

Astronomický základ gregoriánskeho kalendára a juliánskeho dátumu

Doc. Ing. Ladislav Husár, PhD.,
Katedra geodetických základov
Stavebnej fakulty STU, Bratislava

Abstrakt

V družicovej geodézii a v astronómii zohráva kľúčovú úlohu čas, pretože polohové merania kozmických objektov sú realizované z rotujúcej Zeme alebo medzi pohyblivými kozmickými objektmi navzájom. Pri praktických výpočtoch vystupuje ako časový argument najčastejšie juliánsky dátum, ktorý uľahčuje chronologické zatriedenie udalostí, najmä ak sú časovo odľahlé. Pri spracovaní a analýze meraní za kratšie časové obdobie využívame ako chronologickú pomôcku gregoriánsky kalendár, ktorý používame i v bežnom živote. Príspevok popisuje astronomický základ a príčiny vzniku oboch časových jednotiek, výhody ich použitia a praktické dôsledky.

Astronomical Basis of Gregorian Calendar and Julian Date

Abstract

Time plays a key role in satellite geodesy and astronomy, because the spatial measurements of space objects are performed either from the rotating Earth or between mutually moving cosmic objects. The Julian date is the most common time argument in practical calculations, which facilitates the chronological classification of events, especially when they are time-delayed. When processing and analysing measurements over a shorter time period, we use the Gregorian calendar as a chronological tool, which we also use in everyday life. The paper describes the astronomical basis and causes of origin of both time units, the benefits of their use and some practical consequences.

Keywords: tropical year, calendar year, Julian period

1. Úvod

V súčasnosti prevažná časť sveta používa v civilnom živote **gregoriánsky kalendár**, ako vhodný prostriedok na orientáciu a záznam udalostí v čase v rámci roka. V astronómii, ktorá skúma chronológiu udalostí priestorovo i časovo veľmi odľahlých, plní tento cieľ **juliánsky dátum**. Obe tieto chronologické pomôcky sa používajú všade tam, kde sú predmetom záujmu udalosti a javy prebiehajúce v čase. Do tejto oblasti patrí bezpochyby i geodézia, ktorá, tak ako v minulosti i dnes, využíva mnohé meračské technológie založené na meraní presných časových okamihov alebo intervalov a súčasne pri transformácii medzi nebeskými a terestrickými systémami vyžaduje znalosť juliánskeho dátumu, ktorý podstatne urýchľuje výpočet v čase naakumulovaných polohových zmien meraných kozmických objektov. V texte sa stručne venujeme príčinám vzniku oboch týchto chronologických pomôcok a výhodám, ktoré priniesli.

2. Gregoriánsky kalendár

Gregoriánsky kalendár vstúpil do platnosti v roku 1582, kedy ho zaviedol pápež Gregor XIII., čím ukončil používanie dovtedy platného juliánskeho kalendára. Čo vyvolalo nevyhnutnú reformu kalendára? Roku 325 zvolal cisár Konštantín I. do Nicei (historické mesto v Anatólii v dnešnom Turecku, grécky *Nikaia* a latinsky *Nicaea*) veľké zhromaždenie biskupov cirkvi, ktoré vošlo neskôr do histórie ako Prvý nicejský koncil. Tu bolo účastníkmi koncilu prijaté pravidlo o stanovení termínu najväčšieho kresťanského sviatku Veľkej noci, ktorý sa mal odvtedy sláviť v celej

cirkvi jednotne v prvú nedeľu po prvom jarnom splne, ktorý nasledoval po jarnej rovnodennosti.

