мс}/1 \text{ ст.}) 86\,400 \text{ с} = 2 \cdot 10^{-8}/1 \text{ ст.} \end{aligned}$$

За одне сторіччя накопичена нерівномірність UT1 становить приблизно 30 с, а за 3000 років — приблизно 7.5 год (Жаров, 2006).

Детальніше про уповільнення обертання Землі розповідається на с. 150–151.

3.2.2. ШКАЛА ЕФЕМЕРИДНОГО ЧАСУ ET

Системи зоряного і всесвітнього часу, які базуються на явищі добового обертання Землі, вимірюють час нерівномірно. Тому зоряна і середня сонячна секунди, що визначалися як $1/86400$ відповідних діб, не є сталими і тому мало придатні як одиниці вимірювання часу.

Відповідно до рішення VIII Генеральної Асамблеї МАС (1952) в астрономічних щорічниках з 1960 р. замість аргументу ефемерид «всесвітній час» було введено поняття «ефемеридний час» ET (Ephemeris Time) — рівномірний час ньютонівської механіки, який є аргументом диференціальних рівнянь гравітаційних теорій руху усіх тіл Сонячної системи, а також видимих геоцентричних ефемерид.

В основу шкали ефемеридного часу були покладені обчислення координат планет і Сонця, виконані С. Ньюком (1835–1909).

Нуль-пункт шкали ефемеридного часу було визначено фундаментальною епохою 1900 січень 0,12 год ET, тобто початок збігався з моментом, коли геометрична середня довгота Сонця, віднесена до середнього рівнодення дати, дорівнювала $279^{\circ}41'48.04''$.

У 1957 р. Міжнародний комітет мір і ваг прийняв за одиницю вимірювання часу *ефемеридну секунду, рівну $1/31556925.9747$ частини тропічного року в зазначену фундаментальну епоху.*

Взаємозв'язок ефемеридного часу ET і всесвітнього часу UT встановлювався застосуванням поправки ΔT , яка визначалася порівнянням спостережних положень Місяця з обчисленими за теоріями Брауна — Еккерта:

$$\Delta T^s = ET - UT = 24.349^s + 72.318^s T + 29.950^s T^2 + 1.82144'' B, \quad (3.10)$$

де T — період, виражений в юліанських століттях по 36 525 ефемеридних діб від фундаментальної епохи; B'' — флуктуація довготи Місяця, тобто різниця між довготами Місяця в секундах дуги, які спостерігались і розраховувались. При цьому з основних розкладів координат Місяця, отриманих Брауном, виключено емпіричний член і введена поправка на вікове прискорення Місяця.

З поняттям «ефемеридного часу» тісно пов'язане поняття «ефемеридного меридіана» (рис. 3.3), який займає у просторі таке ж місце, яке зайняв би гринвіцький меридіан за умови рівномірного обертання Землі з кутовою швидкістю, що відповідає визначенню ефемеридного часу. Ефемеридний меридіан проходить на схід від гринвіцького на кутовій відстані

$$\Delta \lambda_e = (1 + \mu) \Delta T = 1.002738 \Delta T.$$

Ефемеридний меридіан робить повний оберт 360° відносно середнього рівнодення за 23 год 56 хв 04.09804 с ефемеридного часу. Він збігається з гринвіцьким на деяку дату між 1900 і 1905 рр.

Введення ET-секунди забезпечило більшу стабільність одиниці часу, ніж її визначення через середню сонячну добу, але мало суттєві недоліки.

Основним недоліком є труднощі при відтворенні ефемеридної секунди годинником. Недоліком ефемеридного часу

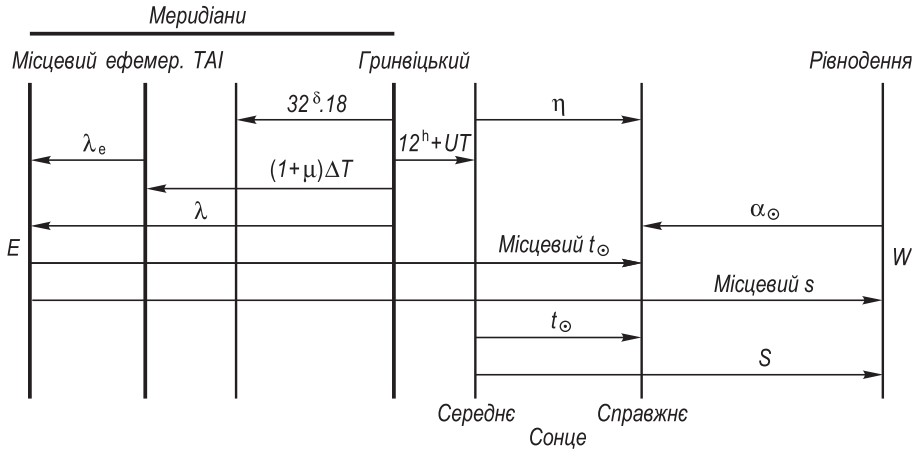


Рис. 3.3. Зв'язок різних меридіанів і шкал часу

виявилася також та його властивість, яка при введенні ЕТ здавалася перевагою, а саме: залежність від теорії руху Місяця, що постійно вдосконалювалася і уточнювалася. З'явилися варіанти теорії руху Місяця з індексами:

$j = 0$: уточнена ефемеридна Місяця ІЛЕ (Improved Lunar Ephemeris), яка ґрунтується на розкладі у ряд в теорії Брауна після вилучення емпіричного члена;

$j = 1$: у версії $j = 0$ здійснено перехід на нову систему астрономічних сталей МАС 1964 р. і виправлена помилка в коефіцієнті члена № 182 розкладу теорії Брауна;

$j = 2$: у версії $j = 1$ уточнені сонячні збурення за теорією Еккерта.

Цим ефемеридам відповідали шкали ЕТ0, ЕТ1, ЕТ2 і поправки $\Delta T_0, \Delta T_1, \Delta T_2$.

У сучасну епоху ефемеридна шкала ЕТ не використовується для обробки спостережень або обчислення ефемерид. Вона застосовується лише для аналізу історичних спостережень як аналог рівномірної шкали ТДТ — земного динамічного часу (див. с. 100). Значення ΔT обчислюються для різних періодів за формулами:

$$\Delta T = 1850^s - 435^s \tau + 44^s \cdot 3\tau^2$$

або

$$\Delta T = 1360^s + 320^s \tau + 44^s \cdot 3\tau^2 \dots \dots \dots \text{від } 390 \text{ до н. е. до } 948 \text{ р.}$$

$$\Delta T = 25^s \cdot 5 t^2 \dots \dots \dots \text{від } 948 \text{ до } 1650 \text{ р.}$$

$$\Delta T = (5.2 \pm 0.4)^s +$$

$$+ (13.31 \pm 0.33)^s (t - 0.19)^2 \dots \dots \dots \text{після } 1650 \text{ р.}$$

У формулах τ — у століттях від 948 р., а t — у століттях від 1800.0 (М. Лукашова, М. Свешников, 2004).

Внаслідок опрацювання спостережень планет і Місяця з'явилася можливість отримати різницю $\Delta T = ET - UT1$, починаючи з 1630 р. з точністю декілька десятків секунд для XVII ст. і декілька секунд для XIX ст.

Поправки ΔT , отримані зі спостережень покриття зір Місяцем, сонячних затемнень і проходження Меркурія по диску Сонця від -700 р., наведено на рис. 3.4 і 3.5.

Основна складова поправки за ефемеридний час

$$\Delta T = 58.09^s + 0.5970^s (Y - 2000) + 0.00134^s (Y - 2000)^2, \quad (3.11)$$

де Y — поточний рік.

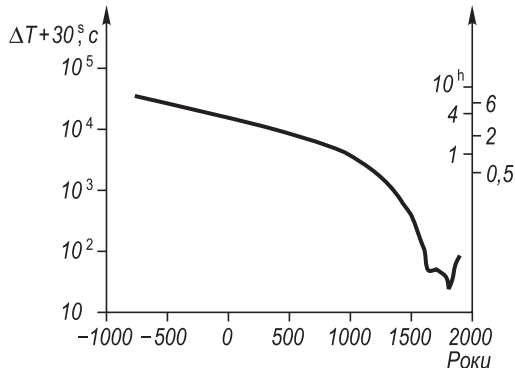


Рис. 3.4. Поправки ($\Delta T + 30^s$) для періоду від 700 р. до н. е. до 1990 р.

Різниці ефемеридного і всесвітнього часу з 1890 р. наведено в додатку Д.3.

Ефемеридний час ніколи не використовувався у повсякденному житті. Фактично його застосування обмежувалося потребами астрономічної динаміки. Ніколи не було офіційних організацій, які б централізовано регламентували процес його вимірювання так, щоб надати єдину реалізацію, прийнятну за домовленістю. Слід нагадати, що до 1960 р. офіційна шкала часу, всесвітній час і визначення секунди (середнього сонячного часу) базувались на законах обертання Землі. Після прийняття ефемеридного часу ЕТ розпочався період несумісності між шкалою часу УТ і ефемеридною одиницею часу. Атомне вимірювання часу дало змогу усунути цю плутанину в 1971 р.

Зі зростанням точності астрономічних спостережень відмовилися від ефемеридного часу. На Генеральній Асамблеї МАС (1976) були визначені нові шкали: земного динамічного часу — ТДТ і барицентричного динамічного часу — ТДВ. Значення за шкалою ТДТ

є аргументом у рівняннях динаміки в рамках загальної теорії відносності в геоцентричній системі координат. Значення за шкалою часу ТДВ введено як аргумент для обчислення ефемерид, віднесених до барицентру Сонячної системи. Шкала ТДВ відрізняється від ТДТ лише періодичними членами, амплітуда яких менша за $0.002''$.

Відповідно до рішення МАС час ТДТ замінив ефемеридний час у 1984 р. (Детальніше про шкали часу ТДТ і ТДВ див. на с. 100–101). Проте питання про визначення ЕТ не було вирішено. У 1994 р. згідно з рекомендацією МАС реалізація шкали земного часу ТТ (див. розділ «Релятивістські шкали часу») поширювалась назад у часі до 1955 р. з урахуванням динаміки Сонячної системи.

Дійсно, одиниця вимірювання за шкалою ТТ дорівнює тривалості атомної секунди на геоїді, що обертається. Вона була визначена таким чином, щоб її якнайкраще узгодити з визначенням ефемеридної секунди. Крім того, початок ТТ обрали так, щоб забезпечити її нерозривність з ЕТ.

Отже, заміна ЕТ на ТТ не призводить до будь-якої великої розривності у конструюванні ефемерид. У цьому сучасному визначенні ефемеридного часу для релятивістської динаміки одиниця шкали ефемеридного часу визначається атомною секундою, а початок ефемеридної шкали пов'язується з початком Міжнародної атомної шкали.

На XXVI Генеральній конференції МАС (Прага, 2006) була ухвалена Резолюція 3 щодо узгодження шкали ефемеридного часу T_{eph} , яку використовує Лабораторія реактивного руху в США, з релятивістською шкалою ТДТ.

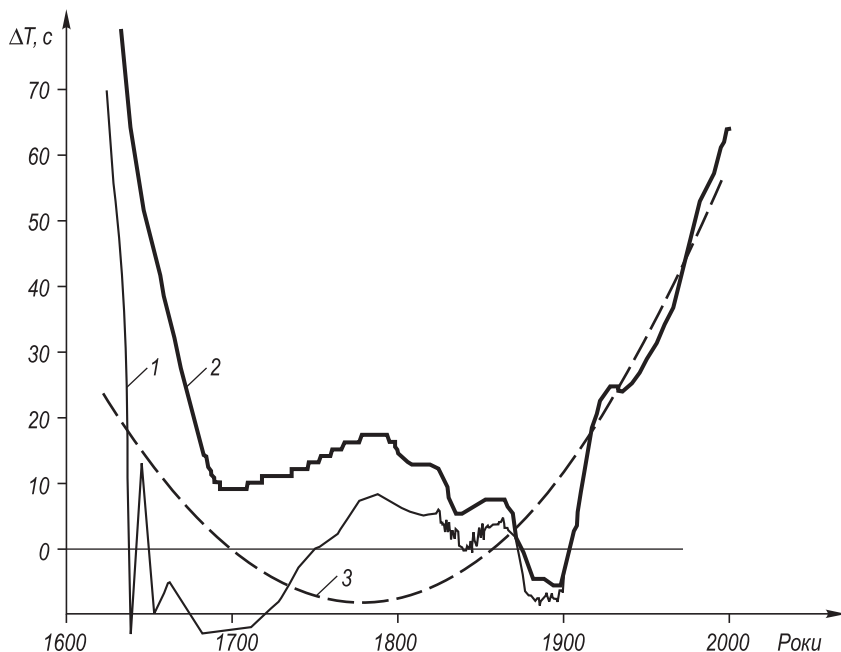


Рис. 3.5. Поправки ΔT для періоду 1620–1997 рр.:
 1 — дані за Брауером (1952); 2 — дані за Стефенсоном і Моррісоном (1984);
 3 — параболу, визначена Макарсі і Бебком (1986) з параметрами $\Delta T = 58.09^s +$
 $+ 0.5970^s (Y - 2000) + 0.00134^s (Y - 2000)^2$

3.2.3. ШКАЛА МІЖНАРОДНОГО АТОМНОГО ЧАСУ ТАІ

Шкала міжнародного атомного часу ТАІ (французькою — Temps Atomique International) була побудована в середині ХХ ст.

Як уже відмічалось (підрозділ 2.2. «Фізична система лічби часу»), з 1955 р. у зв'язку з появою високостабільних еталонів частоти, застосування яких базувалося на фізичних явищах квантових переходів між енергетичними рівнями атомів і молекул, стало можливим формування нових типів шкал часу — атомних, не пов'язаних з явищем добового або орбітального руху Землі. Незалежні атомні шкали часу з'явилися в лабораторіях

Франції, США, Швейцарії, Канади, Великобританії і Японії. З 1958 до 1968 р. Міжнародне бюро часу формувало атомну шкалу часу АЗ на основі фазових вимірювань частотних сигналів, які посилялися лабораторіями, що були оснащені атомними годинниками. Годинники Паризької обсерваторії вважалися базовими для задання атомної шкали часу.

У 1969 р., використовуючи неперервні порівняння часу (а не частоти) через систему LORAN-C, Міжнародне бюро часу створило атомну шкалу часу АТ таким чином, щоб забезпечити неперервність зі шкалою АЗ і щоб мінімізувати частотні розходження цих шкал. За початок відліку секунд у шкалі АЗ було обрано момент 0 год UT2 1 січня

1958 р. У цей момент час за шкалою атомного часу точно дорівнював 0 год 0 хв 0 с. З переходом від шкали АЗ до шкали АТ вибір цього початкового відліку не змінився.

Відповідно до рекомендації Міжнародного бюро мір і ваг (Париж, 1970) та рішення Генеральної конференції мір і ваг (1971) МБЧ ввело з 1 січня 1972 р. шкалу міжнародного атомного часу ТАІ, яка є продовженням шкали АТ з впровадженням секунди СІ Міжнародної системи одиниць.

Секунда СІ, як вже відзначалось у розд. 2.2, була визначена в 1967 р. рішенням XIII Генеральної конференції Міжнародного бюро мір і ваг за одиницю атомного часу. За цим рішенням *секунда СІ (SI) має тривалість 9 192 631 770 періодів, які відповідають резонансній частоті квантового переходу між рівнями $F = 4, V = 0$ і $F = 3, V = 0$ надтонкої структури основного стану ${}^2S_{1/2}$ атома цезію ${}^{133}\text{Cs}$ на рівні моря. З 1980 р. секунда СІ віднесена до геоїда.*

У 1972–1988 рр. шкала ТАІ формувалася Міжнародним бюро часу, з 1988 р. — в Секції часу Міжнародного бюро мір і ваг (ВІРМ).

За рішенням Генеральної конференції з питань мір і ваг (1971) *Міжнародний атомний час ТАІ — це час, який встановлюється Міжнародним бюро часу на основі показів атомних годинників, що працюють у різних установах відповідно з визначенням секунди, яка є одиницею часу Міжнародної системи одиниць.*

У 1980 р. Консультативний комітет із визначення секунди уточнив і доповнив формулювання ТАІ з точки зору загальної теорії відносності: *ТАІ є координатним часом, який визначається в геоцентричній системі відліку з одиницею виміру, що дорівнює секунді СІ на геоїді,*

який обертається (про координатний та власний час див. с. 98).

Нуль-пункт шкали ТАІ вибрано так, щоб показники шкал ТАІ, АТ і УТ1 збігалися 1958 січень 1, 0 год.

Зв'язок ТАІ і УТ1 визначається співвідношенням

$$\Delta T(A) = \text{ТАІ} + 32.184^s - \text{УТ1}.$$

Значення $\Delta T(A)$ публікуються в Бюлетені IERS серії В. Для сучасної епохи $\Delta T(A)$ дорівнює +66 с (див. додаток Д.3).

Після введення шкали ТАІ шкалу ефемеридного часу ЕТ стали інтерпретувати як поширення ТАІ для епох до 1956 р. (коли шкали ТАІ ще не існувало), а їх зв'язок на 1 січня 1977 р. описується співвідношенням

$$\text{ЕТ} = \text{ТАІ} + 32.184^s.$$

Шкала ТАІ повідомляється користувачам як поправки для годинників місцевих або національних шкал часу, що публікуються ВІРМ із затримкою один місяць. Конкретні атомні годинники беруться до уваги і враховуються при обчисленні ТАІ лише після того, як результати синхронізації упродовж декількох місяців передаються до ВІРМ і у ВІРМ впевнені у стабільності й точності ходу цих годинників.

Нестабільність секунди ТАІ на інтервалах часу від одного місяця до одного року трохи менша, ніж 10^{-14} . На більших інтервалах осереднена нестабільність збільшується до $5 \cdot 10^{-14}$.

Ідеальний стандарт часу генерує постійну в часі частоту. Проте якщо частота буде відрізнятиметься від номінальної (9 192 631 770 Гц), то шкала цього стандарту буде рівномірно розходитися з ТАІ. Різниця реальної частоти стандарту і номінальної називається його точністю.

Точність секунди ТАІ дорівнює приблизно $5 \cdot 10^{-14}$. Це означає, що шкала

ТАІ розходиться з ідеальною шкалою часу приблизно на 1 мкс в рік.

При визначенні ТАІ у 2007 р. ВІРМ використовувало показання 300 атомних годинників 65 лабораторій світу (ВІН Annual Report on Time Activities, 2006).

З 1973 р. шкала ТАІ обчислюється за середньоваговими значеннями показань окремих годинників з вагами, які обернено пропорційні варіаціям ходу годинників за алгоритмом, що має назву ЕАЛ (Echelle Atomique Libre) — вільна атомна шкала. ЕАЛ є основою для обчислення ТАІ (Annual Report of the ВІРМ for 1988–2004).

Показання окремих годинників залежать від прийнятого початку відліку часу, який може бути обраний довільно, але таким чином, щоб годинники вказували правильний час умовно обраної події у минулому. Це можливо, якщо існуватиме шкала часу, яка була б однорідною і неперервною від цієї події. Шкала ТАІ саме і є такою шкалою. Її неперервність гарантована великою кількістю годинників, а однорідність — безперервним взаємним калібруванням у середині ансамблю годинників і калібруванням відносно первинних стандартів.

Алгоритм обчислення шкали ТАІ. Для обчислення ТАІ кожному атомному стандарту, який бере участь у визначенні ТАІ, надається вага, що є функцією нестабільності частоти. Середня відносна частота ν_k на k -му двомісячному інтервалі i -го годинника використовується для обчислення дисперсії Аллана:

$$\sigma_i^2(\tau) = (\nu_{k+1} - \nu_k)^2 / 2,$$

де $\tau = 2$ місяці.

Потім обчислюється дисперсія середніх частот ν_j , де $j = k, k + 1, k + 2, \dots, k + 6$. Статистична вага стандарту w_i про-

порційна зворотному значенню цієї дисперсії. Розглянута процедура дає змогу виключити короткочасову нестабільність годинника. Середні значення дисперсії Аллана $\sigma^2(\tau)$ для ансамблю годинників $i = 1, 2, \dots, n$, яке обчислене з урахуванням статистичного значення ваги годинника w_i , використовується для оцінки нестабільності шкали ТАІ.

Оскільки кожен із стандартів є незалежним від інших, то можна позначити шкалу, сформовану i -м стандартом, як ТАІ _{i} . Тоді відповідно до визначення загальної шкали:

$$\text{ТАІ} = [1 / (\sum_i^n w_i)] \times \left\{ \sum_{i=1}^n w_i [\text{ТАІ}_i + a_i + b_i(t - t_0)] \right\}, \quad (3.12)$$

де w_i — статистична вага i -го стандарту; a_i — сталі, що визначають зміщення нуль-пунктів шкал часу ТАІ _{i} відносно ТАІ; b_i — сталі, які характеризують хід годинника.

Константи a_i обирають так, щоб у початковий момент часу t_0 значення ТАІ _{0} збігалося з показанням годинника за шкалою часу, яка використовувалася раніше (для виключення стрибків часу). Тоді з рівняння (3.12) при $t = t_0$

$$\sum_{i=1}^n w_i a_i = \sum_{i=1}^n w_i [(\text{ТАІ})_0 - (\text{ТАІ})_{i0}]. \quad (3.13)$$

З рівняння (3.13.) можна отримати

$$a_i = (\text{ТАІ})_0 - (\text{ТАІ})_{i0}.$$

Для обчислення величин b_i треба врахувати, що хід годинника залежить як від властивостей самого годинника (позначимо b_i'), так і від релятивістських ефектів (b_i''):

$$b_i = b_i' + b_i''.$$

Релятивістські поправки b_i'' обчислюються відповідно до теорії відносності. Оскільки поправки b_i' при великій су-

купності годинників можуть бути і додатними і від'ємними, то вважають, що

$$\sum_{i=1}^n w_i b'_i = 0.$$

Релятивістські поправки для різних атомних годинників неоднакові. Це означає, що внаслідок релятивістських ефектів показання атомних годинників розходяться. Розходження характеризуються лінійним дрейфом і малими квазіперіодичними варіаціями. Лінійний член визначається гравітаційним потенціалом U_3 і швидкістю годинника відносно центру мас Землі ω . Оскільки годинники розташовані не точно на поверхні геоїда, то різниця їх положень по висоті Δh спричинює зміну гравітаційного потенціалу на величину $\Delta U_3(\Delta h) = g_0 \Delta h / c^2$, де g_0 — прискорення сили тяжіння на геоїді; c — швидкість світла.

Таким чином, релятивістська теорія передбачає зміну ходи годинника при зміні висоти з коефіцієнтом приблизно $1.1 \cdot 10^{-13}$ км.

З урахуванням зміни швидкості годинника відносно центру Землі $\Delta \omega$ релятивістська поправка

$$b'' = \left(g_0 \Delta h / c^2 + \Delta \omega^2 / c^2 \right).$$

Врахування релятивістської поправки дає змогу нібито «розташувати» годинники на геоїді (Жаров, 2006).

Порівняння атомних стандартів. Для визначення шкали часу ТАІ покази атомних стандартів частоти треба порівняти. Детально про порівняння годинників (синхронізація часу) розповідається в підрозділі 3.4. Тут лише відмітимо, що Міжнародне бюро мір і ваг, яке відповідає за обчислення ТАІ, в останні роки використовує для порівняння шкал часу, в основному, глобальні навігаційні системи GPS і ГЛОНАСС та метод TWSTFT (двостороннє супутникове передавання часу і частоти).

Якщо в пункті, де знаходиться i -й стандарт частоти, приймається k сигналів точного часу, то після врахування затримки часу внаслідок розповсюдження радіосигналів, можна записати k рівнянь, які пов'язують показання стандарту частоти ТАІ і годинника T_j на j -му передавачеві радіосигналів:

$$\text{ТАІ}_i - T_j = \Delta T_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, k).$$

Якщо ввести нові змінні $x_i = \text{ТАІ} - \text{ТАІ}_i$, $y_j = \text{ТАІ} - T_j$, то, розв'язуючи системи рівнянь

$$x_i - y_j = \Delta T_{ij},$$

$$\sum_{i=1}^n w_i [-x_i + a_i + b_i(t - t_0)] = 0,$$

$$a_1 = (\text{ТАІ})_0 - (\text{ТАІ}_i)_0,$$

$$\sum_{i=1}^n w_i b'_i = 0,$$

можна знайти значення x_i . Таким чином, шкала часу ТАІ реалізується у вигляді поправок x_i до показань за ТАІ конкретних атомних стандартів частоти, які порівнюються. Поправки x_i на окремі дати публікуються в «Циркулярі Т» ВІРМ. Крім того, на сайті ВІРМ (<http://www.bipm.fr>) можна знайти інформацію про хід усіх годинників, які використовуються для обчислення шкали ТАІ.

Результати порівняння нестабільності атомних годинників детально розглядаються на с. 144–146.

У повсякденному житті ми використовуємо шкалу всесвітнього координованого часу (UTC), яка відрізняється від ТАІ на ціле число секунд. З 1 січня 2006 р. до 1 січня 2009 р. різниця між шкалами становила 33 с, а з 1 січня 2009 р. ця різниця

$$\text{ТАІ} - \text{UTC} = 34 \text{ с.}$$

Згідно з резолюцією МАС (1991) астрономію при редукції спостережень ви-

користовують земний час ТТ (с. 101), який являє собою ідеальну шкалу ТАІ. Для того, щоб не було розривів зі шкалою ефемеридного часу, що використовувалася раніше при обробці спостережень, в геоцентричній системі прийнято, що

$$TT = TAI + 32.184 \text{ с}$$

(Thomas C., Wolf P., Tavella P., 1994; Одуан К., Гино Б., 2002; Жаров В., 2006).

3.2.4. ШКАЛА ВСЕСВІТНЬОГО КООРДИНОВАНОГО ЧАСУ UTC

У 1961 р. для передавання сигналів точного часу була введена система всесвітнього координованого (узгодженого) часу UTC (Coordinated Universal Time), яка узгоджує добове обертання Землі з новою системою вимірювання і збереження часу — системою атомного часу.

Всесвітнє координування часу зумовлене необхідністю поєднати потреби двох груп користувачів часу.

Перші — це переважна більшість населення Землі, а також астрономи і геодезисти, які хотіли б, щоб час визначався природним явищем, пов'язаним зі сходом і заходом Сонця, тобто зміною годинного кута Сонця (або точки весняного рівнодення). Друга група, до якої належать фізики, інженери, працівники навігації тощо, хотіли б мати рівномірний високоточний час, який зберігається атомними стандартами часу та частоти. А це означає, що потрібно узгодити шкали UT1 і ТАІ. Такою «гібридною» шкалою часу стала шкала UTC.

Спочатку узгодженість нерівномірної шкали всесвітнього часу UT1 і рівномірної шкали всесвітнього координованого часу UTC в межах 0,1 с до-

сягалась поступовим зсувом частоти атомних стандартів (див. додаток Д.4). Проте з 1 січня 1972 р. частотні зсуви шкали UTC відмінено і введено зміну показань годинників у системі UTC на ± 1 с так, щоб різниця $\Delta UT1 = [UT1 - UTC]$ не перевищувала 0,9 с (раніше 0,7 с), що зручно при практичному використанні UTC. Зміна відбувається стрибками залежно від знаку різниці: або додаванням (додатної) секунди, або пропусканням (від'ємної) секунди (leap second). Допоміжні додатна або від'ємна секунди вводяться як остання секунда місяця в системі UTC переважно 31 грудня або 30 червня. Додатна секунда починається в 23 год 59 хв 60 с і закінчується в 0 год 0 хв 0 с першої доби наступного місяця. У випадку від'ємної секунди після моменту 23 год 59 хв 58 с через одну секунду настає момент 0 год 0 хв 0 с першої доби наступного місяця.

Таким чином, з 1 січня 1972 р. шкала всесвітнього координованого часу стала за своєю суттю шкалою атомного часу, тому різниця показань годинників у системі UTC і одночасних показань годинників у системі ТАІ визначається лише цілим числом секунд.

Отже, співвідношення між шкалами для будь-якої дати t визначається виразами

$$UTC(t) - TAI(t) = n^s,$$

$$|UTC(t) - UT1(t)| < 0.9^s.$$

Різниця $\Delta UT1 = [UT1 - UTC]$ публікуються в Бюлетенях Міжнародного бюро міри і ваги, округлені до 0,1 с, передаються радіосигналами часу за допомогою спеціального коду.

Різниця ТАІ – UTC на 0^h UTC наведено в додатку Д.4.

Співвідношення шкал ТАІ, UT1, UTC показано на рис. 3.6.

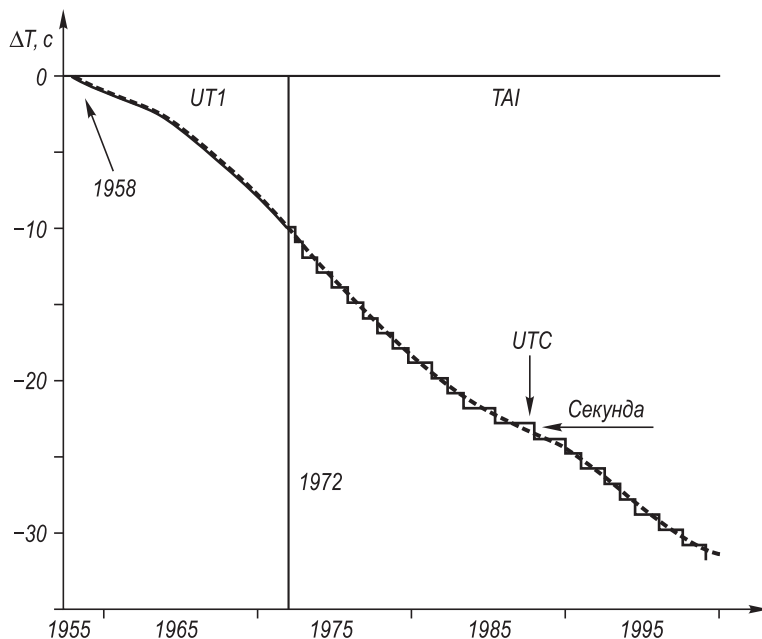


Рис. 3.6. Співвідношення шкал TAI, UT1, UTC (1.01.1958 — дата узгодження TAI і UT1; 1.01.1972 — момент введення стрибків в UTC) (Quinn T. 1991)

Масштаби UTC і TAI однакові — це секунда СІ, але існує зсув нуль-пунктів. Між UTC і UT1 накопичується розходження, зумовлене, по-перше, нерівномірністю шкали UT1, по-друге, нерівністю масштабів UT1 і TAI (1 атомна секунда не дорівнює точно 1 с шкали UT1).

З 1988 р. шкали TAI і UTC обчислює і поширює Сектор часу Міжнародного бюро мір і ваг у Парижі. Національні лабораторії часу формують власні шкали часу $AT(k)$, $UTC(k)$, які потім порівнюють із TAI і UTC. Інформацію щодо TAI, UTC, $AT(k)$, $UTC(k)$ національних лабораторій можна знайти на сайті: <http://www.bipm.org>.

Отже, шкала часу UTC фіксує розходження шкали всесвітнього часу UT1 і атомного часу TAI, яке пояснюється тим, що тривалість середньої сонячної

добі більша від тривалості атомної доби, яка дорівнює 86 400 с системи СІ.

Радіосигнали часу передаються за шкалою UTC, і зміни в передаванні сигналів часу (введення допоміжної секунди) призводять до порушень синхронізації комп'ютерних, навігаційних та телекомунікаційних мереж. Тому деякі з міжнародних організацій, такі як Міжнародний телекомунікаційний союз, Союз радіонаук, Міжнародне бюро мір і ваг тощо, були зацікавлені в змінах визначення шкали UTC.

Саме тому на XXIV Генеральній асамблеї МАС(2000) було прийнято резолюцію стосовно шкали UTC. Згідно з нею створена робоча група МАС для підготовки пропозицій щодо доцільності корекцій шкали UTC стрибком на одну секунду, а також пропозицій загалом про

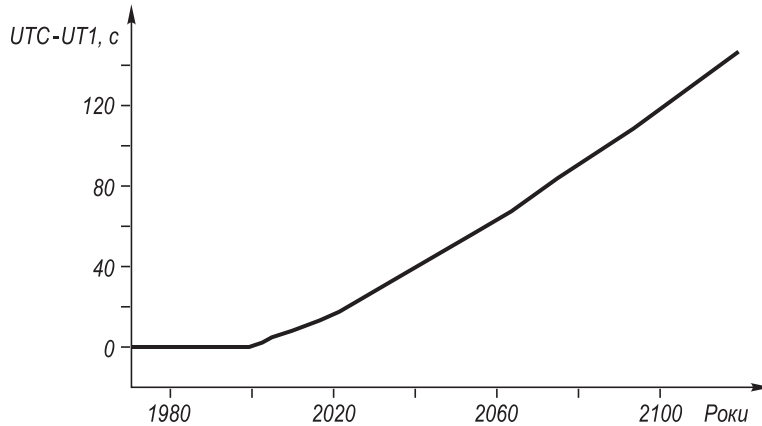


Рис. 3.7. Прогнозована різниця UTC–UT1 при відміні стрибків

перевизначення поняття цієї допоміжної шкали UTC.

Дискусії щодо відміни стрибків при формуванні UTC тривають і досі. Сучасні дослідження дають змогу з достатньою точністю встановити величину припливного уповільнення в обертанні Землі і на цій основі передбачати відхилення UTC – UT1 у випадку відміни стрибків (рис. 3.7, McCarthy, 2000). До кінця XXI ст. різниця може досягнути 2 хв. У 2050 р. різниця буде наростати зі швидкістю близько 1.5 с за рік (у 90-х рр. XX ст. вона становила приблизно 0,7 с за рік). У зв'язку з цим доведеться або змиритися з великою різницею UTC – UT1 (при відміні стрибків), або часто вводити стрибки.

Д. Маккарті (McCarthy, 2000) вважає, що проблему можна розв'язати трьома способами:

- 1) збільшити допустиму різницю між UTC і UT1 (замість 0.9 с), що дасть змогу зменшити число можливих стрибків;
- 2) ввести стрибки через рівні проміжки часу, наприклад через 10 років. У такому разі стрибки будуть не частими, але великими;

3) перевизначити секунду в системі СІ. Оскільки розбіжність шкал у момент t

$$\text{TAI}(t) - \text{UT1}(t) = a_0 + (b_0/v^2)(t - t_0) + c_0(1/v^2)(t - t_0)^2,$$

де $v = 9\,192\,631\,770$ циклів для атома цезію, то цю розбіжність між шкалами можна ліквідувати, змінивши числа циклів, які визначають секунду, на величину

$$\begin{aligned} \Delta v &= -v^2[b_0/v + 2(c_0/v^2)(t - t_0)] = \\ &= b_0v - 2c_0(t - t_0). \end{aligned}$$

При такому радикальному підході до 2100 р. число циклів при визначенні СІ-секунди треба буде зменшити на 250. Слід відзначити, що при цьому доведеться перевизначити й усі фізичні константи, які пов'язані з визначенням часу (зокрема, метр). Очевидно, запропонований варіант модифікації UTC не найкращий (Тр. ИПА, 2004; Лукашова, Свешников, 2004).

Існують й інші пропозиції щодо зміни шкали UTC. Серед них такі:

- виключити введення допоміжної секунди, тобто взагалі відмінити користування шкалою UTC. Тоді до 2050 р. різниця UT1 – UTC = 1 хв;

замінити масштаб відхилення, тобто зробити його більшим 0.9 с. Це найпростіший спосіб, але він не вирішить проблеми;

розробити нову модель обчислення UTC. Можна буде вводити допоміжну секунду в строго визначені дати (наприклад, 29 лютого, тобто один раз в 4 роки).

З точки зору теоретичних досліджень наявність або відсутність стрибків не відіграє важливої ролі, оскільки їх відміна призведе лише до злиття TAI і UTC шкал, тобто фактично до відміни однієї з них. Проте відміна стрибків може бути досить корисною для навігації. Тому вирішення питання про долю шкали UTC має суттєве практичне значення.

3.2.5. ШКАЛИ GPS-ЧАС І ГЛОНАСС-ЧАС

У зв'язку із запуском супутників Глобальної позиційної системи (Global Positioning System, GPS) в США та системи ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система) в колишньому СРСР, оснащених атомними годинниками, з'явилися нові шкали часу: GPS-час і ГЛОНАСС-час, які належать до атомних шкал часу.

Відповідно до плану космічні сегменти обох систем мають містити по 24 супутники, які безперервно випромінюють радіонавігаційні сигнали. Прийняті спеціальним приймачем сигнали навігаційних супутників дають змогу визначити місцеположення, швидкість і поточний час споживача, а також отримати інформацію про працездатність супутникових систем. Для виконання поставлених завдань потрібно, щоб у зоні радіовидимості приймача перебували щонайменше чотири супутники, які

належать до одного «сузір'я», або п'ять супутників, що належать до різних конфігурацій супутників.

Системи GPS та ГЛОНАСС мають глобальний характер і є результатами розвитку наземних і локальних низькоорбітальних супутникових радіонавігаційних систем ЛОРАН, ОМЕГА, ЧАЙКА, ТРАНЗИТ та ін.

Безпосереднім попередником сучасної системи GPS була Морська навігаційна супутникова система TRANSIT, розроблена військовим відомством США. Система TRANSIT мала суттєві недоліки, тому була замінена на систему GPS, яка швидко, точно та недорого в усіх куточках земної кулі та у будь-який момент часу дає можливість відповісти на питання: який час, які координати та швидкість у даній точці спостережень? (Б. Гофманн-Велленгоф та ін., 1996).

З порівняння кількох варіантів конфігурацій орбіт виявилось, що найбільш економічною є схема, в якій рівновіддалені супутники обертаються з періодом 12 год по кругових орбітах, нахилених до площини екватора під кутом 55° . Ця конфігурація забезпечує видимість протягом 24 год будь-де на Землі від чотирьох до восьми штучних супутників Землі. Сигнали GPS мають двочастотний характер і передаються у L-діапазоні, а саме: $L1 = 1575.42$ МГц, $L2 = 1227.60$ МГц.

Шкалу GPS-час впровадив Контрольний відділ Морської обсерваторії США (USNO), який базувався в штаті Колорадо. Ця шкала складалася з невеликого ансамблю цезієвих годинників на супутниках GPS. Спочатку шкалу GPS-час синхронізували зі шкалою всесвітнього координованого часу Морської обсерваторії США: UTC(USNO). Тепер шкала GPS-часу пов'язана з системою

всесвітнього координованого часу UTC. В системі GPS рахують час у тижнях (нульова точка відліку — північ з 5 на 6 січня 1980 р.) з 1.5-секундними інтервалами, у секундах протягом тижня та в секундах протягом доби. Така інформація передається в навігаційних повідомленнях супутників.

