

„ZPLOŠTĚNÍ ZEMĚ“ - ČERNÝ SEŠIT PROFESORA BUCHARA

Georgij Karský

VÚGTK - Geodetická observatoř Pecný

251 65 Ondřejov 244

Abstrakt:

Podle zachovaného pracovního sešitu [1] je sledován myšlenkový postup a konkrétní výpočty, kterými profesor Buchar odvodil z pohybu umělých družic svá první (i první ve světě) publikovaná určení dynamického zploštění Země.

1. Úvodem o smyslu návratu k počátkům

Při stém výročí narození profesora RNDr. Emila Buchara, DrSc., člena-korespondenta ČSAV (1901-1979), může být zajímavé nahlédnout do geneze jedné z jeho nejvýznamnějších prací - určení zploštění Země z pozorování prvních umělých družic. Zachovaný profesorův pracovní sešit [1] ukazuje první počátky Bucharových prací v oblasti dynamické kosmické geodézie, zahájené nejpozději ihned po vypuštění prvního sovětského sputniku v rámci Mezinárodního geofyzikálního roku [2] (podle toho, že mezi odvozováním jsou zapsány jedny z prvních zveřejněných elementů této družice pro epochu 1957 Oct. 9,40466 UT).

Jsou to na počátku zejména úvahy o přenesení teorie a praxe nebeské mechaniky do prostoru blízkého zemskému povrchu. Pomineme-li krajně přibližné metody výpočtů drah meteorů, neměla klasická nebeská mechanika v tomto prostoru dotud nic na práci. V sešitu jsou stopy zápasu s nízkou přesností prvních (většinou vizuálních) pozorování umělých družic Země (UDZ), s problematikou získání potřebných konstant, i se zpracováním relativně (tehdy) velkého množství dat pomocí mechanických počítačích strojů (je tam např. poznámka: „Stroj Triumphator dělá chyby, přepočítáno“).

Profesor Buchar byl první, kdo publikoval výsledky určení zploštění Země z pozorování pohybu UDZ ([3] až [5] a dále [6] až [8]). Myšlenka, že když nesféricnost Země ovlivňuje dráhu UDZ, je také možné z dráhy družice zpětně určit tvar Země, se v té době ovšem „vznášela ve vzduchu“ (tedy alespoň ve „vzduchu“ klasických astronomů) a zabývalo se jí více lidí - jak svědčí řada prvních publikací (viz [9] až [12]), o kterých bude ještě zmínka v závěru. Ale z článků vidíme až hotové postupy a výsledky. „Černý sešit“ ukazuje cestu od počátku, nápady, slepé uličky, úspěšné pokusy i omyly, až po publikovatelné závěry a číselné výsledky.

V tomto článku ovšem nemůžeme ukázat všechny detaily Černého sešitu a musíme se omezit jen na to nejdůležitější. A navíc nám hrozí jedno vážné nebezpečí. Dnes, kdy je kosmická geodézie běžnou technologií výzkumu i praxe, kdy množství dat, předkládaných počítačům, nebývá nepřekonatelnou překážkou uplatnění teoreticky hlubokých modelů zkoumaných objektů a jevů, jsme totiž někdy v pokušení projevovat při pohledu na práce pionýrů „zpětnou moudrost“, spojenou s nenáležitou kritičností až neúctou k jejich „nepatrným“ výsledkům. Buďme si toho vědomi a některé nedokonalosti, patrné spíše v pracovním sešitu [1] než v tištěných publikacích (jejichž rukopisy nebyly nalezeny), chápeme jen jako stopy překážek na Bucharově průkopnické cestě do nového světa věd o Zemi.

Bližší poznání toho, jak předchůdci dnešních vědeckých pracovníků se svými skrovnějšími prostředky dosahovali výsledků, znamenajících vědecký pokrok, může být poučením, povzbuzením i inspirací pro uplatnění vlastních znalostí, nápadů a vytrvalosti. V tom je asi i hlavní smysl studia dějin vědy obecně.