Toto pravidlo zväzuje okamih jarnej rovnodennosti, kedy Slnko prechádza jarným bodom (priesečníkom rovníka s ekliptikou), a fázu Mesiaca – spln s dátumom Veľkej noci, ktorý sa tak stal závislým od astronómie. Pozitívny význam tejto dohody spočívajúci v zjednotení dátumu Veľkej noci pre celý vtedajší kresťanský svet a v jej zobjektívnení väzbou na astronomický úkaz platný pre celú Zem, priniesol so sebou aj „negatívnu daň“ v podobe nezohody astronomického a kalendárneho roka, ktorej dôsledok sa prejavil až oveľa neskôr. Podstata spočívala v rozdielnej dĺžke astronomického roka, presnejšie tropického roka a juliánskeho roka platného vo vtedy používanom juliánskom kalendári. Tropický rok je doba, ktorá ubehne medzi dvoma po sebe nasledujúcimi prechodmi Slnka jarným bodom, pričom tento zdanlivý pohyb Slnka je odrazom obežného pohybu Zeme okolo Slnka po ekliptike. Jeho dĺžka závisí od dvoch pohybov: obežného pohybu Zeme a precesného pohybu jarného bodu, ktorého smer je opačný ako pohyb Zeme. Obežnú rýchlosť Zeme charakterizuje jeden z dráhových elementov planét stredný denný pohyb $n_{\odot} = 3548,19280''\text{d}^{-1}$ a podobne rýchlosť jarného bodu po ekliptike ovplyvnená precesiou v dĺžke predstavuje dennú zmenu $n_{\gamma} = 0,13769''\text{d}^{-1}$. Slnko a jarný bod sa pohybujú proti sebe týmito uhlovými rýchlosťami za deň, takže tropický rok uplynie, ak spoločne opíšu plný uhol. Dĺžku tropického roka určíme podielom plného uhla súčtom oboch stredných denných pohybov: $r_{tr} = (360 \times 3600)'' / (n_{\odot} + n_{\gamma}) = 365,2422\text{d}$. Naproti tomu priemerná dĺžka juliánskeho roka plynie zo štvorročného cyklu (troch bežných a jedného priestupného roka) juliánskeho kalendára $r_j = (3 \times 365 + 366) / 4 = 365,25\text{d}$. Rozdiel v trvaní oboch rokov $r_j - r_{tr} = 0,0078\text{d} = 11\text{ min a }14\text{ s}$ je zdanlivo zanedbateľný,

ale je len otázkou času, kedy dosiahne nežiaduce hodnoty. Tak sa stalo, že od Nicejského koncilu po šesťnásť storočie narástol na hodnotu $(1582 - 325) \times 0,0078 = 9,8$ d, čiže na takmer 10 dní! V roku 1582 pripadla jará rovnodennosť na 11. marec, namiesto 21. marca v roku 325. Nesúlad dlhšieho juliánskeho roka s kratším tropickým rokom sa prejavoval tým, že okamih jarnej rovnodennosti (daný jednoznačne polohou Slnka na jeho zdanlivej ročnej dráhe medzi hviezdami – jeho prechodom z južnej na severnú časť sféry) udávajúci začiatok astronomickej jari sa posúval k začiatku juliánskeho roka. To malo za následok, že *skutočná* astronomická rovnodennosť (daná postavením Slnka) sa posúvala stále viac od letného obdobia a spolu s ňou aj dátum Veľkonočnej nedele. To začínalo nepriaznivo kolidovať s poľnými prácami, čo narúšalo život bežných ľudí. Preto pápež Gregor XIII. Pristúpil k spomínanej reforme.

Striedanie ročných období v stredných zemepisných šírkach závisí od postavenia Zeme voči Slnku, hlavne od uhla dopadu slnečných lúčov na zemský povrch (rozhodujúca nie je vzdialenosť Slnka od Zeme ale sklon ekliptiky $\varepsilon = 23,5^\circ$). V deň jarnej rovnodennosti slnečné lúče dopadajú kolmo k rovine prechádzajúcej rotačnou osou Zeme a osou ekliptiky (tzv. kolúrom solsticiálnym), preto osvetľujú všetky rovnobežky rovnako dlho 12 hodín. Preto sa tento významný deň 21. (resp. 20.) marec nazýva rovnodennosť. Platí pre všetky miesta na Zemi bez ohľadu na ich zemepisnú šírku. Napr. v našich šírkach ($\varphi \approx 48^\circ$) vtedy Slnko dosahuje napoludnie v okamihu hornej kulminácie výšku nad horizontom $h = 90 - \varphi \approx 42^\circ$. Ale v letnom slnovrate je to až $h = 90 - \varphi + \varepsilon \approx 65,5^\circ$, kým v čase zimného slnovratu len $h = 90 - \varphi - \varepsilon \approx 18,5^\circ$. Tomu zodpovedá rozdielna dĺžka dní v lete a v zime.