GPS є військовою системою США, тому іноді її точність штучно занижувалася введенням селекторного доступу. Згідно із заявою президента США Б. Клінтона від 1 травня 2000 р. селекторний доступ для цивільних користувачів скасовано.

GPS-час має сталий зсув на 19 с відносно Міжнародного атомного часу TAI та збігається із всесвітнім координованим часом UTC на стандартну GPS-епоху: 1980 січень 6.0. Шкала GPS-час відтворює безперервний час, який не коригується стрибком секунди, як це робиться в шкалі UTC.

Співвідношення часів GPS і TAI описується виразом $[TAI - \text{GPS-час}] = 19 \text{ с} + C_0$. Різниця 19 с утримується сталою, а C_0 (середня похибка ± 10 нс) змінюється з часом.

Співвідношення між GPS- часом і часом UTC містить змінну кількість секунд як результат зміни часу UTC стрибками на одну секунду. Це співвідношення залежить від часу:

від 1999 липень 1,0 год UTC до 2006 січень 1,0 год UTC — $[UTC - \text{GPS-час}] = -13 \text{ с} + C_0$;

від 2006 січень 1,0 год UTC до 2009 січень 1,0 год UTC — $[UTC - \text{GPS-час}] = -14 \text{ с} + C_0$;

від 2009 січень 1,0 год UTC до повідомлення — $[UTC - \text{GPS-час}] = -15 \text{ с} + C_0$.

У Паризькій обсерваторії (OP) отримують добові значення C_0 з урахуванням поправок елементів орбіт супутників й іоносферних затримок у GPS-спостере-

женнях високих супутників, а потім ці значення згладжують для отримання різниць $[UTC(OP) - \text{GPS-час}]$ на 0 год UTC. Середня квадратична похибка добових значень C_0 становить ± 10 нс.

Система ГЛОНАСС аналогічна GPS, розроблялася в колишньому СРСР, підпорядкована Російській Федерації. До цього часу вона не функціонує в повному обсязі (з 26.12.2007 р. на орбіті перебуває 15 супутників).

Відповідно до проекту система ГЛОНАСС у 2009 р. має складатися з 24 супутників (включаючи й трьох активних запасних), які рівномірно будуть розташовані у трьох орбітальних площинах з нахилом 64.8° до екватора. Орбіти супутників цієї системи близькі до колових з висотою 19 100 км та періодом 11.25 год, тобто подібні до GPS-орбіт. У системі ГЛОНАСС супутники передають навігаційні радіосигнали у двох частотних діапазонах: L1 ≈ 1.6 ГГц; L2 ≈ 1.2 ГГц.

ГЛОНАСС-супутники визначають час за загальною часовою шкалою. Його називають ГЛОНАСС-часом. Рахунок часу в системі ГЛОНАСС упродовж доби здійснюють у годинах, хвилинах і 30-секундних інтервалах. Кожен 2-секундний рядок закінчується позначкою часу.

Відрізняється ГЛОНАСС від GPS структурою навігаційного повідомлення. Крім того, в ГЛОНАСС застосовуються інші системи координат і часу. Система шкали часу ГЛОНАСС прив'язана до шкали Держеталону координованого всесвітнього часу Російської Федерації UTC (SU). Між системами часу ГЛОНАСС і UTC (SU) введено сталий зсув на 3 год ($t_{\text{ГЛ}} = t_{\text{UTC(SU)}} + 3 \text{ год}$).

Щоб узгодити дані, які передаються з навігаційних супутників, із системним часом, з кожного супутника подаються

корегувальні параметри, що враховують розбіжність шкал часу супутників і системної шкали в програмах розрахунку, вбудованих у навігаційну апаратуру.

Розроблено приймачі для одночасної реєстрації сигналів як від GPS-, так і від ГЛОНАСС-супутників. Обидві системи разом використовуються для виконання різних наукових завдань. Точність вимірювань вища при використанні GPS, тому що в цій системі працює більша кількість супутників. Проте ГЛОНАСС дає корисну додаткову інформацію. Усі супутники ГЛОНАСС оснащені світловідбивачами для їх лазерної локації, у той же час існує лише один такий GPS-супутник.

Співвідношення між ГЛОНАСС-часом і UTC має вигляд

$$[\text{UTC} - \text{ГЛОНАСС-час}] = 0 \text{ с} + C_1.$$

Часова різниця 0 с є сталою, а величина C_1 змінюється з часом. Порядком різниці — декілька сотень наносекунд з моменту події до 1 липня 1997 р., а від 1 липня 1997 р. — декілька десятків наносекунд.

Співвідношення між ГЛОНАСС-часом і TAI містить змінне число секунд. Від 1999 липень 1.0 год UTC до 2006 січень 1,0 год UTC — $[\text{TAI} - \text{ГЛОНАСС-час}] = 32 \text{ с} + C_1$;

від 2006 січень 1.0 год UTC до 2009 січень 1.0 год UTC — $[\text{TAI} - \text{ГЛОНАСС-час}] = 33 \text{ с} + C_1$;

від 2009 січень 1.0 год UTC — $[\text{TAI} - \text{ГЛОНАСС-час}] = 34 \text{ с} + C_1$, де C_1 подано на 0 год UTC кожного дня.

Величини C_1 обчислювали до 2006 р. за даними спостережень ГЛОНАСС у лабораторії VSL (Нідерланди) для супутників в елонгації. Дані потім згладжували, щоб отримати добові значення UTC(VSL) – ГЛОНАСС-час на 0 год UTC.

З 2006 р. величини C_1 обчислюються в Астрогеодинамічній обсерваторії AOS

(Польща, Боровець). Добові значення C_1 отримують лінійною інтерполяцією величин $[\text{UTC} - \text{UTC}(\text{AOS})]$.

Щодобові значення C_0 і C_1 публікуються в щомісячних Циркулярах Міжнародного бюро мір і ваг. Інформація про співвідношення шкал часу UTC і TAI зі шкалами GPS-час та ГЛОНАСС-час надається в Річних звітах згаданого бюро, а також на сайті <http://www.bipm.org>.

Супутники GPS і ГЛОНАСС широко використовуються, зокрема, Міжнародним бюро мір і ваг для синхронізації атомних годинників різних лабораторій світу. Точність синхронізації становить 2 нс для відстаней до 1000 км, і 6 нс — понад 1000 км.

Широкозонним доповненням до систем GPS та ГЛОНАСС є європейська система EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) — Європейська геостаціонарна навігаційна служба. Це супутникова система функціонального доповнення SBAS (див. с. 111).

Це одна система під назвою GALILEO розробляється Європейською співдружністю.

Запуск системи планується до 2010 р. В проєкті GALILEO крім держав Європейської Співдружності планують брати участь Україна, Китай, Ізраїль, Південна Корея. Ведуться переговори про участь Аргентини, Бразилії, Австралії, Чилі, Індії, Малайзії та Російської Федерації. За проєктом на орбіту буде виведено 30 супутників (27 операційних і 3 резервних).

На відміну від GPS і ГЛОНАСС система GALILEO не буде підконтрольною ні державним, ні військовим установам (BIPM Annual Report on Time Activities, v.1, 2006; Б. Гофманн-Волленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз, 1995; В. П. Бабак, В. В. Конін, В. П. Харченко, 2004).

3.3. РЕЛЯТИВІСТСЬКІ (ДИНАМІЧНІ) ШКАЛИ ЧАСУ

Як уже відзначалося, в науковій літературі ще немає прийнятої загальної назви для нових шкал. Зустрічаються назви: барицентричний динамічний час, земний динамічний час, барицентричний координатний час, геоцентричний координатний час, земний час. Оскільки на відміну від інших ці шкали визначаються з урахуванням релятивістських теорій і були введені за рішеннями МАС разом із застосуванням в астрометрії загальної теорії відносності для визначення систем відліку, то природно назвати їх «релятивістськими шкалами часу». Звісно, це не позбавляє їх властивостей динамічності (вони є аргументом руху небесних тіл). Названі шкали суттєво відрізняються від уже прийнятої першої динамічної шкали часу класичної механіки ЕТ.

3.3.1. РЕКОМЕНДАЦІЇ МАС ЩОДО ВВЕДЕННЯ НОВИХ СИСТЕМ ВІДЛІКУ

Упродовж багатьох років релятивістська теорія не застосовувалася в практичній астрометрії, оскільки її ефекти були занадто малі порівняно з точністю астрономічних спостережень. Проте в другій половині ХХ ст. відбулися значні зміни в астрометрії, зумовлені збільшенням точності астрометричних спостережень та удосконаленням теоретичних моделей. Метод радіоінтерферометрії з наддовгою базою (РНДБ) досягнув субмілісекундної точності визначення кутових положень радіоджерел, які були використані для реалізації системи відліку. Космічна астрометрія, а саме

проект HIPPARCOS, забезпечили мілісекундну точність оптичних визначень положень зір, яскравіших від 10-ї зоряної величини. Лазерна локація штучних супутників Землі та радіотехнічні спостереження GPS використовуються для визначення на субмілісекундному рівні параметрів обертання Землі. На цьому рівні точності визначення системи координат, редукція спостережень та їхній аналіз мають уже будуватися на сучасній теоретичній базі, яка й визначається загальною теорією відносності (ЗТВ).

Релятивістська теорія або теорія відносності (від лат. *relatio* — відношення), визначає закономірності, які є загальними для всіх фізичних процесів. Як встановив А. Айнштейн, ці властивості залежать від гравітаційних полів (полів тяжіння), що діють у даній області простір-час. Властивості цієї області за наявності полів тяжіння досліджуються із застосуванням ЗТВ.

У спеціальній теорії відносності (СТВ) розглядають властивості простору-часу в наближенні, при якому ефектами тяжіння можна нехтувати. Спеціальна теорія відносності є частковим випадком ЗТВ, проте історично розвиток теорії проходив у зворотному напрямі, а саме: СТВ була сформована А. Айнштейном у 1906 р., а кінцеве формулювання ЗТВ дано ним же в 1916 р.

В основу СТВ покладено два постулати Айнштейна:

всі закони, за якими відбуваються фізичні процеси, однакові в усіх інерціальних системах відліку;

швидкість світла у вакуумі не змінюється при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої.

З аналізу цих постулатів випливає, що зв'язок між різними інерціальними системами відліку встановлюється перетвореннями Лоренца, які визначають

основні просторово-часові співвідношення у СТВ.

Перетворення Лоренца зручно виражати у термінах геометрії чотиривимірного простору Мінковського. Точка у цьому просторі задається радіусом-вектором x^μ ($\mu = 0, 1, 2, 3$), однією з компонент якого є час фізичної події ($x^0 = ct$), а інші три збігаються з її просторовими декартовими координатами ($x^{1,2,3} = x, y, z$). При переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої компоненти x^μ виражаються одні через інші за допомогою перетворень Лоренца. При цьому незмінною залишається квадратична комбінація $s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$, яка називається квадратом чотиривимірного інтервалу і узагальнює поняття віддалі в евклідовому просторі. Величина s^2 може набувати додатних, від'ємних і нульових значень. У зв'язку з цим геометрію простору Мінковського називають псевдоевклідовою.

З перетворень Лоренца випливає, що просторово розділені події, які одночасні в одній системі відліку, будуть неодноразовими в іншій. При переході від системи відліку, в якій стрижень і годинник нерухомі (власна система), до системи відліку, що рухається відносно першої зі швидкістю v , довжина стрижня l_0 в напрямі руху зменшується за законом

$$l = l_0(1 - v^2/c^2)^{1/2},$$

а часовий інтервал між двома подіями збільшується —

$$\Delta t = \Delta t_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}.$$

Загальна теорія відносності узагальнює теорію простору, часу і руху спеціальної теорії відносності і разом з тим є релятивістським узагальненням ньютонівської теорії гравітації. Ця теорія припускає, що за наявності матеріальних тіл і полів чотиривимірний простір-час

стає викривленим і гравітація ототожнюється з кривиною простору-часу. Сформульовані А. Айнштейном рівняння ЗТВ є узагальненням рівнянь ньютонівської теорії гравітації і переходять у них у граничних випадках слабких гравітаційних полів і малих швидкостей руху. Загальна теорія відносності передбачає ефекти, яких немає в СТВ і класичній теорії гравітації.

Детальнішу інформацію про порушені питання стосовно теорії відносності і виміру часу можна отримати з наукових джерел, зокрема, таких авторів, як П. Фомін (1978); К. Одуан і С. Гіно (2002); В. Брумберг (2004); В. Жаров (2006); Ковалевський (2004); Я. Яцків та ін. (2006).

Вперше рекомендації стосовно нових систем відліку і шкал часу, які базувались на принципах загальної теорії відносності, були сформульовані внаслідок гострих дискусій на Колоквіумі № 180 МАС (1990). А в 1991 р. вони були затверджені на Генеральній асамблеї МАС. Треба зазначити, що Резолюції МАС враховують ефекти ЗТВ лише в постньютонівському наближенні.

Відомо, що в астрономії та суміжних науках використовуються дві основні системи координат — Міжнародна система небесних координат (IRCS — International Celestial Reference System) і Міжнародна земна референсна система координат (ITRS — International Terrestrial Reference System). Доцільно нагадати деякі положення стосовно систем відліку.

Математично ICRS — це глобальна система координат, яка у своїй просторовій частині має початок у барицентрі Сонячної системи (його визначають у рамках ЗТВ) і охоплює простір, де ще можна розглядати Сонячну систему як ізольовану систему мас із дуже незначним гравітаційним випромінюванням

(тобто де можна знехтувати впливом Галактики і гравітаційно-хвильовим випромінюванням). Із урахуванням цих обмежень ICRS — це еквівалент інерціальної системи координат ньютонівської астрометрії. Система ITRS являє собою локальну систему координат, яка у своїй просторовій частині має початок у геоцентрі (його визначено в рамках ЗТВ) і яка охоплює весь навколосемний простір (В. Брумберг, 2004).

Фізичними реалізаціями систем координат ICRS і ITRS є відповідно Міжнародна небесна система відліку (ICRF — International Celestial Reference Frame) і Міжнародна земна система відліку (ITRF — International Terrestrial Reference Frame). Системи ICRF і ITRF визначаються Міжнародною службою обертання Землі (IERS — International Earth Rotation Service).

Система ICRF фізично задається опорними квазарами. Її можна розглядати як систему, що визначається суто експериментальним шляхом із РНДБ спостережень квазарів. У 1994 р. для реалізації ICRF складено список близько 600 позагалактичних джерел.

Система ITRF фізично визначається положеннями опорних наземних станцій, координати яких стали (за відрахуванням тектонічних рухів) відносно координатної геоцентричної шкали часу (див. с. 100). Головною площиною цієї системи є рухомий екватор (екватор дати), який визначається з експериментальних даних стосовно параметрів обертання Землі.

Для того щоб однозначно визначити названі вище системи координат, Міжнародний астрономічний союз запровадив дві закріплені в космічному просторі системи координат — баріцентричну небесну систему координат BCRS (Barycentric Celestial Reference System)

та геоцентричну небесну систему координат GCRS (Geocentric Celestial Reference System), які були визначені на основі постньютонівського наближення метрики та перетворення координат, що враховує прискорення геоцентру та гравітаційний потенціал.

Системи BCRS і GCRS не обертаються одна відносно одної і мають різні шкали часу. Орієнтація їхніх осей задається положенням вибраних радіоджерел так, щоб точка відліку прямих піднесень була близькою до точки весняного рівнодення на епоху J2000.0 (IERS Conventions, 2003).

Кожній системі координат відповідає свій координатний час.

Згідно з рішенням Міжнародного астрономічного союзу про запровадження ЗТВ як теоретичної основи при визначенні фундаментальних ефемерид тіл Сонячної системи та шкал часу була проведена реформа останніх (перехід до релятивістської форми). Якщо до цих рішень шкала ефемеридного часу ET базувалася на ньютонівській динаміці (теорія руху Сонця за Ньютоном і теорія руху Місяця за Брауном), то основою нових релятивістських шкал є релятивістська числова теорія руху DE200/LE200, DE405/LE405, яку розроблено в Лабораторії реактивного руху (США).

Ефемериди DE200/LE200, DE405/LE405 можна знайти на сайті JPL: <ftp://navigator.jpl.nasa.gov/pub/ephem/export/ascii/>.

Далі мова йтиме саме про релятивістські шкали часу, перехід до яких означає, що перетворення координат і часу відбувається при розгляді чотиривимірного простору замість тривимірного. В цьому разі властивості простору-часу в кожній точці визначаються відповідно до теорії Айнштайна розподілом речовини в просторі. Як наслідок простір-

час стає викривленим. При обробці результатів спостережень в рамках ЗТВ розрізняють два види величин: власні і координатні. Власні величини визначаються за результатами спостережень або експериментів без будь-яких узгоджень щодо вибору системи відліку. Координатні залежать від властивостей обраних систем відліку. Відповідно до цього також розрізняють власний і координатний час.

3.3.2. КООРДИНАТНИЙ І ВЛАСНИЙ ЧАС

З підвищенням точності стандартів частоти і впровадженням концепцій загальної теорії відносності в астрометрію і небесну механіку були внесені суттєві зміни в побудову шкал часу.

В ньютонівській механіці перехід від однієї системи координат $\{x_1, t_1\}$ до іншої $\{x_2, t_2\}$ спричинював лише зміну просторових координат $x = \{x_1, x_2, x_3\}$ тривимірного простору, час t не змінювався:

$$x_2 = f(x_1, t_1), t_2 = t_1,$$

де f — матриця зсуву, повороту і деформації системи просторових координат x_2 відносно x_1 .

На відміну від класичних теорій у загальній теорії відносності (ЗТВ) геометричні властивості простору-часу, які описуються чотиривимірною системою координат $\{x^\alpha\}$, ($\alpha = 0, 1, 2, 3$), залежать від розподілу матерії та її стану. Тут x^0 є часовою координатою, $x^0 = ct$, де c — швидкість світла у вакуумі, а t — параметр, його називають координатним часом даної системи координат.

Резолюція МАС щодо запровадження ЗТВ як основи в теорії небесної механіки стосується двох координатних систем: барицентричної BCRS і геоцент-

ричної GCRS з відповідними координатними часами в кожній з них.

При переході від однієї системи координат до іншої перетворення координатного часу з точністю до членів порядку c^{-2} може бути записане у вигляді

$$t_2 = t_1 + A_0 - c^{-2} A_s(t_1) - c^{-2} A_p(t_1),$$

тут другий член пов'язаний з різницею нуль-пунктів шкал часу, третій — з віковим дрейфом однієї шкали відносно другої (різниця в величинах одиниць шкал часу), четвертий відображає періодичні варіації шкал одна відносно одної (Тр. ИПА РАН, 2004).

Згідно із ЗТВ істотні риси метрики простору-часу відображені у такому запису інтервалу ds :

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k, \quad (3.14)$$

де g_{ik} — компоненти фундаментального метричного тензора, які визначають геометрію системи координат (або метрику простору-часу).

Окремо розглядають простір Мінковського, коли

$$g_{00} = -1; g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1; \\ g_{ik} = 0 \text{ при } i \neq k. \quad (3.15)$$

Квадрат довжини чотиривимірного вектора, який об'єднує дві точки події (метрика Мінковського), записують так:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2. \quad (3.16)$$

Якщо далі розглянути дві події, що відбулися за час dt в деякій точці референсної системи ($dx = dy = dz = 0$), то для інтервалу ds матимемо

$$ds^2 = -c^2 dt^2. \quad (3.17)$$

У цьому виразі час t має зв'язок з об'єктом. Цей новий час називається влас-

ним часом, він пов'язується з фізичним процесом у даній точці і позначається грецькою буквою τ .

Оскільки гравітаційне поле проявляється в зміні метрики простору-часу, тобто визначається величинами g_{ik} , то власний час спостерігачів, які перебувають у різних точках простору і рухаються один відносно одного, проходить по-різному.

Відповідно до резолюції XXI Генеральної асамблеї МАС щодо запровадження ЗТВ як теоретичної основи при визначенні ефемерид, квадрат відстані в чотиривимірному просторі-часі між двома близькими точками можна подати у вигляді

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = -(1 - 2U/c^2)c^2 dt^2 + (1 + 2U/c^2)dr^2, \quad (3.18)$$

де τ — власний час, тобто інтервал часу за годинником, який рухається разом зі спостерігачем ($dr = 0$) відносно обраної системи координат; U — сума гравітаційних потенціалів тіл, які входять у систему, і припливного потенціалу зовнішніх сил (при цьому вважається, що припливний потенціал дорівнює нулеві у центрі координатної системи).

Враховуючи вищевказане, при $U/c^2 \ll \ll 1$ отримують важливе співвідношення між власним τ і координатним t часом:

$$d\tau/dt = 1 - U/c^2 - v^2/2c^2. \quad (3.19)$$

Зрозуміло, що власний час τ збігається з координатним часом t лише для годинників, які перебувають у стані спокою відносно обраної референсної системи ($v = 0$) і розташованих в точці, де $U = 0$.

Слід ще раз підкреслити принципову відмінність поняття власного часу від координатного. Власний час ототож-

нюється з фізичним часом спостерігача, який він вимірює годинником (за деяким періодичним процесом), що рухається разом з ним по його світовій лінії. (*Світова лінія* в теорії відносності — геометричний образ чотиривимірної траєкторії матеріальної точки у просторі-часі. Подія, яка відзначається точкою в чотиривимірному просторі, називається світовою точкою.)

Координатний час залежить від вибору референсної системи. Через її довільний вибір одному і тому ж інтервалу власного часу може відповідати нескінченна кількість інтервалів координатного часу (Брумберг, 2004).

Для того, щоб перетворити власний час на координатний або порівняти власні часи різних спостерігачів, потрібно знати компоненти g_{ik} метричного тензора в рівнянні (3.14).

Метричний тензор визначається розв'язком рівнянь Айнштайна для заданого розподілу мас. Загалом отримано багато різних як точних, так і наближених розв'язків цих рівнянь. Проте для практичних використань особливе місце займає метрика Сонячної системи. Для простих обчислень досить добрим наближенням гравітаційного поля Сонячної системи є поле точкової маси, оскільки 99,9 % маси Сонячної системи зосереджено в Сонці.

Точний розв'язок рівнянь Айнштайна для випадку сферичного тіла, яке не обертається, було знайдене М. Шварцшильдом у 1916 р. Гравітаційний потенціал U точки масою M на відстані r визначається формулою (G — гравітаційна стала)

$$U = GM/r.$$

У сферичних координатах розв'язок рівнянь Шварцшильда можна записати у вигляді

$$c^2 dr^2 = c^2(1 - 2U/c^2)dt^2 - dr^2/(1 - 2U/c^2) - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\lambda^2).$$

Початок просторових координат системи відліку збігається з центром мас тіла, тому $g_{00} = 1 - 2U/c^2$ (Жаров, 2006).

Як уже відзначалося, метрика Шварцшильда досить точно описує гравітаційне поле Сонячної системи. При $r \rightarrow \infty$ метрика Шварцшильда збігається з метрикою плоского простору — метрикою Мінковського: $2U/c^2 \rightarrow 0$, $dr^2 = r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\lambda^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$.

Більш точний порівняно з метрикою Шварцшильда вираз метрики Сонячної системи було отримано за допомогою постньютонівського формалізму (PPN). Про цей наближений розв'язок рівняння поля, який справедливий для слабкого гравітаційного поля і малих швидкостей групи несферичних тіл, що обертаються, можна довідатися з підручника В. Жарова «Сферическая астрономия», 2006.

Повертаючись до визначення власного часу, зазначимо, що в межах спеціальної теорії відносності одночасні події в нерухомій барицентричній системі відліку не є одночасними в геоцентричній системі, яка рухається. Власний час атомних годинників на поверхні Землі залежить від їх положення і швидкості в барицентричній системі відліку та координатного часу. При порівнянні показань годинників, які перебувають у різних місцях, потрібно враховувати різницю їх власних часів.

3.3.3. ІСРАРХІЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ШКАЛ ЧАСУ

ШКАЛИ ДИНАМІЧНОГО ЧАСУ TDB І TDT

Рекомендаціями XVI (Гренобль, 1976) і XVII (Монреаль, 1979) Генеральних асамблей МАС шкала ET з 1986 р. була замінена в практиці обчислення астрономічних ефемерид на дві шкали:

TDB (Barycentric Dynamical Time) — барицентричний динамічний час, який є рівномірним часом і виступає в ролі аргументу диференціальних рівнянь гравітаційних теорій руху тіл Сонячної системи;

TDT (Terrestrial Dynamical Time) — земний динамічний час, який є аргументом геоцентричних ефемерид.

Шкали TDB і TDT відрізняються лише періодичними членами.

Як вказано в Примітці 1 до Рекомендацій 5 Комісії 4 (Trans. IAU, 1977, v. 168), ці шкали в термінології ЗТВ можна розглядати відповідно як координатний час барицентричної референсної системи і власний час спостерігача на Землі.

Реформа шкал була проведена у зв'язку з релятивізацією фундаментальних ефемерид Сонячної системи. В той час як ET базувалося на ньютонівській динаміці і теорії руху Місяця (за Брауном), нові шкали побудовані на релятивістській теорії руху DE200/LE200, розробленій у Лабораторії реактивного руху JPL (Пасадена, США).

У резолюціях МАС (Trans. IAU, 1977, v. 168; 1980, v. 178) щодо нових шкал часу для динамічних теорій і ефемерид були надані такі рекомендації:

1) вважати значенням нуль-пункту нової шкали часу для видимих геоцентричних ефемерид TDT epoch

$$1977 \text{ січень } 1,0^h 0^m 32.184^s \text{ TDT} = \\ = 1977 \text{ січень } 1,00^h 00^m 00^s \text{ TAI};$$

2) одиницею шкали TDT вважати добу тривалістю 86 400 с системи СІ на середньому рівні моря (з 1996 р. віднесено секунду СІ до геоїда);

3) прийняти для рівнянь рухів, віднесених до барицентру Сонячної системи, таку шкалу часу TDB, щоб між цією шкалою та шкалою часу TDT, яку прийнято для видимих геоцентричних ефемерид, існували лише періодичні варіації;

4) не вводити стрибків у системі Міжнародного атомного часу TAI.

Таким чином, шкалі барицентричного динамічного часу TDB надавалися властивості координатного часу в барицентричній референсній системі (BRS), шкалі TDT — координатного часу в геоцентричній референсній системі (GRS), а властивості власного часу надавалися шкалі TAI. Співвідношення між TDT і TAI описується рівнянням

$$TDT = TAI + 32.184^s,$$

а зв'язок між TDT і TDB визначається за співвідношенням, яке залежить від динамічної моделі Сонячної системи.

У більшості випадків використовується наближений вираз для різниці TDB – TDT (справедливий лише для геоцентру):

$$TDB - TDT = +0.001658^s \sin(g + 0.0167 \sin g),$$

$$g = 357.528^\circ + 0.98560028^\circ (\text{JD} - 2451545.0) T,$$

де T — час, який відраховується від епохи J2000.0 в юліанських сторіччях.

Точніше співвідношення потребує врахування збурень у русі Землі від планет і Місяця.

Зв'язок між всесвітнім часом UT1 і TDT забезпечується через шкалу TAI:

$$\Delta T(A) = TDT - UT1 = TAI + 32.184^s - UT1.$$

Значення $\Delta T(A)$ наводяться в Астрономічних щорічниках.

Сучасні дослідження, які базуються на радіотехнічних спостереженнях великих планет і космічних апаратах, вказують на узгодження атомної і динамічної шкал часу на рівні 10^{-12} .

З'ясувалося, що динамічні шкали часу TDT і TDB мають певні недоліки.

Передусім це стосується неузгодженості визначень. У термінології ЗТВ час TDB розглядається як координатний час барицентричної системи координат, а час TDT — як власний час спостерігача, хоча спочатку вважалося, що ці шкали є координатними шкалами часу систем BCRS і GCRS.

По-друге, неоднозначні процедури виключення вікового дрейфу і, відповідно, процедури визначення довгоперіодичної компоненти.

Крім того, перехід від однієї системи координат до іншої призводив до зміни не лише шкали часу, а й числових значень деяких астрономічних сталих (зокрема, величин метра, планетних мас тощо). Як приклад наведемо визначення геоцентричної гравітаційної сталої Землі GM_3 , які базуються на TDT та TDB:

$$GM_3 (TDT) = 3.98600440 \cdot 10^{14} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2},$$

$$GM_3 (TDB) = 3.98600434 \cdot 10^{14} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}.$$

Різниця між величинами у 6 разів перевищує похибку їх визначення (Seidelmann and Fukushima, 1992).

Враховуючи всі відзначені недоліки, в Резолюції MAC (1991) динамічні шкали часу було замінено на координатні шкали часу TCB, TCG і TT.

Проте на XXVI Генеральній асамблеї MAC (Прага, 2006) знову повернулися до питання про переобчислення барицентричного динамічного часу TDB. Зокрема, в Резолюції 3 відмічена можливість використання шкали TDB як продовження шкали ефемеридного часу T_{eph} .

ШКАЛИ КООРДИНАТНОГО ЧАСУ

TT, TCG і TCB

Щоб усунути недоліки, притаманні шкалам динамічного часу TDB і TDT, в 1991 р. на XXI Генеральній асамблеї

МАС була проведена нова реорганізація шкал часу. Ввели шкали координатного часу, які віднесено до барицентрів відповідних систем небесних тіл (або окремих об'єктів):

замість неоднозначного віднесення секунди СІ як одиниці вимірювання часу до рівня моря рекомендовано відносити її до геоїда, який відповідає значенню нормального геопотенціалу W_0 ;

було рекомендовано, щоб астрономічні сталі мали однакові значення в усіх системах координат. При цьому основними фізичними одиницями в усіх системах є СІ-секунда для власного часу і СІ-метр для власної довжини, взаємозв'язок якого з СІ-секундою визначається швидкістю світла

$$c = 299\,792\,458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Згідно з Резолюцією XXI Генеральної асамблеї МАС за основу теорії в небесній просторово-часовій референсній системі прийнято загальну теорію відносності.

Шкали координатного часу визначаються так:

TCB (Barycentric Coordinate Time) — барицентричний координатний час барицентричної системи координат Сонячної системи (BCRS);

TCG (Geocentric Coordinate Time) — геоцентричний координатний час геоцентричної системи координат (GCRS);

ТТ (Terrestrial Time) — земний час (аргумент геоцентричних ефемерид).

Шкалу ТТ часу використовують для фіксації астрономічних спостережень, які виконуються з поверхні Землі, і для наземних метрологічних досліджень. Вона практично реалізується наземними еталонами часу і частоти.

Якщо шкали часу TCB і TCG відносяться до центрів відповідних систем, то час ТТ є власним часом спостерігача на поверхні (геоїді) Землі.

Поняття «земний час» ТТ (Terrestrial time) як референсної шкали часу було введено Рекомендацією А4 МАС у 1991 р.

На момент 1977 січень 1,0 год 0 хв 0 с ТАІ відлік часу за шкалою земного часу ТТ було встановлено рівним точно даті 1977 січень 1,0 год 0 хв 32.184 с.

Земний час є еквівалентом земного динамічного часу TDT. Його залежність від Міжнародного атомного часу ТАІ описується співвідношенням

$$ТТ = TDT = ТАІ + 32.184 \text{ с.}$$

Таким чином, шкала ТАІ є реалізацією ТТ, проте через похибки синхронізації годинників і обчислень вона має малий лінійний зсув ($\sim 1 \text{ мкс/рік}$) відносно ідеальної шкали ТТ.

Оскільки реалізація шкали часу ТТ відноситься до геоїда, невизначеність та змінність якого може бути джерелом невизначеності земного часу ТТ, на XXIV Генеральній асамблеї МАС (2000) була прийнята Резолюція В1.9 стосовно перевизначення шкали ТТ: шкала ТТ є шкалою часу, яка відрізняється від геоцентричного координатного часу TCG на сталу швидкості:

$$dTТ/dTCG = 1 - L_G,$$

де $L_G = 6.969\,290\,134 \cdot 10^{-10}$, $L_G = U_G/c^2$; U_G — гравітаційний потенціал на геоїді.

Атомний час ТАІ, як уже зазначалося, являє собою земний час ТТ, але також може вважатися і реалізацією TCG, оскільки відрізняється лише зсувом на початковий момент і лінійним дрейфом.

Загальне зауваження:

Відлік усіх координатних часів здійснюється від епохи

$$\begin{aligned} (JD = 2\,443\,144.5 \text{ ТАІ}) \\ 1977 \text{ січень } 1,0^{\text{h}} 0^{\text{m}} 32.184^{\text{s}} \text{ ТТ} = \\ = 1977 \text{ січень } 1,0^{\text{h}} 0^{\text{m}} 0.000^{\text{s}} \text{ ТАІ} \end{aligned}$$

в геоцентрі (IERS Convention, 2003).

3.3.4. ЗВ'ЯЗОК МІЖ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМИ ШКАЛАМИ ЧАСУ

Численні рекомендації МАС відносно застосування в астрономічній практиці референсних координатних систем і шкал часу на основі релятивістських теорій були підсумовані й узагальнені Міжнародною службою обертання Землі (IERS Convention, 2003).

Щоб показати зв'язок між різними релятивістськими шкалами часу, базуючись на цій публікації, передусім наведено в табл. 3.2 нові числові стандарти (IERS Convention, 2003), які мають безпосереднє відношення до визначення шкал часу. Стандартизовані дані наведено в системі CI (System International d'Unites, 1998) й узгоджено з використанням шкал геоцентричного координатного часу TCG в геоцентричній системі координат та барицентричного координатного часу TCB для барицентричної системи координат. Проте величини τ_A , σ_A , ψ_1 (див. табл. 3.2) визначено з використанням барицентричного динамічного часу TDB.

Одиниці часу t і довжини l в системах TDB і TCB пов'язані між собою такими співвідношеннями (Seidelmann, Fukushima, 1992):

$$t_{\text{TDB}} = t_{\text{TCB}} / (1 - L_B), \quad l_{\text{TDB}} = l_{\text{TCB}} / (1 - L_B).$$

Зв'язок між шкалами часу встановлюється відповідно до рекомендацій МАС. Відзначимо, що константи переходів між релятивістськими шкалами часу уточнювалися неодноразово.

Наведемо деякі особливості шкал часу (відповідно до IERS Convention, 2003).

1. Шкала TAI не змінюється за винятком уточнення визначення СІ-секунди.

2. Шкала TT відрізняється від TAI сталим зсувом:

$$TT = TAI + 32^s.184,$$

тобто в момент 1977 січень $1,0^h 0^m 0^s$ TAI відлік часу за шкалою TT буде 1977 січень $1,0^h 0^m 32.184^s$. Це зумовлює спадкоємність шкали TT зі шкалами ET і TDT. Як уже відзначалося, земний час TT і земний динамічний час TDT є еквівалентними, тому їх можна розглядати як реалізацію ідеалізованого атомного часу з одиницею вимірювання СІ-секундою, визначеною на геоїді. Можна вважати, що для практичних потреб ці шкали є продовженням у минуле ефемеридного часу ET.

Через фізичні дефекти атомних стандартів частоти можливі зміни сталої зсуву між TT і TAI, яка для інтервалу 1977–1990 рр. визначалась із точністю ± 10 мкс. Шкалу TAI можна розглядати як фізичну реалізацію TT. Оскільки існують різні реалізації атомних шкал (з відповідними абрєвіатурами — xxx), то рекомендується позначати зв'язок TT з його фізичною реалізацією виразом TT (xxx). Наприклад, TT(TAI) — земний час за Міжнародною атомною шкалою TAI; TT(BIMP90) — земний час, який реалізовано Міжнародним бюро мір і ваг у 1990 р.; TT (USNO) — земний час за атомною шкалою часу Морської обсерваторії США.

3. Шкала TCG відрізняється від TT і від TDT сталим дрейфом (віковим членом), який враховує незмінний член потенціалу W_0 :

$$\begin{aligned} TCG - TT &= c^{-2} W_0 = \\ &= L_G (JD - JD_0) 86\,400^s, \end{aligned}$$

де $JD_0 = 2443\,144.5 = 1977$ січень $1,0^h$ TAI; значення W_0 і L_G наведено в табл. 3.2.

4. Співвідношення між шкалами TCB і TDB лінійне:

$$\begin{aligned} TCB - TDB &= \\ &= L_B (JD - JD_0) \cdot 86\,400^s + P_0, \end{aligned}$$

3.2. Стандартизовані величини, що застосовуються при визначенні часу

Параметр	Значення	Точність
Швидкість світла c	299 792 458 м·с ⁻¹	Ухвалена
Середнє значення $L_B = 1 - d(TT)/d(TCB)$	$1.550\,519\,767\,72 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-17}$
Середнє значення $L_C = 1 - d(TCG)/d(TCB)$	$1.480\,826\,867\,41 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-17}$
$L_G = 1 - d(TT)/d(TCG)$	$6.969290134 \cdot 10^{-10}$	Ухвалена
Гравітаційна стала G	$6.673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Астрономічна одиниця τ_A (в секундах)	499.004 783 806 1 с	0.000 000 02 с
Астрономічна одиниця $\sigma\tau_A$ (в метрах)	149 597 870 691 м	6 м
Нутаційний кут у довготі ψ_1	5038.478 75''/с	0.000 40''/с
Нахил до екліптики на J2000.0 ε_0	84 381.4059''	0.0003''
Екваторіальний радіус Землі a_E	6 378 136.6 м	0.10 м
Середня кутова швидкість обертання Землі ω	$7.292\,115 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$	Змінна
Середня екваторіальна сила тяжіння g_e	$9.780\,327\,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$
Потенціал геоїда W_0	$62\,636\,856.0 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$	$0.5 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$

де $L_B = L_C + L_G$; $P_0 \approx 6.55 \cdot 10^{-5}$ с; значення L_B , L_C , L_G наведено в табл. 3.2.

5. Шкала TCB утворюється зі шкали TCG шляхом чотиривимірного перетворення. Наближене значення поправки в секундах

$$TCB - TCG = L_C(JD - JD_0) 86\,400^s + c^{-2}v_e(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) + P,$$

де $L_C = 1,480\,813 \cdot 10^{-8} (\pm 1 \cdot 10^{-14})$; c — швидкість світла; v_e , \mathbf{x}_e — барицентричні швидкість і положення центру мас Землі; \mathbf{x} — барицентричне положення спостерігача; P — параметр, що є сукупністю періодичних членів з головним членом, амплітуда якого дорівнює 1.6 мс.

Для спостерігача на поверхні Землі різниця TCB – TCG містить періодичні добові члени з максимальною амплітудою 2,1 мкс.

Графічне співвідношення шкал часу наведено на рис. 3.8 і 3.9.

Слід відзначити, що всі сучасні ефемериди тіл Сонячної системи є релятивістськими, тому вони пов'язані з певною релятивістською шкалою часу.