2. MGR a MGS (IGY and IGC) 1957 - 1959

Mezinárodní geofyzikální rok (MGR), původně plánovaný od poloviny roku 1957 do konce 1958 a posléze prodloužený do konce roku 1959 jako Mezinárodní geofyzikální spolupráce (MGS), byl prvním velkým mezinárodním („globálním“) vědeckým projektem po 2. světové válce. Měl komplexně zkoumat Zemi (včetně vod i ovzduší) z mnoha hledisek a měl již všechny základní znaky dnes běžných mezinárodních projektů: koordinaci měření a pozorování podle jednotných instrukcí, předávání aktuálních dat, pokynů a efemerid nejrychlejšími prostředky (tehdy dálkopisem), shromažďování a analýzu výsledků měření v určených centrech. Komunikace a dokumentace v rámci projektu International Geophysical Year and Cooperation (IGY and IGC) se vedla v

angličtině (z důvodu obecné srozumitelnosti a ne proto, že „je to tak vznešenější“, jak se vyjádřil jeden významný tuzemský činitel).

Tehdejší Československo se důstojně účastnilo projektu ve všech oblastech, kromě oceánografie a glaciologie [2]. Emil Buchar byl koordinátorem programu VIII. (Longitudes and Latitudes) a z tematiky, kterou se zde zabýváme, jsou v [2] citovány v rámci programu XI. (Rockets and Satellites - koordinátor Vladimír Guth) Bucharovy práce [3] - [6]. Celkem měl projekt 14 programů.

3. Bucharův pracovní sešit

Obyčejný školní sešit [1] v černých tvrdých deskách se štítkem byl asi původně určen k běžným přípravám profesora na přednášky a pod. Je nelinkovaný a nestránkovaný, záznamy, odvozování i výpočty jsou psány tužkou, pokud jsou datovány, tedy většinou bez uvedení letopočtu. Vlepeno je několik listů milimetrového papíru s grafy (např. závislosti $d\Omega/dt$ a $d\omega/dt$ na sklonu a velké poloose dráhy) a papíry čtverečkové s „hromadnými“ výpočty, zejména pro zpracování pozorování UDZ. Profesorovo úhledné písmo je všude dobře čitelné, číslice jednoznačné. Uvedeme nyní hlavní témata (nikoliv všechna) v sešitu zpracovaná - jsou to profesorem (a také a stejně zde) podtržené „názvy kapitol“.

Sešit začíná tématem Některé výpočty z precese a nutace, následuje Otáčivý moment z rozdílné přitažlivosti rušícího tělesa, Porovnání hvězdného chronometru s vteřinovými permanentními signály a Určení přibližných počátečních hodnot φ, z , podle všeho pro měření cirkumzenitálem.

Další „kapitolou“ začíná problematika pohybu UDZ; je ne zcela srozumitelně označena Resal 437 (patrně odvolávka na publikaci) a obsahuje (řekněme orientační) odvození vlivu rušivého potenciálu Země na dráhu družice. Je aplikováno na první Sputnik, jehož elementy jsou uvedeny bez udání pramene. Pak je 2. satelit - z výšky a periody dle ČTK z 4. XI. (1957) jsou odhadnuty údaje potřebné pro aplikaci vlivu rušivého potenciálu na tento objekt.

Zde je jediná početní chyba, kterou jsem v Černém sešitu našel (neuvažuji drobnosti zaokrouhlování). Pro výpočet rozměrů a tvaru dráhy družice užitím 3. Keplerova zákona převáděl Buchar dobu oběhu Měsíce $27^d 7^h 42^m$ na minuty a dostal 38923^m místo správných 39343^m . Prostě zapomněl vzít do počtu těch 7 hodin. Výsledkem bylo, že dostal velkou poloosu dráhy rovnou 7357 km místo 7305 km a excentricitu 0.0962 místo 0.1047, což bylo asi dost nápadné (oficiální údaj byl 0.105). Takové věci se mohly prof. Bucharovi přihodit jistě jen zcela výjimečně, patrně ve spěchu a vzrušení. Nemělo to na nic vliv a příští přepočít („Valouch, 39343.19^m“ - u odvození gravitační konstanty) je v sešitu dvakrát zaškrtnut kontrolní „fajfkou“.