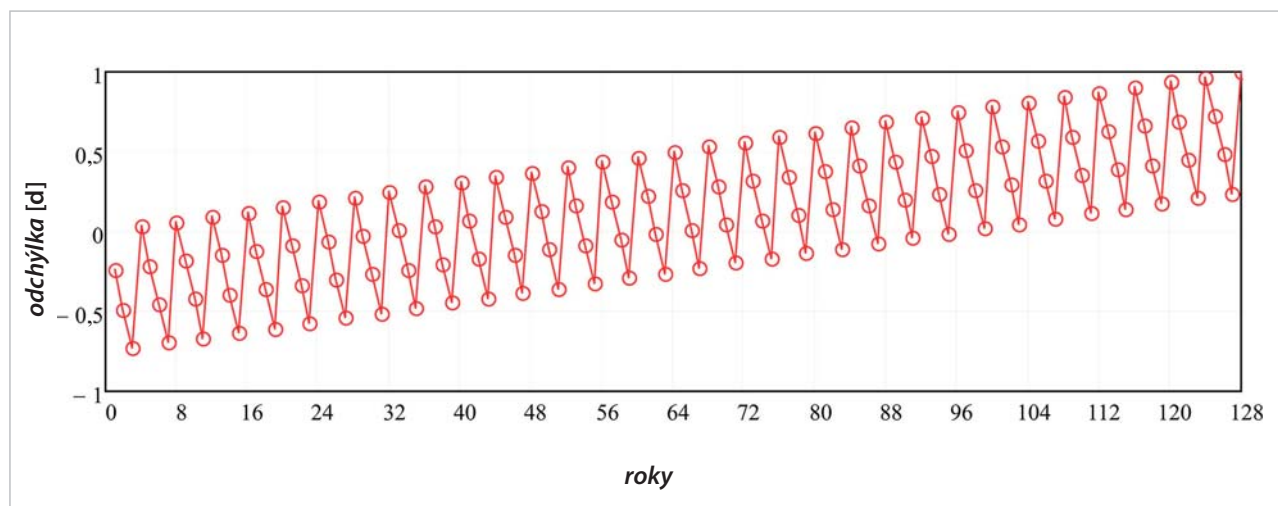
Problém kalendára spočíva v tom, že na rozdiel od **tropického roka**, ktorý **netrvá celý počet dní** a po ktorom sa postavenia Zeme a Slnka začínajú opakovať spolu s ročnými obdobiami, má akýkoľvek **kalendárny rok celý počet dní**. Ak teda priradíme úkazom na oblohe súvisiacim s tropickým rokom umelo vytvorený kalendárny rok, prejaví sa to nesúlodom kalendára s ročnými obdobiami a s bežným praktickým životom. Juliánsky kalendár bol riešením na niekoľko storočí. Neskôr, keď bol spomenutý nesúlad badateľný i v bežnom živote a začal narúšať jeho chod, stala sa jeho reforma nevyhnutná.

Pápež Gregor XIII. zaviedol gregoriánsky kalendár buľou *Inter gravissimas*¹⁾ 24. februára 1582 s cieľom preniesť jarú rovnodennosť späť na 21. marec a stanoviť pravidlo, ktoré by lepšie zosúladiť nový gregoriánsky rok s tropickým rokom. Prvý cieľ dosiahol tým, že pridal do kalendára fiktívnych 10 dní tak, že po štvrtku, ktorým bol 4. október, nasledoval piatok 15. október (namiesto 5. októbra). Tým odstránil zaostávanie dovtedy používaného juliánskeho roka za astronómickým tropickým rokom. Novú dĺžku gregoriánskeho roka určilo pravidlo zachovávajúce 4-ročný cyklus priestupných rokov s výnimkou, že z celých storočí budú priestupné len tie, ktoré sú deliteľné číslom 400. Aká je priemerná dĺžka gregoriánskeho roka r_g daná týmto pravidlom? Vyplýva z 400-ročného obdobia a je daná výrazom: $r_g = (400 \times 365 + 25 \times 4 - 3) / 400 = 365 + 25 / 100 - 0,0075 = 365,2425$ d. Zohľadnili sme 25 priestupných rokov za storočie podľa juliánskeho pravidla a odpočítali sme 3 dni podľa nového pravidla, podľa ktorého sú roky 100, 200 a 300 nepriestupné. Odchýlka gregoriánskeho roka od tropického roka sa tým podstatne zredukovala – iba na hodnotu $r_g - r_t = 0,0003$ d, ktorá narastie na jeden deň za $(1 / 0,0003) = 3333$ rokov, teda až v roku 4915 (1582 + 3333).