Як аргумент дифференціальних рівнянь усіх гравітаційних теорій руху тіл Сонячної системи має використовуватися шкала TCB, яка замінила шкалу TDB. Формально перехід ефемерид зі шкал часу TDB (або ET) до шкали TCB здійснюється за співвідношенням

$$\Delta t(TCB) = \Delta t(TDB)/(1 - L_B).$$

Земний динамічний час TDT за своїм фізичним змістом практично збігається з ефемеридним часом ET, тому у відповідних випадках можна користуватися зручними на практиці уже визначеними ефемеридними показниками, наприк-

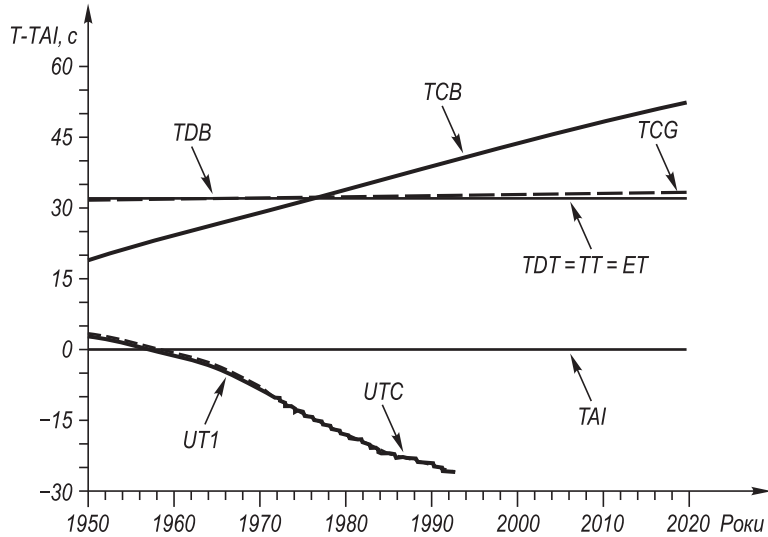


Рис. 3.8. Графічне співвідношення різних шкал часу

лад ефемеридною довготою (Audoin С., Guinot В., 2001; Лукашова М. В., Свешников М. Л., 2004).

На XXVI Генеральній асамблеї МАС (Прага, 2006) були ухвалені рекомендації стосовно перевизначення баричентричного динамічного часу TDB та уточнення щодо застосування ефемеридної шкали часу T_{eph} , яка використовується в Лабораторії реактивного руху США при обчисленні ефемерид.

Узагальнення щодо шкал часу. Нагадаємо співвідношення між різними шкалами часу:

$$\Delta T = ET - UT;$$

$$\Delta UT = UT1 - UTC;$$

$$\Delta AT = TAI - UTC;$$

$$TT = TDT = ET = TAI + 32.184 \text{ с};$$

$$TDB = TDT + (1/c^2) V_z (r - R_z) + P;$$

$$TCG = TT + L_G (t - t_0);$$

$$TCB = TDB + L_B (t - t_0);$$

$$TCB = TCG + L_C (t - t_0) + (1/c^2) V_z (r - R_z) + P;$$

$$T_{eph} = TT + (1/c^2) V_z (r - R_z) + P,$$

де $t - t_0 = [\text{MJD}(\text{TAI}) - 43\,144.0] 86\,400 \text{ с};$

$$L_G = 6.969\,290\,134 \cdot 10^{-10};$$

$$L_B = 1.550\,519\,767\,72 \cdot 10^{-8} \pm 2 \cdot 10^{-17};$$

$$L_C = 1.480\,826\,867\,41 \cdot 10^{-8} \pm 2 \cdot 10^{-17};$$

r, R_z — баричентричні радіуси-вектори годинника і центра Землі; V_z — вектор швидкості центра Землі.

Початковим моментом часу є t_0 , який дорівнює 0 год 0 хв 0 с TAI, 1 січня 1977 р. Модифікована юліанська дата для цього моменту $\text{MJD}(\text{TAI}) = 43\,144.0$.

Наведемо приклад перетворення однієї шкали часу в іншу (Жаров, 2006).

Різницю моментів баричентричного координатного часу $t - t_0$ можна замінити різницею моментів атомного часу. Порядок похибки обчислення різниці власного і координатного часу 10^{-18} .

Програми для обчислення різниць TCB – TCG є на сайті //etai.bipm.org/iers/conv2003/conv2003_c10.html .

Якщо спостереження проводяться з поверхні Землі, то процедура переведення моменту часу деякої події з локальної топоцентричної системи координат у барицентричну систему така (реєстрація моментів виконується за шкалою UTC).

1. Використовуючи вираз $\Delta AT = TAI - UTC$, знаходять момент події за шкалою TAI.

2. Від шкали TAI переходять до шкали TT (або TDT).

3. Якщо використовуються ефемериди DE200/LE200, то потрібно знайти момент події за шкалою TDT відповідно до рівняння

$$TDB = TDT + (1/c^2)V_Z(r - R_Z) + P,$$

для чого обчислюють періодичні члени P і малі квазіперіодичні члени.

4. Якщо використовуються новіші ефемериди, то спочатку переходять із шкали TT на шкалу TCG відповідно до рівняння $TCG = TT + L_c(t - t_0)$.

5. Нарешті, використовуючи рівняння

$$TCB = TCG + L_c(t - t_0) + (1/c^2)V_Z(r - R_Z) + P,$$

можна знайти момент за шкалою TCB.

При застосуванні ефемерид DE495/LE405 потрібно скористатися шкалою T_{eph} :

$$T_{eph} = TT + (1/c^2)V_Z(r - R_Z) + P.$$

Вказані вище ефемериди, які побудовані в Лабораторії реактивного руху, можна знайти на сайті цієї лабораторії:

<ftp://navigator.jpl.nasa.gov/pub/ephem/export/ascii/>.

3.3.5. ЧОМУ ТАК БАГАТО ШКАЛ ЧАСУ?

«Why so many time scales?», — таке запитання поставили у своїй роботі Seidelmann, Fukushima (1992). І автори вважають: «Найпростіша відповідь на запитання, чому існує багато шкал часу, може бути такою — щоб зрозуміти межу використання кожної практичної шкали часу і часового аргументу (в англійській термінології — time-like argument) та можливостей їх використання».

Отже, Міжнародний атомний час (TAI) є статистично сформованою загальною шкалою часу для міжнародного використання. Ця шкала базується на показаннях усіх точних атомних годинників як комерційних, так і лабораторних стандартів. Шкала TAI є основою для високоточних міжнародних і національних вимірювань часу та порівнянь шкал часу.

Відмінною від шкали TAI є шкала всесвітнього часу UT1, яка встановлюється на основі спостережень за обертанням Землі. Цю шкалу можна точно визначити лише з аналізу спостережень, які вже отримано, і які можна прогнозувати лише з обмеженою точністю. Для визначення точного розташу-

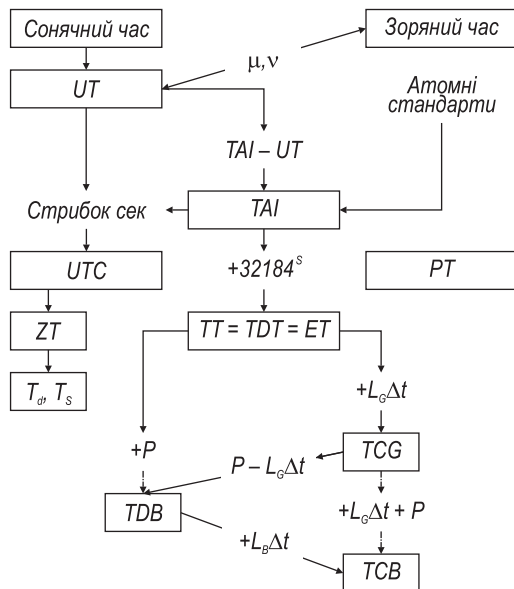


Рис. 3.9. Зв'язок між різними шкалами часу

вання об'єкта на поверхні Землі відносно небесної координатної системи потрібно знати UT1.

Всесвітній координований час UTC, як це впливає і з його назви, є координованим (узгодженим) часом між шкалою всесвітнього та атомного часу, і є стандартом для всіх цивільних систем часу. Він також є основою для збереження і порівняння систем часу, які використовуються в кожній країні, а також для передавання радіосигналів точного часу.

Використання в астрономії СТВ і ЗТВ зумовило появу чисельних релятивістських шкал часу як часових аргументів (time-like arguments) ефемерид. Це релятивістські шкали часу.

Земний час TT можна розглядати як ідеалізовану версію атомного часу. Він визначається з фіксованою епохою в 1977 січень 1,0 год 0 хв 0 с TAI і одиницею виміру СІ-секундою на геоїді.

Геоцентричний координатний час TCG — час, пов'язаний із просторовими координатами, віднесеними до геоцентру Землі.

Барицентричний координатний час TCB — це координатний час, який належить координатній системі з барицентром Сонячної системи. Час TCB є часовим аргументом рівнянь руху, які визначають рух тіл Сонячної системи відносно барицентра Сонячної системи.

Ефемеридний час (перший динамічний час класичної механіки) втратив своє початкове значення, замість нього Резолюцією 3 (МАС, 2006) рекомендовано використовувати барицентричний динамічний час TDB.

Підсумовуючи все наведене вище, пропонуємо, що введення нових шкал не дає змоги досягти досконалості, воно зумовлене появою нових застосувань у нових умовах наукових досліджень і життя людства.

Ера великої кількості шкал часу триває. Так, McCarthy (2005) відзначає, що шкали часу будуть і далі розвиватися, щоб задовольнити потреби користувачів. Схоже, що і дискусія відносно визначення UTC ще триватиме протягом декількох років і що створюватимуться нові навігаційні шкали часу. Сподіваємося на розвиток шкал часу в космічних експериментах і значне підвищення точності годинників.

Можливо, у майбутньому з'явиться визначення галактичного координатного часу.

3.3.6. СТАНДАРТНА ЕПОХА J2000.0

В «Astronomical Almanac» (Washington, London) до 1984 р., а в «Астрономическом ежегоднике СССР» (Ленінград) до 1986 р. за нуль-пункт шкали ефемеридного часу використовували фундаментальну епоху 1900 січень 0,12 год ET, яка була прийнята в планетних теоріях Ньюкома. Цей нуль-пункт збігався з епохою, коли геометрична середня довгота Сонця, що була віднесена до дати середнього рівнодення, дорівнювала $279^{\circ} 41' 48.04''$.

Резолюція МАС (1976) запровадила нову стандартну епоху, основні положення якої були визначені так:

1) новою стандартною епохою, яка позначається J2000.0, вважати епоху 2000 січень 1.5, що збігається з юліанською датою JD2451545.0. Нове стандартне рівнодення відповідає цьому моменту;

2) одиницею часу, яка використовується у фундаментальних формулах, вважати юліанське сторіччя тривалістю 36 525 діб;

3) епохи (моменти) початку року мають відрізнятися від стандартної епохи

на величини, які кратні юліанському року тривалістю 365.25 доби.

Нова стандартна епоха відрізнялася на одне юліанське століття від фундаментальної епохи 1900 січень 0,12 год ефемеридного часу ET. Будь-яка епоха в новій системі визначається із співвідношення

$$[2000.0 + (JD - 2451545.0)/365.25],$$

де JD — поточна юліанська дата.

Для переходу до бесселевої епохи, яка базується на тропічному році епохи 1900.0, потрібно скористатися виразом

$$B\left(1900.0 = \frac{JD - 2415020.31352}{365.242198781}\right).$$

Одиницею часу при цьому є тривалість тропічного року (365.242198781) в епоху B1900.0 (JD2415020.31325). Символи J і B, які означають юліанську і бесселеву епохи, іноді опускають, якщо неоднозначність, що при цьому виникає, не впливає на практичні результати.

Наведене вище визначення стандартної епохи J2000.0 було ухвалене Резолюцією IAU C7 (1994) з деякими уточненнями, а саме:

1) епоха J2000.0 визначається в геоцентрі і на дату 2000 січень 1.5 TT, що відповідає юліанській даті 2451545.0TT;

2) юліанське сторіччя містить 36525 діб за шкалою TT;

3) співвідношення шкал часу на епоху J2000.0:

$$\begin{aligned} TDT &= TT = \\ &= TDB + 0.000094... - v_e(x - x_e) c^{-2}; \\ TCB &= TDB + 11.25362^S; \\ TCG &= TDB + \\ &+ 0.5057339^S ... - v_e(x - x_e) c^{-2}; \\ UT1 &= TDB - 65^S, \end{aligned}$$

де x_e , v_e — барицентричні положення і швидкість центра мас Землі на J2000.0;

x — барицентричне положення спостерігача; c — швидкість світла.

Для зір каталогу FK5 різниця між часовими шкалами TDB, TCB, TCG на J2000.0 незначна.

Ефемеридне забезпечення буде високоточним, якщо зазначено, в якій шкалі часу вказано стандартну епоху, бо існує різниця епох в шкалах TDB, TCB на 11 с, тому, наприклад :

у шкалі TCB стандартна епоха J2000.0 дорівнюватиме юліанській даті 2451545.0 = 2000 січень 1,12 год 00 хв 00 с;

у шкалі TDB стандартна епоха J2000.0 буде датою 2000 січень 1,12 год 00 хв 11 с.

Для вказаних випадків пропонується застосовувати такий запис: J2000.0 (TCB), J2000.0 (TDB). Це ж стосується юліанського сторіччя. Воно визначається як 36525 діб за шкалою TDB і 36525.00056632 доби за шкалою TCB (IERS Convention, 2003).

3.4. СИНХРОНІЗАЦІЯ ЧАСУ

Для всіх фізичних величин порівняння між стандартами є однією з основ метрології. Головна мета порівняння полягає в перевірці відповідності між первинними стандартами різних лабораторій і визначенні можливих їх похибок. Порівняння і синхронізація різних стандартів часу і частоти використовуються також для створення середнього первинного стандарту, який буде досконалішим за окремі стандарти. Саме на базі такого порівняння атомних годинників різних лабораторій створено Міжнародну атомну шкалу часу TAI.

Для синхронізації шкал часу спочатку використовували метод перевезення годинників з однієї обсерваторії (або

лабораторії) до іншої. З розвитком технічних засобів методи синхронізації годинників удосконалювалися (прийм радіо-, телевізійних сигналів тощо).

Отже, щоб сформувати точну шкалу часу, потрібно порівняти і синхронізувати показання годинників, які розташовані й працюють на великій відстані один від одного. Синхронізацію годинників можна виконати такими методами:

фізичним транспортуванням годинників;

передаванням електромагнітних сигналів (наприклад, радіонавігаційною системою типу LORAN-C);

квaziодночасним передаванням електромагнітних сигналів уздовж ідентичних траєкторій, що з'єднують годинники А і Б: від А до Б і від Б до А (наприклад, двостороннього супутникового передавання часу і частоти системами типу TWSTFT і GNSS);

метеорним методом;

методом РНДБ.

Певна річ, що найпростішим методом порівняння показань годинників був метод їх транспортування (казали, що час перевозять у каретах), але точність цього методу була невисока.

У ХХ ст. (до середини 1980-х рр.) синхронізація годинників виконувалася шляхом використання радіосигналів системи LORAN-C. Точність цієї системи за добу становила ± 1 мкс у часі та $\pm 10^{-12}$ за частотою. Метод транспортування годинників все ж використовувався, в основному, для синхронізації годинників радіостанцій, що передають сигнали, з годинниками головної радіостанції, які були прийняті як робочі еталони часу і частоти. Точність цього методу становила $\pm (1...5)$ мкс.

Метеорну синхронізацію годинників теж почали застосовувати у ХХ ст. Цей метод розробили харківські радіофізи-

ки під керівництвом Б. Л. Кащєєва. Метеорна синхронізація полягає в тому, що іонізовані сліди, залишені метеорами, які влітають в атмосферу Землі з космосу, використовують як пасивні відбивачі радіосигналів для синхронізації сигналів часу віддалених радіостанцій. Точність синхронізації такого методу становить ± 10 мкс.

Тепер згадані методи практично замінені новими, які діють на основі глобальних навігаційних супутникових систем GNSS. Частіше використовують глобальні позиційні системи: США — GPS, Російська Федерація — ГЛОНАСС. Супутники GPS випромінюють сигнали, синхронізовані з єдиною GPS-шкалою часу.

Коригуванням моменту приходу сигналу на затримку в атмосфері і апаратурі можна визначити різницю між показаннями наземних годинників на станціях спостереження, які слідкують одночасно за одним і тим же супутником. Обчислення проводяться за шкалою GPS. Точність синхронізації двох годинників становить 2 нс за умови одночасного спостереження одного супутника двома недалеко розташованими станціями (до 1000 км) упродовж одного проходження. В інших випадках точність знижується до 10 нс.

Проводилися експерименти з іншими супутниковими системами з метою вивчення похибок, які залишаються при використанні лише однієї системи. Сигнали, які передаються телекомунікаційними супутниками і приймаються одночасно в декількох пунктах, дають змогу провести пряме порівняння частот у цих пунктах.

Метою експерименту під назвою LASSO (Laser Synchronization from Stationary Orbit — синхронізація за допомогою лазера, який перебуває на стаціонарній

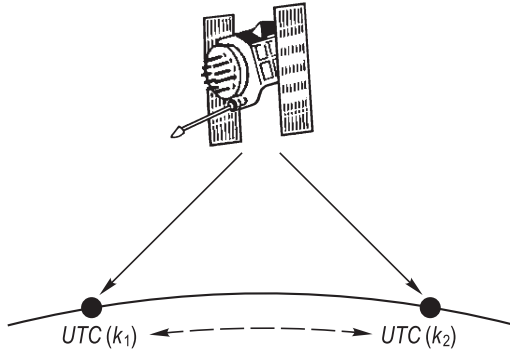


Рис. 3.10. Схема синхронізації годинників за допомогою GPS

орбіті) було отримання вищої точності синхронізації годинників. Його провели з використанням одного з супутників METEOSAT між пунктами в Європі (обсерваторія CERGA, Грасс, Франція) і в США (обсерваторія Мак-Дональд, Техас). Точність синхронізації в цьому експерименті досягла 0,2 нс. Це був унікальний і дуже дорогий експеримент.

Кращим рішенням є нині існуюча двокодова система, що використовує супутник зв'язку GPS для порівняння часу випромінювання сигналів, які посилали на супутник двома станціями (k_1, k_2) і отримували назад (рис. 3.10). Для цих станцій можна записати

$$x_{ak1}(t) = UTC(k_1)(t) - \text{GPS time}(SV_a)(t),$$

$$x_{ak2}(t) = UTC(k_2)(t) - \text{GPS time}(SV_a)(t),$$

$$x_{ak1k2}(t) = x_{ak1}(t) - x_{ak2}(t).$$

Величини $x_{ak1k2}(t)$ характеризують порівняння показань годинників двох станцій на дату t через супутник SV_a .

Наведений метод назвали TWSTFT (two waysatellite and frequency transfer — двостороння супутникова передача часу і частоти). При порівнянні показань годинників у Парижі і Токіо цим методом через геостационарний супутник на ви-

соті $67,5^\circ$ східної довготи отримано значення $x_{ak1k2}(t) = 299$ нс (К. Одуан, Б. Гіно, 2002).

Синхронізацію часу методом TWSTFT та за допомогою систем GPS і ГЛОНАСС широко використовують у Міжнародному бюро мір і ваг при обчисленні ТАІ.

Синхронізувати годинники можна також методом, що базується на застосуванні радіоінтерферометрів із наддовгою базою (РНДБ). Застосування РНДБ в геодезії і у вивченні орієнтації Землі ґрунтується на вимірюванні різниці часу приймання сигналів від квазарів у пунктах, які віддалені один від одного на великі відстані, — від декількох сотень до декількох тисяч кілометрів. Розташовані в цих пунктах годинники можуть бути синхронізовані з точністю до 10 пс.

Різниця в показаннях годинників є одним із багатьох параметрів, які визначаються у процесі обробки результатів спостережень РНДБ.

Глобальна навігаційна супутникова система GNSS. Для синхронізації годинників можуть бути використані також глобальні навігаційні супутникові системи.

Глобальна навігаційна супутникова система GNSS (Global Navigation Satellite System) як навігаційний елемент систем керування повітряним рухом системи CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance /Air Traffic Management) має певну комбінацію розміщених на Землі, супутниках і на борту повітряного корабля складових, до яких, зокрема, входять:

супутникова радіонавігаційна система США — GPS;

супутникова радіонавігаційна система Росії ГЛОНАСС;

бортова система функціонального доповнення ABAS (Aircraft Based Augmentation System);

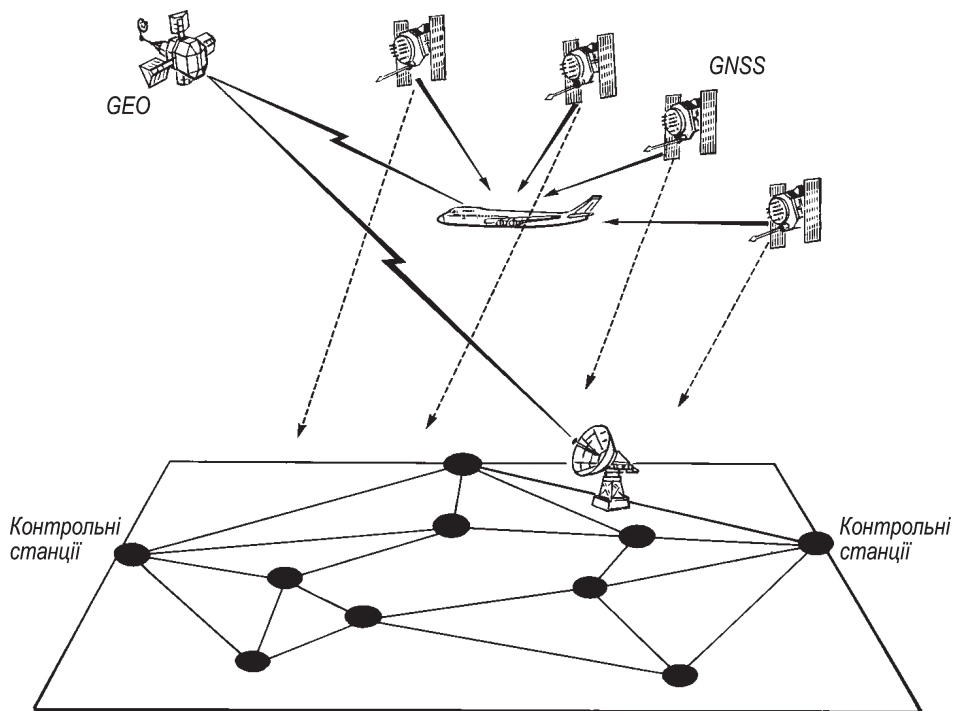


Рис. 3.11. Структура супутникової системи функціонального доповнення SBAS

супутникова система функціонального доповнення SBAS (Satellite-Based Augmentation System) (рис. 3.11, 3.12);

наземна система функціонального доповнення GBAS (Ground Based Augmentation System) (рис. 3.13);

бортовий приймач.

Основні відмінності між доповненнями SBAS і GBAS — способи отримання й доставлення коригувальної інформації, а також розміри зони дії цих підсистем.

Система GBAS — локальна, функціонує в зоні радіусом до 50 км, а SBAS — глобальна система, зона дії якої має радіус декілька тисяч кілометрів.

Прикладами SBAS є американська широкозонна система функціонального доповнення WAAS (Wide Area Augmen-

tation System), аналогічна за своїми функціями європейська система EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) та японська супутникова система функціонального доповнення MSAS (Multi-functional Transport Satellite-based Augmentation System).

На відміну від систем WAAS і MSAS, система EGNOS є широкозонним доповненням не лише до GPS, але й до ГЛОНАСС.

Експлуатація функціонального доповнення WAAS почалася з 2001 р., а доповнення EGNOS — з 2003 р. Зону дії доповнення EGNOS передбачається поширити на Близький Схід, Центральну Азію, Африку та Латинську Америку (Бабак В., Конін В., Харченко В., 2004).

Синхронізація з точки зору релятивістської теорії. У межах ньютонівської

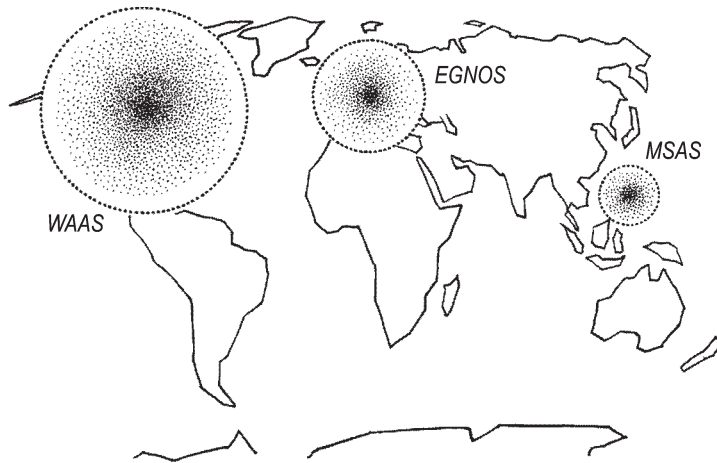


Рис. 3.12. Зони дії та обслуговування системи типу SBAS

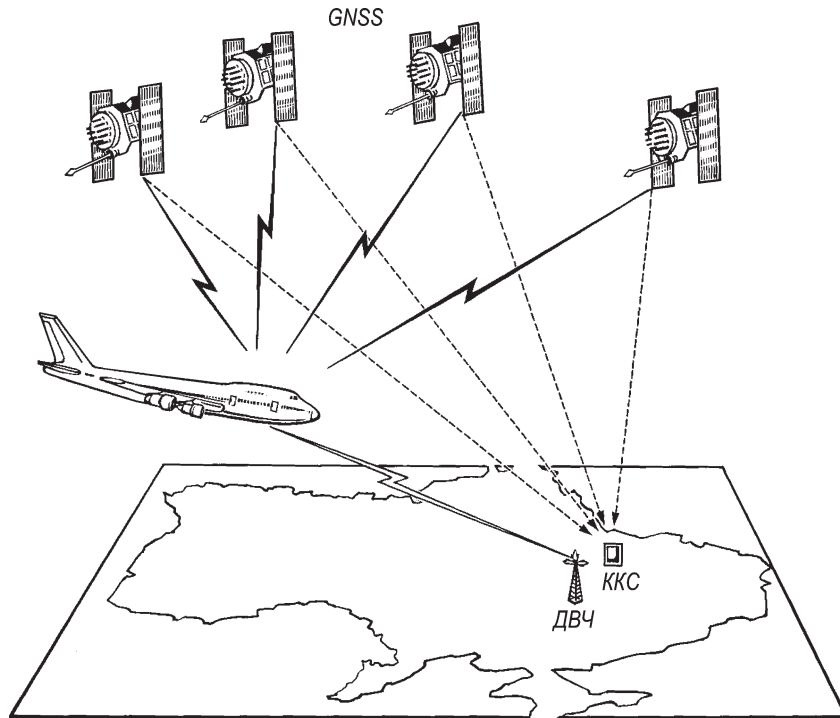


Рис. 3.13. Структура наземного доповнення GBAS (ККС — контрольно-коригувальна станція; ДВЧ — канал дуже високого частотного діапазону)

теорії тяжіння, в якій існує абсолютний час для всього простору, не виникає особливих проблем із синхронізацією часу.

У спеціальній теорії відносності (СТВ), в якій простір і час втрачають свої абсолютні властивості, для синхронізації годинників, які перебувають у стані спокою відносно однієї і тієї ж інерціальної системи, А. Айнштайн розробив спеціальну процедуру. Припустимо, що від годинника A за його показанням у момент T_A^1 в напрямі годинника B посиляється світловий сигнал, який досягає B за його показаннями у момент T_B . У той же момент T_B сигнал відбивається від B назад і досягає A за їх показаннями в T_A^2 .

Годинники A і B вважаються синхронізованими за Айнштайном, коли $T_B = (T_A^1 + T_A^2)/2$.

У загальній теорії відносності (ЗТВ) завдяки тому, що в нескінченно малих ділянках простору-часу ЗТВ переходить у СТВ, можна синхронізувати годинники за процедурою Айнштайна для двох нескінченно близьких подій. Проте для значних ділянок простору-часу це зробити неможливо, оскільки вибір шляху синхронізації залежить від траєкторії, що з'єднує A і B , і не є однозначним. Зокрема, це може призвести до такого випадку: якщо годинник A синхронізовано з годинником B , а годинник B , у свою чергу, з годинником C , то годинник A може не бути синхронізованим із C .

Особливо складною є проблема синхронізації годинників для обертових референсних систем. У цьому разі з'являється зсув Δt в показаннях годинників при синхронізації. Для годинників, що розташовані на поверхні Землі, яка обертається, зсув, нс,

$$\Delta t = \pm 207 \cos^2 \varphi,$$

де φ — широта, на якій розташовано годинник.

Звідси видно, що виникають труднощі при формуванні шкали ТАІ, для утворення якої потрібно усереднення (а отже, і синхронізація) показань атомних годинників, які розташовані на поверхні Землі, що обертається. У зв'язку з цим вибір певного алгоритму синхронізації є умовним і визначається за домовленістю.

Тепер прийнято концепцію координатної синхронізації, яка залежить від вибору референсної системи (Thomas C., Wolf P., 1994; Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д., 1996; Одуан К., Гіно Б., 2002; Бабак В. П., Конін В. В., Харченко В. П., 2004).

3.5. ПУЛЬСАРНИЙ ЧАС

Пульсари (анг. Pulsating Sources of Radioemission, PSR) були відкриті у 1967 р. групою американських радіоастрономів під керівництвом Е. Хьюїша. За відкриття цих об'єктів Е. Хьюїш і М. Райл отримали Нобелівську премію в галузі фізики за 1974 р.

Зараз відомо понад 1000 пульсарів. Всі пульсари, відкриті між 1967 і 1982 рр., мають період обертання близько 1 с. Відносна нестабільність цих пульсарів від 10^{-10} до 10^{-11} . У 1982 р. сукупність небесних об'єктів астрономи доповнили ще однією категорією пульсарів. Це мілісекундні пульсари з періодом декілька мілісекунд.

Поняття «пульсарний час» з'явилося у 1982 р. після відкриття короткоперіодичного пульсара PSR 1937+21. Період його обертання дорівнює 1.6 мс. З того часу декілька подібних пульсарів було знайдено в галактичному диску, а також у кулястих скупченнях. Цікава група об'єктів — це подвійні пульсари.

Пульсар — це нейтронна зоря, яка утворюється після вибуху зорі з масою від 1.4 до 2.5 мас Сонця. Вибух проявляється як спалах Наднової зорі. Нейтронна зоря має масу від однієї до двох мас Сонця і радіус приблизно 10–20 км. З теорії випливає, що всередині зорі має перебувати нейтронно-протонне ядро, яке вміщує 90 % усієї маси зорі. Ядро оточене проміжною корою з нейтронів та зовнішньою корою з ядер важких елементів. Більшість пульсарів має період обертання від частини до декількох секунд, який повільно і практично лінійно збільшується з часом. Вважають, що гальмування обертання відбувається через вплив магнітних сил на зовнішню оболонку і що мілісекундні пульсари — це старі пульсари, які були розкручені до великої швидкості внаслідок акреції речовини з зорі-компонента.

Значне магнітне поле пульсара приводить до появи протяжної магнітосфери і сильного електричного поля біля магнітних полюсів. Це поле формує і прискорює плазму до релятивістських швидкостей, що й зумовлює інтенсивне радіовипромінювання, направлене вздовж магнітної осі пульсара (рис. 3.14). Якщо вісь радіовипромінювання не збігається з магнітною віссю, то радіопромінь описує на небі конус. Коли Земля попадає у цей конус, то реєструються імпульси на фоні загального радіовипромінювання з періодом, що дорівнює періоду обертання пульсара (Одуан К., Гіно Б., 2002; Ковалевский Ж., 2004).

Інтенсивність прийнятого імпульсу значно змінюється від одного періоду до іншого. Це обумовлено тим, що радіохвилі перетинають навколосоряну турбулентну плазму, яка спричиняє певну нестабільність форми імпульсу. Але якщо усереднити імпульс для великого числа періодів, то отриманий профіль

буде стабільним у часі. Сигнал, який приймається, реєструється з кроком декілька мікросекунд у локальній шкалі часу, що формується водневим мазером. Далі моменти прийому сигналу переводять у шкалу ТАІ.

Час реєстрації обирають таким чином, що він дорівнює частці від ділення видимого періоду P імпульсу на деяке ціле число. Наприклад, можна взяти $N = 1024$ канали для запису сигналу за період. Далі комп'ютер складає інтенсивність сигналів в кожному каналі й обчислює середнє значення. Хронометрування полягає у визначенні часу приходу вибраних деталей сигналу в середньому профілі імпульсу.

Наведемо формулу для визначення пульсарного часу:

$$N(t) = f_0 \Delta t + (1/2)d(f)\Delta t^2 + (1/6)d^2(f)\Delta t^3 + \dots,$$

де $N(t)$ — номер приходу імпульсу від пульсара; $\Delta t = t - t_0$, t_0 — початкова епоха спостереження, яка визначається з каталогу пульсарів; t — час приходу імпульсу з номером $N(t)$ у барицентр Сонячної системи в шкалі барицентричного часу TDB або TCB; f_0 , $d(f)$, $d^2(f)$ — частота обертання пульсара і її похідні на епоху t_0 (ці значення беруться з каталогу) (Жаров В., 2006).

Оскільки швидкість зміни періоду обертання мілісекундних пульсарів дуже велика, то вважається, що вони можуть у майбутньому задавати дуже стабільну шкалу часу.

Проте існує і протилежна думка, що пульсари, строго кажучи, не прийнятні для визначення шкали часу, але вони мають стабільне обертання в довготривалому інтервалі, тому в майбутньому можуть слугувати для поліпшення довготривалої стабільності ТАІ. Детальніше

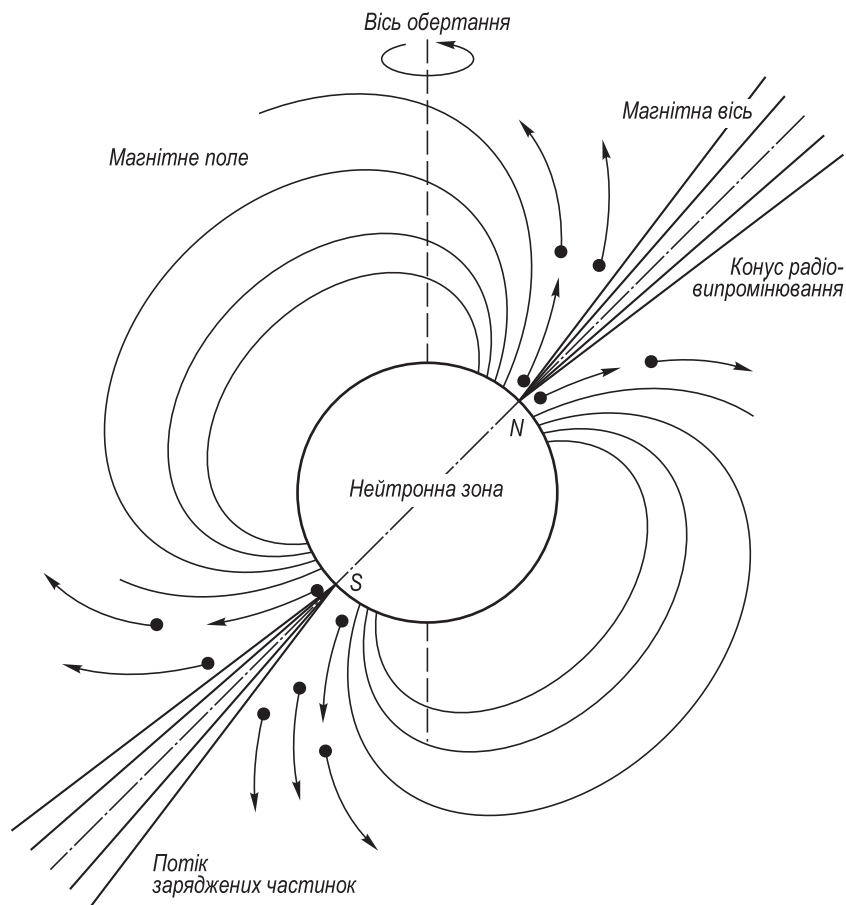


Рис. 3.14. Схема випромінювання пульсара (Ковалевський Ж., 2004)

про пульсарну шкалу часу написано у книжках авторів Одуана К. і Гіно Б. (2002), Ковалевського Ж. (2004), Жарова В. (2006).

Незважаючи на оптимістичні оцінки довгострокової стабільності пульсарної шкали часу, практично ідею створення шкали РТ не вдалося реалізувати дотепер. Головна проблема пояснюється непередбаченими стрибками швидкостей обертання пульсарів, що найімовірніше обумовлено перебудовою їх кори (Ильсов Ю. П. и др., 1989).

Деякі зауваження відносно пульсарного часу зробили Одуан К. і Гіно Б. (2002): «... здається ймовірним, що мілісекундні пульсари не дадуть нам ні одиницю часу, ні час, який ми визначаємо нашими годинниками. Вимірювання часу пульсарів є найбільш затребуваним при застосуванні їх в атомних шкалах часу при розгляді точності і довготривалої стабільності (на інтервалах шести і більше місяців). Пульсарний час приводить до нових результатів у астрометрії, динаміці Сонячної системи і в самій

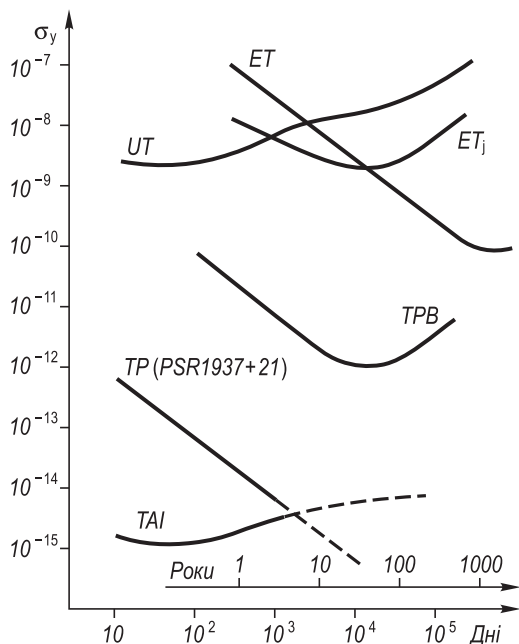


Рис. 3.15. Нестабільність астрономічних шкал часу UT, ET, ET_j:

TP(RSR1937+21) — пульсарний час на основі обертання пульсара, записаного в дужках; *TPB* — пульсарний час на основі орбітального руху подвійного пульсара та фізичної шкали TAI; ET і ET_j — шкали ефемеридного часу, отримані зі спостережень Сонця і Місяця відповідно; UT — всесвітній час; TP(PSR1937+21) — пульсарний час на основі обертання зазначеного в дужках пульсара; TPB — пульсарний час на основі орбітального руху подвійного пульсара

теорії гравітації. Вимірювання подвійних пульсарів опосередковано підтвердило існування гравітаційних хвиль, які були передбачені теорією відносності, і, таким чином, посилили довіру до вказаної теорії. За ці дослідження в 1993 р. була

присуджена Нобелівська премія з фізики Р. А. Холсу і Дж. Х. Тейлору».