Následující „kapitoly“ Potenciál elipsoidu (v bodu satelitu S) a Porucha v délce uzlu $d\Omega/dt$ již naznačují, kudy se budou ubírat další úvahy profesora Buchara. Odvození zabírá asi 4 strany a podle datování dráhových údajů o Sputniku 2, jimiž je zarámováno, je můžeme zařadit do **první dekády listopadu 1957. Od této doby patrně E. Buchar cílevědomě směřoval k určení svého zploštění Země**, i když to ještě není explicitně uvedeno. Klasickému astronomovi bylo i bez toho jasné, že odvodí-li se z pozorování sekulární porucha v některém z elementů dráhy, je možné zpětně určit zploštění rušícího tělesa (Země), které vstupuje do poruchové funkce. Kapitola Potenciál elipsoidu... obsahuje též rovnici pro poruchu v délce perigea $d\omega/dt$ a poznámku „**Směr pohybu perigea závisí jen na sklonu dráhy (a malou měrou na e). Je podivné, že nezávisí na zploštění elipsoidu a na velké poloose dráhy.**“ Vidíme, že i dobrý znalec nebeské mechaniky se mohl setkat s překvapením, když se začal zabývat pohybem těles v těsné blízkosti Země.

Následují výpočty a grafy sekulárních poruch v délce výstupního uzlu a perigea pro dráhy blízké kružnici, v závislosti na velké poloose a sklonu dráhy. Pak je „odskok“: Doba pádu planety na Slunce (když na začátku má nulovou rychlost) a opět údaje o amerických a sovětských družicích s odhady dráhových poruch.

Odvození sekulárních poruch v poloze perigea a uzlu, spolu s orientačními výpočty jejich možné velikosti, zřejmě vedlo autora k závěru, že jsou určitelné s přesností dostatečnou pro smysluplný výpočet zemského zploštění. Pokračuje proto úvahami a odvozováním k určování drah družic.

V Černém sešitu se další kapitola nazývá Dráha družice (meth. Laplace). Určení dráhy touto metodou je založeno na zápisu pohybových rovnic, kam se dosazují derivace souřadnic, získané postupným diferencováním geometrických vztahů pro topocentrické úhlové souřadnice (moderní způsob odvození metody má např. Escobal [13]). Po pokusných výpočtech Buchar konstatuje: „**Zdá se, že z řady poloh, měřených z jednoho místa zemského povrchu, nelze Laplace-ovou metodou určit s dostatečnou přesností vzdálenost družice ρ a tím**

mění elementy její dráhy.“ Tato kapitola obsahuje vloženou stat’ Gravitační konstanta k; o této konstantě v kontextu Bucharovy práce bude podrobněji pojednáno v oddílu 4.