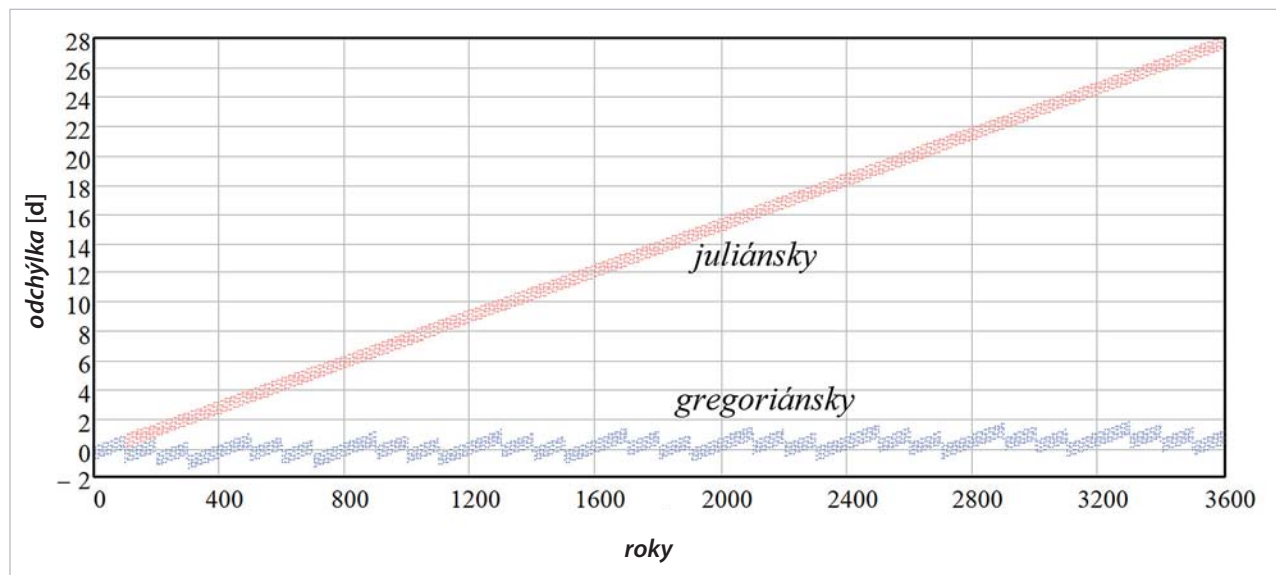
V skutočnosti však táto veľmi dobrá zhoda neznamená, že odchýlky prevyšujúce 1 deň nenastanú skôr. Príčina spočíva v tom, že neporovnávame priemernú dĺžku gregoriánskeho roka s tropickým rokom, ale vždy dĺžku bežného (365 d) alebo priestupného (366 d) kalendárneho roka, ktoré sú tvorené celým počtom dní. Kým v juliánskom kalendári prvé tri roky v 4-ročnom cykle narastala odchýlka na jeden až trojnásobok zlomku dňa, o ktorý bol tropický rok dlhší od juliánskeho, teda o $-0,2422$ d (-5 h 49 min), $-0,4844$ d (-11 h 38 min), $-0,7266$ d (-17 h 26 min), a v štvrtom roku klesla vloženie priestupného roka na hodnotu $(3 \times 365 + 366) - 4 \times 365,2422 = 0,0312$ d ($+45$ min). To predstavuje za 32 4-ročných cyklov (128 rokov) práve 1 deň ($0,0312 \times 32$) (obr. 1). Tieto krátkodobé rozdiely prevyšovali celkový dlhodobý ročný trend 0,0078 d.

Podobná situácia platí aj v gregoriánskom kalendári, kde sú odchýlky od tropického roka vznikajúce naakumulovaním bežných a priestupných rokov pravdaže odlišné, ale opäť presahujúce celkový trend 0,0003 d za rok (obr. 2).

1) <http://www.bluewaterarts.com/calendar/NewInterGravissimas.htm>.