На рис. 3.15 показано нестабільність астрономічних шкал часу ET і ET_j та фізичної шкали TAI. Властивості TAI для 1998 р. передбачені на майбутнє (Audoin С., Guinot В., 1998; Ковалевський Ж., 2004).

В розділі «Чому так багато шкал часу?» відмічалось, що існування різних систем і шкал часу не є примхою теоретиків. Різниця шкал базується на принципово різних фізичних процесах. Так, атомні шкали базуються на фізичних процесах, які проходять в атомах, тому вони пов'язані з атомними сталими (стала Планка, заряд електрона, стала тонкої структури). Основою динамічної і координатної шкал є рух тіл Сонячної системи, який визначається законами гравітації, і залежить від значення гравітаційної сталої. Саме тому такі шкали можна назвати гравітаційними. Тепер вважається, що ці дві шкали еквівалентні, але це справедливо лише в тому разі, коли фундаментальні фізичні сталі не змінюються з часом.

Пульсарна шкала є кінематичною (залежить лише від кутової швидкості обертання зорі) і, з теоретичної точки зору, визначається рівнянням стану речовини нейтронних зір. У світі «змінних фізичних сталей» пульсарна шкала не буде збігатися ні з гравітаційною, ні з атомною шкалами. У зв'язку з цим дослідження співвідношень між різними шкалами часу сприятимуть розумінню як геофізичні процеси, що проявляються у варіаціях обертання Землі, так і фундаментальні основи сучасного природознавства.

4. СЛУЖБИ ЧАСУ

*О Время! Вечности подвижное
зерцало! —*

*Все рушится, падет под дланию
твоей!...*

Сокрыт предел твой и начало

От слабых смертного очей!...

*Века рождаются и исчезают снова,
Одно столетие стирается другим...*

Ф. И. Тютчев

4.1. МІЖНАРОДНЕ БЮРО ЧАСУ

Вже перші дослідження передавання сигналів точного часу по радіо, проведені на початку ХХ ст., показали необхідність створення міжнародної організації, котра координувала б передавання радіосигналів часу і визначала б їх похибки. У 1912 р. за пропозицією Бюро довгот у Парижі була скликана Міжнародна конференція, мета якої полягала у вивченні можливостей утворення єдиної системи часу. На конференції створено спеціальний Комітет для підготовки організації Міжнародної комісії часу і Міжнародного бюро часу (МБЧ). Важливим завданням Комітету стала розробка програми передавання радіосигналів точного часу і прийняття її усіма державами. Світова війна 1914 р. призупинила діяльність Комітету і створення Міжнародного бюро часу (ВІН — Bureau International de l'Heure).

У 1919 р. в Брюсселі створено Міжнародний астрономічний союз (МАС) — International Astronomical Union (IAU), який об'єднав роботу 48 комісій з різних розділів астрономії. Комісія № 31 займалася питаннями часу. Одним з перших рішень цієї комісії було створення постійно діючого Міжнародного бюро часу в Парижі.

Діяльність МБЧ розпочалася 1 січня 1920 р. Першим директором було обрано Г. Біжурдена. З 1924 по 1964 р. МБЧ очолював М. Стойко, а з 1964 р. по 1988 р. — Б. Гіно.

Основним завданням МБЧ була координація робіт і узагальнення результатів усіх служб часу в світі. Узагальнені результати, так звані «зведені моменти», МБЧ почало публікувати лише в 1931 р.

З метою підвищення точності визначення всесвітнього часу МБЧ стало визначати поправки з урахуванням руху полюса Землі. Для цього при МБЧ створена Термінова служба широти, яка обчислювала координати полюса Землі. З 1956 р. МБЧ ввело три форми всесвітнього часу: UT0, UT1, UT2 (дві останні форми отримали назву «квазірівномірний час»).

У 1988 р. МБЧ реорганізовано у Міжнародну службу обертання Землі (МСОЗ) — International Earth Rotation Service (IERS), причому функції МБЧ розподілили так: МСОЗ займалася визначенням параметрів обертання Землі — координат полюса, всесвітнього часу, референсних систем координат, а питання стосовно визначення Міжнародного атомного часу (ТАІ) та розповсюдження сигналів часу (координованого всесвітнього часу — UTC) було передано до Секції часу Міжнародного бюро мір і ваг (МБМВ) — la Section du temps

du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

Для визначення всесвітнього часу МБЧ використовувало оптичні астрометричні інструменти: пасажні інструменти, меридіанні круги, фотографічні зенітні труби, призмові астролябії Данжона. Основою методів спостережень за допомогою цих інструментів є вимірювання кутових відстаней зір від астрономічного меридіана спостерігача або від зеніту (тобто азимут зорі або зенітна відстань). За цими відстанями і відомими положеннями зір (пряме піднесення і схилення) можна визначити астрономічну широту спостерігача і місцевий зоряний час.

Методи визначення всесвітнього часу і координат полюса, які використовувалися мережею станцій МБЧ, належать до методів класичної астрометрії.

Визначення точного часу класичними методами зводилося до визначення поправки годинника u . Методи визначення поправки годинника з астрономічних спостережень базувалися на реєстрації моментів проходження зір через небесний меридіан або через альмукантарат* (коло рівних висот).

В момент проходження зорі через меридіан зоряний час

$$s = \alpha, \text{ або } s = \alpha + 12^h,$$

де α — пряме піднесення зорі.

Відомо, що

$$s = T_m + u,$$

де T_m — показання годинника в момент проходження зорі через меридіан; u — поправка годинника в цей же момент.

Отже, $u = \alpha - T_m$, якщо зоря спостерігається у верхній кульмінації, або $u = \alpha - T_m + 12^h$, якщо зоря спостерігається в нижній кульмінації.

Таким чином, щоб визначити поправку годинника зі спостережень зір в меридіа-

ні, потрібно знати пряме піднесення зорі α та визначити показання годинника T_m у момент її проходження через меридіан.

На цих принципах базувався метод визначення часу зі спостережень зір за допомогою пасажних інструментів та зенітних труб.

З основної формули паралактичного трикутника

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (4.1)$$

де $t = s - \alpha = T + u - \alpha$, впливає, що коли відомі пряме піднесення α і схилення δ зорі, а також φ — географічна широта місця спостереження, то, знайшовши зенітну відстань z цієї зорі і зафіксувавши в момент вимірювання показання годинника T , можна обчислити годинний кут t зорі, а потім знайти поправку годинника

$$u = t + \alpha - T.$$

Поправку годинника u можна визначити і не вимірюючи зенітних відстаней зір, якщо записати показання годинника T_i в моменти проходження декількох зір у різних азимутах, але через один і той же альмукантарат. У цьому випадку розв'язується система з декількох рівнянь з двома невідомими u і φ на основі рівняння (4.1). Методом «рівних висот» точний час визначався за допомогою призмових астролябій*.

Згадані методи стосувалися визначення всесвітнього часу класичними оптичними засобами астрометрії. З 1972 р. МБЧ почали використовувати у своїй роботі результати як класичних оптичних спостережень, так і нові методи, засновані на спостереженнях ШСЗ і позагалактичних джерел (радіоінтерферометрія з наддовгою базою, лазерна локація ШСЗ і Місяця тощо).

Проведення міжнародної кампанії МЕРІТ у 1981–1983 рр., метою якої було порівняння різних методів, показало

перевагу нових методів визначення всесвітнього часу і координат полюса, що врешті-решт спричинило реорганізацію роботи МБЧ у 1988 р.

Визначення параметрів обертання Землі (всесвітній час і координати полюса Землі) стало завданням Міжнародної служби обертання Землі, а технічні питання щодо визначення атомної шкали відійшли до Секції часу Міжнародного бюро мір і ваг.

4.2. МІЖНАРОДНА СЛУЖБА ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ

4.2.1. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ

Створена у 1988 р. Міжнародна служба обертання Землі (МСОЗ) — International Earth Rotation Service (IERS) в основному перейшла на використання при обчисленні всесвітнього часу і координат полюса (параметри обертання Землі) нових методів і засобів спостережень, зокрема, радіоінтерферометрії з наддовгою базою (РНДБ); лазерної локації ШСЗ; GPS-спостережень; доплерівських спостережень.

Абсолютне визначення всесвітнього часу забезпечує лише метод РНДБ, інші ж методи дають поправки до всесвітнього часу (або визначення відхилення доби від стандарту, тобто від 86 400 с) — LOD (length of day) = ΔD .

Точність визначення часу різними методами:

Метод	Точність
РНДБ (UT1)	у середньому 0.05·0.0001 с
Лазерна локація ШСЗ (ΔD)	1.15·0.0001 с
GPS (ΔD)	0.37·0.0001 с

У 2005 р. мережа станцій МСОЗ включала 362 спостережних пункти, 128 з яких складають основу мережі — вони ведуть регулярні спостереження, що аналізуються в Центрах аналізу МСОЗ (рис. 4.1).

Радіоінтерферометрія з наддовгою базою надала принципово нову можливість визначення всесвітнього часу з високою точністю. Застосовуються два радіотелескопи (рис. 4.2), які рознесені на декілька тисяч кілометрів. Вимірюючи зсув часу Δt , можна знайти орієнтацію вектора бази \mathbf{B} відносно до напрямку на джерела. Найрозповсюдженішим методом спостережень є синхронна реєстрація сигналів точкового радіоджерела незалежно у кожному пункті спостережень. Запис спостережень здійснюється на магнітну стрічку з одночасним записом позначок часу і частоти від цезієвих або водневих стандартів, які перебувають на пунктах спостереження і мають бути синхронізовані між собою з максимально можливою точністю.

Отже, основними спостережними даними, які отримуються з РНДБ для астрометричних і геодезичних досліджень, є вимірювання часових інтервалів між прийомами сигналу від позагалактичного радіоджерела на двох кінцях РНДБ. Такий інтервал називається затримкою, а його похідна за часом — спостережуваною частотою інтерференції.

Вектор бази РНДБ між двома телескопами

$$\mathbf{B} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1,$$

де $\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1$, — радіуси-вектори телескопів.

Якщо вектор \mathbf{B} відомий, а \mathbf{s} є одиничним вектором у напрямі до спостережуваного джерела з відомими координатами, то

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{s} = c\Delta t,$$

де c — швидкість світла; Δt — затримка сигналу.

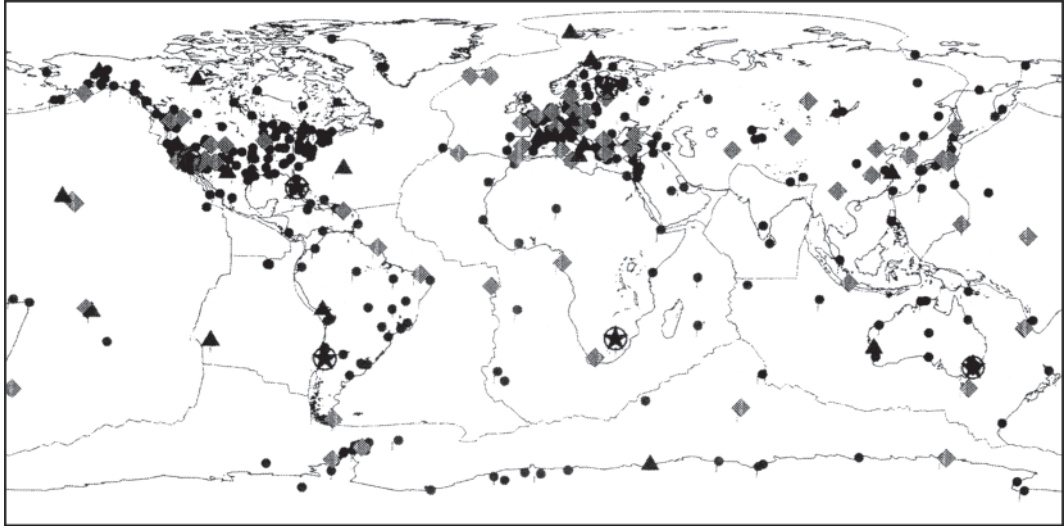


Рис. 4.1. Мережа станцій ITRS

Кожна станція спостереження незалежно приймає і реєструє сигнали від радіоджерела. Час прибуття сигналів також реєструється за допомогою місцевих годинників. Різниця зареєстрованих моментів приходу сигналу Δt може бути записана так (Мориц Г., Мюллер А., 1992):

$$\Delta t = K_1 \sin(\Omega t + \varphi) + K_2 + \Delta c_0 + \Delta c_1 t, \quad (4.2)$$

де K_1, K_2 — константи; Ω — кутова швидкість Землі; φ — фазова константа; Δc_0 — поправка зареєстрованих різниць моментів; Δc_1 — різниця ходу годинників.

Якщо координати джерела наведені в екваторіальній системі, то

$$\begin{aligned} K_1 &= (1/c)[(\Delta U^2 + \Delta V^2)^{1/2} \cos \delta], \\ K_2 &= (1/c)\Delta W \sin \delta, \\ \varphi &= \alpha - \alpha_0, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де α, δ — пряме піднесення і схилення джерела; $\Delta U, \Delta V, \Delta W$ — різниця прямокутних координат між двома антена-

ми; α_0 — пряме піднесення базової лінії на початкову епоху $t = 0$.

Таким чином, спостереження затримки сигналу від одного джерела можна використати для визначення чотирьох невідомих параметрів: $K_1, K_2 + \Delta c_0, \Delta c_1$ і φ . Параметр Ω вважається відомим.

Із спостережень визначаються три компоненти базової лінії ($\Delta U, \Delta V, \Delta W$), дві координати джерела (α, δ) і два інструментальних параметри ($\Delta c_0, \Delta c_1$). З цих семи параметрів можна оцінити лише шість, оскільки пряме піднесення джерела α неможливо відокремити від прямого піднесення базової лінії. У зв'язку з тим, що є лише чотири спостережуваних незалежних параметри, то така ситуація є невизначеною.

Інакше кажучи, РНДБ-спостереження одного радіоджерела не дає змоги визначити все: і базову лінію, і координати джерела.

Але якщо спостерігається більше одного джерела, то кожне з них додає три

нові незалежні спостережні величини (K_1 , K_2 і φ для даного джерела, оскільки Δc_0 , Δc_1 є спільними для всіх джерел) і лише два нових невідомих параметри.

Отже, для визначення всіх невідомих у даному випадку (трьох параметрів для базової лінії, п'яти параметрів для джерела і двох параметрів для годинника) потрібні спостереження принаймні трьох джерел. Крім того, оскільки є ще десять невідомих параметрів, то загалом має бути не менше десяти спостережень, і кожне джерело потрібно спостерігати не менше трьох разів. На практиці проводиться набагато більша кількість спостережень значно більшого числа джерел, що забезпечує надлишковість рівнянь і внутрішню узгодженість даних.

Якщо спостережною величиною є частота інтерференції, а не самі затримки сигналу, то виникає дещо інша ситуація. При диференціюванні рівняння (4.2) можна отримати

$$\Delta t = \Omega K_1 \cos(\Omega t + \varphi) + \Delta c_1. \quad (4.4)$$

Як і у випадку, коли спостерігалися затримки сигналу, тут є чотири невідомі величини, які треба визначити із спостереження джерела, — два параметри базової лінії ΔU і ΔV , один параметр джерела δ , годинний параметр Δc і лише три незалежних параметри K_1 , Δc_1 , φ . Якщо спостерігається більше одного джерела, то кожне нове джерело додає два невідомих параметри і два незалежних спостережних параметри (K_1 і φ , а параметр Δc_1 є спільним для всіх джерел). Таким чином, неможливо лише за швидкістю інтерференції визначити всі геодезичні й астрономічні параметри. Неможливо також визначити полярну складову базової лінії, до того ж одна з координат базової

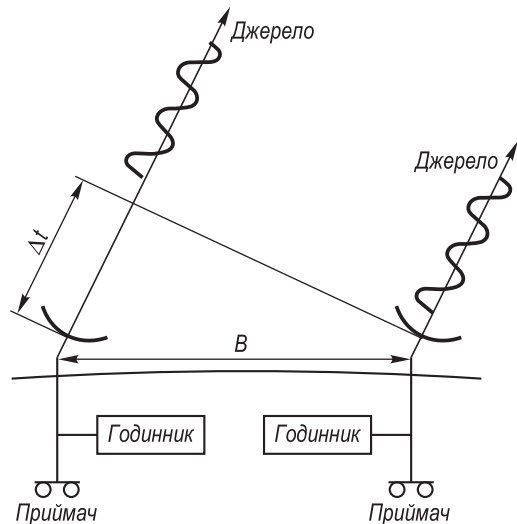


Рис. 4.2. Схема РНДБ

вої лінії або координат джерела мала б визначатися іншим способом.

Взагалі, використання РНДБ для служб точного часу і руху полюса Землі дає змогу отримувати високоточну інформацію, незалежну від погоди, тобто неперервну.

Детальніше з методами РНДБ можна ознайомитись у книжках Г. Мориця, А. Мюллера, 1992; К. Одуана, Б. Гіно, 2002; Ж. Ковалевського, 2004.

Лазерна локація ШСЗ і Місяця використовується для визначення поправок до всесвітнього часу. Методика їх отримання суттєво відрізняється від методики отримання поправок годинника зі спостережень зір або радіоджерел. Адже ШСЗ і Місяць не є нерухомими реперами на небі, наприклад як радіоджерела. Проте порівняння теорії руху Місяця і ШСЗ з лазерними спостереженнями цих тіл дає змогу отримати поправки до всесвітнього часу.

Вимірювання віддалей до супутника здійснюють за допомогою їх локації

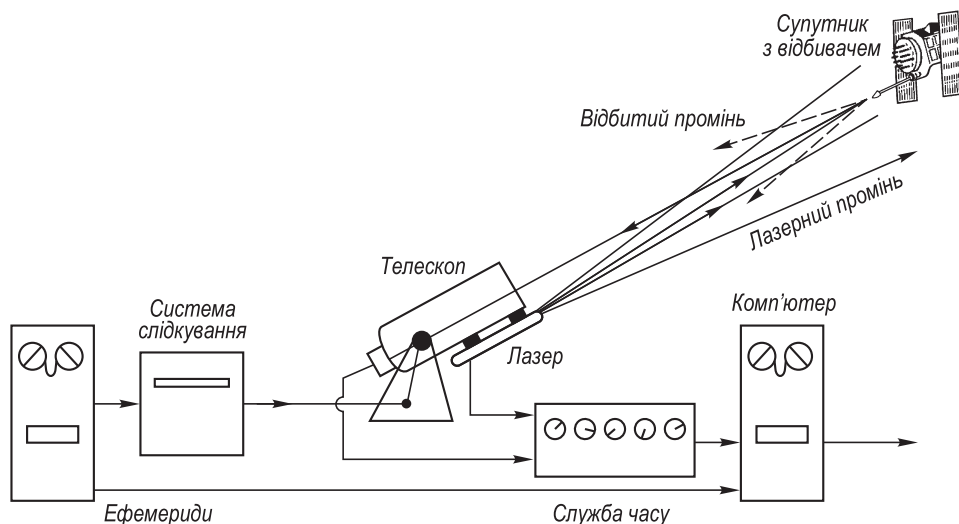


Рис. 4.3. Схема супутникової віддалемірної лазерної системи

електромагнітними хвилями світлового або радіодіапазонів. Фактично вимірюється час розповсюдження хвиль між супутником і приймачем, а шукана відстань ρ обчислюється за формулою

$$\rho = c\tau, \quad (4.5)$$

де c — швидкість світла; $\tau = (1/2)(t_Q - t_E)$, t_E — момент часу, коли світловий імпульс випромінюється наземним віддалеміром; t_Q — момент часу повернення сигналу до віддалеміра.

Схема супутникової лазерної локації показана на рис. 4.3. Лазерний імпульсний передавач і приймач встановлюються і монтується разом із телескопом наведення. Наведення контролюється комп'ютером, який використовує наперед обчислену орбіту. Частина випромінюваного імпульсу використовується для встановлення початку часового інтервалу. Супутник має кутові відбивачі, від яких імпульси передавача відбиваються і реєструються приймачем. Цей відбитий імпульс завершує

часовий інтервал вимірів. За відсутності систематичних похибок час проходження імпульсу через вакуум, помножений на швидкість світла, є подвоєною відстанню між відбивачем і приймачем. Стандартні поправки до спостережуваної віддалі завжди включають поправки на тропосферну рефракцію, калібровку, редукцію до центра мас супутника і, можливо, поправку, яка враховує переміщення відбивача і приймача за час проходження імпульсу.

Про сучасні системи лазерної локації ШСЗ і Місяця розповідається, зокрема, в книжках Г. Моріца, А. Мюллера, 1992; К. Одуана, Б. Гіно, 2002; Ж. Ковалевського, 2004.

Глобальна позиційна система (GPS) призначена для визначення положення точки на поверхні Землі методом вимірювання псевдовідстаней, що визначаються шляхом реєстрації радіосигналу, який передається супутником. Псевдовідстань може бути отримана або множенням швидкості розповсюдження

(кодованого) сигналу на вимірний проміжок часу, потрібний для подолання шляху від супутника до приймача, або шляхом вимірювання фази сигналу.

Розглянемо метод вимірювання, який застосовується в GPS, без врахування впливу зовнішнього середовища і без конкретизації способу формування вимірювального сигналу.

Введемо позначення t^S, t_R — показання годинника на супутнику відповідно в момент випромінювання ним сигналу і показання годинника приймача в момент прийому цього сигналу. Далі позначимо δ^S, δ_R — поправки годинників, які потрібно додавати до показань цих приладів, щоб отримати час за обраною еталонною шкалою (її називають системною шкалою GPS). З урахуванням цих позначень формулу (4.5) можна записати так:

$$\begin{aligned} \rho &= c[(t_R + \delta_R) - (t^S + \delta^S)] = \\ &= c(t_R - t^S) + c(\delta_R - \delta^S) = R + c\Delta\delta, \end{aligned} \quad (4.6)$$

де R — вимірювана відстань між приймачем і супутником, яка називається псевдовідстанню. Вона відрізняється від дійсної геометричної віддалі ρ на величину $c\Delta\delta$, зумовлену неврахуванням впливом поправок годинника супутника і приймача, що на момент вимірювання невідомі. Втім, для виконання навігаційних і геодезичних робіт у реальному часі Служба керування GPS веде вимірювання і прогноз поправок годин кожного супутника і ці дані, а також прогнозовані параметри орбіт супутників, передає для споживачів разом із вимірювальними сигналами. Залишається визначити поправку годинника приймача.

Основне рівняння для розв'язання навігаційної задачі за допомогою GPS:

$$\begin{aligned} R_i = \rho_i - c\Delta\delta_1 &= [(X_i^S - X_0)^2 + (Y_i^S - Y_0)^2 + \\ &+ (Z_i^S - Z_0)^2]^{1/2} - c(\delta_R - \delta^S). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Тут чотири невідомих: координати пункту X_0, Y_0, Z_0 і поправка годинника приймача δ_R . Для їх визначення потрібно скласти і розв'язати систему з чотирьох таких рівнянь ($i = 1, 2, 3, 4$), тобто використати спостереження мінімум чотирьох супутників.

В основному GPS-спостереження використовують у задачах із навігації (як військової, так і цивільної), у геодезії, яка займається проблемами моніторингу глобальних змін у часі. Іншим важливим застосуванням GPS є синхронізація точного часу. Досяжна точність передавання міток часу за допомогою GPS — декілька сотень наносекунд, проте рівень в одну наносекунду вважається досяжним.

Широко використовується метод GPS для синхронізації атомних годинників у Секції часу Міжнародного бюро мір і ваг при обчисленні Міжнародного атомного часу ТАІ (Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз, 1995; К. Одуан, Б. Гіно, 2002, а також доповнення М. Кауфмана до книги К. Одуан, Б. Гіно).

4.2.2. СУЧАСНИЙ СКЛАД МІЖНАРОДНОЇ СЛУЖБИ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ

Центральне бюро (Central Bureau). В 1988–2000 рр. перебувало в Парижі (Франція), з 2001 р. — у Франкфурті-на-Майні (Німеччина), Федеральне управління з картографії і геодезії (ВКГ).

Центри спостереження (Technique Centres), які включають станом на 2008 рік такі служби: Міжнародну GPS-

службу (International GPS Service-IGS), Міжнародну лазерну службу (International Laser Ranging Service-ILRS), Міжнародну РНДБ-службу (International VLBI Service-IVS), Міжнародну доплерівську службу (International Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite-DORIS Service-IDS).

Центри обробки спостережень (Product Centres), до них належать Центр міжнародної небесної референсної системи координат (ICRS Centre), Центр міжнародної земної референсної системи координат (ITRS Centre), Центр орієнтації Землі (Earth Orientation Centre), Центр Термінової/Прогнозної Служби (Rapid Service/Prediction Centre), Центр глобальних геофізичних течій (Global Geophysical fluids Centre), Центр конвенцій (Convention Centre) та ін.

Публікації МСОЗ:

У 1988–1999 рр. виходили видання: IERS Annual Report, Central Bureau, Observatoire de Paris, France, Bulletin B. З 2000 р.: IERS Annual Report, publ. Central Bureau Bundesamt fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt-am-Main, Germany:

IERS Technical Note; Internet: <http://www.iers.org/iers/publications/reports/>:

Bulletin A (щотижневий) — публікується Національною службою орієнтації Землі США (NEOS);

Bulletin B (щомісячний) <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulletinb/pdf>. У бюлетені публікуються:

1) добові згладжені значення x , y , $UT1-UTC$, $Dpsi$, $dEps$, dX , dY на $0^h UT$;

2) добові значення $UT1R-TAI$, LOD , $LODR$, $OMEGA$ на $0^h UT$;

3) інформація про шкали часу $TAI-UTC$;

4) інформація про точність індивідуальних серій, за якими визначаються параметри обертання Землі: VLBI, GPS, SLR.

4.3. СЕКЦІЯ ЧАСУ МІЖНАРОДНОГО БЮРО МІР І ВАГ

Секція часу Міжнародного бюро мір і ваг (МБМВ) — Section du temps du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) — формує шкалу Міжнародного атомного часу (TAI) і шкалу Всесвітнього координованого часу (UTC) шляхом комбінації показань окремих атомних годинників різних лабораторій світу. За певним алгоритмом обчислюється шкала «вільного атомного часу» EAL (Echelle atomique libre), яка є середньоваговою шкалою показань окремих шкал $AT(k)$. Процедуру визначення ваг вибирають таким чином, щоб EAL була стабільною на великих інтервалах часу.

У формуванні TAI і UTC у 2008 р. брали участь 65 лабораторій світу. Загальна кількість застосованих атомних годинників 300. Інформація від локальних лабораторій регулярно передається до МБМВ на 0 год UTC відповідної Модифікованої юліанської дати (MJD) через кожні 5 днів. Дані обробляються за алгоритмом EAL. Точність TAI в межах $2 \cdot 10^{-15}$.

Для синхронізації атомних годинників різних лабораторій мережі МБМВ використовують GPS- і ГЛОНАСС-супутники, а також метод TWSTFT (Two-waysatellite time and frequency transfer).

Точність синхронізації становить 2 нс для відстаней до 1000 км, 6 нс — понад 1000 км.

Шкали TAI і UTC стають доступними для користувачів як різниці цих шкал зі шкалами національних лабораторій « k ». Ці різниці $UTC - UTC(k)$ і $TAI - AT(k)$ обчислюються на кожний 10-денний інтервал Модифікованої юліанської дати (MJD), що закінчується на цифру 9, та на 0 годин UTC і пуб-

лікуються у виданнях МБМВ з 1 січня 1988 р. в Бюлетені Т та Щорічному звіті (Annual Report of BIPM Time Section).

У Бюлетені Т публікуються UTC – UTC(*k*), TAI – TAI(*k*), різниці UTC – (GPS-час), UTC – (GLONASS-час) та тривалість одиничного інтервалу шкали TAI.

Щорічний звіт (Annual Report) складається з частин А, В, С, D. У частині А публікуються загальна інформація, опис обчислення для шкали TAI та її точність, відомості про лінії зв'язку передавання сигналів часу та ін.

У частині В подається список лабораторій, які беруть участь у формуванні TAI, а також таблиці з інформацією про зміну частоти в UTC з 1961 р., співвідношення TAI і UTC і про незалежні шкали AT(*k*). Тут є також інформація про первинні стандарти частоти, різниці UTC – UTC(*k*), ваги окремих лабораторій при формуванні TAI, результати вимірювання частот EAL і TAI, середню тривалість одиничного інтервала шкали TAI в секундах CI на рівні моря.

Частина С містить інформацію про передавання сигналів у системі UTC.

Частина D (публікується не кожний рік) подає наукові публікації.

Internet: <http://www.bipm.org>.

4.4. НАЦІОНАЛЬНІ СЛУЖБИ ЧАСУ

4.4.1. НАЦІОНАЛЬНА СЛУЖБА ОРІЄНТАЦІЇ ЗЕМЛІ США (NEOS)

Служба NEOS об'єднує Морську обсерваторію США (USNO) і Геодослідну лабораторію (GL) Національної океанічної та атмосферної адміністрації (NOAA). Мета створення NEOS — координація, аналіз і розповсюдження даних опера-

тивних служб США, які діяли за програмами визначення параметрів орієнтації Землі. Ці програми включають програму Міжнародної радіоінтерферометричної служби (IRL), що базується на спостереженнях радіоінтерферометрів з наддовгою базою РНДБ, якою керує GL, і програму Морської мережі РНДБ (NAVNET).

Оскільки NEOS має у своєму складі Термінову службу IERS, вона збирає, обробляє й аналізує спостереження обсерваторій, що входять до Мережі МСОЗ. Служба NEOS розробляє алгоритми оперативного визначення параметрів орієнтації Землі та їх прогнозу, забезпечує необхідною терміною інформацією усі зацікавлені країни світу.

Публікації NEOS: щотижневий Бюлетень А (IERS Bulletin A), щорічний звіт (NEOS Annual Report).

Національні шкали часу США — ТА (USNO) і UTC (USNO). Головна роль у створенні Національної атомної шкали часу США належить USNO, а функції метрології часу і частоти виконує Національний інститут стандартів і технологій США (NIST), який здійснює збереження і передавання розмірів одиниць часу і частоти. До функцій USNO належать забезпечення точним часом усіх зацікавлених спостерігачів. В USNO створені і використовуються первинні годинники, які мають 15 водневих мазерів (серед них VLG-11 із добовою нестабільністю близько $3 \dots 5 \cdot 10^{-15}$) і 71 цезієвий стандарт частоти (в тому числі HP5071A з атомно-променевою трубкою з нестабільністю $2 \cdot 10^{-14}$).

Точність первинного цезієвого стандарту частоти США із лазерною накачкою NIST-7 становить $(5 \dots 7) \cdot 10^{-15}$.

Найбільшу точність одиниці частоти і атомної секунди $(2.2) \cdot 10^{-15}$ має первинний цезієвий стандарт частоти на «фон-

танному ефекті» з лазерним охолодженням, який було створено у Франції.

Служба USNO контролює засоби передавання сигналів точного часу і еталонних частот Мініборони США, до яких належать 7 радіостанцій СДВ-зв'язку (передавання еталонних частот із похибкою $1 \cdot 10^{-11}$ на відстань до 10 000 км), 7 радіостанцій глобальної мережі радіонавігаційної системи (РНС) СДВ-OMEGA (забезпечення прив'язки шкал часу з похибкою 1–3 мкс і похибкою частоти $1 \cdot 10^{-12}$) і 12 мереж радіостанцій РНС ДВ-LORAN-C (забезпечення прив'язки шкал часу з похибкою 0.1 мкс за фазовими і 2 мкс за імпульсними вимірами і похибкою частоти до $1 \cdot 10^{-12}$).

Годинники головної керівної станції GPS (2 водневих мазери і 12 цезієвих стандартів частоти) синхронізовані з годинниками USNO з похибкою приблизно 10^{-12} через дуплексний канал геостационарного космічного апарата зв'язку і з похибкою близько 5 нс диференціальним методом за сигналами мережі радіонавігаційної системи WAAS.

Служба NIST контролює передавання сигналів часу і еталонних частот через спеціальні радіостанції, через 2 геостационарних метеорологічних космічних апарати, а також через телецентри. Сучасна висока точність передавання сигналів часу і частоти в США забезпечується використанням GPS.

4.4.2. ДЕРЖАВНА СИСТЕМА ЄДИНОГО ЧАСУ І ЕТАЛОННИХ ЧАСТОТ (ДСЄЧЕЧ) РОСІЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ

Національними шкалами часу Російської Федерації є TA(SU) і UTC(SU).

Система ДСЄЧЕЧ призначена для забезпечення сигналами точного часу

і еталонними частотами комплексів оборонного, народно-господарського і наукового призначення, а також частотно-часового метрологічного забезпечення збройних сил і народного господарства.

До складу ДСЄЧЕЧ входять: еталонна база, засоби передавання сигналів часу і частоти, засоби контролю й управління, що включає автоматизований центр керування системою.

Державна служба частоти і часу відповідає за відтворення, збереження і передавання одиниць часу і частоти. Для цього застосовуються Державний первинний еталон одиниць часу і частоти (цезієвий репер) і 10 водневих стандартів частоти. Рівень відтворення одиниці часу і частоти $5 \cdot 10^{-14}$, а збереження атомної шкали TA(SU) і UTC(SU) здійснюється з нестабільністю приблизно $(2 \dots 5) \cdot 10^{-15}$. Вторинні еталони мають похибку відтворення одиниць часу і частоти на рівні $(2 \dots 5) \cdot 10^{-14}$. Синхронізація шкал здійснюється за допомогою системи ГЛОНАСС з похибкою до 20 нс.

Інститут метрології часу і простору Російської Федерації обчислює параметри обертання Землі (ПОЗ) — всесвітній час UT1(SU) і координати полюса $x(SU)$, $y(SU)$ на основі результатів астрооптичних, супутникових і радіоінтерферометричних спостережень. Результати цих обчислень публікуються в щоквартальних Бюлетенях Е «Всемирное время и координаты полюса» і в щотижневих Бюлетенях А. В цих Бюлетенях наводяться також порівняння значень ПОЗ, отриманих різними методами, а також з даними Міжнародної служби обертання Землі.

Різниця шкал UTC – TA(SU) =
= –30.172 76 с (з 1 січня 2006 р.) =
= –31.172 76 с (з 1 січня 2009 р.).

4.4.3. НАЦІОНАЛЬНІ АТОМНІ ШКАЛИ УКРАЇНИ ТА(UA) І UTC(UA)

Первинний еталон одиниць часу і частот було створено у 1997 р. у ДНВО «Метрологія» (Харків). Еталон є складним науково-технічним комплексом, що складається з груп таких засобів вимірювання:

апаратури відтворення та зберігання одиниць часу і частоти, яка включає водневі стандарти частоти і часу типів Ч1-80, Ч1-76 та Ч1-70М, що входять до групової міри зі змінним складом;

апаратури зберігання шкали часу і еталонних частот — системи формування робочої шкали часу і формування еталонних частот, а також апаратури підсилення і розмноження еталонних сигналів частоти і часу;

апаратури внутрішніх звірень, вона включає блоки фазових компараторів, частотні компаратори, автоматизовану вимірювальну систему, систему порівняння частот, вимірювач частотних характеристик сигналів;

апаратури зовнішніх порівнянь, до її складу входить апаратура звірень еталонів за допомогою сигналів супутникових радіонавігаційних систем ГЛОНАСС та GPS, спеціалізована апаратура порівнянь еталонів за радіометеорними каналами, апаратура порівнянь еталонів за каналами телебачення;

апаратури забезпечення еталона, яка має систему резервного електроживлення апаратури еталона і систему кондиціонування та термостатування робочих приміщень;

системи автоматизованого контролю параметрів зовнішнього середовища (температури, вологості та атмосферного тиску) в робочих приміщеннях.

Найважливішою складовою частиною еталона є апаратура відтворення та зберігання одиниць часу і частоти — група міра, яка включає до 9 водневих стандартів частоти і часу, з яких до складу основної групи входить як мінімум 3 стандарти з найкращими характеристиками.

Нестабільність частоти водневих стандартів для інтервалів часу вимірювань від 1 до 10^4 с визначалась за даними взаємних порівнянь двох або більшої кількості стандартів однакового типу. Для інтервалу вимірювання 1 доба, який є основним для еталонів часу і частоти, нестабільність частоти водневих стандартів оцінювалась за даними щодобової різниці частот кожного стандарту окремо відносно середньої частоти групи стандартів (за даними внутрішніх порівнянь).

Для порівняння шкали UTC(UA) зі шкалами UTC(SU) і UTC (МБМВ) використовуються сигнали супутникових радіонавігаційних систем ГЛОНАСС і GPS, а також метод радіометеорного порівняння шкал часу. Як свідчать результати порівняння шкал UTC(UA) і UTC(МБМВ), з використанням сигналів GPS упродовж 2000 р. середнє квадратичне відхилення на місячному інтервалі спостережень становить ± 8 нс (Величко, Макаренко, Камінський та ін., 1997).

5. ГОДИННИКОВИЙ ЛІТОПИС (ВІДТВОРЕННЯ І ЗБЕРЕЖЕННЯ ЧАСУ)

*Лениво время, как песок текло,
Но вот его пленили наши предки,
Нашли в нем лад, и меру, и число,
С тех пор оно живет в часах как
в клетке.*

С. Маршак

Ще в давні часи з'явилася потреба у вимірюванні, відтворенні та збереженні часу. Вже тоді будували грандіозні споруди — орієнтири, за якими можна робити висновки про послідовність змін пір року.

До астрономічних обсерваторій кам'яного віку належать менгіри та кромлехи.

Менгіри — це стоячі камені, що використовуються як візири при астрономічних спостереженнях. Найбільший із менгірів знаходиться в Ре-Тегра (район Карнака у французькій Бретані). Він відомий як Великий Менгір (або камінь Феї). Великий Менгір — камінь завдовжки 22,5 м. Він упав і розколовся на чотири уламки. До падіння Великий Менгір здіймався над поверхнею землі на 19 м, його вага була 330 т.

Кромлехи — кола діаметром від 50–60 м, сформовані з менгірів. Теж використовувались як візири.

Однією з мегалітичних споруд є Стоунхендж, побудований на межі кам'яного і бронзового віків, приблизно через тисячу років після спорудження єгипетських пірамід.

Гігантський Стоунхендж — кам'яна загадка в Європі, як назвав цей монумент дослідник У. Тревер. Ця стародавня споруда розташована в Англії. Археологи зійшлися на думці, що цей архітектурний пам'ятник зведений між 3500 і 1100 рр. до н. е.