Když to nešlo Laplaceovou metodou, použil profesor Buchar v následujících kapitolách svého sešitu čistě geometrické metody. V kapitole Odvození geocentrické polohy družice na základě měření z jednoho stanoviska předpokládá, že je kromě souřadnic stanoviska a tam pozorovaných topocentrických rovníkových souřadnic družice znám i její geocentrický průvodič (z přibližné efemeridy); hledají se pak geocentrické α , δ . Velká poloosa dráhy se určuje na základě pozorovaných dob oběhu, a spolu s nimi se aproximuje polynomem 2. stupně (připojen je ilustrační výpočet). Je tu poznámka, že jistý úhel „je vlastně nepravý azimut družice, měřený od severního bodu“, přičemž „nepravý zenit“ je průsečík geocentrického průvodiče stanice s nebeskou sférou. Po některých orientačních výpočtech je zde pak vložena kapitolka Určení polohy družice ze dvou míst, v níž na základě poučky o nulovém součtu průmětů stran dvou uzavřených polygonů, střed Země - stanoviště (1., 2.) - družice - střed Země, se ze známých směrů k družici, tj. topocentrických α , δ , odvozují její geocentrické rektascense, deklinace a vzdálenosti. Úvaha nepokračuje dále, ale následuje kapitola Určování Ω z jednotlivého měření, v níž se hledá délka výstupního uzlu Ω ze známých geocentrických α , δ a sklonu dráhy k rovníku i . Je k tomu užít ten nejjednodušší způsob - řešení pravoúhlého trojúhelníka na geocentrické sféře. Jeho vrcholy jsou výstupní uzel Ω (u něhož je měřen sklon dráhy i), geocentrická poloha družice a pata deklinační kružnice, jdoucí družicí, na rovníku; strany jsou $(\alpha-\Omega)$, δ a úhlová vzdálenost družice ve dráze od uzlu u , měřená na průmětu rovinné dráhy na sféru. - Poznamenejme, že všude, kde prof. Buchar s „nebeskomechanickým tradicionalismem“ mluví v Černém sešitu o „délce“ výstupního uzlu (a my to zde takto citujeme), jde, striktně vzato, o jeho rektascensi (jak je také uvedeno v Bucharových tištěných publikacích).

Kapitola Určování Ω z jednotlivého měření zabírá necelou stránku sešitu (řešení pravoúhlého trojúhelníka, byť sférického, je vskutku jednoduché); z toho většinu tvoří odhad vlivu chyb ve sklonu dráhy a v poloze družice na určení výstupního uzlu.. Dovojuje se, že vliv chyby ve sklonu (rovný 1,74dř) „je kladný pro $-90^\circ < (\alpha-\Omega) < 90^\circ$ a záporný pro $90^\circ < (\alpha-\Omega) < 270^\circ$, proto je možno sdružovat výsledky jen stejného druhu.“ Tato poznámka je až za tvrzením, že „při rozdílech odpadá“ a zde je vysvětlení, proč profesor použil jen některá pozorování ze všech, která měl k dispozici (jak vědí pamětníci). Pokud jde o chyby polohy družice, předpokládá se stejná chyba ϵ ve směru deklinační kružnice a ve směru rovnoběžky, jejichž společný vliv je odhadnut na 2,93 ϵ , tedy pro chyby v souřadnicích 1° by byla chyba v délce uzlu rovná asi 3° . Tyto odhady jsou provedeny pro $i=65,3^\circ$ a $\delta=49^\circ$ až 50° , tedy pro první sovětské družice, pozorované v našich končinách poblíž zenitu.

Za touto kapitolou již následují **konkrétní výpočty na pozorovacích datech z Československa**, nejprve orientační a pak již pro skutečné určení zploštění. Ty jsou na 11 stranách vlepeného čtverečkovaného papíru. Rozpis vzorců potvrzuje, že **skutečně byly použity postupy z kapitol Odvození geocentrické polohy družice na základě měření z jednoho stanoviska a Určování Ω z jednotlivého měření**. Tyto postupy předpokládají znalost některých dráhových parametrů, které profesor Buchar bral z vnějších zdrojů (viz oddíl 5), protože z „našich“ (československých) pozorování nebylo možné je všechny nezávisle určit. Tyto parametry se však mění dosti pomalu a plynule, takže je Buchar na základě různých údajů pro svou potřebu aproximoval vesměs kvadratickým polynomem ve funkci času. Mezi výpočty tedy nalézáme takto vyjádřené přibližné výrazy pro a , e , ω , jsou tu i Elementy 2. sovětské družice z cirkulářů, kde jsou pro různé epochy vedle a a e též tyto výrazy pro ω i Ω . K tomu je nutné poznamenat, že takto různě publikované dráhové elementy byly určeny především pro účely sledování družic, takže vlivy zploštění Země snad mohly být do nich přibližně zahrnuty, ale nikoliv z nich zkoumány.