Obr. 1 Narastanie odchýlky „juliánsky – tropický rok“ v čase



Obr. 2 Porovnanie nárastu odchýlok „kalendárny – tropický rok“ v juliánskom a gregoriánskom kalendári za dlhé obdobie

V okolí nepriestupných storočí klesá odchýlka až o 7 násobok 0,2422 d, čo zvyšuje jej zápornú hodnotu prevyšujúcu 1 deň, konkrétne na extrémne minimum $-1,3866$ d v roku 303. Naopak okolo priestupných storočí sa počas 200 rokov zachováva 4-ročný cyklus z juliánskeho kalendára, čo vedie k nárastu odchýlky ku kladným hodnotám, konkrétne maximum je $+1,7088$ d v roku 3296 (obr. 2). Z obr. 2 je zrejмый prínos gregoriánskeho kalendára, ktorý sa od tropického roka z dlhodobého hľadiska prakticky neodchyľuje (dokumentuje to jeho takmer vodorovný trend), na rozdiel od juliánskeho kalendára, ktorého vzdalovanie je z obr. 2 zrejмый. Spomínané krátkodobé rozdiely presahujúce 1 deň sú pre bežný život nepodstatné a sú len *povinnou daňou* za dosiahnutý priaznivý efekt nového kalendára. Záverom možno konštatovať, že budúcnosť juliánskeho kalendára je diskutabilná vzhľadom na jeho neustále vzdalovanie sa od reálnej situácie na oblohe determinovanej tropickým rokom. Dnes sa „juliánske Vianoce“ oneskorujú oproti bežným o 13 dní, ale v roku 3600 to bude 28 dní (obr. 2) a napr. v roku 3984 ($3600 + 3 \times 128$) to bude presne o mesiac neskôr, čiže až 24. januára?!

3. Juliánsky dátum

Juliánsky dátum²⁾ (*JD*) navrhol francúzsky humanista a matematik J. J. Scaliger (1540-1609) ako vhodný prostriedok na sledovanie a usporadúvanie astronomických javov v ich časovej postupnosti. S návrhom prišiel približne v dobe vzniku gregoriánskeho kalendára v diele *De emendatione temporum* (1583) a v dodatku *Thesaurus temporum* (1606) reagujúcom na reformu kalendára. Viedla ho k tomu snaha po zjednodušení astronomických výpočtov.

Na rozdiel od potrieb bežného života, pre ktoré sa zaužívaný rytmus dní, týždňov, mesiacov a rokov osvedčil, v astronómii bola odlišná situácia, lebo skúma udalosti a javy, vzájomne extrémne vzdialené nielen v priestore ale

aj v čase, preto vyžadovala záznamy na podstatne dlhšej neprerušovanej časovej osi, ako je jeden rok. Zvolil na to vhodný prostriedok – *JD*, ktorý používa jedinou jednotku deň a beh času popisuje nárastom počtu dní v rámci tzv. juliánskej periódy dlhej 7 980 rokov. Platí v nej juliánsky systém počítania rokov, ale používa iba jedinou časovú jednotku deň, teda ju tvorí 1995 4-ročných cyklov, čo zodpovedá rozsahu možných hodnôt *JD* (vyjadrovaných v dňoch) od 0 až po 2 914 695 d, pričom horná hranica zodpovedá poslednému dňu periódy:

$$JD_{\max} = 2\,914\,695 \text{ d} = 365,25 \times 7\,980 = (3 \times 365 + 366) \times 1995.$$

Na rozdiel od bežného kalendára, začínajú dni v *JD* na poludnie, a nie o polnoci. Znovu je príčina v astronómii, lebo pre astronómov v minulosti bolo výhodné, aby nočné merania pripadali na jeden dátum, a nie na rozhranie dvoch dní³⁾. Ako vznikol *JD*, kde je jeho začiatok a čo je podstatou juliánskej periódy?