Стоунхендж є спорудою з 82 п'ятихтонних мегалітів, 30 кам'яних блоків, вагою по 25 т і 5 величезних трилітів — каменів, вага яких досягає 50 т. Складені кам'яні блоки утворюють арки, які служили колись бездоганим покажчиком сторін світу.

Відомий астроном Ф. Хойл, вивчивши геометричні особливості Стоунхенджа, визначив, що творці споруди знали точний орбітальний період Місяця і тривалість сонячного року. За висновками інших дослідників, лунки всередині кола, яке утворюється кам'яними блоками, точно позначали траєкторію Полюса світу 12–30 тис. років тому!

У 1998 р. вчені-астрономи відтворили за допомогою комп'ютера первинний вигляд Стоунхенджа і провели різні дослідження. Їхні висновки виявилися для багатьох шокуючими. З'ясувалося, що цей стародавній моноліт є не тільки сонячним і місячним календарем, як передбачалося раніше, але й точною моделлю сонячної системи в поперечному розрізі. Згідно з цією моделлю, Сонячна система складається не з дев'яти, а з дванадцяти планет, дві з яких знаходяться за орбітою Плутона (останньою з відомих на сьогоднішній день дев'яти планет), а ще одна — між орбітою Марса і Юпітера, де зараз розташовується пояс астероїдів. В принципі, ця модель

підтверджує припущення сучасної астрономічної науки і повністю узгоджується з уявленнями багатьох стародавніх народів, які також вважали, що кількість планет у нашій Сонячній системі дорівнює дванадцяти.

Головна вісь Стоунхенджа, яка спрямована вздовж алеї, показує на точку сходу Сонця в день літнього сонцестояння. Основні і часто повторювані орієнтири Стоунхенджа точно спрямовані на Сонце і Місяць. За цими орієнтирами можна було фіксувати точки сходу і заходу Сонця і Місяця в різних стадіях їх видимого переміщення на небесній сфері (рис. 5.1).

Кам'яні будівлі-гіганти для астрономічних цілей створювали і в Давньому Єгипті та Вавилоні. Відомо, що піраміди були орієнтовані за сторонами світу, а вхідний отвір спрямовано на Полярну зорю. Багатоповерхову Вавилонську вежу також було збудовано для астрономічних спостережень.

Поблизу Каїра знаходиться один із гігантських обелісків, споруджений за 3 000 рр. до н. е. (схожий на нього обеліск «Голка Клеопатри» нині експонується в Лондоні). Один із них був встановлений перед храмом Сонця. Вважають, що коли тінь від обеліска падала проти входу до храму, починалося богослужіння.



Рис. 5.1. Руїни Стоунхенджа

У ті ж часи розвивалася і гномоніка — наука про годинники. (Гномон — покажчик переміщення тіні від Сонця, за довжиною і напрямом якої вимірювався час).

Ясне небо у Вавилоні, Єгипті і Греції створювало сприятливі кліматичні умови для астрономічних спостережень і використання гномонів та інших видів сонячних годинників для вимірювання часу. Проте вони були непридатні в похмуру погоду і, ясна річ, уночі. Тому поряд із сонячними користувались ще і водяними, пісочними та вогневими годинниками. Механічні годинники з'явилися у XIV–XVII ст., а високоточні атомні — у другій половині XX ст.

5.1. СТАРОДАВНІ ГОДИННИКИ

5.1.1. СОНЯЧНІ ГОДИННИКИ

Першими приладами для вимірювання часу були сонячні годинники. На рис. 5.2–5.6 показано різні їх види.

Як уже відзначалося, найпростішим сонячним годинником вважається гномон. Циферблатом таких годинників була рівна горизонтальна площина, на

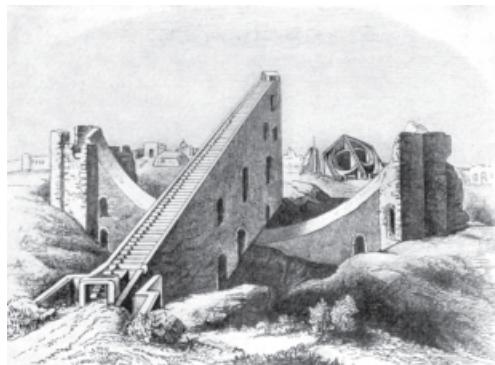


Рис. 5.2. Екваторіальний сонячний годинник Савай-Джай Сінеха (Індія, Делі)

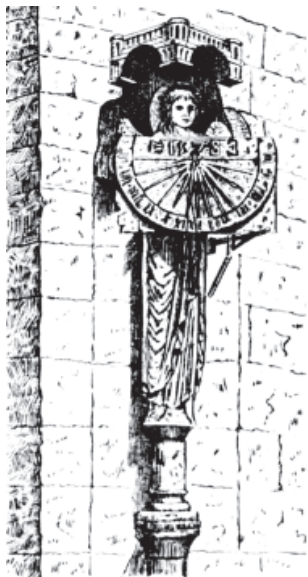


Рис. 5.3. Сонячний годинник на кафедральному соборі в Шаартре (Франція)

якій вертикально закріплювалася жердина (стрижень, пластинка), що відкидала тінь. У північній півкулі вранці тінь від гномона спрямована на захід, опівдні — на північ, а ввечері — на схід.

За положенням тіні і визначали справжній сонячний час. Проте тінь від гномона в таких годинниках упродовж дня описувала не коло, а більш складну криву, яка змінювалася залежно і від місяця року, і від дня до дня. Для позбавлення сонячних годинників цього недоліку їх циферблат стали робити з декількох ліній з поділками, так, щоб кожна відповідала певному місяцю року. Наприклад, давньогрецький астроном Арістарх Самоський (близько 310–230 рр. до н. е.) для своїх сонячних годинників виготовив циферблат у формі чаші з почорненою внутрішньою поверхневою сіткою ліній, а годинники давньогрецького астронома Євдокса (близько 404–355 рр. до н. е.) мали на плоскому цифер-



Рис. 5.4. Сонячний годинник у Страсбурзькому соборі (Франція)

блаті складну сітку ліній, які отримали назву «арахнеа», що означає павук.

Згодом астрономи зрозуміли, що для підвищення точності сонячних годинників їх стрижень треба спрямовувати на полюс світу, тобто до тієї точки небосхилу, яка при обертанні Землі здається нерухомою. Якщо при цьому площину циферблата розташувати паралельно площині небесного екватора, тобто перпендикулярно до стрижня, то кінець його тіні описує коло. Швидкість тіні буде рівномірною і тому на такому циферблаті годинні штрихи розташовані рівномірно, їх положення можна визначити з умови $360^\circ = 24 \text{ год}$. Так було створено екваторіальні сонячні годинники, в яких дошку з циферблатом встановлювали під кутом до горизонту $\alpha = 90^\circ - \varphi$, де φ — географічна широта встановленого годинника. На них поділки штрихів нанесені зверху і знизу на циферблаті, а стрижень пронизує циферблат наскрізь.

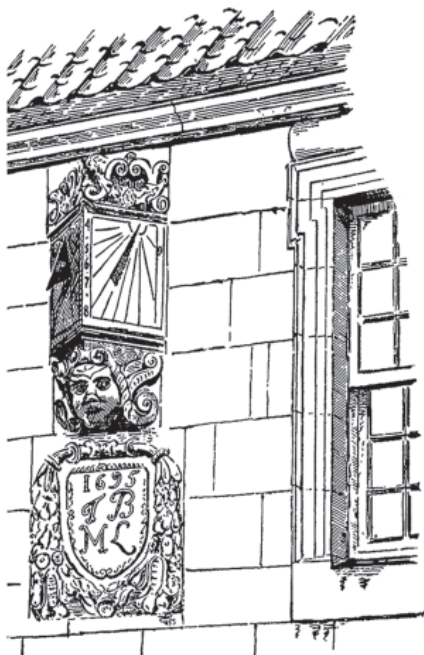


Рис. 5.5. Вертикальний сонячний годинник XVII ст. (Франція)

Рис. 5.6. Сонячний годинник XVIII ст. (Україна, на території Києво-Могилянської академії)

В екваторіальних сонячних годинниках упродовж однієї частини року (у північній півкулі з березня по вересень) тінь від стрижня падає на циферблат зверху, а протягом другої частини — знизу, тому годинники придатні до застосування для усіх днів року. Проте важко відлічувати час у випадку, коли тінь падає знизу. Для усунення цього недоліку сонячні годинники почали робити з горизонтально розташованим циферблатом, на якому наносилися штрихи з розрахунку $\operatorname{tg} x = \operatorname{tg} t \sin \varphi$, де x — кут між полуденною лінією (лінія північ—південь) і лінією від центру циферблата до даного штриха; $t = T_0 - 12$ — годинний кут Сонця; φ — географічна широта місця знаходження годинника.



На горизонтально розташованому циферблаті лінія, що проходить через штрихи, які відповідають 6-й і 18-й годинам, перпендикулярна до полуденної лінії. Показчиком у таких годинниках був трикутник із гострим кутом, величина якого рівна широті даної місцевості φ . Встановлюється трикутник так, щоб його площина була перпендикулярною до площини циферблата і збігалася з напрямом північ—південь. У таких годинниках швидкість переміщення тіні від трикутника нерівномірна, а тому кути на циферблаті, що відповідають годинним проміжкам часу, різні за величиною.

У давнину сонячні годинники були широко розповсюджені. В Єгипті як гномони сонячних годинників викори-

стовували високі обеліски, прочани Індії — посохи з мініатюрними сонячними годинниками. Відомі сонячні годинники, де полудень відмічався дзвоном. Були годинники, в яких за допомогою відповідно встановленого і направленого скла, що могло запалювати, сонячний промінь керував гарматою і змушував її стріляти о певній годині.

Сонячні годинники не вимагали заводу, вони не зупинялися і навіть «йшли» точніше, ніж деякі сучасні годинники, але мали два суттєвих недоліки: вони показували час лише вдень і в безхмарну погоду. Сонячні годинники будували аж до XVII і навіть до XVIII ст.

5.1.2. ПІСОЧНІ ГОДИННИКИ

Пісочними годинниками можна було користуватися в будь-який час доби незалежно від погоди. Їх виготовляли у вигляді двох лійкоподібних скляних посудин, які вставлялися одна в одну. Верхня



Рис. 5.7. Пісочний годинник звичайного типу

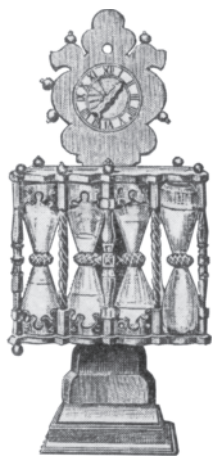


Рис. 5.8. Комплект з чотирьох пісочних годинників із циферблатом

заповнювалася піском до певного рівня. Тривалість висипання піску в нижню посудину і була мірою часу. Такі годинники робили не тільки з двох, але і з більшої кількості посудин (рис. 5.7, 5.8).

Пісочні годинники широко використовувалися на кораблях — це так звані «корабельні склянки», які слугували морякам для встановлення часу зміни вахти та відпочинку. В XIII ст. сипучу масу для пісочних годинників виготовляли з суміші піску і мармурового пилу, яку кип'ятили з вином і лимонним соком по декілька разів. Застосування такої суміші сипучого матеріалу давало змогу підвищити точність визначення часу. Тепер пісочні годинники, в основному, використовують у медичній практиці.

5.1.3. ВОГНЕВІ ГОДИННИКИ

Вогневі годинники не потребують постійного нагляду, тому мали широке розповсюдження.

Один із вогневих годинників, якими користувалися вуглекопи давнього світу, був побудований у вигляді глиняної посудини з такою кількістю олії, якої вистачало на 10 год горіння світильника. Після вигорання олії в посудині рудокоп закінчував свою роботу в шахті.

У Китаї для вогневих годинників із спеціальних сортів дерева, розтертого



Рис. 5.9. Китайський вогневий годинник

на порошок разом із пахощами, готували тісто, з якого робили палички різної форми або довгі спіралі. Такі палички (спіралі) могли горіти місяцями, не потребуючи обслуговування.

Відомі вогневі годинники, які одночасно застосовувались як будильники (рис. 5.9).

Європейський варіант вогневих годинників, якими найчастіше користувалися у монастирях, — це свічки, на котрі наносилися позначки. Згорання свічі між позначками відповідало визначеному проміжку часу.

Точність вогневих годинників, незалежно від їх конструкції, була низь-

кою і багато в чому залежала від навколишнього середовища — доступу свіжого повітря, вітру та інших факторів.

5.1.4. ВОДЯНІ ГОДИННИКИ

Досконалішими від вогневих були водяні годинники, які не потребували систематичного відновлення. Водяні годинники були відомі і широко використовувалися в Давньому Єгипті, Вавилоні, Китаї. У Греції їх називали «клепсидрами» (викрадачами води) (рис. 5.10, 5.11).

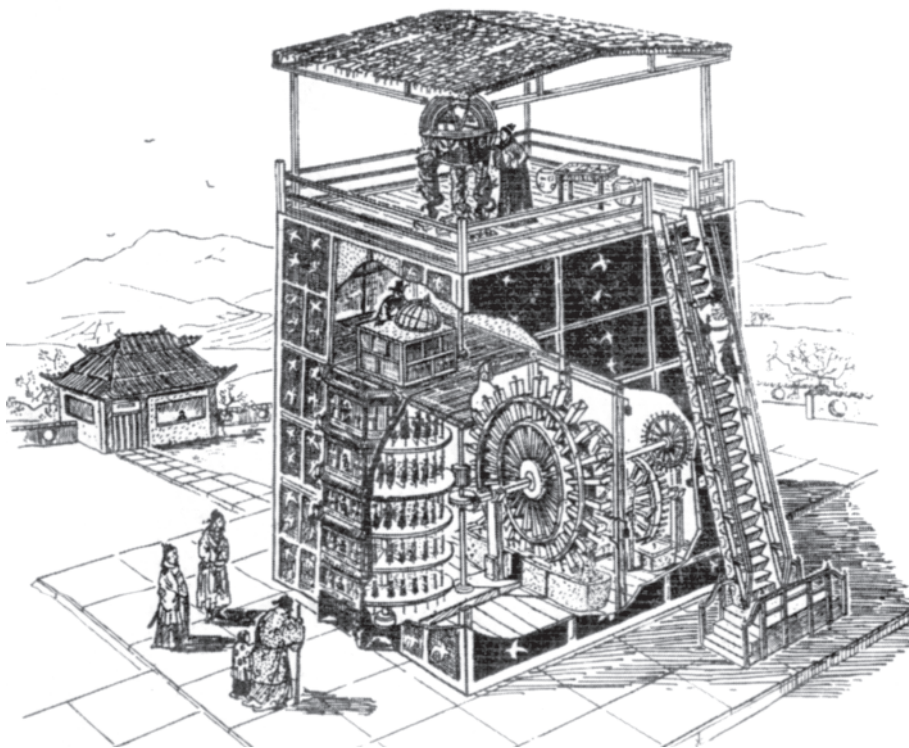


Рис. 5.10. Китайський астрономічний водяний годинник, який діє разом з армілярною сферою і небесним глобусом

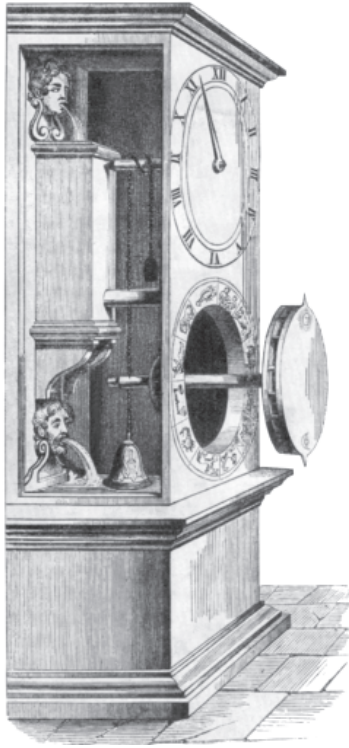


Рис. 5.11. Стародавній водяний годинник (використовувався у Західній Європі до XVIII ст.)

Перші водяні годинники являли собою посудину з отвором, з якої витікала вода за певний час. Згодом створювалися водяні годинники різної конструкції і визначення часу за такими годинниками проводили відповідно до швидкості перетікання води з однієї посудини в іншу. Посудини мали позначки, які використовувалися для відліку проміжків часу.

Клепсидри використовували не лише у побуті (особливо вночі), але і для регламентації часу виступу ораторів на громадських зібраннях і в судах та в інших випадках. Звідси пішли відомі вислови «багато води витекло», «багато води у промові доповідача» тощо.

5.2. МЕХАНІЧНІ ГОДИННИКИ

Підсумовуючи вищенаведене, відзначимо, що точність визначення часу за сонячними, пісочними, вогневими та водяними годинниками не перевищувала декількох хвилин і навіть десятків хвилин за добу, проте ця точність була достатньою для потреб того часу.

Винахід механічних годинників — це результат роботи багатьох майстрів. Важко встановити, хто саме був першим конструктором механічних годинників, і коли, і де це точно відбулося. Деякі автори пишуть, що вперше механічні годинники згадуються у візантійських

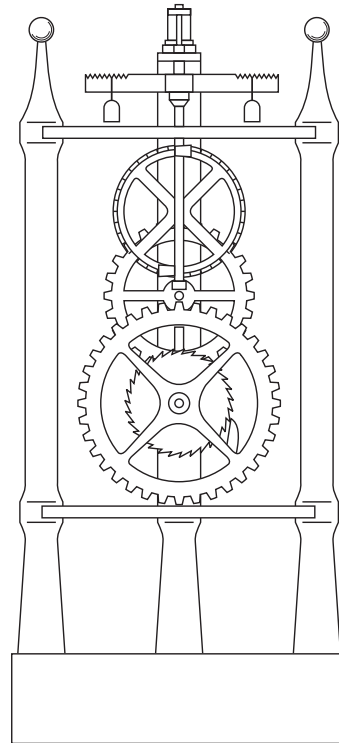


Рис. 5.12. Ходовий механізм паризького баштового годинника де Віка, 1370 р.

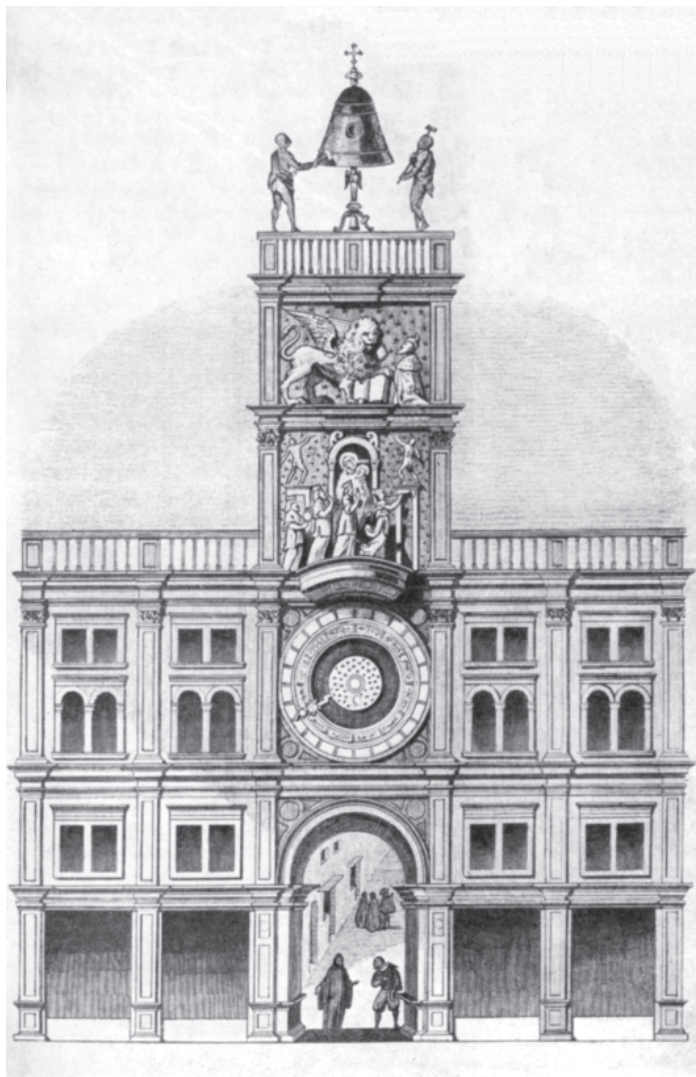


Рис. 5.13. Баштовий годинник на площі св. Марка у Венеції

джерелах кінця VI ст., інші приписують їх винахід Пацифікусу із Верони (IX ст.) або папі Сільвестру II (X ст.), який нібито зробив баштовий годинник із гилями для м. Магдебург.

Впродовж віків механічні годинники удосконалювалися.

Зразки механічних годинників показано на рис. 5.12, 5.13.

Найдавніша згадка про механічний годинник із гишовим приводом датується 1283 р. Цей годинник було встановлено у Данстейблському монастирі (графство Бедфордшип в Англії). Не

дивно, що провідну роль у зародженні та розвитку годинникової технології відіграла Римська католицька церква. Для суворого дотримання молитовного графіка, як того вимагали монастирські правила, принципово необхідним був надійний засіб вимірювання часу. Збільшення кількості торговців у містах Європи другої половини XIII ст. також підвищило попит на вдосконалені годинники. До 1300 р. французькі та італійські ремісники вже виготовляли годинники для церков і кафедральних соборів. Перші такі апарати нагадували громадянам про їх буденні справи, відраховуючи час ударами дзвона. Звідси й походить англійське слово «clock» (годинник), запозичене з латинської мови (Clossa — дзвін).

Революційною деталлю нового годинника була не гиря (опускаючись, вона створювала привідну силу) і не колеса-шестерні для передавання енергії (вони застосовувалися вже щонайменше 1300 років). Переворот спричинив спуск — пристрій, що контролював обертання коліс і передавав енергію, необхідну для підтримання коливань.

Проте лише в 60-х рр. XIV ст. з'явилися годинники, в яких обертання коліщат здійснювалося за допомогою шпінделя — валика, який обертався під дією сили. Такі годинники до XVI ст. мали одну годинну стрілку, а точність їх ходи не перевищувала чверті години на добу. Все ж це були справді механічні годинники, які мали всі вузли сучасних настінних годинників.

Достовірно відомо, що прості за своєю конструкцією механічні баштові годинники були збудовані в Мілані в 1335 р. У 1348–1364 рр. Донді (Італія) створив годинник, який не лише відраховував час, але й відтворював рух Сонця, Місяця і 5 планет. У 1354 р. були встанов-

лені годинники Страсбурзького собору з курантами, календарем і постатями, які рухалися.

Відомо про механічний годинник з регулюванням ходу і з боєм, який було створено теж у XIV ст. майстром Анрі де Віком із Вюртемберга для короля Франції Карла V. Цей годинник встановлено в Парижі на будинку, в якому пізніше знаходився Палац правосуддя.

Ідею застосування маятника як регулятора шпіндельного ходу висловив ще Леонардо да Вінчі (1452–1519) в «Мадридському кодексі I». Помітний крок уперед при створенні механічних годинників зробив Галілео Галілей (1564–1642), який відкрив ізохронність маятника при малих коливаннях, тобто незалежність періоду коливання маятника від амплітуди. Це стало основою запропонованої ним конструкції маятникових годинників, в яких коливання маятника та їх рахунок проводилися автоматично.

Винахідником сучасних маятникових годинників вважають фізика Х. Гюйгенса (1629–1695), який запропонував їх у 1657 р. і вдосконалив у 1673–1675 рр. Х. Гюйгенс застосував замість шпіндельної конструкції баланс, що дало можливість суттєво підвищити точність ходу годинника. Х. Гюйгенс зауважив, що маятник, рухаючись по дузі кола, здійснює малі коливання швидше, ніж великі. Тому будь-яка зміна розмаху маятника призведе до відставання або прискорення ходу годинника.

Розуміючи, що підтримувати сталу амплітуду (розмах) коливань маятника неможливо, Х. Гюйгенс розробив таку підвіску маятника, яка змушувала гирю рухатися по циклоїдній дузі замість кола. Це робило періоди коливань маятника однаковоими і незалеж-

ними від його амплітуди. Годинники з маятниками були приблизно у 100 разів точнішими від своїх попередників, а їхнє типове відхилення зменшилося з 15 хв на день до хвилини на тиждень. Новина про винахід швидко поширювалася, тож до 1600 р. англійські і французькі майстри вже розробляли власні версії нового годинника.

5.3. РІВНОМІРНІ ГОДИНИ. ЧОМУ ЇХ 24, А НЕ 100?

Перш за все механічні годинники треба було відрегулювати так, щоб вони показували відлік однакових відрізків часу. За умови використання рівномірних годин неодмінно постає питання: звідки починати відлік? На початку XIV ст. виникає кілька систем поділу доби на 24 год, які відрізнялися одна від одної моментами початку відліку.

Відлік італійських годин починався із заходом Сонця, вавилонських — на світанку, астрономічних — опівдні. А відлік громадянських годин у Франції, Англії, Німеччині — опівночі. Врешті-решт була прийнята система, що розмежовувала добу на два періоди по дванадцять годин, яка існує й сьогодні.

Вже у 80-х рр. XVI ст. у годинниківів замовляли прилади, які показували б як хвилини, так і секунди, але точності тодішніх механізмів не вистачало для нанесення поділок на циферблати. Така ситуація тривала аж до 60-х років наступного сторіччя, коли з'явилися годинники з маятником.

Поява хвилин і секунд пов'язана з поділом градуса на шістдесят частин, який запровадили ще вавилонські астрономи. Слово «minute» (хвилина) походить від латинського «prima minuta»

(перша мала поділлка), а «секунда» — від «secunda minuta» (друга мала поділлка).

Ділення доби на 24 год, а годин і хвилин — на 60 частин настільки глибоко вкоренилося у західній культурі, що всі намагання змінити його були марними. Найпомітнішою такою спробою було запровадження десяткової системи мір революційним урядом Франції у 90-х рр. XVIII ст. Метр, літр та інші основні десяткові одиниці громадськість сприйняла, проте поділ доби на 10 год, кожна з яких складалася зі 100 хв по 100 с, проіснував лише 16 місяців.

Із підвищенням точності годинникових механізмів наприкінці XVII ст. в кишенькових годинниках були встановлені хвилинні стрілки, а приблизно з 1760 р. в годинниках почали застосовувати секундні стрілки.

5.4. НОВІТНІ МЕХАНІЗМИ

У 1675 р. з'явився другий великий винахід Х. Гюйгенса — спіральна пружина-волосок. Як гравітація керує маховими осциляціями маятника, так ця пружина регулює обертальні осциляції маховика-балансу в переносних годинниках. Баланс — це добре врівноважений диск, який почергово повторює повні оберти в один бік, а потім — в інший.

Спіральна пружина-волосок спричинила революцію на ринку малогабаритних годинників, точність ходу яких коливалася в межах однієї хвилини на день. Таке досягнення майже одразу викликало розширення сфери використання малогабаритних годинників. За новою модою їх тепер носили на ланцюжку не на шії, а в кишені.

З часом Х. Гюйгенс довідався про одне важливе англійське відкриття. Анкерний спуск, на відміну від використаного ним шпindelного спуску, давав змогу маятникові рухатися по настільки малій дузі, що підтримання циклоїдної траєкторії стало непотрібним. Більше того, цей спуск уможливив використання довгого секундного маятника, що зумовило розробку нового дизайну корпусів. Загальновідомий з 1876 р. годинник у видовженому футлярі став одним із найпопулярніших елементів англійського стилю. Точність годинників у видовжених корпусах з анкерним спуском і довгими маятниками досягла однієї секунди за добу.

Згодом знаменитий англійський годинникар Т. Томпсон і його послідовник Дж. Греєм модифікували анкерний спуск так, що він працював без відходу. Цей удосконалений механізм став стандартом у точному вимірюванні часу на наступні 150 років (Пипуныров В. Н., 1982).

5.5. ХРОНОМЕТРИ ТА ПРОБЛЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОТИ МІСЦЯ

Історія винаходу хронометрів тісно пов'язана з мореплаванням та з проблемою визначення довготи місця. Уявлення про географічну довготу пунктів на земній поверхні разом з поняттям про географічну широту увійшло в астрономію ще в глибоку давнину. Проте якщо широту обчислювали за астрономічними спостереженнями відносно просто (її визначати вмів ще Ератосфен близько 240 р. до н. е.), то визначення довготи було складним упродовж багатьох століть. Довготу не вміли визначати з аст-

рономічних спостережень ні в античні часи, ні в середні віки. З цією обставиною пов'язана, зокрема, велика помилка Христофора Колумба.

Нагадаємо, що перепливши «море Темряви» і досягнувши у жовтні 1492 р. Багамських островів, Колумб був глибоко переконаним, що перебуває біля берегів Азії. Недарма відкриті землі він назвав Вест-Індією. Ця назва і назва корінних мешканців Америки, яких з тієї ж причини «охрестили» індіями, збереглися до наших днів. Ця омана не полишила Колумба до кінця його життя. Організувавши згодом чотири експедиції до берегів Америки, він був впевнений, що плаває поблизу Азії. Необізнаність великого Колумба була спричинена помилками середньовічних карт і невмінням точно визначати географічну довготу.

Астрономічним методом географічна довгота визначається як різниця місцевого часу даного пункту і місцевого часу початкового меридіана. Найпростіший шлях вирішення цієї проблеми полягає у «транспортуванні часу». Припустимо, що ви перебуваєте на нульовому меридіані. Тут в обсерваторії є можливість поставити годинник точно за місцевим часом нульового меридіана. Потім ви відправляєтеся в далеку подорож, причому ваш годинник продовжує показувати місцевий час нульового меридіана.

Досягнувши пункту призначення, ви виконуете астрономічне визначення місцевого часу. Порівняння результату з показаннями переносного годинника дає значення довготи. Точність визначення залежить від точності годинників і від того, наскільки переносний годинник надійно зберігає час нульового меридіана. Так, якщо ви рухаєтесь уздовж екватора, то помилка в часі усього на 1 хв призведе до неточності визна-

чення місцезнаходження на поверхні Землі майже на 30 км. А якщо через шторм або спеку за довгі місяці плавання годинник чи то відстане, чи то піде вперед на годину, то помилка визначення довготи вже досягне 15° . Це означає, що помилка визначення місцеположення на поверхні Землі буде перевищувати 1500 км.

Отже, для точного визначення довгот потрібні точні годинники — хранителі часу.

Найбільшу зацікавленість до визначення довгот проявило британське адміралтейство. В королівських і урядових колах Англії були призначені великі нагороди за вдале вирішення цієї проблеми, що сильно заохочувало винахідницьку і наукову думку. Розглядалися два способи визначення довготи: один — із застосуванням годинників, інший — за допомогою астрономічних спостережень (це спостереження місячних затемнень, затемнень чотирьох яскравих супутників Юпітера за методом Галілея, метод місячних відстаней, який потребував точних вимірювань розташування Місяця відносно зір).

Астрономічні методи визначення довготи на практиці виявилися складними, трудомісткими і недостатньо точними. До кінця XVIII ст. ця проблема була вирішена, проте не за допомогою методів практичної астрономії, а шляхом створення точних годинників на основі удосконалення балансових годинників зі спіраллю.

Найбільша нагорода була присуджена Дж. Гаррісону, котрий до 1759 р. виготовив чотири морських годинники. Він практично довів можливість за допомогою цих годинників визначити довготу точніше, ніж астрономічними методами. Проте будова морських годинників Гаррісона була досить склад-

ною, а їх виготовлення дуже дорогим, тому вони не були придатні для серійного виробництва.

У Франції П. Леруа створив морські годинники, які були досконалішими, ніж годинники Гаррісона. Усі подальші розробки провадилися на їх основі.

Роль хронометрів при визначенні довгот різко зменшилася після винаходу телеграфа. Потім телеграф замінило радіо. Проблема визначення часу і географічних довгот як одна з найскладніших проблем астрономії XVII–XVIII ст. в наш час перестала існувати.

5.6. НОВА ГОДИННИКОВА ЕРА

Наприкінці XIX ст. З. Ріфлер із Мюнхена розробив абсолютно новий тип регулятора — високоточний годинник, за допомогою якого контролювали хід інших годинників. Регулятори З. Ріфлера, які працювали у частковому вакуумі для мінімізації ефектів барометричного тиску й були обладнані маятником, малочутливим до змін температури, досягали точності десятої частини секунди за добу, і тому їх було встановлено майже в усіх астрономічних обсерваторіях (рис. 5.14).

Наступний великий крок було зроблено через кілька десятиріч, коли англійський інженер-залізничник В. Шорт розробив годинник із вільним маятником, якій надійно зберігав точність одну секунду за рік.

Система Шорта складалася з двох маятникових годинників — головного, який перебував у вакуумному резервуарі, та допоміжного, що мав циферблат. Кожні 30 с допоміжний годинник подавав електромагнітний імпульс головно-

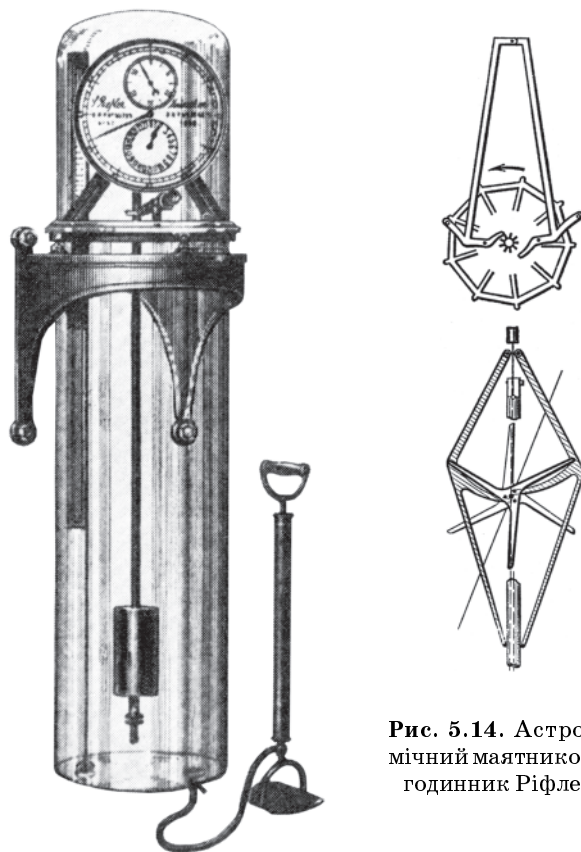


Рис. 5.14. Астрономічний маятниковий годинник Ріфлера

му годинникові, регулюючи свій хід за допомогою маятника головного годинника, вільного від механічних впливів.

5.7. КВАРЦОВІ ГОДИННИКИ

У 1928 р. В. Меррісон відкрив надзвичайно однорідне й надійне джерело частоти, яке зробило таку ж революцію в годинникарстві, як маятник 272 роки перед тим. Розроблений спочатку для використання у радіопередавачах кварцовий кристал, який збуджують елект-

ричним струмом, вібрає з високостабільною частотою. Похибка перших кварцових годинників, встановлених у Королівській обсерваторії у 1939 р., становила лише дві тисячних частини секунди за добу. Коливання кварцу мають за певних умов абсолютну стабільність, яка не залежить від сили земного тяжіння, землетрусів та інших явищ природи.

Для кварцових годинників, які протягом декількох місяців відлічують час з точністю до 10^{-10} с, варіація їх добового ходу стабільна (до декількох мільйонних частин секунди) і вона в тисячу разів мен-

ша, ніж у маятникових. Але кварцова пластинка порівняно швидко «старіє», тому різниця в показаннях двох кварцових годинників може за декілька років досягти 10 с.

Після розробки генераторів високо-стабільних коливань у 1954 р. були створені годинники, в яких застосовуються коливання молекул. Такі годинники називають квантовими або атомними.

5.8. ВИСОКОТОЧНІ ГОДИННИКИ

В основу атомних годинників покладено атомний часовий стандарт (природну резонансну частоту атома), який був значно точнішим за стандарт частоти кварцових кристалів. Результатом експериментів 50-х рр. ХХ ст. у США та Англії було винайдення цезій-променевого атомного годинника. Почалася нова годинникова ера — ера високих технологій вимірювання і зберігання часу.

Далі наведена коротка інформація про атомні стандарти частоти та атомні годинники. Більш повна інформація опублікована у літературі (К. Одуан, Б. Гіно, 2002; Ж. Ковалевський, 2004).

5.8.1. АТОМНІ СТАНДАРТИ ЧАСТОТИ

Атомний стандарт частоти — це кварцовий осцилятор, який контролюється частотою переходу між енергетичними рівнями атома. Серед різних атомних частот, що можуть бути використані для управління кварцовим осцилятором, для визначення секунди у Міжнародній системі одиниць СІ була вибра-

на одна. Вона відповідає переходу між двома надтонкими енергетичними рівнями F_3 і F_4 в атомі цезію. Частота цього переходу $f_0 = 91\,926\,317\,770$ Гц.

Осцилятори, дія яких основана на атомних переходах, генерують частоту, що відповідає визначенню секунди. Серед них багато таких, які виробляються у промислових масштабах. Параметри частоти f_0 знаходяться в межах заданої точності.

Стандарти використовуються і в метрологічних лабораторіях. Їх робота дуже ретельно контролюється з метою врахування зовнішніх впливів на частоту, яка після введення різних поправок має бути дуже близькою до f_0 . При обчисленні поправок припускається, що номінальне значення частоти f_0 було отримане при нульовому магнітному полі, атоми перебували в стані спокою, тобто при нулі градусів Кельвіна, в резонаторі, котрий вносив відомий фазовий зсув тощо. Це первинні атомні стандарти. Вони використовуються для перевірки Міжнародної атомної шкали часу.

Існують три типи цезієвих стандартів частоти.

Стандарти частоти з гарячим пучком атомів цезію. Пучок атомів цезію отримують у пічці при нагріванні декількох грамів ізотопу Cs^{133} до температури від 100 до 170 °С.

Сучасним найкращим первинним стандартом частоти, який працює на цьому принципі, є стандарт Фізико-технічного федерального інституту в Брауншвейзі (Німеччина). Його точність становить $2 \cdot 10^{-14}$, а нестабільність $5 \cdot 10^{-15}$ за добу.