Zpracování jednotlivých pozorování končí odvozením „délky“ výstupního uzlu Ω . Je k tomu uvedeno, že „stř. chyba jednoho určení Ω je průměrně $\pm 10'$.“ Výsledky pak byly sdruženy do 5 (později 7) normálních bodů, s nimi byla počítána aproximace Ω polynomem 2. (později 3.) stupně podle času. Z této aproximace pak vyjádřena derivace $d\Omega/dt$ a z jejích hodnot pro různé epochy počítáno zploštění Země. Použity byly různé vzorce a konstanty (gravitační), opakovaně ověřované a upravované. Je tu třeba Kontrola polohy Ω (cirkuláře SAO), ale i Poznámka o vlivu otáčející se atmosféry se závěrem, že „Unášení družice rotující atmosférou se projevuje neustálým zmenšováním sklonu. Poloha uzlu zůstává v průměru nezměněna.“

Zajímavé je pořadí (určení) výpočtů zploštění. Nejprve je „Přibližné určení K (pro článek v Ř.H.)“ - tj. pro populární časopis Říše hvězd [4], pak jsou (bez uvedení určení) vzorce a modifikované výpočty, které se objevují v Nature [3] - jakoby myšlenka poslat to do prestižního časopisu se objevila až dodatečně, následuje nové zpracování, které nalezneme ve Studiích [5], pak je Revise výpočtu pro článek v Nature a nakonec Pohyb uzlu na základě 7 přesných pozorování (k tomu viz oddíl 5).

Celkově je tato část sešitu poněkud nepřehledná. Proto o pracovních vzorcích, konstantách a dalších veličinách, které se zde opakovaně odvozují, modifikují a používají, pojednáme souhrnně v následujícím oddílu. Výsledky postupu, jehož logika byla naznačena v předcházejících odstavcích, uvedeme přehledně a ve vztahu k publikacím v oddílu 6.

4. Některé pracovní vzorce, symbolika, jednotky a konstanty

Černý sešit obsahuje téměř úplné odvození všech vztahů, potřebných pro určení zploštění Země z pohybu UDZ, zejména pro poruchy v dráhových elementech, spolu s potřebnými konstantami. To souvisí i s volbou měřicích jednotek, vhodných pro výpočty pohybu blízkozemských družic. Pro převod parametru K na dynamické zploštění použil Buchar několik vyjádření Clairautovy rovnice, jak původní nejjednodušší, tak i přesnější podle Jordana nebo Jeffreyse. Gravitační konstantu pro svou volbu jednotek odvozoval z pohybu Měsíce.

V této studii se neopovázíme hodnotit odvozené vzorce jinak, než konstatováním, že nejsou v rozporu s pozdějšími, úplnějšími odvozeními jiných autorů. Bucharem zvolené aproximace postačily pro zpracování pozorování v tom množství a přesnosti, které měl k dispozici. Spokojíme se zde pouze s dokumentováním obsahu Černého sešitu a s konstatováním, že některé zde probírané vztahy jsou v publikacích uvedeny bez bližšího určení původu, nebo jako „známé“.

4.1 Měřicí jednotky a rozměry veličin

Označíme si pro nás praktické základní měřicí jednotky obecnými symboly - pro délku L , pro hmotnost M a pro čas T ; pro doplňkovou jednotku rovinného úhlu uijeme Ψ . Pak můžeme rozměry jednotlivých veličin zapsat obecně jako součiny (kladných nebo záporných) mocnin těchto symbolů. Tak bude např. rozměr momentu setrvačnosti $[L^2M]$, veličiny K $[L^2]$, sekulární poruchy v délce uzlu $d\Omega/dt$ $[\Psi T^{-1}]$ atd.