Scaliger zvolil za základ dlhú juliánsku periódu 7 980 rokov, ktorú dostal vynásobením troch známych niekoľkoročných cyklov $28 \times 19 \times 15$. Prvý je doba, po ktorej pripadnú rovnaké dni v týždni na rovnaké dátumy juliánskeho roka. Pretože po každom bežnom roku s 365 dňami sa posunú dni týždňa v kalendári o jeden deň (rok pokryje 52 celých 7-dňových týždňov + 1 deň), situácia by sa zopakovala po 7-mich rokoch. Cyklus opakovania sa spomalí každý štvrtý priestupný rok, ktorý má 366 dní, preto sa celý cyklus predĺži na $7 \times 4 = 28$ rokov. Druhé číslo 19 je Metonov cyklus (objavený Metonom aténskym v 5. st. p. n. l.), ktorý predstavuje veľmi dobrú zhodu 19 tropických rokov s 235 lunáciami (lunácia alebo synodický mesiac je doba 29,53009 dní, za ktorú sa vystriedajú všetky fázy Mesiaca). Uvedené násobky cyklov sa líšia o veľmi malú hodnotu $235 \times 29,53059 - 19 \times 365,2422 = 0,08685 \text{ d} \approx 2 \text{ h}$. Posledné číslo juliánskej periódy 15 je indikcia, cyklus 15 rokov zaužívaný v rímskom daňovom systéme. Zaujímavé bolo chronologické umiestnenie tejto periódy alebo stanovenie jej začiatku.

2) Pomenoval ho po svojom otcovi (Julius Caesar Scaliger). Podobnosť s menom rímskeho cisára Gaius Julius Caesar, podľa ktorého je pomenovaný juliánsky kalendár, spôsobuje často zámenu pojmov juliánsky kalendár a juliánsky dátum.

3) Až po roku 1925 sa dosiahlo zjednotenie v počítaní dní v astronómii a v morskej navigácii s civilnými dňami [1].

Poradové číslo roka v 28 ročnom cykle sa nazýva slnečný cyklus a v Metonovom cykle zlaté číslo. Prvý rok nášho letopočtu bol 9. rokom slnečného cyklu, 1. rokom Metonovho cyklu a 3. rokom indikcie, takže v ňom platilo súčasne trojčísle 9-1-3. Scaliger zvolil za začiatok *JD* rok, kedy by súčasne začínali všetky cykly tvoriace juliánsku periódu, teda by v ňom platilo trojčísle 1-1-1. Každé z trojice čísel je dané desatinnou časťou podielu „rok/cyklus“, takže konkrétne: $4713 / 28 = 168 + \frac{9}{28}$, $4713 / 19 = 248 + \frac{1}{19}$ a $4713 / 15 = 314 + \frac{3}{15}$.

My sme akoby situáciu otočili a trojice čísel prislúchajúce rokom vymenili. Hľadali sme rok od 1. roka našej éry s „1-1-1“ po rok s trojicou „9-1-3“, ktorý pripadol na rok 4713 ale pred naším letopočtom. Táto výmena je korektná, lebo prvému roku pred naším letopočtom sme prisúdili číslo 1: 1. r. p. n. l. Pri algebrickom počítaní rokov do minulosti nasleduje po 1. r. n. l., nultý rok, potom -1. rok ... atď. až po posledný rok -4712, ktorý je iným označením začiatku *JD* (zohľadňujúcim záporné čísla rokov). V súčasnosti by sme našli rok 4713 p. n. l. jednoduchým príkazom, ktorý by hľadal poradové číslo riadku matice (tvorenej tromi stĺpcami, z ktorých by v prvom rástli roky vždy v medziach 1-28, v druhom od 1 po 19 a v treťom 1-15) so 7 980 riadkami, ktorý by mal skladbu 9-1-3, kde by sme použili uvedený poznatok o význame desatinnej časti výrazu „rok/cyklus“.

Použitie *JD* dokumentujeme na odvodení jeho hodnôt pre dve epochy – pre začiatok nášho letopočtu a pre súčasnú základnú epochu používanú v astronómii, ktorou je 1. 1. 2000.