Цезієвий стандарт з оптичним накачуванням. Стандарт включає піч (джерело атомів) і резонатор, схожі на ті, що використовуються в стандартах з маг-

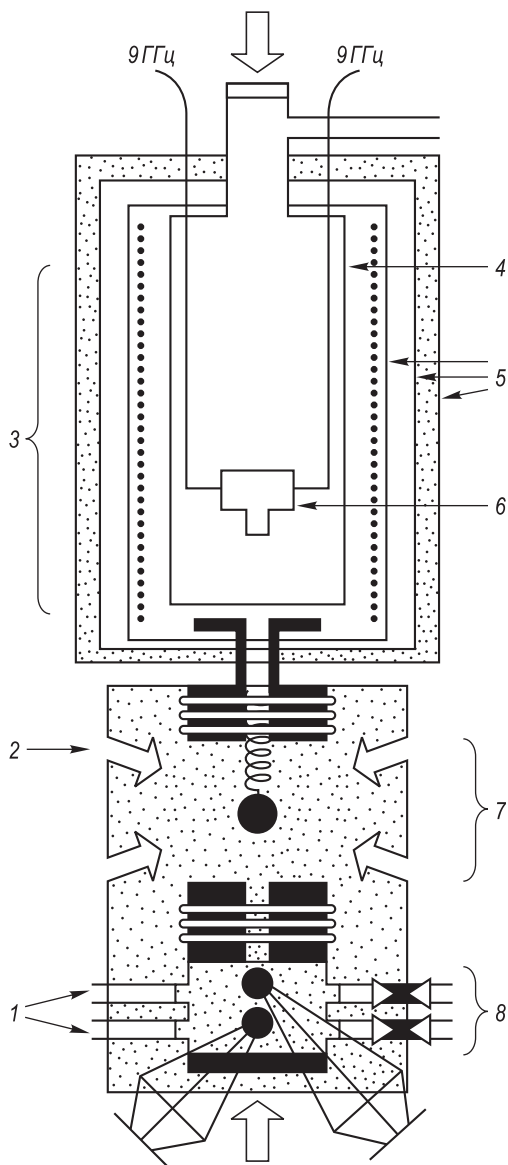


Рис. 5.15. Схема цезієвого стандарту частоти BNM-LPTF у Паризькій обсерваторії: 1 — детектуючі промені; 2 — лазерні променівловлювачі; 3 — область мікрохвильової взаємодії; 4 — вакуумний резервуар; 5 — магнітні екрани; 6 — мікрохвильовий резонатор; 7 — джерело холодних атомів; 8 — детектори

нітним поділом пучка. Різниця полягає в методі поділу атомів за енергетичним станом. Замість магніта перед входом у резонатор цезієвий пучок опромінюється лазерним променем з частотою, яка відповідає переходу $F_4 \rightarrow F_3$.

Найкращими сучасними стандартами частоти з оптичним накачуванням є стандарти Національного інституту науки і техніки США. Порядок їх точності $5 \cdot 10^{-15}$ і така ж нестабільність.

Стандарти з лазерним охолодженням. Основним недоліком згаданих вище двох стандартів є те, що атоми перетинають резонатор з високою швидкістю. Це визначає основну причину, яка обмежує їх точність. Вирішенням проблеми є радикальне зменшення швидкості атомів. Одним із способів їх уповільнення є опромінювання атомів двома зустрічними лазерними пучками, частота яких однакова і наближена до однієї із резонансних частот атома цезію.

Перший прототип стандарту частоти із застосуванням атомів цезію було сконструйовано в Паризькій обсерваторії у 1994 р. (рис. 5.15). На резонатор подавалась частота 9 ГГц (Ковалевський Ж., 2004).

Крім цезієвих створено декілька стандартів на атомах рубідію. Їх перевага полягала в тому, що на частоту переходу менше впливають зовнішні збурення і зсув частоти через зіткнення атомів значно менший, ніж у Cs^{133} .

На жаль, *стандарти на атомах рубідію* не можуть вважатися первинними стандартами, тому що секунда визначається через частоту атомного переходу цезію. Вони мають короткотривалу стабільність, як і цезієві стандарти. Порівняння, проведене в Паризькій обсерваторії, двох цезієвих стандартів і одного рубідієвого стандарту показало, що

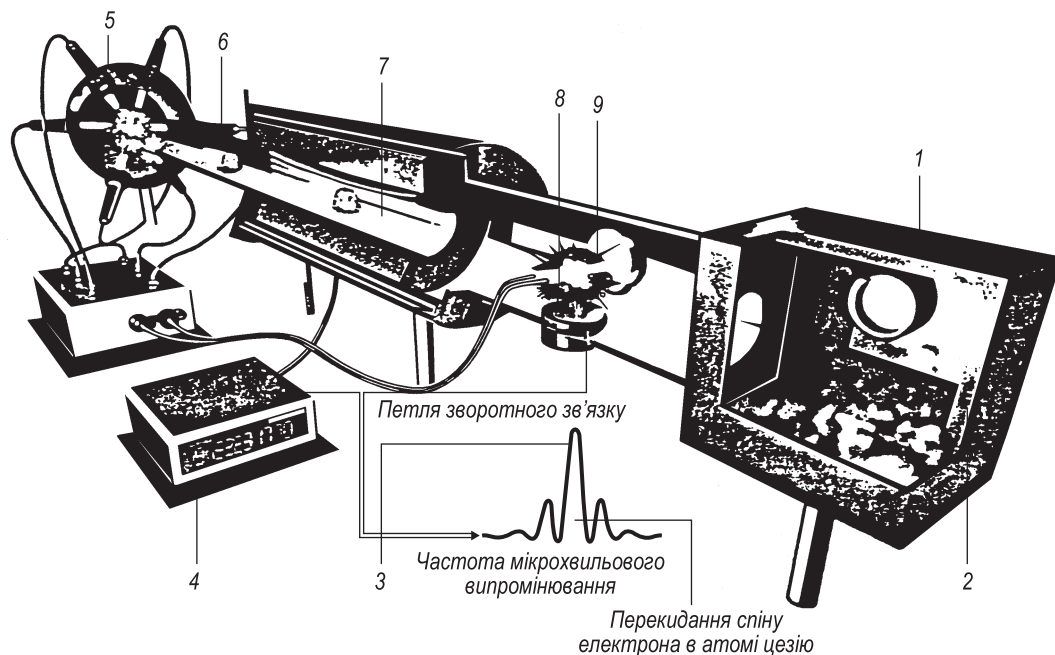


Рис. 5.16. Схема атомного годинника PHARAO, виготовленого у французькому Національному центрі космічних досліджень у співпраці з іншими лабораторіями в рамках проекту ACES (Гіббз В., 2003):

1 — приймач цезію; 2, 6 — атоми цезію; 3 — атоми з бажаним спіновим станом; 4 — мікрохвильовий атом-лічильник; 5 — охолоджувальний лазер; 7 — мікрохвильовий резонатор; 8 — фотодетектор; 9 — зондувальний лазер

між їхніми стабільностями немає суттєвої різниці (її порядок 10^{-15}).

Стандарти з лазерним охолодженням у космосі. Наступним кроком у підвищенні точності стандартів частоти має бути зупинка руху атомів, які є в резонаторі. Це можливо при роботі приладу в космосі в умовах мікрогравітації. Експеримент планується провести на борту Міжнародної космічної станції дослідженням двох цезієвих стандартів. Європейський проект називається «Атомні годинники в космосі» (Atomic Clock Experiment in Space, ACES) і американський «Первинний атомний стандарт в космосі» (Primary Atomic Reference Clock in Space, PARCS).

Їх показання періодично порівнюватимуть між собою і з показаннями годинників, що перебувають на Землі. Очікують, що порядок нестабільності і точності стандартів становитиме $5 \cdot 10^{-17}$ (рис. 5.16).

5.8.2. АТОМНІ ГОДИННИКИ

Усі типи атомних годинників працюють за одним принципом: забезпечують умови граничного розрідження атомів і певна різниця «населеності» надтонких рівнів. Часовий перехід здійснюється в умовах, коли можлива спектроскопія надвисокого розділення. Виконується

ся детектування переходу. Слабке магнітне поле, яке захищене від зовнішнього збурення, настраюється на ту область, де атоми взаємодіють з електромагнітним випромінюванням. Використовуються електронні засоби для забезпечення споживачів практичними сигналами.

Цезієві годинники. Кварцовий осцилятор, керований частотою атомного стандарту, генерує опорний сигнал із частотою 5МГц. Він і є основною складовою атомних годинників. Достатньо додати пристрій для лічби числа періодів опорного сигналу і оцінки його фази, і стандарт частоти стане годинником. Поділивши або помноживши частоту на різні коефіцієнти, можна отримати набір частот або послідовність позначок часу з різним періодом. Після визначення початку відліку часу отримують незалежну систему відліку послідовних подій, яка називається шкалою часу.

Годинники не обов'язково керуються цезієвими стандартами частоти. Важливою властивістю годинників є їх стабільність на різних інтервалах часу. Іншим важливим фактором є їх вартість, яка істотно залежить від характеристики годинників і очікуваного їх використання. Крім цезієвих годинників часто використовуються два інших типи атомних стандартів і годинників, застосування яких ефективне для виконання багатьох завдань.

Рубідієві годинники. Працюють на резонансній частоті ізотопу Rb^{87} 6,834 658 ГГц. Стандарти на рубідії (с. 142) також використовуються як годинники.

Водневі мазери. Резонансна частота цих приладів $f_0 = 1\,420\,405\,752$ Гц. Випромінювання відбувається при переході між двома рівнями енергії E_1 і E_2 , які відповідають різним орієнтаціям спіну електрона в магнітному полі ядра. Довжи-

на хвилі становить 21 см, завдяки їй зроблено багато відкриттів у радіоастрономії.

Мазер (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation — мікрохвильовий прискорювач вимушеного випромінювання) — це генератор сантиметрових радіохвиль. Він працює за таким же принципом, що й лазер.

5.8.3. ПОРІВНЯННЯ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ВИСОКОТОЧНИХ ГОДИННИКІВ

Короткочасна нестабільність (на інтервалах менше декількох секунд) кварцових годинників залежить, в основному, від механічної стабільності кристала кварцу. На часовому інтервалі до одного місяця найстабільнішими годинниками є водневі мазери. Їх головний недолік полягає в тому, що вони не забезпечують споживачів одиницею часу, якщо частота не прокалібрована за цезієвим годинником. Найкращу довготривалу стабільність мають цезієві годинники. Якщо від годинника вимагається висока стабільність на короткому інтервалі часу, то можуть бути використані дешевші рубідієві годинники.

Цезієві та водневі стандарти є основою національних еталонів часу і використовуються для формування національних і Міжнародної шкал атомного часу.

При інтегруванні частоти початок шкали часу не визначено. Тому нуль-пункти різних шкал атомного часу можуть не збігатися. Крім того, різниця нуль-пунктів шкал може змінюватися через випадкові і систематичні похибки (або варіації ходу) атомних стандартів частоти. Саме з випадковими і систематичними варіаціями частоти пов'язані дві найважливіші характеристики атомних годинників: нестабільність і точність.

Нестабільність частоти визначається дисперсією Аллана (Annual Reports of the BIPM Time Section). В ідеальному випадку на виході генератора частоти є синусоїдальний сигнал типу

$$V(t) = V_0 \cos 2\pi\nu_0 t, \quad (5.1)$$

де ν_0 — номінальна частота генератора.

Проте в дійсності сигнал

$$V(t) = V_0 \cos[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)], \quad (5.2)$$

де $\varphi(t)$ — фаза, яка змінюється випадково. Для спрощення не розглядатимуться флуктуації амплітуди сигналу.

Миттєва частота генератора визначається похідною $\nu(t)$ від аргументу $\Phi(t) = [2\pi\nu_0 t + \varphi(t)]$ за виразом (5.2):

$$\begin{aligned} \nu(t) &= (1/2)(d\Phi/dt) = \\ &= \nu_0 + (1/2)(d\varphi/dt). \end{aligned}$$

Відносне відхилення частоти генератора від його номінальної частоти

$$\begin{aligned} y(t) &= [\nu(t) - \nu_0] / \nu_0 = \\ &= 1/[2\pi\nu_0] (d\varphi/dt). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Для атомних стандартів частоти справедливе співвідношення $|\varphi(t)/2\pi\nu_0| \ll 1$, тобто відносна зміна частоти є малою величиною (В. Жаров, 2006).

Оскільки час визначається інтегруванням частоти, то приєднання до генератора лічильника кількості періодів сигналу (5.2) перетворює цей пристрій у годинник. Це означає, що інтеграл

$$x_k(t) = \int_k^{t_k+\tau} t_k y(t') dt'$$

є величиною, на яку відстають або випереджають годинники на інтервалі часу від t_k до $t_k + \tau$ відносно ідеального стандарту, в основі якого лежить генератор сигналу (5.1).

Середнє відносне відхилення частоти генератора на k -му інтервалі, тривалість якого дорівнює τ , визначається виразом

$$y_k = [(x_{k+1} - x_k)] / \tau. \quad (5.4)$$

Тоді дисперсія Аллана

$$\sigma^2 y(\tau) = (1/2) \langle (y_{k+1} - y_k)^2 \rangle, \quad (5.5)$$

де дужки $\langle \rangle$ означають усереднення в нескінчених межах.

Використовуючи рівняння (5.4), можна отримати

$$\begin{aligned} \sigma^2 y(\tau) &= \\ &= (1/2\tau^2) \langle (x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k)^2 \rangle. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Зі збільшенням τ до визначеної величини випадкові флуктуації частоти усереднюються і дисперсія Аллана зменшуються. Проте надалі при збільшенні τ починаються систематичне збільшення шумів, які приводять до збільшення дисперсії Аллана.

Для більш коректного відображення поведінки генератора при малих величинах τ (або для опису короткочасової нестабільності генератора) Аллан запропонував використовувати модифіковану дисперсію. Якщо τ_0 — мінімальний інтервал при інтегруванні частоти, то для обчислення дисперсії при $\tau = n\tau_0$ використовується формула

$$\begin{aligned} \text{Mod} \sigma_y^2(\tau) &= (1/2\tau^2) \times \\ &\times \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_n^{k=1} (x_{k+2n} - 2x_{k+n} + x_k) \right]^2 \right\rangle. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Очевидно, що рівняння (5.7) збігається з (5.6) при $n = 1$.

На рис. 5.17 показана дисперсія Аллана (нестабільність) найбільш поширених стандартів частоти, а також шкали часу ТАІ.

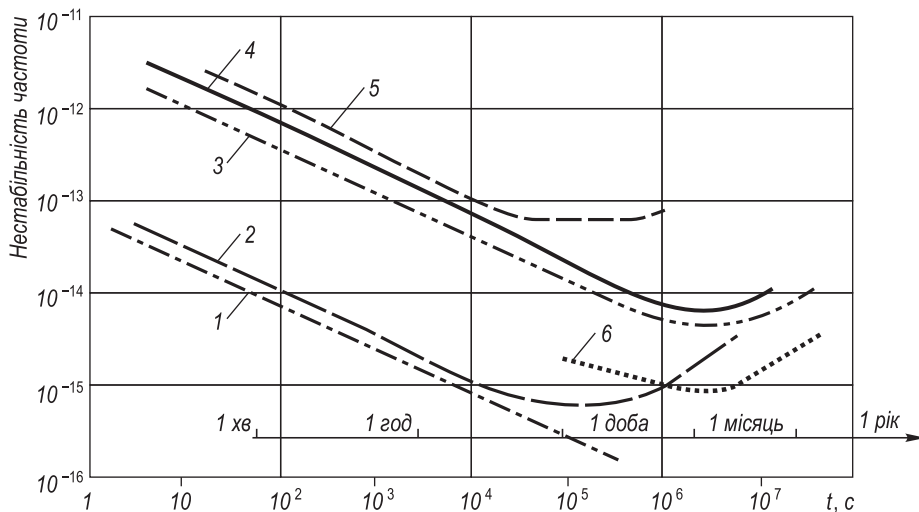


Рис. 5.17. Залежність нестабільності годинників і шкали ТАІ від часу (Ковалевський Ж., 2004):

1 — атомні фонтани; 2 — водневі лазери; 3 — лабораторні цезієві стандарти; 4 — рубідієві годинники; 5 — найдосконаліші промислові цезієві годинники; 6 — шкала ТАІ

Нестабільність кращих цезієвих стандартів дорівнює 10^{-14} при умові усереднення порядку декількох діб. Водневі стандарти мають найкращу короткочасну нестабільність (до 10^{-15}) на інтервали 100–1000 с. Очікується, що нестабільність нового цезієвого годинника на атомному фонтані Паризької обсерваторії може досягати 10^{-16} на інтервали усереднення до декількох діб.

Нестабільність секунди ТАІ на інтервалах часу від одного місяця до одного року дорівнює трохи менше ніж 10^{-14} . На більших інтервалах усереднена нестабільність збільшується до $5 \cdot 10^{-14}$.

Точність. Ідеальний стандарт буде генерувати сталу в часі частоту. Проте якщо частота буде відрізнятися від номінальної (9 192 631 770 Гц), то шкала цього стандарту буде рівномірно розходитися з ТАІ. Різниця між реальною частотою стандарту і номінальною називається його точністю. Точність секунди ТАІ дорівнює приблизно $5 \cdot 10^{-14}$. Це означає, що шкала ТАІ розходиться з ідеальною шкалою часу приблизно на 1 мкс за рік (В. Жаров, 2006).

5.9. ЧИ ОБМЕЖЕНА ТОЧНІСТЬ ГОДИННИКІВ?

Теоретично час можна виміряти з нескінченною точністю. Але сила тяжіння і рух викривляють час, що накладає практичне обмеження на точність годинників.

Завдяки значним технічним досягненням надточна хронометрія упродовж останніх 30 років розвивається небаченими темпами.

Наприклад, похибка годинника на «цезієвому фонтані», який у 1999 р. за-

пустив у дію Національний інститут стандартів і технологій (NIST) в Боулдері (штат Колорадо), становить 10^{-15} с. Проте, за прогнозами, годинники, що використовуватимуться на Міжнародній космічній станції для відліку часу у відкритому космосі, даватимуть похибку, меншу за 10^{-16} с. А поява успішних прототипів нових годинникових конструкцій — приладів, що визначатимуть час за допомогою атомів кальцію та йонів ртуті, — дає підставу очікувати, що точність вимірювання досягне позначки 10^{-18} (1000-кратне зростання менше ніж за 10 років).

Саме такі нові годинники називають оптичними, бо на відміну від уже існуючих, які працюють на мікрохвильових радіочастотах (10^{10} Гц), в оптичних годинниках застосовують природну оптичну частоту $5 \cdot 10^{14}$ Гц. Точність таких годинників досягає 10^{-17} і вище. Оптичні годинники розробляються, наприклад, у Національній фізичній лабораторії Великобританії, Аерокосмічному центрі Німеччини. Планується, що такими годинниками буде оснащена глобальна навігаційна система GALILEO (A. Moundrak, H. Klein, B. Eissfeller, 2008).

Детальний аналіз виявляє істотне обмеження: згідно з теорією Айнштейна, підтвердженою експериментально, час не є абсолютним. Частота будь-якого годинника зменшується зі зростанням сили тяжіння під час швидкого руху відносно спостерігача і навіть тоді, коли випромінюється фотон при переході електрона з одного енергетичного рівня на інший або при переорієнтації його спіну. Встановивши надточний годинник на космічній станції, вчені хочуть випробувати теорію відносності. Але шойно годинники досягнуть точності 10^{-18} (похибка

менша, ніж на півсекунди за час існування Всесвіту), — вже релятивістські ефекти поставлять складні завдання перед вченими. Адже технології, яка б синхронізувала роботу годинників з такою точністю, у всьому світі просто немає.

Міжнародне бюро мір і ваг нещодавно затвердило пропозицію щодо дозволена «вторинних» означень секунди, які встановлюють відповідність частоти атома цезію частоті інших атомів. Якщо Загальна асамблея згаданого Бюро підтримає цю ідею, то визначення секунди буде розширене і стане менш догматичним.

Розробникам годинників буде непросто оминати теорію відносності. Точність годинника в межах 10^{-17} буде відкинута ударом двох релятивістських ефектів. Перший з них — розтягнення часу. Годинники, що рухаються, сповільнюють свій хід.

Інший «руйнівник» точності — сила тяжіння. Чим вона більша, тим повільніший плін часу. Годинники на вершині Евересту поспішають, порівняно з годинниками на рівні моря, на 30 мкс за рік. Курт Гіблл, фізик із Пенсильванського державного університету, вважає, що враховуючи нашу технічну здатність розділяти спектральні лінії за допомогою мікрохвильових годинників та екстраполювати їх на оптичні, ми зможемо досягнути похибки в межах 10^{-22} . Він не береться стверджувати, що зробити це можна найближчим часом. Та й потреби немає, адже ніхто не знає, як із такою точністю синхронізувати два годинники. Яка з цього користь, якщо цей годинник не можна рухати і звіряти з іншим?

Проте ці песимістичні погляди поділяють далеко не всі, і про це мова йти-ме далі.

5.10. ГОДИННИКИ У КОСМОСІ

Про атомні годинники, встановлені на борту ШСЗ, йшлося у розділах про GPS-час і ГЛОНАСС-час. Ці годинники використовуються як у космічній навігації, так і для синхронізації годинників на Землі.

Розглядалася можливість застосування атомних годинників на ШСЗ для перевірки гравімагнітних ефектів і дослідження еволюції елементів орбіт ШСЗ з часом. Теоретично можна також використовувати точні порівняння швидкості плинущу часу на супутнику і на поверхні Землі. Однак нескладні оцінки (Я. С. Яцків та ін., 2005) показують, що це ще не дасть можливості вимірювати гравімагнітні ефекти. В цій же книжці наведено формулу для визначення впливу обертання Землі на швидкість плинущу часу на борту супутника:

$$\Delta T/T = (3GJ/c^4 r)\omega,$$

де G — гравітаційна стала; J — момент імпульсу супутника; c — швидкість світла; r — віддаль супутника від центру Землі; ω — кутова швидкість обертання супутника.

Вплив зменщується зі збільшенням r . Для орбіти супутника біля поверхні Землі (дуже низька орбіта) він стає максимальним, коли $r = R = 6\,371\,110$ м і $\Delta T/T = 3.5 \cdot 10^{-20}$. Це менше, ніж похибка стандарту часу, який передбачають встановити на борту Міжнародної космічної станції (близько 10^{-17}). Таким чином, неможливо виміряти цей ефект без підвищення точності еталона часу на борту ШСЗ.

Мета проектів майбутніх експериментів на борту Міжнародної космічної станції (МКС) — покращення точності зберігання часу, перевірка гравітаційної теорії тощо.

Проект ACES/PHARAO (Atomic Clock Ensemble in Space/ Project d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite) передбачає:

встановлення на МКС годинника PHARAO та дослідження його функціонування у космічних умовах (у конструкції годинника застосовано дуже сповільнений потік охолоджених атомів цезію);

реалізацію на базі PHARAO та водневого мазера шкали часу, яка може бути порівняна з показаннями годинників на поверхні Землі з точністю 10^{-17} , що значно перевищує точність синхронізації, досягнутої за допомогою GPS. Це дасть змогу реалізувати глобальну систему часової синхронізації з надвисокими характеристиками і в перспективі надасть нові можливості для навігаційних та позиційних застосувань;

пошук анізотропної швидкості світла на рівні $2 \cdot 10^{-17}$, який планується здійснити з урахуванням того, що при порівнянні з наземними годинниками мікрохвильові сигнали будуть спрямовуватися у різних напрямках та ін.

Проект PARCS (Primari Atomic Reference Clock in Space) передбачає застосування на МКС цезієвого атомного годинника з лазерним охолодженням в умовах мікрогравітації та системи передавання часу за допомогою супутників GPS.

Мета проекту — покращення точності зберігання часу, перевірка гравітаційної теорії шляхом вимірювання гравітаційного червоного зміщення та ін.

Проект PARCS готує відділ часу і частоти Національного інституту стандартів і технологій в Боулдері (штат Колорадо, США). Проект Головного космічного атомного годинника має звести похибку секунди до $5 \cdot 10^{-17}$.

Європейське космічне агентство розробляє космічний атомний годиннико-

вий ансамбль (ACES), який буде працювати на космічній станції разом з PARCS. Планується, що обидва годинники з точністю до 99,999 97 % вимірюватимуть вплив мікрогравітації на навколоземній орбіті на сповільнення часу та визначатимуть різницю з наземними показаннями.

Дослідження *RACE (Rubidium Atomic Clock Experiment)* — рубідієвий атомний годинниковий експеримент) заплановано провести теж на МКС. У годиннику, на відміну від PHARAO та PARCS, замість цезію застосовують атоми рубідію. Це дає змогу зменшити систематичну похибку, зумовлену зіткненнями атомів.

Мета проекту:

демонстрація нових годинникових засобів з лазерно охолодженими атомами, які дають можливість порівнювати частоту з точністю 10^{-17} ;

значне покращення класичних годинникових перевірок ЗТВ;

передавання точного часу та частоти.

В експерименті цезій у годиннику замінюють іншим лужним елементом. У найдосконаліших цезієвих фонтанах найбільше джерело похибок — холодні зіткнення. При температурі, близькій до абсолютного нуля, починають діяти закони квантової фізики і поведінка атомів стає хвильовою.

Рубідієві годинники мають ще одну перевагу — зручність спостереження за флуктуаціями сталої тонкої структури. Стала визначає силу електромагнітної взаємодії в атомах та молекулах. Вона дорівнює приблизно $1/137$. Це безрозмірна величина, що впливає зі стандартної теорії фундаментальних взаємодій Всесвіту, має дуже важливе значення. На думку В. Гіббза, якщо сильно її змінити, Всесвіт не зможе підтриму-

вати життя у тому вигляді, в якому ми його бачимо (В. Гіббз, 2003).

У стандартній моделі стала тонкої структури не змінюється цілу вічність. Але в деяких альтернативних теоріях (наприклад, у певних теоріях струн) вона може злегка змінюватися і зростати з плином часу. У серпні 2001 р. група астрономів повідомила попередні дані, що за останні шість мільярдів років ця стала тонкої структури могла зрости на одну десятитисячну. Але зв'язувати істину в цьому питанні важко. Порівнюючи показання рубідієвих годинників і хронометрів на основі цезію та інших елементів, учені зможуть зменшити межу можливих флуктуацій у 20 разів.

Важливим аспектом призначення ACES є зв'язок спільноти користувачів. Стабільність і точність сигналів годинників з ACES будуть отримані на Землі для синхронізації годинників у різних наземних станціях. Крім того, використання ACES дає змогу перевірити деякі фундаментальні фізичні величини, статус мікрохвильових годинників і частотно-часових передавачів. Ефективне використання ACES в радіоінтерферометрії з наддовгою базою, глобальній позиційній системі і в навігації при визначенні точних орбіт, в геодезії та гравіметрії.

Важливість застосування ACES в галузі часової і частотної метрології і фізиці холодних атомів була продемонстрована на презентації ESA АО-2004 проектів (оптичні годинники і атомні інтерферометри для космічних застосувань, тощо) (Annual Reports ВІНМ, 1988–2005; П. Бакулин, П. Блинов, 1977; С. Audoin, В. Guinot, 2001; В. Гіббз, 2003; В. Ендрюс, 2003; Ж. Ковалевський, 2004; О. Яцків та ін., 2005; В. Жаров, 2006).

6. АСПЕКТИ ЗМІН ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ

Наука не вивчає час, але вивчає прояв природних процесів у часі, який від явищ абсолютно не залежить.

А. Пуанкаре

6.1. ГЕОФІЗИЧНІ АСПЕКТИ

Характеристики швидкості обертання Землі. Нагадаємо, що обертання Землі навколо своєї осі дає змогу вимірювати час природним способом і визначати шкалу всесвітнього часу. Обертання Землі характеризується вектором миттєвої кутової швидкості, який розкладається на три компоненти: один вздовж середньої осі обертання, два інші — у перпендикулярній площині.

Перший компонент задає миттєву швидкість обертання Землі навколо своєї середньої осі або тривалість доби, а два інших — координати миттєвого полюса Землі. Вектор кутової швидкості обертання Землі не сталий у часі. Зміна його першого компонента проявляється як нерівномірність обертання Землі, а зміна двох інших — як рух полюсів Землі.

Нестабільність обертання Землі змусила вчених відмовитися від визначення стандарту вимірювання часу на основі обертання Землі. Саме про цю нестабільність розповідалося в розділі «Шкала всесвітнього часу UT».

В цьому ж розділі наведено співвідношення між зміною тривалості доби і швидкістю обертання Землі. Та крім небажаних впливів на визначення всесвітнього часу як стандарту нестабільність обертання Землі приховує в собі

цінну інформацію про геофізичні процеси, які відбуваються у геосферах і які залежать від особливостей будови і фізичних властивостей земних надр. Саме тому нестабільність обертання Землі є інтегральною характеристикою природних процесів.

Зміни швидкості обертання Землі можна охарактеризувати безрозмірною величиною

$$\begin{aligned}v &= \delta\omega/\Omega = (\omega - \Omega)/\Omega = \\ &= -(D_e - T)/T = -\delta D_e/T,\end{aligned}$$

де $\omega = 2\pi/D_e$, $\Omega = (2\pi/86400)$ рад/с — кутові швидкості відповідно для земної і стандартної доби; D_e — тривалість земної доби; $T = D_a$ — тривалість стандартної (атомної) доби, яка дорівнює 86400 с. Оскільки величина ω змінюється тільки в дев'ятому-восьмому знаку, то значення v має порядок 10^{-9} – 10^{-8} .

Криві відносних зміни середньорічних швидкостей обертання Землі за останні 350 років наведено на рис. 6.1. Ці криві побудовані за даними робіт D. McCarthy, A. Babcock (1986) — з 1656 р.; F. Stephenson, I. Morrison (1984) — з 1650 р.; D. Brower (1952); Н. Сидоренков, Н. Сиренко (1991); Н. Сидоренков (2000) — з 1820 р. По осі абсцис відкладено роки, по осі ординат — відносні відхилення кутової швидкості Землі v , помножені на 10^{10} .

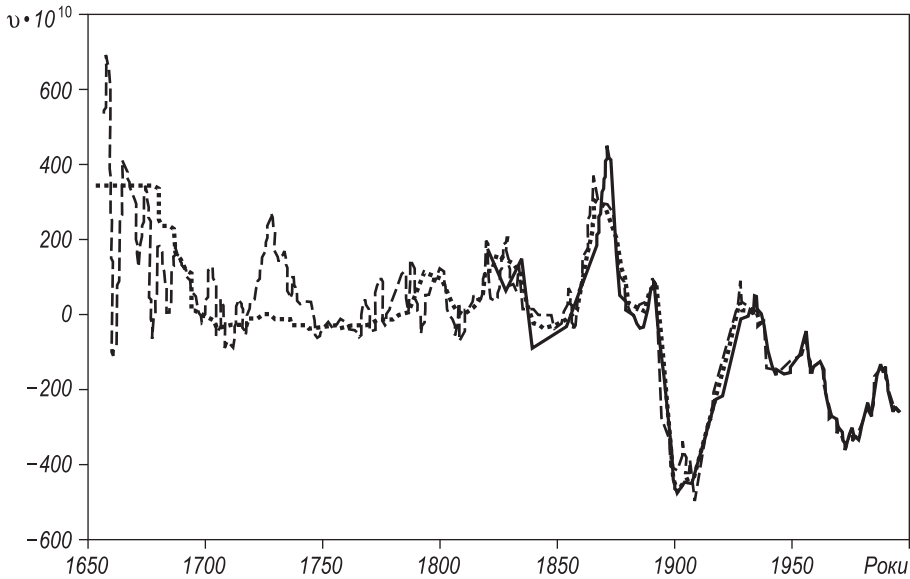


Рис. 6.1. Відносні зміни швидкості обертання Землі

Видно, що з часом завдяки підвищенню точності узгодженість кривих покращується. Швидкість обертання Землі змінювалася суттєво в XVII ст. і після з 1860 р. З 1700 до 1860 р. флуктуації швидкості були значно меншими. Більш помітними є нерегулярні флуктуації кутової швидкості обертання Землі з характерними періодами тривалістю декілька десятків років. Найшвидше Земля оберталася близько 1870 р., коли значення v досягали $+340 \cdot 10^{-10}$, а повільніше — близько 1903 р. (значення v дорівнювали $-479 \cdot 10^{-10}$). З 1903 до 1934 р. спостерігалось прискорення обертання Землі; з кінця 30-х р. до 1972 р. — сповільнення, яке деколи змінювалося короткими періодами невеликих прискорень. З 1973 р. швидкість обертання Землі збільшується (сповільнення, яке відзначалося з 1989 до 1994 р., було звичайною флуктуацією). Рис. 6.1 подано за книгою Сидоренкова, 2004.

Сумніви щодо сталості швидкості обертання Землі виникли після відкриття Е. Галлеєм у 1693 р. вікового прискорення руху Місяця. Думки про вікове сповільнення обертання Землі під дією припливного тертя вперше висловив І. Кант у 1755 р. А в 1875 р. С. Ньюком вперше сформулював припущення про нерегулярність флуктуацій обертання Землі, що викликало великий подив і зацікавленість сучасників. Зокрема, в книжці Манка і Макдональда «Обертання Землі» (рос. переклад 1964) наведено вислів з президентського адресу від лорда Кельвіна 1876 р. такого змісту: «Схвильований припущенням Ньюкома про нерегулярність Землі як хранителя часу, я не міг думати ні про що інше, крім прецесії і нутації, припливів і мусонів, зниження екваторіальних областей і танення полярного льоду». Кельвін щойно повернувся із закордонного відрядження і повинен був виголо-

сити президентський адрес перед Британською асоціацією наук. Він підготував промову про науковий прогрес в Америці, проте весь свій виступ лорд присвятив проблемам обертання Землі. Хоч минули століття з того часу, як питання про нестабільне обертання Землі схвилювало відомого вченого, проте і в наш час інтерес до цієї проблеми не втрачається.

Надійність обчислення характеристик швидкості обертання Землі, які проводилися на основі інструментальних спостережень координат Місяця, Сонця і планет з XVII ст., була невисокою. Крім того, спостереження були епізодичними — іноді перерви тривали десятки років.

З часом точність спостережень зростала і в XIX ст. досягла рівня, коли достовірність характеристик швидкості обертання Землі стала задовільною.

Проте відстежити зміни швидкості обертання Землі, які відбулися декілька тисяч років тому, астрономам допомогли записи про час сонячних і місячних затемнень, зроблені жерцями Давнього Єгипту, Вавилону, Греції, Китаю. Вивчаючи ці давні праці про затемнення, а також використовуючи дані про вікові прискорення Сонця, Меркурія і Венери, астрономи визначили, що за останні 3000 років тривалість доби зростала в середньому на 0.0021 с за століття, що було зумовлено віковим сповільненням швидкості обертання Землі.

Причиною вікового сповільнення швидкості обертання Землі є припливне тертя в системі Земля—Місяць. Вчені визначили, що зміна моменту сил в системі Земля—Місяць внаслідок припливних сил приводить, з одного боку, до уповільнення швидкості обертання Землі, з іншого, — до зменшення середнього руху Місяця і його віддалення від Землі приблизно на 3 см за рік.

На початку XX ст. систематичними астрономічними спостереженнями була також доведена достовірність існування флуктуацій обертання Землі. За останні 100 років відхилення тривалості діб від їх середнього значення досягала $\pm 45 \cdot 10^{-4}$ с.

У тридцять роки XX ст. за допомогою кварцових годинників М. Стойко відкрив *сезонну зміну швидкості обертання Землі*. В 1955 р. почалися роботи зі створення більш рівномірної шкали атомного часу і параметри сезонних коливань почали визначати більш упевнено. З'ясувалося, що існують річні і піврічні коливання тривалості діб з амплітудами відповідно $37 \cdot 10^{-5}$ с і $34 \cdot 10^{-5}$ с. Ці сезонні коливання зумовлені, в основному, перерозподілом моменту імпульсу між Землею й атмосферою.

Багаторічні флуктуації, тобто зміни швидкості обертання Землі з *періодами від 2 до 100 років*, значно перевищують сезонні коливання. Для їх пояснення потрібні надзвичайно великі прирости моменту імпульсу атмосфери або моменту інерції Землі. Тому вважається, що міжрічні флуктуації не можуть спричинятися геофізичними процесами, на земній поверхні. Природу цих коливань вчені пов'язують із процесами взаємодії ядра і мантії Землі.

Короткоперіодичні флуктуації швидкості обертання Землі в інтервалі періодів від декількох днів до двох-трьох років, де є і сезонні, квазідворічні і 55-добові коливання, практично всі зумовлені змінами моменту імпульсу атмосфери (Манк і Макдональд, 1964; Lambeck, 1980; Сидоренков, 1991).

Хоча як маса, так і момент інерції атмосфери майже в мільйон разів менші, ніж Землі в цілому і в сто разів менші, ніж Світового океану, проте її внесок у нестабільність обертання Землі в інтервалі

від декількох діб до декількох років виявився домінуючим. Причина цього парадоксального факту криється у великій рухливості повітряної маси. Якщо швидкість руху речовини мантії Землі дорівнює кільком міліметрам у рік, течії в океані — 10 см/с, то швидкість вітру може перевищувати 100 м/с. Внаслідок сильних вітрів зміни моменту імпульсу атмосфери значно перевищують варіації моменту імпульсу океанів і рідинного ядра. Енергетичні оцінки теж підтверджують достовірність цього висновку.

Справді, нестабільність обертання Землі відповідно до закону збереження моменту імпульсу може бути наслідком руху зворотного знаку в оболонках, які оточують тверду Землю: в атмосфері, гідросфері, кріосфері, рідинному ядрі або в зовнішньому космічному просторі. Зрозуміло, що потужність джерел енергії, що збуджують ці рухи, повинна бути не меншою від потужності нестабільності обертання Землі. Потужність як річної, так і міжрічної нерівномірності обертання Землі

$$dE/dt = C\omega(d\omega/dt) \approx 10^{14} \dots 10^{15} \text{ Вт},$$

де E — кінетична енергія обертання Землі; C — полярний момент інерції; ω — кутова швидкість; $d\omega/dt$ — кутове прискорення, близько $10^{-19} \dots 10^{-20} \text{ с}^{-2}$.

Середня потужність джерел енергії рухів у атмосфері становить приблизно $2 \cdot 10^{15}$ Вт, океанічних течій — близько 10^{14} Вт, геомагнітних бур — 10^{12} Вт, полярних сьайв — 10^{11} Вт, землетрусів — $3 \cdot 10^{11}$ Вт, вулканів — 10^{11} Вт, потоку тепла із надр Землі — 10^{13} Вт, міжпланетного магнітного поля і сонячного вітру, що взаємодіє з магнітосферою, — 10^{12} Вт. Наведені значення свідчать про те, що найімовірніше лише рух повітря в атмосфері і, можливо, течія в океані здатні

спричинити нестабільність обертання Землі. Потужність інших геофізичних процесів мала порівняно з потужністю варіацій обертання Землі (Куликов і Сидоренков, 1977; Сидоренков, 2002).

Треба відзначити, що такі важливі для обертання Землі ефекти, як перенесення вологи зі Світового океану на материк (зокрема, і на льодові щити Антарктиди і Гренландії), перерозподіл повітряних мас на земній кулі були б неможливими за відсутності атмосферних рухів. Враховуючи все сказане і те, що течія у Світовому океані генерується в основному вітрами, можна дійти висновку про першочергову важливість процесів у атмосфері при розгляді природи нестабільності обертання Землі.