Soustava jednotek SI, metr, kilogram, sekunda a další, určená pro většinu měření v pozemském makrosvětě, často nevyhovuje v prostoru „astronomickém“. V nebeské mechanice sluneční soustavy se tradičně používá soustava: astronomická jednotka délky (původně střední vzdálenost Země od Slunce), hmotnost Slunce a střední sluneční den. **Profesor Buchar** ve své práci použil jako **jednotku délky rovníkový poloměr Země, jako jednotku hmotnosti její hmotnost a jako jednotku času - minutu**, což vhodně odpovídalo způsobu, jak se udávaly rozměry dráhy a oběžné doby UDZ. Z toho vyplynuly některé důsledky, zejména pokud jde o velikost gravitační konstanty a o přepočty sekulárních poruch v elementech drah družic.

4.2 Veličina K („charakterizující zemský elipsoid“ [4])

V současné době se pro charakteristiku tvaru Země užívají Stokesovy parametry v podobě bezrozměrných veličin (viz např. [14]). Hlavní Stokesův zonální parametr 2. stupně a 0. řádu $J_2 \equiv J_2^{(0)}$ má podle [14] tvar

$$J_2^{(0)} = \left(\frac{(A+B)/2 - C}{Ma_0^2} \right),$$

kde A , B , C jsou momenty setrvačnosti vzhledem k souřadnicovým osám (C vzhledem k rotační ose), M je hmotnost Země a a_0 (zpravidla) velká poloosa zemského elipsoidu. Připomeneme si k tomu ještě definici momentu setrvačnosti, např. $C = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \int_m r^2 dm$, kde je m celé (zemské) těleso, m_i , dm konečný nebo diferenciální

hmotný prvek tělesa a r jeho vzdálenost od rotační osy.

Podle definice užití prof. Bucharem je součinitel dynamického zploštění (též tak je nazván v [4]) $K = (C - A)/m$, kde C a $A (=B)$ jsou momenty setrvačnosti Země vzhledem k zemské ose a k rovníkovému průměru, m - její hmotnost. Jak patrně, je také $K = -J_2^{(0)} \cdot a_0^2$. Veličina K vystupuje ve vyjádření sekulárních poruch v elementech dráhy družice a naopak může být z nich určena. Prof. Buchar odvodil z poruchové funkce především výrazy pro poruchu v délce uzlu $d\Omega/dt$ a z nich vzorce pro K v několika podobách, v sešitu ne vždy explicitně vypsanych. Jelikož kladl rovníkový poloměr Země rovný jedné, dostal K numericky blízké J_2 s opačným znaménkem (kladné).

V sešitu se nejprve objevuje „Přibližné určení K (pro článek v Ř.H.)“ v podobě (v originále bez vyznačení, že jde o „ K “)

$$4.2(1) \quad K = \frac{C - A}{m} = - \frac{2a^2}{3n(1 + 2e^2) \cos i} \left(\frac{d\Omega}{dt} \right) .$$

Zde je a velká poloosa dráhové elipsy (v jednotkách rovníkového poloměru Země), e excentricita dráhy, i její sklon a n střední úhlová rychlost.

Následuje vztah pro výpočet do Nature

$$4.2(2a) \quad K = - \frac{2a^{7/2}}{3k^0(1 + 2e^2) \cos i} \left(\frac{d\Omega}{dt} \right) ,$$

kde k^0 je gravitační konstanta; povšimněme si, že je udána *ve stupních*, což je jedna ze zvyklostí tradiční nebeské mechaniky. V tištěném článku [3] je tento vztah v podobě

$$4.2(2b) \quad \frac{d\Omega}{dt} = - \frac{3k(C - A)}{2ma^{7/2}} (1 + 2e^2) \cos i$$

a vyjádření k ve stupních není vyznačeno.