Aby sme sa vyhli zlomkom dňa, je výhodné počítať dni *JD* od poludnia začiatku juliánskej periódy po poludnie 0-tého dňa cieľového roka. Od začiatku juliánskej periódy po začiatok našej éry ubehlo 4713 juliánskych rokov. Ak pokračujeme do minulosti v kontinuálnom počítaní juliánskych rokov, tak priestupný rok padne na prvý rok p. n. l. a rovnako aj na rok 4713 p. n. l. Od nášho letopočtu po rok 4712 p. n. l. vrátane ubehlo 1178 4-ročných cyklov s každým 4. rokom priestupným, teda s dĺžkou cyklu 1461 dní ($= 3 \times 365 + 366$). Pripočítať treba priestupný rok 4713 p. n. l. zmenšený o 1 deň. Položku 1d tvorí súčet dopoludnia v tomto prvom roku *JD*, lebo začína 1. januára o 12:00 h (a nie 0-tého januára), a popoludnia posledného roka nášho letopočtu, lebo rok končí napoludnie 31. decembra deň pred prvým januárom nášho letopočtu, čiže 0-tého januára. Začiatku nášho letopočtu tak zodpovedá *JD*:

$$JD_{0, \text{jan}1, \text{r.n.l.}} = 1178 \times 1461 + (366 - 1) = 1\,721\,423 \text{ d.}$$

K číslu *JD* epochy 0. január roku 2000 o 12:00 h dospejeme podobným postupom. 2000 rokov našej éry by pokrývalo 500 4-ročných cyklov, ale keďže rok 2000 do toho nepatrí, je ich len 499. Posledný 500-tý cyklus sa zredukoval na 3 bežné roky, ktoré treba pripočítať. Súčasne treba odpočítať 3 dni z nepriestupných storočí 1700, 1800 a 1900 a 10 dní, ktoré boli umelo pridané v roku 1582. Tak *JD* súčasnej základnej epochy označovaný JD_0 odvodíme ako:

$$JD_{0, \text{jan}, 12\text{h}, 2000, \text{r.n.l.}} = 1\,721\,423 + 499 \times 1461 + 3 \times 365 - 3 - 10 = 2\,451\,544 \text{ d.}$$

Vo veľkej väčšine prípadov vystupuje pri výpočte efemeríd telies alebo epoch významných astronomických javov časový argument *T* uvádzaný v juliánskych storočiach (pozostávajúcich z 36 525 dní) počítaný od základnej epochy JD_0 . Na jeho vyjadrenie $T = (JD - JD_0) / 36\,525$ stačí použiť

požadovaný *JD* k hľadanému dátumu. Z viacerých spôsobov transformácie kalendárneho dátumu na *JD* uvádzam postup vhodný aj na softvérové použitie [2]:

$$JD = 1720994,5 + 2 - \text{INT}(y' / 100) + \text{INT}[\text{INT}(y' / 100) / 4] + \text{INT}(365,25y') + \text{INT}[30,6001(m' + 1)] + d,$$

v ktorom je dátum v tvare *d* – deň, *m* – mesiac, *y* – rok, INT znamená celočíselnú časť výrazu v zátvorke a čiarkované symboly sú dané podmienkami: ak $m \leq 2 \rightarrow (y' = y - 1, m' = m + 1)$ ak $m > 2 \rightarrow y' = y, m' = m$. *JD* sa používa v astronomických ročenkách dodnes aj s prípadnými tabuľkami jeho vypočítaných hodnôt k dátumom kalendárnych rokov. Rovnako nachádza použitie v družicovej geodézii pri výpočte presných polôh družíc, ale v pozmenenej podobe tzv. modifikovaného juliánskeho dátumu $MJD = JD - 2\,400\,000,5$, pričom číslo 2 400 000,5 zodpovedá začiatku *MJD*, ktorým je 17. november 1858 o 0h svetového času UT. Túto redukciu si vynútili zvýšené požiadavky na presnosť *JD*, ktorý pri doplnení aj o potrebnú zlomkovú časť dňa pozostával z neúnosne veľkého počtu čífer, čo sťažovalo presnosť výpočtových operácií.

Podakovanie

Článok vznikol s podporou projektu ITMS 26220220108: Národné centrum diagnostikovania deformácií zemského povrchu na území Slovenska.

LITERATÚRA:

- [1] CHAUZ, D.: Grinvičskoje vremja i otkrytije dolgoty, Moskva, MIR, 1983, 240 s. ruský preklad HOWSE, D.: Greenwich Time and the discovery of the longitude, Oxford – New York – Toronto – Melbourne, Oxford University Press, 1980.
- [2] BARANOV, V. N. a kol.: Kosmičeskaja geodezija, Moskva, NEDRA, 1986, 408 s.

Do redakcie došlo: 24. 6. 2019

Lektoroval:
prof. Ing. Jan Kostelecký, DrSc.,
VÚGTK, v. v. i.