Частина змін швидкості обертання Землі, як уже відзначалося вище, зумовлена змінами моменту інерції Землі внаслідок припливних деформацій. Теорія цих коливань була добре розроблена (Е. Woolard, 1959; С. Yoder et al., 1981; J. Wahr et al., 1981). Тому при розгляді питань, пов'язаних з оцінками впливу різних геофізичних процесів на обертання Землі, припливні коливання виключають.

Добові і півдобові атмосферні припливи зумовлюють невеликі зміни у швидкості обертання Землі. Збудження нестабільностей обертання Землі добовими і півдобовими океанічними припливами приблизно на 2 порядки більші, ніж відповідні впливи атмосферних припливів.

Порівняння рядів значень швидкості обертання Землі, які отримані за допомогою сучасних методів, з напівемпіричними моделями океанічних припливів показало, що океани відіграють основну роль у збудженні добових і півдобових варіацій обертання Землі. Проте залишаються ще великі внутрішньо-

добові флуктуації обертання, які не розгадалися досі (Brzezinski et al., 2001).

До 80-х років ХХ ст. оцінки нестабільності обертання Землі ґрунтувалися на астрономічних оптичних спостереженнях. Наприкінці 70-х років почали вводити нові технічні комплекси (радіоінтерферометри з наддовгою базою, системи лазерної локації ШСЗ і Місяця, системи глобального визначення положення місця та ін.) і нові методи моніторингу нестабільності обертання Землі, які дали змогу отримати інформацію з великою точністю, зокрема визначити всесвітній час із точністю 0.000 005 с. Крім того, накопичувався геофізичний матеріал, необхідний для з'ясування природи нестабільності обертання Землі. Наприклад, у 1999 р. у США завершено грандіозний за об'ємом багаторічний проект Національних центрів прогнозів навколишнього середовища (NCER) і атмосферних досліджень (NCAR) перегляду аналізів усіх метеорологічних і аерологічних спостережень від 1948 р. На основі NCER/NCAR повторних аналізів обчислені значення компонентів ефективних функцій моменту імпульсу атмосфери з інтервалом 6 років за 1948–2001 рр.

Ці нові дані розширили можливості для вивчення нестабільності обертання Землі, атмосферних і океанічних процесів, особливо за періоди, менші ніж доба.

Античні і палеонтологічні дослідження зміни швидкості обертання Землі. Крім визначень нерівномірності обертання Землі, що базуються на інструментальних спостереженнях і про які йшла мова, є так звані опосередковані методи. Вони вивчають згадані вище античні затемнення Сонця і Місяця (Newton, 1970; Stephenson, 1997) і швидкість росту викопних коралів (палеонтологічний метод).

В останні роки ХХ ст. набули популярності дослідження палеонтологів, які показали, що корали і раковини деяких морських організмів ростуть не перервно, а добовими шарами. Товщина цих шарів залежить не лише від річного періоду, а й періоду, який дорівнює тривалості синодичного місяця. Підраховуючи число добових шарів за рік або за місяць в організмі, який ріс у певну геологічну епоху, можна дізнатися, скільки діб було у році в ту епоху. Таким методом було визначено, що, наприклад, 380 млн років тому налічувалося у році 400 діб. Тривалість року можна вважати з деяким припущенням незмінною. Тоді добуток числа днів у році на тривалість доби має бути сталим у будь-яку епоху. Тепер ця величина становить

$$(365.2422 \text{ діб} \cdot 86\,400 \text{ с/доб}) = \\ = 31\,556\,926 \text{ с.}$$

При 400 днях у році тривалість доби, очевидно, визначається так:

$$(365 \cdot 86\,400 / 400) = 78\,900 \text{ с} = 21.9 \text{ год.}$$

Якщо доба була такою 380 млн років тому, то середня швидкість росту тривалості доби повинна була б бути

$$[(365/400) - 1](86\,400 \text{ с} / 380 \cdot 10^4 \text{ ст.}) = \\ = 0.002 \text{ с/ст.},$$

тобто така ж, як і за даними давніх затемнень.

Як зазначає М.Сидоренков (2002), у природі дуже рідко спостерігається такий гарний збіг значень при дослідженні періодів різної тривалості. Щоб проілюструвати це, він наводить результати визначення швидкості росту тривалості діб:

за даними про сонячні затемнення, які відбулися до 50 р. до н. е., доба зростала зі швидкістю 0.0023 с/ст.;

затемнення першого тисячоліття нашої ери дають швидкість 0.0019 с/ст.;

за інструментальними спостереженнями Місяця і Сонця, які проводились із XVII ст., швидкість росту тривалості доби дорівнює 0.0016 с/ст.

Ці розходження результатів існують ймовірно не тільки через їх помилки, але найімовірніше через нерегулярний характер зміни швидкості обертання Землі (І. Манк, Г. Макдональд, 1964; Г. Мориц, А. Мюллер, 1992; Н. Сидоренков, 2002).

6.2. КОСМІЧНІ АСПЕКТИ

Зміни тривалості доби та року з плином великих проміжків часу (від століття до мільярдів років) є проблемою при складанні різних календарів. Такі зміни відбуваються також і внаслідок причин, пов'язаних з рухом Землі в космічному просторі.

Ці питання розглядалися багатьма астрономами, зокрема І. А. Климимшиним (2002).

Нагадаємо, що Земля рухається навколо Сонця по еліптичній орбіті відповідно до законів Кеплера практично у площині екліптики. Орбіту Землі описують такими параметрами: велика піввісь a , мала піввісь b і ексцентриситет $e = (a^2 - b^2)^{1/2} / a$ (рис. 6.2).

Лінія АП, що з'єднує афелій і перигелій планети, називається лінією апсид. Якщо орбіта планети — коло, то ексцентриситет $e = 0$. Чим більший ексцентриситет, тим більшою є різниця між най-

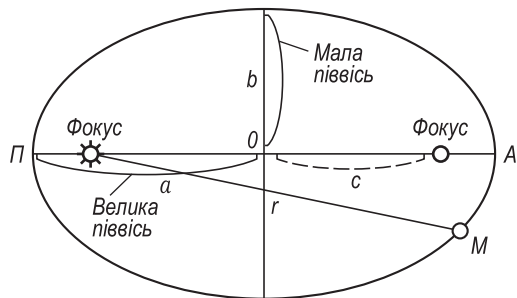


Рис. 6.2. Еліпс як орбіта планети:

Π — перигелій; А — афелій (відповідно найближча і найдальша від Сонця точки орбіти); r — радіус-вектор планети M

меншою (в перигелії) і найбільшою (в афелії) відстанями планети від Сонця.

Середня відстань Землі від Сонця $a = 149.6$ млн км. На початок 2000 р. ексцентриситет земної орбіти $e = 0.016708$. Завдяки цьому Земля в перигелії на 2.5 млн км знаходиться ближче до Сонця, в афелії ж на стільки далі порівняно з її середньою відстанню до Сонця.

Площина орбіти кожної планети певним чином орієнтована в просторі відносно зір, а орієнтація планети змінюється відносно положення екліптики (змінюється кут i , під яким орбіта планети нахилена до екліптики). Внаслідок дослідження всіх цих змін були зроблені, зокрема, такі висновки.

1. Ексцентриситет орбіти Землі e змінюється від $e \approx 0.066$ до $e \approx 0.003$, коливаючись навколо значення 0.028. В наш час e зменшується приблизно на 0.000042 за кожні 100 років. Через 25 000 р. орбіта Землі буде практично коловою, далі ж — через 620 000 років — ексцентриситет $e \approx 0.06$.

2. Підраховано, що приблизно за 70 000 років площина орбіти Землі відхилиться від її положення, яке було, наприклад у 1850 р., на кут $i \approx 4^\circ$. Саме

тому зміщується серед зір положення полюса екліптики — точки перетину з небесною сферою перпендикуляра, проведеного до неї з її центра.

3. З характерним часом близько 41 000 років кут нахилу площини небесного екватора коливається від найбільшого ($\varepsilon \approx 24.5^\circ$) до найменшого ($\varepsilon \approx 22^\circ$) значень. Тому, зокрема, на 2.5° (≈ 278 км) зміщується на поверхні Землі положення тропіків (географічних паралелей, на яких у момент літнього сонцестояння, або, відповідно, зимового, Сонце опівдні досягає зеніту). На початок 2006 р. параметр ε мав значення $23^\circ 26' 21.21''$, він зменшується щорічно на $0.47''$. У 4000 р. до н. е. кут ε досягав значення $24^\circ 13'$. Тому висота Сонця у верхній кульмінації тоді була на $46'$ більшою, ніж у наші дні. Відповідно точка сходу Сонця була тоді на горизонті «лівіше», а точка заходу — «правіше», ніж це фіксує тепер спостерігач у північній півкулі Землі (у її південній півкулі навпаки).

4. Перигелій орбіти Землі зміщується відносно зір у той же бік, у який рухається по орбіті наша планета, а повний оберт відносно зір лінія апсид здійснює за 113 000 тропічних років. Оскільки ж точка весняного рівнодення пересувається по орбіті у зворотний бік, то відносно неї довгота перигелію зростає на $61.8''$ за рік і повний оберт відносно точки Υ лінія апсид завершує за 21 000 років. На початок 2000 року відрахована від точки Υ геліоцентрична довгота перигелію земної орбіти дорівнювала $102^\circ 47'$: перигелій орбіти Землі тепер знаходиться в напрямі на сузір'я Близнят.

У наш час Земля проходить через перигелій своєї орбіти 2–5 січня, а через афелій 1–6 липня. Ця неоднозначність дає зумовлена двома причинами. По-перше, навколо Сонця насправді ру-

хається система Земля—Місяць, і якраз центр її рухається по еліпсу, параметри якого дещо збурюються тяжінням інших планет. По-друге, згаданий рух системи Земля—Місяць насправді відбувається не навколо Сонця, а навколо центра мас усієї Сонячної системи, відносно якого центр Сонця, описуючи складну криву, іноді відхиляється на два радіуси Сонця (тобто центр мас Сонячної системи тоді «висить над поверхнею Сонця» на відстані 700 000 км!).

Наслідком описаної тут орієнтації орбіти Землі у просторі і є неоднакова тривалість пір року. В наші дні у північній півкулі весна (від весняного рівнодення до літнього сонцестояння) налічує 92.8 доби, літо (від літнього сонцестояння до осіннього рівнодення) — 93.6 доби, далі, відповідно, осінь — 89.8 і зима — 89 діб. Таким чином, у північній півкулі весна і літо тривають близько 184.4 доби, а осінь і зима 178.8 доби.

У наш час зсув між датою зимового сонцестояння і проходженням Землі через перигелій дорівнює у середньому 13 діб, тобто 13° дуги. На таку кутову відстань перигелій змістився на $13^\circ / 61.8'' \approx 757$ років. Це означає, що приблизно у 1280 р. Земля проходила через перигелій своєї орбіти в день зимового сонцестояння, а близько 11 000 років тому — в день літнього сонцестояння. Тоді весна і літо в північній півкулі тривали приблизно 179 діб, а осінь і зима — 186 діб.

«Невдале» поєднання тривалості весняно-літнього періоду і значення ексцентриситету земної орбіти створювало в минулому умови, сприятливі для росту льодовиків і похолодання клімату. Саме так було близько 20 000 років тому, коли, як і тепер, перигелій земної орбіти практично збігався з точкою зимового сонцестояння, але ексцентри-

ситет орбіти мав відносно велике значення $e \approx 0.02$.

Отже, всі ці «космічно» зумовлені зміни призводять до змін тривалості тропічного року, а також тривалості доби.

Як уже згадувалося раніше, обертання Землі навколо осі поступово уповільнюється, а тривалість земної доби зростає. Мільярд років тому доба була орієнтовно на 4 год коротшою, ніж тепер, а через 4.5 млрд років Земля здійснюватиме усього 9 обертів навколо своєї осі за рік: кутова швидкість обертання планети навколо осі зменшиться у 40 разів!

Важливим є, звичайно, питання про тривалість року, однак окремо ставлять питання про рік зоряний і рік тропічний. Стосовно першого, обчислення показали, що зоряний рік за 100 років збільшується усього на 0.01 с. Інакше кажучи, його можна вважати незмінним.

Зовсім інша ситуація з роком тропічним. У наш час прецесійний рух осі обертання Землі дещо прискорюється. А тому з кожним наступним роком Сонце повертається в точку весняного рівнодення за все менший, ніж це було, наприклад у 1990 р., проміжок часу. За

кожні 100 років його тривалість зменшується на 0.54 с.

Звичайно, для календарних розрахунків важливим є те, скільки налічується реальних діб, тобто середніх тодішніх сонячних діб. Відомо, що у минулому доба була дещо коротшою. Тому з обчислень випливає, що конкретно в 1 р. н. е. тропічний рік був на 23 с довшим, ніж у 1900 р. Тривалість тропічного року в ефемеридних («зразка 1900 р.») і поточних добах наведена в табл. 6.1 (Климишин, 2002).

6.1. Тривалість тропічного року в ефемеридних і поточних добах

Рік	Тривалість року в добах	
	ефемеридних	поточних
3000 р. до н. е.	365.242 501	365.242 885
1 р. н. е.	365.242 316	365.242 465
1900 р. н. е.	365.242 199	365.242 199
4000 р. н. е.	365.242 069	365.241 905

Урахування сотисячних частин доби необхідне при з'ясуванні питання про точність календаря (зокрема, григоріанського).

СЛОВНИЧОК АСТРОНОМІЧНИХ ТЕРМІНІВ

АЛЬМУКАНТАРАТ — коло однакових висот, мале коле небесної сфери, площина якого паралельна площині горизонту.

АНОМАЛІСТИЧНИЙ МІСЯЦЬ — проміжок часу між двома послідовними проходженнями Місяця через перигей його орбіти.

АНОМАЛІСТИЧНИЙ РІК — проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра диска Сонця через найближчу точку його видимої геоцентричної орбіти.

АПЕКС — точка перетину напрямку руху космічного об'єкта в певний момент з уявною небесною сферою.

АПОЦЕНТР — точка на орбіті в еліптичному русі двох тіл навколо спільного центра мас, в якій радіус-вектор одного з тіл, проведений з центра мас, набуває найбільшого значення. Якщо центральним тілом є зоря, Сонце, Земля, Місяць, то це, відповідно, апоастр, афелій, апогей, апоселеній.

АПСИД ЛІНІЯ — лінія, яка сполучає перицентр і апоцентр.

АСТРОНОМІЧНА ОДИНИЦЯ (а. о.) — 1) а. о. відстані дорівнює великій півосі земної орбіти, $1,495\,978\,70 \cdot 10^{11}$ м; 2) а. о. часу — атомна секунда СІ.

АСТРОНОМІЧНИЙ ЧАС — середній гринвіцький час GMT (GMAT), яким користувалися до 1 січня 1925 р.

АТОМНА СЕКУНДА — тривалість 9 192 631 770 періодів, які відповідають резонансній частоті квантового переходу між рівнями ($F = 4, V = 0$) і ($F = 3, V = 0$) надтонкої структури основного стану ${}^2S_{1/2}$ атома цезію ${}^{133}\text{Cs}$ на рівні моря.

АТОМНИЙ ЧАС — час, одиницю шкали якого визначає атомна секунда.

БАРИЦЕНТР — центр мас системи тіл. Баррицентр Сонячної системи, залежно від роз-

міщення планет, може віддалятися від центра Сонця на кілька сонячних радіусів.

БАРИЦЕНТРИЧНА НЕБЕСНА РЕФЕРЕНСНА СИСТЕМА (Barycentric Celestial Reference System — BCRS) — система барицентричних просторово-часових координат для Сонячної системи в межах загальної теорії відносності.

БАРИЦЕНТРИЧНИЙ КООРДИНАТНИЙ ЧАС (Barycentric Coordinate Time — TCB) — координатний час в Барицентричній небесній референсній системі з СІ-секундою в межах цієї системи. TCB співвідноситься з геоцентричним координатним часом і земним часом через релятивістські перетворення, які включають віковий член.

БАРИЦЕНТРИЧНИЙ ДИНАМІЧНИЙ ЧАС (Barycentric Dynamical Time — TDB) — шкала часу, визначена Резолюцією МАС 1976 для використання як незалежного аргументу барицентричних ефемерид і рівнянь руху. Відрізняється тільки періодичними членами від земного динамічного часу (TDT). В Барицентричній небесній референсній системі TDB не забезпечується СІ-секундою, бо існує віковий дрейф відносно барицентричного координатного часу (TCB). TDB-секунда вважається довшою, ніж TCB-секунда, приблизно на $1,55 \cdot 10^{-8}$.

ВЕЛИКИЙ ВИБУХ (англ. BIG BANG) — термін, за допомогою якого об'єднано сучасні уявлення про початкові стадії розвитку Всесвіту, що пояснюють його властивості й еволюцію.

ВІК ВСЕСВІТУ, Габбла час — час розширення Всесвіту від моменту Великого Вибуху. За сучасними оцінками становить близько 13,7 млрд років.

ВІСЬ СВІТУ — пряма, що проходить через центр уявної небесної сфери паралельно осі

обертання Землі. Точки її перетину з небесною сферою є полюсами світу.

ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ — комплекс питань, пов'язаних із визначенням точного часу, тобто зі співставлення інтервалів часу з еталоном.

ВЛАСНИЙ ЧАС — інтервал часу за годинником, який рухається разом із спостерігачем.

ВСЕСВІТ — весь навколишній світ з усіма видами речовини та випромінювання, який розвивається в просторі та часі. Загальні особливості Всесвіту в цілому описуються космологічними моделями.

ВСЕСВІТНЕ ТЯЖІННЯ — фундаментальна властивість матерії, яка проявляється в існуванні сил притягання між матеріальними об'єктами. Вперше закон всесвітнього тяжіння сформулював І. Ньютон у 1687 р. В загальній теорії відносності А. Айнштейна всесвітнє тяжіння набуло нового трактування. Гравітаційне поле описується рівняннями Айнштейна, які пов'язують розподіл матерії, її рух з геометричними властивостями простору. За слабких гравітаційних полів і швидкостей загальна теорія відносності дає такий самий результат, як і закон Ньютона.

ВСЕСВІТНІЙ КООРДИНОВАНИЙ ЧАС (Coordinated Universal Time UTC) — шкала часу, призначена для розповсюдження сигналів часу. UTC відрізняється від ТАІ на ціле число секунд; коли різниця між UTC і UT1 перевищує ± 0.90 с, в шкалу UTC вводиться одна секунда.

ВСЕСВІТНІЙ ЧАС (УТ) — середній сонячний час на меридіані Гринвіча. Міра часу, що найбільш наближено відповідає середньому добовому руху Сонця і є основою усіх цивільних систем вимірювання часу. Формально УТ визначається за допомогою математичної формули як функція зоряного часу, тобто УТ визначається зі спостережень добового руху зір і відображає нерівномірне обертання Землі навколо своєї осі.

ГАББЛА (ХАББЛА) ЗАКОН — співвідношення, яке виявляє залежність між відстанню до галактики r та її променевою швидкістю Vr :

$$Vr = Hr,$$

де H — стала Габбла.

ГАББЛА СТАЛА — коефіцієнт пропорційності у Габбля законі. За даними різних авторів $H = 50 \dots 100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Сучасне значення $65 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ (М. Сажин, 2002).

ГАЛАКТИКА — 1) (з малої літери) — велетенська космічна система, що включає зорі, їх скупчення, міжзоряну речовину, хмари газу та пилу, космічні промені тощо; 2) (з великої літери) — спіральна зоряна система, до якої входить наше Сонце. Основну частину зір нашої Галактики ми бачимо у вигляді Молочного Шляху.

ГЕОДЕЗИЧНА ЛІНІЯ — найкоротша лінія між двома точками. На площині це звичайна пряма, на сфері — дуга великого кола, що проходить через ці дві точки. Світова лінія вільної матеріальної точки в загальній теорії відносності є геодезичною в рімановому просторі, характеристики якого визначаються розподілом і рухом матерії.

ГЕОІД — поверхня однакового потенціалу сили тяжіння, що на морях і океанах збігається з незбуреною поверхнею води.

ГЕОПОТЕНЦІАЛ — потенціал сили тяжіння Землі; функція W , яка є сумою ньютонівського потенціалу притягання та потенціалу відцентрової сили.

ГІДЖРА — початок мусульманського літочислення — 16 липня 622 р. (дата переселення Мухаммеда з міста Мекки до Медіни).

ГЛОБАЛЬНА НАВІГАЦІЙНА СУПУТНИКОВА СИСТЕМА (ГНСС) — високотехнічна система, яка забезпечує інформаційне координатно-часове поле завдяки функціонуванню на орбітах низки видимих із будь-якої точки Землі супутників, які безперервно передають високоточні сигнали. Сучасна ГНСС включає системи GPS (USA) і ГЛОНАСС (Росія).

ГНОМОН — старовинний астрономічний інструмент для визначення часу; сонячний годинник.

ГОДИННИЙ КУТ — одна з координат першої екваторіальної системи небесних координат; кут між площиною небесного меридіана і площиною кола схилень.

ГОДИННИК — прилад для відтворення та зберігання часу.

ГРАВІТАЦІЙНА СТАЛА (G) — коефіцієнт пропорційності в законі всесвітнього тяжіння Ньютона: $F = GM_1M_2R^{-2}$, де M_1 , M_2 — маси двох гравітуючих тіл, R — відстань між тілами; F — сила їх взаємодії.

ГРАВІТАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ — скалярна величина, яка характеризує напруженість гравітаційного поля в певній точці.

ГРАВІТАЦІЯ (лат. gravitas — вага) — те саме, що й тяжіння.

ГРИНВІЧ, ГРИНВІЦЬКА ОБСЕРВАТОРІЯ — найстаріша Британська обсерваторія, заснова-

на в 1675 р. Через неї умовно проведено нульовий меридіан.

ДАВНЬОРУСЬКИЙ КАЛЕНДАР — місячно-сонячний календар східних слов'ян.

ДИНАМІЧНИЙ ЧАС — шкали часу, введені в 1984 р. замість ефемеридного часу як незалежний аргумент динамічних теорій і ефемерид.

ДОБА — одна з одиниць вимірювання часу в астрономії, яка дорівнює інтервалу часу, протягом якого Земля здійснює один оберт навколо своєї осі.

ДРАКОНІЧНИЙ МІСЯЦЬ — проміжок часу між двома послідовними проходженнями Місяця через один і той же вузол орбіти на екліптиці під час його обертання навколо Землі.

ДРАКОНІЧНИЙ РІК — проміжок часу між двома послідовними проходженнями Сонця через один і той же вузол орбіти Місяця.

ЕКВАТОР — 1) **ЕКВАТОР НЕБЕСНОГО ТІЛА** — лінія перетину поверхні тіла з площиною, яка проходить через центр мас і перпендикулярна до осі обертання. Геодезичний екватор пов'язаний з площиною, яка утворюється при обертанні великої осі фігури Землі (еліпсоїд відносності). Астрономічний екватор — геометричне місце точок з астрономічною широтою, яка дорівнює нулю. 2) **НЕБЕСНИЙ ЕКВАТОР** — велике коло небесної сфери, віддалене на 90° від полюса світу. Уздовж небесного екватора небесну сферу перетинає площина, яка проходить перпендикулярно до осі обертання Землі. 3) **ГЕОМАГНІТНИЙ ЕКВАТОР** — геометричне місце точок поверхні Землі, в яких вертикальна складова напруженості геомагнітного поля і магнітне нахилення дорівнюють нулеві. 4) **ГАЛАКТИЧНИЙ ЕКВАТОР** — велике коло небесної сфери, відносно якого розподіл об'єктів нашої Галактики симетричний.

ЕКЛІПТИКА — лінія перетину небесної сфери з площиною, яка проходить через її центр паралельно площині орбіти Землі; велике коло небесної сфери, по якому відбувається видимий річний рух Сонця (точніше, його центру). Є опорною при встановленні координатних систем на небесній сфері.

ЕЛОНГАЦІЯ — положення зорі на небосхилі, при якому її азимут набуває найбільшого або найменшого значення.

ЕОН — етап в історії розвитку Землі тривалістю близько 1 млрд років.

ЕПОХА — початкова точка відліку певної ери. В астрономії — початок відліку часу при визначенні небесної системи відліку (епоха

рівнодення), а також момент, до якого відносяться координати зір у каталогах (епоха каталогу).

ЕРА — літочислення, яке ведеться як від події реальної, так і легендарної.

ЕТАЛОН ЧАСУ — періодичний процес, на основі якого визначають час. Сьогодні це атомний еталон часу.

ЕФЕМЕРИДИ — астрономічні дані про положення на небі та умови спостереження світил для окремих або послідовних моментів часу. **ЕФЕМЕРИДИ DE200/LE200, DE405/LE405 ТА ІН.** — числові ефемериди, які основані на високоточній моделі руху Сонця, планет і барицентру системи Земля+Місяць відносно барицентру Сонячної системи (DE200) і руху Місяця відносно геоцентру (LE200) у прямокутній системі координат, яка визначена геоекватором і рівноденням стандартної епохи J2000.0. Уточнені варіанти зазначених моделей руху сприяли появі нових версій ефемерид, а саме: DE403/LE403, DE405/LE405. Зазначені ефемериди розроблялися Лабораторією реактивного руху США (Jet Propulsion Laboratory, USA). Можна знайти на сайті JPL: <ftp://navigator.jpl.nasa.gov/pub/ephem/export/ascii/>

ЕФЕМЕРИДНА ДОВГОТА — довгота, яка вимірюється від ефемеридного меридіана.

ЕФЕМЕРИДНИЙ ГОДИНИЙ КУТ — годинний кут, віднесений до ефемеридного меридіана.

ЕФЕМЕРИДНИЙ МЕРИДІАН — фіктивний меридіан, який обертається рівномірно незалежно від Землі. Ефемеридний меридіан знаходиться на $1.002\,738\ \Delta T$ на схід від Гринвіцького меридіана, де $\Delta T = TT - UT1$.

ЕФЕМЕРИДНИЙ ЧАС (ЕТ) — шкала часу, яка використовувалася з 1960 р. до 1984 р. як незалежний аргумент у гравітаційних теоріях Сонячної системи. В 1984 р. ЕТ була замінена шкалою динамічного часу.

ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ (ЗТВ) — сучасна теорія простору, часу, тяжіння, створена А. Айнштейном у 1916 р. Вихідний її постулат — рівність мас інертної (що фігурує в законах динаміки І. Ньютона) і гравітаційної, або важкої (що є в законі всесвітнього тяжіння). УЗТВ тяжіння трактують як викривлення просторово-часового континууму. Властивості викривленого простору описуються неевклідовою геометрією, в ньому всі матеріальні об'єкти рухаються найкоротшими шляхами — по геодезичних лініях. Астрономія — одна з наук, де ЗТВ використовують якнайширше, і яка є ос-

новною її експериментальною базою. ЗТВ є основою сучасної релятивістської космології.

ЗЕМНИЙ ЧАС (ТТ — Terrestrial Time) — аргумент геоцентричних ефемерид. Ця шкала часу використовується для фіксації астрономічних спостережень, які виконуються з поверхні Землі, і для наземних метрологічних досліджень. Вона практично реалізується наземними еталонами часу і частоти.

ЗОДІАК — сукупність 12 сузір'їв, розміщених уздовж екліптики.

ЗОРЯНИЙ — системалічби часу, в основі якої обертання Землі навколо осі відносно зір. Одиниця вимірювання зоряного часу — зорянодоба. Вона дорівнює 24 год зоряного часу, або 23 год 56 хв 4.091 с середнього сонячного часу.

КАЛЕНДАР — система відліку часу, в якій дні нумеруються відповідно до їх положення у відповідному циклі.

КАЛЕНДИ — назва першого дня кожного місяця в давньоримському календарі.

КАТАЛОГ — зведення даних про певні характеристики астрономічних об'єктів.

КАТАЛОЖНЕ РІВНОДЕННЯ — перетин годинного кола нульового прямого піднесення зорі каталогу з небесним екватором.

КЛЕПСИДРА — стародавній прилад для вимірювання часу за тривалістю витікання води з резервуара.

КОЛАПС — в астрономії гравітаційний колапс — катастрофічне стискання зорі з масою понад 2.5–3.0 мас Сонця після вичерпання джерел термоядерної енергії. Під час колапсу вже ніякі сили не можуть протистояти гравітаційним силам притягання до центру, що є одним з процесів утворення чорної діри.

КОНТИНУУМ — у фізиці суцільне матеріальне середовище, властивості якого змінюються в просторі неперервно.

КООРДИНАТНИЙ ЧАС — час, який жорстко пов'язаний із вибором референсної координатної системи. В силу довільного вибору системи одному і тому ж інтервалу власного часу може відповідати нескінченна кількість інтервалів координатного часу.

КОСМІЧНА ШКАЛА ЧАСУ, КОСМОЛОГІЧНА ШКАЛА ЧАСУ — шкала часу, яку використовують при розгляді різних космологічних моделей для з'ясування зміни параметрів Всесвіту.

КОСМОГОНІЯ — розділ астрономії, що вивчає походження об'єктів космосу.

КОСМОЛОГІЧНА ВІДСТАНЬ — відстань, на якій починають проявлятися ефекти розширення Всесвіту. Чіткої межі немає.

КОСМОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ — у релятивістській космології це основні параметри еволюціонуючого Всесвіту, які визначають внаслідок розв'язання рівнянь поля Айнштейна в межах певних уявлень про найзагальніші властивості Всесвіту: ізотропії, однорідності, стаціонарності тощо.

КОСМОЛОГІЧНЕ РОЗШИРЕННЯ — взаємне віддалення далеких космічних об'єктів. Пов'язане із загальним розширенням Всесвіту.

КОСМОЛОГІЧНИЙ ПРИНЦИП — принцип, який полягає в постулюванні однаковості Всесвіту для спостерігача, що перебуває в будь-якій точці Всесвіту.

КОСМОЛОГІЯ — вчення про Всесвіт як ціле, що базується на вивченні найзагальніших його властивостей.

КОСМОС — космічний простір з усіма його об'єктами, синонім Всесвіту.

КУЛЬМІНАЦІЯ — проходження світила в добовому русі небесної сфери через меридіан північніше (нижня кульмінація) або південніше (верхня кульмінація) від полюса світу.

КУТ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ (EARTH ROTATION ANGLE) — кут Θ , який вимірюється вздовж екватора Небесного проміжного полюса (СІР) між одиничними векторами, спрямованими до Небесного ефемеридного початку (СЕО) і Земного ефемеридного початку (ТЕО).

МЕГАЛІТ — давні кам'яні споруди, знайдені в різних країнах світу. На думку дослідників, споруди призначалися для астрономічних спостережень.

МЕТОНІВ ЦИКЛ — проміжок часу 6940 днів (19 тропічних років), який використовується для узгодження тривалості синодичного місяця і тропічного року в місячно-сонячних календарях.

МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ, Система Інтернаціональна (СІ) — універсальна система фізичних величин для всіх галузей науки, техніки, господарства. Прийнята ХІ Генеральною конференцією з мір і ваг (Париж, 1960). Секунда часу (с) є однією із семи головних одиниць.

МІЖНАРОДНИЙ АСТРОНОМІЧНИЙ СОЮЗ (МАС) — наукове товариство астрономів, засноване 1919 р. До складу МАС входять 40 Комісій. Проблемамаи часу займається Комісія № 31 «Час».

МІНЬКОВСЬКОГО МЕТРИКА — квадрат довжини чотиривимірного вектора, який з'єднує дві точки-події і не змінюється при обертанні в просторі Мінковського.

МІНЬКОВСЬКОГО ПРОСТІР — чотирирівний простір, введений Г. Мінковським у 1907–1908 рр. Об'єднує фізичний тривимірний простір і час.

МІСЦЕВИЙ СЕРЕДНІЙ СОНЯЧНИЙ ЧАС — час, що минув від нижньої кульмінації середнього Сонця.

МІСЯЦЬ — проміжок часу, який приблизно дорівнює періоду обертання Місяця навколо Землі.

МОДИФІКОВАНА ЮЛІАНСЬКА ДАТА (MJD) — юліанська дата (JD) мінус 2 400 000.5.

НАША ЕРА, НОВА ЕРА — система літочислення, у якій за початок відліку років (епоху) вважають рік народження Ісуса Христа.

НЕБЕСНІ КООРДИНАТИ — система чисел, за допомогою яких визначають положення об'єкта на небесній сфері. За початок системи координат беруть або точку спостереження на земній поверхні або центри мас Землі, Сонця, планет та ін. Відповідно до цього запроваджують системи небесних координат: топоцентричну, геоцентричну, геліоцентричну, планетоцентричну тощо.

НЕБЕСНИЙ ПОЛЮС — точка перетину осі обертання Землі з небесною сферою.

НЕБЕСНА СФЕРА — сферична поверхня довільного радіуса з центром у довільній точці простору, на якій розташування небесних тіл зображають у такому вигляді, як їх видно з цієї точки у певний момент часу. Поняття небесної сфери дає змогу визначити кутові відстані між довільними небесними світилами залежно від того, де є центр небесної сфери — у точці спостереження на земній поверхні, у центрі Землі чи в центрі Сонця — розрізняють топоцентричну, геоцентричну і геліоцентричну небесні сфери. Для визначення положень об'єктів на небесній сфері користуються кількома системами небесних координат.

НЕБОСХИЛ — половина небесної сфери, що лежить над горизонтом.

НЕРІВНОМІРНІСТЬ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ — зміна швидкості обертання Землі як результат збурюючої дії Місяця, Сонця, планет та різних геофізичних причин на обертання Землі. Відмічають вікове сповільнення обертання Землі в середньому на 2,0 мс за 100 років, довгоперіодичні та сезонні (0.001 с), а також стрибкоподібні зміни. Відповідно до Міжнародної системи одиниць стандартне значення середньої кутової швидкості обертання Землі $\omega = 7.292\,115 \cdot 10^{-5}$ рад \cdot с $^{-1}$.

НОВИЙ СТИЛЬ (григоріанський календар) — календарна система, яку запровадив у 1582 р. римський папа Григорій XIII замість старого стилю (юліанського календаря).

НУТАЦІЯ — періодичні невеликі коливання осі добового обертання Землі відносно її середнього положення.

ОРБИТИ НЕБЕСНИХ ТІЛ — траєкторії, якими рухаються в просторі небесні тіла відносно центрального тіла.

ПАРАЛАКС — явище видимого зміщення тіла на фоні віддаленіших тіл у випадку зміщення спостерігача.

ПАРАМЕТРИ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ — величини, які характеризують обертання міжнародної земної системи координат відносно міжнародної небесної системи відліку: x , y — координати полюса Землі, UT1 — всесвітній час.

ПАРАПЕГМА — модель давньогрецького місячно-сонячного календаря, що мав форму витесаного з каменя куба, на кожній стороні якого було вирізьблено по дві таблиці (всього 12 таблиць) з текстами, які відображали типові сходи і заходи окремих зір перед сходом і після заходу Сонця. Тут же були гнізда для встановлення цвяхів, на головках яких було вказано «вік» Місяця на цей день сонячного року.

ПАРСЕК (від паралакс за секунду) — позасистемна одиниця відстані в астрономії. Парсек (пк) — це відстань, з якої радіус земної орбіти видно під кутом 1". 1 пк = 206 265 а. о. = = 3.26 світлового року = $30.857 \cdot 10^{12}$ км.

ПЕРИЦЕНТР — точка на еліптичній орбіті, для якої радіус-вектор одного з тіл, проведений із центра мас, має найменше значення. Якщо центральним тілом є Земля, то це перигей, Сонце — перигелій, зоря — периастр, Місяць — периселеній.

ПОПРАВКА ГОДИННИКА — різниця між точним часом в його певний момент і показанням годинника.

ПОЯСНИЙ ЧАС — єдиний час у межах годинного пояса, який обчислюється в шкалі всесвітнього координованого часу.

ПРЕЦЕСІЯ — зміщення точки весняного рівнодення назустріч видимому річному рухові Сонця по екліптиці зі швидкістю 50.26" за рік. Віль обертання Землі здійснює прецесійний рух (описує конус) з періодом 25 800 років.

ПУЛЬСАР — джерело імпульсного (з високою стабільністю періоду) космічного радіовипромінювання; нейтронна зоря. Періоди у більшості відомих пульсарів лежать у межах

від $1.6 \cdot 10^{-5}$ до 5 с. Деякі з пульсарів є компонентами подвійних систем.

РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТР — інструмент для радіоастрономічних спостережень, який складається з двох антен, розміщених на деякій відстані (базі) і з'єднаних між собою кабелем, хвилеводом або радіорелейною лінією зв'язку.

РАДІОТЕЛЕСКОП — інструмент для приймання і реєстрації радіовипромінювання небесних об'єктів. Складається з антени, електричної лінії для передавання енергії, радіоприймача та реєструючої системи.

РЕЛЯТИВІСТСЬКА ТЕОРІЯ, або ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ — теорія, що встановлює закономірності, які є загальними для всіх фізичних процесів. Як встановив А. Айнштайн, ці властивості залежать від гравітаційних полів (полів тяжіння), що діють у даній області простору-часу. Властивості простору-часу за наявності полів тяжіння досліджуються в загальній теорії відносності. В спеціальній теорії відносності розглядають властивості простору-часу в наближенні, при якому ефектами тяжіння можна нехтувати.

РЕФЕРЕНСНА СИСТЕМА — система, яка прийнята за опорну.

РІВНОДЕННЯ — момент часу, коли центр диска Сонця переходить через небесний екватор (див. точки рівнодень).

РІВНЯННЯ РІВНОДЕНЬ — нутація за прямим піднесенням.

РІВНЯННЯ ЧАСУ — різниця між середнім місцевим сонячним часом і справжнім сонячним часом для одного з того ж моменту.

РІК — астрономічна і календарна одиниця вимірювання часу, яка визначається обертанням Землі навколо Сонця.

РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ — зростання відстаней між галактиками, зумовлене розширенням простору. Підтвердженням розширення Всесвіту є червоне зміщення в спектрах галактик.

СВІТЛОВИЙ РІК — відстань, яку світло, поширюючись із швидкістю 299 792 458 м/с, проходить за рік. $1 \text{ св. рік} = 0.3066 \text{ пк} = 63\,240 \text{ а. о.} = 9.5 \cdot 10^{15} \text{ м.}$

СВІТОВА ЛІНІЯ — в теорії відносності геометричний образ чотирирівимірної траєкторії матеріальної точки у просторі-часі.

СЕКУНДА — одиниця вимірювання часу. $1 \text{ с} = 1/60 \text{ хвилини} = 1/3600 \text{ години} = 1/86\,400 \text{ доби.}$ У 1956 р. секунда дорівнювала $1/31\,556\,925.9747$ довжини тропічного року. У 1967 р. була прий-

нята атомна секунда, яка дорівнює 9 192 631 770 періодів випромінювання атома цезію-133. Позначається українською — «с», міжнародне позначення — «s».