Listujeme-li sešitem dále, nalezneme nakonec pro článek do Studií [5] nový zápis potenciálu rotačního elipsoidu a poruchy uzlu (s odkazem na Tisserand I, str. 187, ve Studiích patrně jako Bucharova citace [6]). Pak je vzorec pro K , zde nepatrně upravený do podoby užitě v [5]:

$$4.2(3) \quad K = - \frac{2a^{7/2}}{3k^0(1 + 2e^2 + \frac{39}{8}e^4) \cos i} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{E}{a^2} \left(1 + \frac{11}{2}e^2 \right) \left(\sin^2 i - \frac{4}{7} \right) .$$

Ani zde není v tištěné podobě [5] vyjádření k ve stupních vyznačeno. Pro veličinu E , v sešitu označenou jako D , je tam

$$4.2(4a) \quad D = \frac{a'^4}{3} (11\alpha^2 - 10\alpha h) ,$$

s odkazem na „str. 556 (Handbuch d. G.)“, zatímco v tisku [5] je

$$4.2(4b) \quad E = \frac{1}{2}\alpha (7\alpha - 5h) ,$$

s Bucharovou citací [7] H. Jeffreys: The Earth. 3rd ed., Cambridge 1952. Přitom je a' rovníkový poloměr Země, α zploštění a h poměr odstředivé síly k gravitačnímu zrychlení na rovníku. V tisku [5] (nikoliv v sešitu) je

$$4.2(5) \quad h = \frac{w^2(1 - \alpha)}{k^2 m} ,$$

kde w je úhlová rychlost rotace Země (častěji značená jako ω). Ve Studiích [5] je pro K ještě malý opravný člen, uvedený jako vzorec (27), který jsem v sešitu nenalezl - patrně vznikl až v průběhu práce na rukopisu. Tento člen koriguje vliv zploštění Země na velkou poloosu a , určenou podle třetího Keplerova zákona z poměru oběžných dob Měsíce a družice. Má podobu

$$4.2(6) \quad dK = \frac{7K}{2a} da = \frac{7K^2}{4a^2} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) .$$

Popsaný přehled vývoje způsobu výpočtu veličiny K z pozorovaných sekulárních poruch v délce uzlu ukazuje snahu prof. Buchara po dosažení teoretické dokonalosti tohoto zkoumání - i když vlastní zpracování pozorování (výpočty poloh UDZ) se valně neměnilo.

4.3 Výpočet zploštění

Pro výpočet dynamického zploštění α z parametru K nalezneme v Černém sešitu za „Přibližným určením K (pro článek v Ř.H.)“ nejprve nejjednodušší výraz

$$4.3(1) \quad \alpha = \frac{a' w^2}{2\gamma_a} + \frac{3(C - A)}{2m} ,$$

kde w je úhlová rychlost rotace Země (v sešitu písmeno někdy vypadá jako ω), a' rovníkový poloměr Země a symbolem γ je patrně míněna normální tíže na rovníku (není specifikováno). Vzorec nebyl použit, neboť hned za ním je „Přesnější výpočet zploštění α (Jordan 310)“:

$$4.3(2a) \quad \alpha(1 + \alpha) = \frac{3K}{2} \left(1 + 2\alpha + \frac{h}{2} \right) + \frac{h}{2}(1 + h) ,$$

iterací později upravený do podoby

$$4.3(2b) \quad \alpha = \frac{3K}{2} + \frac{h}{2} + \frac{3}{4}(3K^2 + Kh - h^2) ,$$

užité v Nature [3]. V Říši hvězd [4] je uveden tvar

$$4.3(2c) \quad (1 - 3K)\alpha + \alpha^2 = \frac{3}{2}K + \frac{h}{2} \left(1 + \frac{3}{2}K - h \right) ,$$

který lze obdobně iterací převést na 4.3(2b). Konstanta h je u 4.3(2a) uvedena v podobě

$$4.3(2d) \quad h = \frac{a' w^2}{g_1} = \frac{\text{odstřed. síla na rovníku}}{\text{tíže na rovníku}} .$$