СИГНАЛИ ТОЧНОГО ЧАСУ — сигнали, які передаються по радіо і телебаченню в певні моменти доби.

СИНГУЛЯРНІСТЬ — Точка простору-часу, в якій його кривина стає нескінченною (С. Хокінг).

СИНХРОНІЗАЦІЯ ГОДИННИКІВ — процедура визначення поправки показань одного годинника відносно іншого.

СИСТЕМА НЕБЕСНИХ КООРДИНАТ — сукупність опорних точок і кіл на небесній сфері, за допомогою яких визначається положення світил на небі.

СИСТЕМА СВІТУ — уявлення про розміщення та рухи у просторі Землі, Сонця, планет і зір. К. Птоломей (II ст. н. е.) математично розробив геоцентричну систему світу, яка через 1300 р. була замінена геліоцентричною системою світу М. Коперника (1473–1543). Саме ця система правильно пояснювала місцезнаходження Сонця і планет в Сонячній системі.

СЛУЖБА ЧАСУ — сукупність спеціалізованих лабораторій, обсерваторій, які визначають, зберігають час і передають споживачам інформацію про нього.

СОНЦЕСТОЯННЯ — момент часу, під час якого центр диска Сонця проходить через точку сонцестояння — точку екліптики, найбільш віддалену від небесного екватора. Назва пов'язана з тим, що поблизу сонцестояння схилення Сонця з кожним днем змінюється дуже повільно, а тому висота Сонця у верхній кульмінації протягом кількох днів практично однакова.

СТАРИЙ СТИЛЬ — те саме, що юліанський календар.

СТОЛІТТЯ — проміжок часу, який дорівнює 100 рокам. Згідно з сучасним літочисленням (від Різдва Христового) століття починається «першим» роком, а закінчується кратним числом 100.

СТОУНХЕНДЖ (ОДИН З МЕГАЛІТІВ) — стародавня (вік оцінюють у 4 тис. років) астрономічна обсерваторія на рівнині Солсбері, що на південному заході Англії.

ТЕМНА ЕНЕРГІЯ — космологічне поле, що в сучасну епоху за результатами обробки з космічного апарата WMAP складає основний внесок (70 %) у загальну масу Всесвіту та призводить до прискорення його розширення.

ТЕМНА МАТЕРІЯ — це матерія, яка не випромінює і не відбиває електромагнітне випромінювання і через це недосяжна для безпосередніх спостережень.

ТРИВАЛІСТЬ ДНЯ — проміжок часу, упродовж якого Сонце перебуває над горизонтом.

ТОЧКИ РІВНОДЕНЬ — точки перетину небесного екватора з екліптикою. Через точку весняного рівнодення центр диска Сонця 20(21) березня переходить із Південної півкулі неба в Північну, а через точку осіннього рівнодення 22(23) вересня — з Північної півкулі неба в Південну.

ТОЧКИ СОНЦЕСТОЯНЬ — точки екліптики, в яких схилення Сонця досягає свого найбільшого за абсолютною величиною значення $\pm 23,5^\circ$.

ТРОПІКИ — паралелі на поверхні Землі, віддалені від екватора на $23^\circ 27'$ на північ (Північний Тропік, або Тропік Рака) і на південь (Північний Тропік, або Тропік Козерога). У день літнього сонцестояння Сонце у верхній кульмінації перебуває в зеніті на Тропіку Рака, а в день зимового сонцестояння на Тропіку Козерога.

ТРОПІЧНИЙ РІК — проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра диска справжнього Сонця через середню точку весняного рівнодення.

ФУНДАМЕНТАЛЬНА ЕПОХА — фіксована дата, яка раніше використовувалась у планетних таблицях С. Ньюкома: 1900 рік січень 0,12 год ефемеридного часу.

ХВИЛИНА — позасистемна одиниця часу. Позначається українською — «хв», міжнародне позначення — «min.» $1 \text{ хв} = 60 \text{ с} = 1/60 \text{ год} = 1/1440 \text{ доби}$.

ХОДА ГОДИННИКА — вимір поправки годинника за інтервал часу. Поправка годинника й інтервал часу можуть визначатися в різних одиницях часу. Наприклад, добова хода (с/доба), годинна хода (с/год).

ХРОНОГРАФ — прилад для реєстрації моменту часу певної події.

ХРОНОЛОГІЯ — наука про форми і методи вимірювання часу.

ХРОНОМЕТР — високоточний переносний годинник, який використовується для зберігання часу.

ЧАС — поряд із простором форма існування матерії, яка визначає порядок зміни явищ. У чотиривимірному просторі — одна з координат. У фізиці і астрономії час — один з основних аргументів, що входять до рівнянь, якими описується навколишній світ, перебіг процесів у ньому.

ЧОРНА ДІРА — релятивістський астрофізичний об'єкт, що утворюється внаслідок гравітаційного колапсу масивного тіла. Назва чорної діри пов'язана з тим, що назовні її, за горизонт подій, не може вирватися ні випромінювання, ні частинка.

ШКАЛА ЧАСУ — неперервна послідовність інтервалів часу визначеної тривалості, які відраховуються від початкового моменту.

ЩОРІЧНИК АСТРОНОМІЧНИЙ — видання, яке містить небесні координати Сонця, планет, деяких зір на кожний день року, а Місяця — на кожну годину доби. Найбільш відомі Щ. а.: «Астрономический ежегодник» Інституту Прикладної астрономії, Санкт-Петербург, Росія; «The Astronomical Almanac», Washington, London.

ЮЛІАНСЬКИЙ ДЕНЬ (JD), ЮЛІАНСЬКА ДАТА, ЮЛІАНСЬКИЙ ПЕРІОД — число днів, які минули від 12 год 1 січня 4713 р. до н. е. Система JD була запроваджена Ж. Скалігером і названа на честь його батька Юліана.

ЮЛІАНСЬКИЙ КАЛЕНДАР, старий стиль — сонячний календар, який введено з 1 січня 45 р. до н. е. реформою Юлія Цезаря.

ЮЛІАНСЬКИЙ РІК — проміжок часу, який дорівнює 365.25 доби.

ДОДАТКИ

Час не є таємною ілюзією інтелекту. Він є суттєвою властивістю Всесвіту.

Дж. Уітроу

Д. 1. Від миттєвого до вічного

*(Д. Лабродор,
«Світ науки», № 3–4, 2003 р.)*

Одна аттосекунда (одна мільярдна мільярдної частинки секунди, 10^{-18} с). Найнетриваліші події, що їх зуміли зафіксувати науковці, вимірюються аттосекундами. За допомогою нескладних високошвидкісних лазерів дослідники отримали імпульси світла, що тривають лише 250 аттосекунд. Хоч цей інтервал і здається неймовірно коротким, він — ціла вічність порівняно з часом Планка (близько 10^{-45} с), який вважають найкоротшим із можливих відрізків часу.

Одна фемтосекунда (одна мільйонна мільярдної частинки секунди, 10^{-15} с). Атом у молекулі зазвичай здійснює одне коливання за 10–100 фемтосекунд. Для проходження навіть дуже швидких хімічних реакцій потрібно кілька сотень фемтосекунд. Процес, що лежить в основі зору, — взаємодія світла з пігментами сітківки — триває близько 200 фемтосекунд.

Одна пікосекунда (одна тисячна мільярдної частинки секунди, 10^{-12} с). Найшвидші транзистори працюють у пікосекундному діапазоні. Нижній кварк — рідкісна субатомна частинка, утворена у високошвидкісних прискорювачах, — живе одну пікосекунду, після чого розпадається. Середній час життя водневого зв'язку між молекулами води за кімнатної температури становить три пікосекунди.

Одна наносекунда (мільярдна частинка секунди, 10^{-9} с). За цей час промінь світла пройде у вакуумі лише 30 см. На виконан-

ня простої дії (наприклад, додавання двох чисел) мікропроцесор персонального комп'ютера затрачає від двох до чотирьох наносекунд. Ще одна рідкісна субатомна частинка, К-мезон, живе впродовж 12 наносекунд.

Одна міросекунда (мільйонна частинка секунди, 10^{-6} с). Промінь світла подолає 300 м — три футбольних поля, проте звукова хвиля на рівні моря пошириться лише на третину міліметра. Спалах високошвидкісного комерційного стробоскопа триває близько однієї міросекунди. Паличка динаміту вибухне через 24 міросекунди після догорання її запалу.

Одна мілісекунда (тисячна частинка секунди, 10^{-3} с). Найкоротший час експозиції звичайного фотоапарата. Хатня муха змахує крилами приблизно раз на три мілісекунди, а бджола — раз на 5 мілісекунд. Щороку тривалість обертання Місяця навколо Землі збільшується на 2 мілісекунди, оскільки його орбіта поступово розширюється. Інтервал у 10 мілісекунд — це «мить» («jiffy») у комп'ютерній термінології.

Одна десята секунди (10^{-1} с). Саме стільки потрібно, щоб «моргнуть оком». За цей час людське вухо може розрізнити відлуння від первинного звуку. «Вояджер 1», космічний апарат, що покидає Сонячну систему, віддаляється від Сонця за цей час ще на 2 км. Колібри сім разів махне крильцями. Камертон, настроєний на «ля» першої октави, зробить чотири коливання.

Одна секунда (1 с). Тривалість одного циклу серцебиття здорової людини. За цей час Земля проходить 30 км навколо Сонця, а Сонце — 274 км на своєму шляху через Галактику. Секунди недостатньо, щоб місяч-

не саяво досягнуло Землі (потрібно 1,3 с). Традиційно секундою вважали одну шістдесяту однієї шістдесятої однієї двадцять четвертої частини доби, проте сьогодні наука дає точніше визначення. Це тривалість 9 192 631 770 циклів одного з різновидів випромінювання, утвореного атомом цезію-133.

Одна хвилинка (60 с). За цей час маса мозку новонародженої дитини збільшується на 2 мг. Пересічна людина може вимовити 150 або прочитати 250 слів. Сонячне світло досягає Землі приблизно за 8 хв. Коли Марс максимально наближається до Землі, сонячне світло, відбите від планети, ми побачимо за 4 хв.

Одна година (3600 с). Клітинам у процесі відтворення цього часу досить, щоб поділитися надвоє. Світло від Плутона, найвіддаленішої планети Сонячної системи, досягає Землі за 5 год 20 хв.

Одна доба (86 400 с = $8.64 \cdot 10^4$ с). Тривалість обертання Землі навколо своєї осі для людини, мабуть, найприродніша одиниця часу.

Один рік (31 557 600 с = $3,16 \cdot 10^7$ с). Земля здійснює один повний оберт навколо Сонця і 365,26 оберту навколо власної осі. Світло від найближчої зорі Проксима Центавра досягає Землі за 4,3 року.

Одне сторіччя ($3.16 \cdot 10^9$ с). Місяць віддаляється від Землі ще на 3,8 м. Одна людина із 26 народжених після Другої світової війни має шанс дожити до 100 років, тоді як гігантські черепахи можуть прожити й 177 років.

Один мільйон років ($3.16 \cdot 10^{13}$ с). Космічний корабель, рухаючись зі швидкістю, близькою до швидкості світла, не подолає й половини шляху до найближчої галактики Андромеди (для цього потрібно 2,3 млн років). За цей час згорають наймасивніші зорі — сині супергіганти, що в мільйони разів яскравіші за Сонце.

Один мільярд років ($3.16 \cdot 10^{16}$ с). Приблизно за цей час новоутворена Земля встигла, утворила океани, дала початок одноклітинному життю та змінила свою первісну, багату на діоксид вуглецю атмосферу на атмосферу, багату на кисень. Тим часом Сонце чотири рази обернулося навколо центру Галактики. Оскільки вік Всесвіту не перевищує 12–14 млрд років, то одиниці часу, більші за мільярд років, вживаються нечасто. Проте космологи переконані, що Всесвіт, очевидно, розширюватиметься нескінченно, поки не загине остання зоря (через 1000 трильйонів років) і не випарується остання чорна діра (через 10^{100} років). Майбутнього попереду набагато більше, ніж залишилося позаду минулого.

Д. 2. Різниця між юліанським і григоріанським календарями (періоди за юліанським календарем)

Століття	3 1 березня	По 29 лютого	Різниця днів	Століття	3 1 березня	По 29 лютого	Різниця днів
I	1	100	-2	XII	1100	1200	+7
II	100	200	-1	XIII	1200	1300	+7
III	200	300	0	XIV	1300	1400	+8
IV	300	400	+1	XV	1400	1500	+9
V	400	500	+1	XVI	1500	1600	+10
VI	500	600	+2	XVII	1600	1700	+10
VII	600	700	+3	XVIII	1700	1800	+11
VIII	700	800	+4	XIX	1800	1900	+12
IX	800	900	+4	XX	1900	2000	+13
X	900	1000	+5	XXI	2000	2100	+13
XI	1000	1100	+6	XXII	2100	2200	+14

Д. 3. Редукція шкал часу

1890–1983, $\Delta T = ET - UT$; 1984–2000, $\Delta T = TDT - UT$; з 2001, $\Delta T = TT - UT$;
з 1990 ΔT подано на 1 січня 0 год UTC; з 1958, $\Delta T (A) = \Delta T = TAI + 32 \cdot 184 - UT1$

Рік	ΔT , с	Рік	ΔT , с	Рік	ΔT , с	Рік	ΔT , с
1890.0	-5.87	1920.0	+21.16	1950.0	+29.15	1980.0	+50.54
1891.0	-6.01	1921.0	+22.25	1951.0	+29.57	1981.0	+51.38
1892.0	-6.19	1922.0	+23.49	1952.0	+29.97	1982.0	+52.17
1893.0	-6.64	1923.0	+22.41	1953.0	+30.36	1983.0	+52.96
1894.0	-6.44	1924.0	+23.62	1954.0	+30.72	1984.0	+53.79
1895.0	-6.47	1925.0	+21.16	1955.0	+31.07	1985.0	+54.34
1896.0	-6.09	1926.0	+23.86	1956.0	+31.35	1986.0	+54.87
1897.0	-5.76	1927.0	+24.49	1957.0	+31.68	1987.0	+55.32
1898.0	-4.66	1928.0	+24.34	1958.0	+32.18	1988.0	+55.82
1899.0	-3.74	1929.0	+24.08	1959.0	+32.68	1989.0	+56.30
1900.0	-2.72	1930.0	+24.02	1960.0	+33.15	1990.0	+56.86
1901.0	-1.54	1931.0	+24.00	1961.0	+33.59	1991.0	+57.57
1902.0	-0.02	1932.0	+23.87	1962.0	+34.00	1992.0	+58.31
1903.0	+1.24	1933.0	+23.95	1963.0	+34.47	1993.0	+59.12
1904.0	+2.64	1934.0	+23.86	1964.0	+35.03	1994.0	+59.98
1905.0	+3.86	1935.0	+21.93	1965.0	+35.73	1995.0	+60.78
1906.0	+5.37	1936.0	+23.73	1966.0	+36.54	1996.0	+61.61
1907.0	+6.14	1937.0	+23.92	1967.0	+37.43	1997.0	+62.29
1908.0	+7.75	1938.0	+23.96	1968.0	+38.29	1998.0	+62.97
1909.0	+9.13	1939.0	+24.02	1969.0	+39.20	1999.0	+63.47
1910.0	+10.46	1940.0	+24.33	1970.0	+40.18	2000.0	+63.83
1911.0	+11.53	1941.0	+24.83	1971.0	+41.17	2001.0	+64.09
1912.0	+13.36	1942.0	+25.30	1972.0	+42.23	2002.0	+64.30
1913.0	+14.65	1943.0	+25.70	1973.0	+43.37	2003.0	+64.47
1914.0	+16.01	1944.0	+26.24	1974.0	+44.49	2004.0	+64.57
1915.0	+17.20	1945.0	+26.77	1975.0	+45.48	2005.0	+64.69
1916.0	+18.24	1946.0	+26.28	1976.0	+46.46	2006.0	+64.85
1917.0	+19.06	1947.0	+27.78	1977.0	+47.52	2007.0	+65.15
1918.0	+20.25	1948.0	+28.25	1978.0	+48.53	2008.0	+65.46
1919.0	+20.95	1949.0	+28.71	1979.0	+49.59	2009.0	+65.70

Д. 4. Різниці міжнародного атомного часу (ТАІ) і всесвітнього координованого часу (UTC)

Дата	ТАІ-UTC
1961 січень 1 — 1961 серпень 1	1.422818 с + 0.001296 (MJD – 37300) с
1961 серпень 1 — 1962 січень 1	1.372818 с + 0.001296 (MJD – 37300) с
1962 січень 1 — 1963 листопад 1	1.845858 с + 0.0011232 (MJD – 37665) с
1963 листопад 1 — 1964 січень 1	1.945858 с + 0.0011232 (MJD – 37665) с
1964 січень 1 — 1964 квітень 1	3.240130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1964 квітень 1 — 1964 вересень 1	3.340130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1964 вересень 1 — 1965 січень 1	3.440130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1965 січень 1 — 1965 березень 1	3.540130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1965 березень 1 — 1965 липень 1	3.640130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1965 липень 1 — 1965 вересень 1	3.740130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1965 вересень 1 — 1966 січень 1	3.840130 с + 0.001296 (MJD – 38761) с
1966 січень 1 — 1968 лютий 1	4.313170 с + 0.002592 (MJD – 39126) с
1968 лютий 1 — 1972 січень 1	4.213170 с + 0.002592 (MJD – 39126) с
1972 січень 1 — 1972 липень 1	10.00 с
1972 липень 1 — 1973 січень 1	11.00 с
1973 січень 1 — 1974 січень 1	12.00 с
1974 січень 1 — 1975 січень 1	13.00 с
1975 січень 1 — 1976 січень 1	14.00 с
1976 січень 1 — 1977 січень 1	15.00 с
1977 січень 1 — 1978 січень 1	16.00 с
1978 січень 1 — 1979 січень 1	17.00 с
1979 січень 1 — 1980 січень 1	18.00 с
1980 січень 1 — 1981 січень 1	19.00 с
1981 липень 1 — 1982 липень 1	20.00 с
1982 липень 1 — 1983 липень 1	21.00 с
1983 липень 1 — 1985 липень 1	22.00 с
1985 липень 1 — 1988 січень 1	23.00 с
1988 січень 1 — 1990 січень 1	24.00 с
1990 січень 1 — 1991 січень 1	25.00 с
1991 січень 1 — 1992 січень 1	26.00 с
1992 липень 1 — 1993 липень 1	27.00 с
1993 липень 1 — 1994 липень 1	28.00 с
1994 липень 1 — 1996 січень 1	29.00 с
1996 січень 1 — 1997 липень 1	30.00 с
1997 липень 1 — 1999 січень 1	31.00 с
1999 січень 1 — 2006 січень 1	32.00 с
2006 січень 1 — 2009 січень 1	33.00 с
2009 січень 1 — До повідомлення	34.00 с

Д. 5. Юліанські дати на початок року за григоріанським календарем

Рік	JD	Рік	JD	Рік	JD	Рік	JD
1950	2433282.5	1976	2442778.5	2002	2452275.5	2028	2461771.5
1951	2433647.5	1977	2443144.5	2003	2452640.5	2029	2462137.5
1952	2434012.5	1978	2443509.5	2004	2453005.5	2030	2462502.5
1953	2434378.5	1979	2443874.5	2005	2453371.5	2031	2462867.5
1954	2434743.5	1980	2444239.5	2006	2453736.5	2032	2463232.5
1955	2435108.5	1981	2444605.5	2007	2454101.5	2033	2463598.5
1956	2435473.5	1982	2444970.5	2008	2454466.5	2034	2463963.5
1957	2435839.5	1983	2445335.5	2009	2454832.5	2035	2464328.5
1958	2436204.5	1984	2445700.5	2010	2455197.5	2036	2464693.5
1959	2436569.5	1985	2446066.5	2011	2455562.5	2037	2465059.5
1960	2436934.5	1986	2446431.5	2012	2455927.5	2038	2465424.5
1961	2437300.5	1987	2446796.5	2013	2456293.5	2039	2465789.5
1962	2437665.5	1988	2447161.5	2014	2456658.5	2040	2466154.5
1963	2438030.5	1989	2447527.5	2015	2457023.5	2041	2466520.5
1964	2438395.5	1990	2447892.5	2016	2457388.5	2042	2466885.5
1965	2438761.5	1991	2448257.5	2017	2457754.5	2043	2467250.5
1966	2439126.5	1992	2448622.5	2018	2458119.5	2044	2467615.5
1967	2439491.5	1993	2448988.5	2019	2458484.5	2045	2467981.5
1968	2439856.5	1994	2449353.5	2020	2458849.5	2046	2468346.5
1969	2440222.5	1995	2449718.5	2021	2459215.5	2047	2468711.5
1970	2440587.5	1996	2450083.5	2022	2459580.5	2048	2469076.5
1971	2440952.5	1997	2450449.5	2023	2459945.5	2049	2469442.5
1972	2441317.5	1998	2450814.5	2024	2460310.5	2050	2469807.5
1973	2441683.5	1999	2451179.5	2025	2460676.5	2051	2470172.5
1974	2442048.5	2000	2451544.5	2026	2461041.5	2052	2470537.5
1975	2442413.5	2001	2451910.5	2027	2461406.5		

Д. 6. Хронологія введення григоріанського календаря в деяких країнах

Країна	Останній день юліанського календаря	Перший день григоріанського календаря
Італія, Іспанія, Португалія, Польща	4 жовтня 1582 р.	15 жовтня 1582 р.
Україна у складі Речі Посполитої	4 жовтня 1582 р.	10 жовтня 1582 р.
Франція	9 грудня 1582 р.	20 грудня 1582 р.
Люксембург, Нідерланди	21 грудня 1582 р.	1 січня 1583 р.
Баварія	5 жовтня 1583 р.	16 жовтня 1583 р.
Австрія	6 січня 1584 р.	17 січня 1584 р.
Швейцарія	11 січня 1584 р.	22 січня 1584 р.
Угорщина	21 жовтня 1587 р.	1 листопада 1587 р.
Пруссія	22 серпня 1610 р.	2 вересня 1610 р.
Німеччина (протестантська), Норвегія, Данія	18 лютого 1700 р.	1 березня 1700 р.
Великобританія	2 вересня 1752 р.	14 вересня 1752 р.
Швеція, Фінляндія	17 лютого 1753 р.	1 березня 1753 р.
Японія	—	1 січня 1873 р.
Китай	—	20 листопада 1911 р.
Болгарія	31 березня 1916 р.	14 квітня 1916 р.
Радянська Росія	31 січня 1918 р.	14 лютого 1918 р.
Україна (УНР)	28 лютого 1918 р.	13 березня 1918 р.
Сербія, Румунія	18 січня 1919 р.	1 лютого 1919 р.
Греція	9 березня 1924 р.	23 березня 1924 р.
Туреччина	18 грудня 1925 р.	1 січня 1926 р.
Єгипет	17 вересня 1928 р.	1 жовтня 1928 р.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Абалакін В. К.* Основы эфемеридной астрономии. — М.: Наука, 1979. — 446 с.
2. *Астрономический* ежегодник на 2007 год. — СПб., 2006. — 724 с.
3. *Астрономічний* енциклопедичний словник: Під ред. Климишина І. А., Корсунь А. О. — Львів, 2003. — 548 с.
4. *Астрономічний* календар на 2003–2008. — К., 2004–2007. — 284 с.
5. *Бабак В. П., Конін В. В., Харченко В. П.* Радіо-супутникова навігація. — К.: Техніка, 2004. — 328 с.
6. *Бакулін П. И., Блинов Н. С.* Служба точного времени. — М.: Наука, 1977. — 352 с.
7. *Бич А.* Основы теории времени. — К.: Знание Украины, 2005. — 116 с.
8. *Брумберг В. А.* Релятивистские системы координат и шкалы времени // Тр. Ин-та приклад. астрономии РАН. — 2004. — Вып. 10. — С. 44–61.
9. *Використання* сигналів супутникових радіонавігаційних систем для порівняння шкал часу / Г. Сидоренко, В. Соловійов, О. Ткачук та ін. // Косм. наука і технологія. — 2001. — Т. 7. — № 4. — С. 101–106.
10. *Гіббз В.* Найточніші годинники // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 66–73.
11. *Гофманн-Волленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д.* Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика: Пер. з англ.; під ред. Яцківа Я. С. — К.: Наук. думка, 1995. — 380 с.
12. *Дейвіс П.* Цей загадковий потік часу // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 22–27.
13. *Дейвіс П.* Як створити машину часу // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 30–35.
14. *Державна* служба єдиного часу і еталонних частот — необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України / О. Величко, Б. Макаренко, В. Камінський та ін. // Косм. наука і технологія. — 1997. — Т. 3, № 1.2. — С. 7–15.
15. *Еззелл К.* Культура часу // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 54–55.
16. *Ендрюс В.* Годинниковий літопис // Світ науки. — 2003. — № 3–4 (19–20). — С. 56–65.
17. *Жаров В. Е.* Сферическая астрономия. — М.: Фрязино, 2006. — 480 с.
18. *Загальна* теорія відносності: випробування часом / Я. С. Яцків, О. М. Александров, І. Б. Вавилова та ін. — Київ, ГАО НАНУ, 2005. — 288 с.
19. *Казютинский В. В.* Памяти Ильи Пригожина // Земля и Вселенная. — 2003. — № 5. — С. 35–39.
20. *Кайку М.* Гіперпростір. Наукова одісея крізь паралельні світи, викривлений простір-час і десятий вимір: Пер. з англ. — Львів: Літопис, 2005. — 456 с.
21. *Климишин І. А.* Календар і хронологія. — Івано-Франківськ: Гостинець, 2002. — 232 с.
22. *Климишин І. А.* Календарь и хронология. — М.: Наука, 1989. — 478 с.
23. *Климишин І. А.* Основы пасхалии в таблично-графическому их отображении. — Івано-Франківськ: Гостинець, 2003. — 95 с.

24. *Климишин І. А., Тельнюк-Адамчук В. В.* Шкільний астрономічний довідник. — К.: Вища шк., 1990. — 289 с.
25. *Ковалевский Ж.* Современная астрометрия: Пер. с англ. — М.: Фрязино, 2004. — 480 с.
26. *Константинов А. И., Флеер А. Г.* Время. — М.: Изд-во стандартов, 1971. — 366 с.
27. *Корсунь А. О.* Вимірювання та зберігання часу // Астрономічний календар на 2003 р. — С. 229–241.
28. *Куликов К. А., Сидоренков Н. С.* Планета Земля. — М.: Наука, 1977. — 192 с.
29. *Лабродор Д.* Від миттєвого до вічного // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 21–24.
30. *Лукашова М. В., Свешников М. Л.* Небесное эфемеридное начало (СЕО) // Тр. Ин-та приклад. астрономии РАН. — 2004. — Вып. 10. — С. 186–206.
31. *Лукашова М. В., Свешников М. Л.* Системы времени эфемеридной астрономии // Тр. Ин-та приклад. астрономии РАН. — 2004. — Вып. 10. — С. 62–111.
32. *Манк У., Макдональд Г.* Вращение Земли. — М.: Мир, 1964. — 384 с.
33. *Массер Дж.* Рана в серці фізики // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 28–29.
34. *Мориц Г., Мюллер А.* Вращение Земли: теория и наблюдения: Пер. с англ. — К.: Наук. думка, 1992. — 512 с.
35. *Общая теория относительности:* Пер. с англ.; Под ред. Хокинга С., Израэля В. — М.: Мир, 1983. — 455 с.
36. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS: Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2002. — 400 с.
37. *Пилуныров В. Н.* История часов с древнейших времен до наших дней. — М.: Наука, 1982. — 496 с.
38. *Пригожин И. Г., Стенгерс И.* Квант. Хаос. Время (К решению парадокса времени): Пер. с англ. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 240 с.
39. *Пульсарная шкала времени /* Ю. П. Илясов, А. Д. Кузьмин, Т. В. Шабанова, Ю. П. Шитов // Труды ФИАН, 1989, 199. — С. 149–159.
40. *Рейхенбах Г.* Философия пространства и времени: Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1985. — 344 с.
41. *Свешников М. Л.* Новые релятивистские шкалы времени эфемеридной астрономии. — СПб., 1992. — 39 с. — (Препринт / Ин-та приклад. астрономии РАН; № 26).
42. *Світ науки.* — 2003. — № 3–4 (19–20). — 62 с.
43. *Сидоренков Н. С.* Физика неустойчивостей вращения Земли. — М.: Наука, 2002. — 384 с.
44. *Силк Дж.* Большой Взрыв. — М.: Мир, 1982. — 209 с.
45. *Система синхронизации и единого времени наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами Украины /* Б. Макаренко, В. Кулишенко, А. Петров и др. // Косм. наука і технологія. — 2001. — Т. 7. — № 4. — С. 107–113.
46. *Стікс Г.* Дійсний час // Світ науки. — 2003. — № 3–4. — С. 18–20.
47. *Труды* Ин-та приклад. астрономии РАН. — 2004. — Вып. 10. — 488 с.
48. *Уитроу Дж.* Структура и природа времени. — М.: Знание, 1984. — 63 с.
49. *Хауз Д.* Гринвичское время и открытие долготы. — М.: Мир, 1983. — 239 с.
50. *Хокинг С.* От Большого Взрыва до черных дыр. Краткая история времени. — М.: Мир, 1990. — 168 с.
51. *Хокинг С., Пенроуз Р.* Природа пространства и времени. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». — 2000. — 160 с.
52. *Хокинг С., Эллис Дж.* Крупномасштабная структура пространства-времени: Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 432 с.
53. *Хренов Л. С., Голуб И. Я.* Время и календарь. — М.: Наука, 1989. — 124 с.
54. *Чернин А. Д.* Физика времени. — М.: Наука, 1987. — 221 с.
55. *Annual Report of the BIPM Time Section //* Рам. — 1988–2004.
56. *Aoki S., Guinot B., Kaplan G. et al.* The new definition of Universal Time, *Astron. Astrophys.* — 1982, 105. — P. 359–361.
57. *Aoki S., Kinoshita H.* Note in the relation between the equinox and Guinot's non-rotating origin. *Celest. Mech.* — 1983, 29. — P. 335–360.

58. *Audoin C., Guinot B.* The Measurement of Time. Cambridge. — 2001. — 335 p.
59. *Brouwer D.* A study of the changes in the rate of rotation of the Earth // *Astron. Journ.* — 1952, 57. — P. 125–146.
60. *Capitain N., Guinot B., McCarthy D. D.* Definition of the Celestial Ephemeris Origin and UT1 in the International Celestial Reference Frame // *Astr. and Astrophys.* — 2000, 355. — P. 398–405.
61. *Fukushima T.* Time ephemeris // *Astron. and Astrophys.* — 1995, 348. — P. 642–652.
62. *Guinot B.* Basic problems in the kinematic of rotation of the Earth // *Time and the Earth's rotation (Sym. IAU N. 82)*. — Dordrecht: Reidel Publ. Comp., 1979. — P. 7–18.
63. *Guinot B.* Time system and time frame, the epochs // *Proc. Journées*. — 2000. — P. 210–213.
64. *Guinot B., Seidelmann P. K.* Time-scale: their history, definition and interpretation // *Astron. and Astrophys.* — 1988, 265. — P. 833–838.
65. *IERS Convection 1992 / IERS Technical Note*. — 1992. — 13. — 135 p.
66. *IERS Convection 1996 / IERS Technical Note*. — 1996. — 21. — 129 p.
67. *IERS Conventions 2003 / IERS Technical Note*. — 2003. — 32. — 141 p.
68. *Information Bulletin of IAU*. — 2001. — № 88. — 52 p.
69. *Kaplan G. H.* The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems? Time Scales and Earth Rotation Models // *Washington: Circular, 2005*. — 104 p.
70. *Klepczynski W., Powers E., Douglas R., Fenton P.* From time to time // *GPS World*. — 2001, May. — P. 40–45.
71. *Kovalevsky J., Seidelmann P.* Fundamentals of Astrometry. — Cambridge, 2004. — 404 p.
72. *Lambeck K.* The Earth's variable rotation: geophysical causes and consequences. — Cambridge, 1980. — 450 p.
73. *McCarthy D. D.* The definition of UTC // In: *Towards models and constants for sub-microarcsecond astrometry (Proc of IAU Coll)*. — 2000, 180. — P. 363–371.
74. *McCarthy D. D., Badcock A. K.* The length of day since 1656 // *Phys. Earth. Plan. Inst.* — 1986, 44. — P. 281–292.
75. *Moudrak A., Klein H., Eissteller B.* Future Time // *Inside GNSS*. — 2008, september/october. — P. 45–50.
76. *Petit G.* Comparison of «Old» and «New» concepts: Coordinate Times and Time Transformations // *IERS Technical Note*. — 2002, 29. — P. 19–29.
77. *Seidelmann P. K., Fukushima T.* Why new time scale? // *Astron. and Astrophys.* — 1992, 265. — P. 833–838.
78. *Stephenson F., Morrison I.* Long-Term changes in the rotation of the Earth: 700 B. C. to A. D. 1800 / *Phil. Trans. Roy. Soc.* — London. — 1984, A313. — P. 47–70.
79. *The Astronomical Almanac for the year 2006*. — Washington, 2005. — № 7. — 242 p.
80. *Thomas C., Wolf P., Tavella P.* Time scales. — Paris, 1994. — 52 p.
81. *Quinn T.* The BIPM and the Accurate Measurement of Time / *Proc of the IEEE*. — 1991. — V. 79. — № 7. — P. 894–905.
82. *Wahr J. M., Sasao T., Smith M. L.* Effect on the fluid core on changes in the length day due to long period tides // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* — 1981. — V. 64. — P. 635–650.
83. *Woolard E.* Inequalities in mean solar time from tidal variations in the rotation of the Earth // *Astronom. Journal*. — 1959. — V. 64, 1269. — P. 140–142.
84. *Yoder C. F., Williams J. G., Parve M. E.* Tidal variation of Earth rotation // *Journal of Geophysical Research*. — 1981. — V. 86, B2. — P. 881–891.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ПОШУКИ СУТНОСТІ ЧАСУ (огляд уявлень від античних до сучасних)	7
1.1. Античні думки	7
1.2. Час у класичній механіці	8
1.2.1. Час і простір	10
1.2.2. Час і рух	11
1.3. Час у теорії відносності. Світова лінія	12
1.4. Час у квантовій теорії	14
1.5. Хвилі часу? Атоми часу?	15
1.6. Стріла часу? Парадокс часу	16
1.7. Машина часу (дещо з цікавих міркувань)	21
1.7.1. Найпростіші міркування	21
1.7.2. Чи можлива подорож у часі?	21
1.8. Питання є, а відповідей немає (плин часу, його незворотність)	24
2. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ	26
2.1. Астрономічні системи лічби часу	27
2.1.1. Зоряний час	27
2.1.2. Сонячний час	29
2.1.3. Тропічний і зоряний рік	31
2.1.4. Розмаїття астрономічних визначень місяця та року	38
2.1.5. Поясний час. Літній час. Декретний час. Лінія зміни дат	42
2.1.6. Астрономічний та історичний відлік років	47
2.1.7. Календарні системи	49
2.1.8. Ери. Епохи	61
2.2. Фізична система лічби часу	65
3. ШКАЛИ ЧАСУ	68
3.1. Хронологія введення шкал часу	69
3.2. Шкали часу класичної механіки	71
3.2.1. Шкала всесвітнього часу UT	71
3.2.2. Шкала ефемеридного часу ET	82
3.2.3. Шкала міжнародного атомного часу TAI	85
3.2.4. Шкала всесвітнього координованого часу UTC	89
3.2.5. Шкали GPS-час і ГЛОНАСС-час	92
3.3. Релятивістські (динамічні) шкали часу	95
3.3.1. Рекомендації МАС щодо введення нових систем відліку	95
3.3.2. Координатний і власний час	98
3.3.3. Ієрархія релятивістських шкал часу	100
3.3.4. Зв'язок між релятивістськими шкалами часу	103

3.3.5. Чому так багато шкал часу?	106
3.3.6. Стандартна епоха J2000.0	107
3.4. Синхронізація часу	108
3.5. Пульсарний час	113
4. СЛУЖБИ ЧАСУ	117
4.1. Міжнародне бюро часу	117
4.2. Міжнародна служба обертання Землі	119
4.2.1. Методи визначення часу	119
4.2.2. Сучасний склад Міжнародної служби обертання Землі	123
4.3. Секція часу Міжнародного бюро мір і ваг	124
4.4. Національні служби часу	125
4.4.1. Національна служба орієнтації Землі США (NEOS)	125
4.4.2. Державна система єдиного часу і еталонних частот (ДСЄЧЕЧ) Російської Федерації	126
4.4.3. Національні атомні шкали України TA(UA) і UTC(UA)	127
5. ГОДИННИКОВИЙ ЛІТОПИС (відтворення і збереження часу)	128
5.1. Стародавні годинники	129
5.1.1. Сонячні годинники	129
5.1.2. Пісочні годинники	132
5.1.3. Вогневі годинники	132
5.1.4. Водяні годинники	133
5.2. Механічні годинники	134
5.3. Рівномірні години. Чому їх 24, а не 100?	137
5.4. Новітні механізми	137
5.5. Хронометри та проблема визначення довготи місця	138
5.6. Нова годинникова ера	139
5.7. Кварцові годинники	140
5.8. Високоточні годинники	141
5.8.1. Атомні стандарти частоти	141
5.8.2. Атомні годинники	143
5.8.3. Порівняння нестабільності високоточних годинників	144
5.9. Чи обмежена точність годинників?	146
5.10. Годинники у космосі	148
6. АСПЕКТИ ЗМІН ВСЕСВІТНЬОГО ЧАСУ	150
6.1. Геофізичні аспекти	150
6.2. Космічні аспекти	155
СЛОВНИЧОК АСТРОНОМІЧНИХ ТЕРМІНІВ	158
ДОДАТКИ	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	171

Науково-популярне видання

КОРСУНЬ Алла Олексіївна

ВИМІР ЧАСУ

ВІД ДАВНИХ-ДАВНІХ ДО СУЧАСНОСТІ

Редактор *П. Ф. Боброва*

Художнє оформлення *С. Жиборовського*

Художній редактор *С. В. Анненков*

Технічний редактор *К. Є. Ставрова*

Комп'ютерна верстка *А. Р. Романовської*

Коректор *Ю. В. Щербак*

Підп. до друку 23.04.2009. Формат 70×90^{1/16}.
Папір офсет. Друк офсет. Гарнітура SchoolBookC.
Ум. друк. арк. 12,87. Обл.-вид. арк. 13,8.
Наклад 500 пр. Зам. №

Видавництво "Техніка".

04053 Київ, вул. Обсерваторна, 25.

Тел.: (044) 272-10-80. Факс: (044) 272-10-88.

E-mail: technika.pub@gmail.com

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру України
суб'єктів видавничої справи ДК № 357 від 12.03.2001.

Віддруковано на Білоцерківській книжковій фабриці.

09117 Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру України
суб'єктів видавничої справи ДК № 567 від 14.08.2001.