Pak se v sešitu náhle objevuje bez bližšího určení pramene nový výraz pro zploštění α . (V článku ve Studiích [5], kde je použit, je k němu Bucharova citace [7] H. Jeffreys: The Earth. 3rd ed., Cambridge 1952.) Výraz má podobu

$$4.3(3a) \quad \alpha = \frac{3}{2}K + \frac{1}{2}h + \alpha \left(\frac{1}{2}\alpha - \frac{1}{7}h \right) .$$

Takto je uveden v [5], zatímco v sešitu je zapsán s vynásobením závorky a opět iterací upraven na pracovní tvar

$$4.3(3b) \quad \alpha = \frac{3}{2}K + \frac{h}{2} + \frac{9}{8}K^2 + \frac{15}{28}Kh + \frac{3}{56}h^2 .$$

Poznamenejme, že v tomto místě Černého sešitu použil prof. Buchar místo symbolu h pro poměr odstředivého a tíhového zrychlení označení m (v tomto textu změněno).

4.4 Gravitační konstanta

V triviálním zápisu Newtonova gravitačního zákona s užitím jednotek SI

$$4.4(1) \quad F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

je síla F vyjádřena v jednotkách newton [$N \equiv \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], $m_{1,2}$ jsou hmotnosti [m], r je jejich vzdálenost [m], z čehož pro gravitační konstantu G plyne rozměr [$\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \equiv \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$].

Ani dnešní nejlepší doporučená hodnota $G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ (ISO Standard 1992, CODATA 1998) však nestačí pro astronomické výpočty - a dřívější tím spíše. V době, kdy prof. Buchar počítal své zploštění, se udávalo $(6.67 ; 6.672 \text{ nebo } 6.673) \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$, ale jeho, jako klasického astronoma, jistě ani nenapadlo, aby pro svou potřebu (pro své jednotky) převáděl tuto „fyzikální“ gravitační konstantu. Mohl by to snadno udělat podle vzorce

$$4.4(2) \quad G_N = G_P \frac{M_N T_N^2}{L_N^3} ,$$

kde G_P je gravitační konstanta v původní soustavě jednotek, veličiny s indexem N se týkají nové soustavy a to tak, že L , M a T jsou nové jednotky délky, hmotnosti a času vyjádřené počtem jednotek staré soustavy. Ale tento postup by jednak nedal dostatečnou přesnost, jednak, a to je důležitější, by neodpovídal předpokládanému pohybu po keplerovské elipse (oskulační dráze), jak pro družici, tak pro Měsíc, z jehož pohybu Buchar odvodil (řekněme) „efektivní“ gravitační konstantu pro pohyb kolem Země. Takový astronomický postup je naznačen např. v [15].

Astronomové totiž odedávna řeší problém gravitační konstanty „oklikou“. Zvolí např. pro výpočty ve sluneční soustavě tradiční soustavu jednotek (viz 4.1) - astronomická jednotka (a.j.), hmotnost Slunce, střední sluneční den - a s nimi, na základě pozorovaných pohybů těles (tj. měření jejich poloh) a příslušných pohybových teorií, odvodí gravitační konstantu. Tak byla odvozena tzv. Gaussova konstanta $k = 0.01720209895$. Když se později zpřesňovaly teorie pohybu i pozorování, bylo k ponecháno na této hodnotě (aby se nemusely stále přepočítávat různé tabulky apod) - a upravila se velká poloosa zemské dráhy (na 1.000018 a.j.). Je třeba ještě poznamenat, že v astronomickém formalismu odpovídá konstantě G z 4.4(1) veličina k^2 .

V Černém sešitu nalézáme několik odvození gravitační konstanty pro Bucharem použitou soustavu jednotek (viz 4.1). Počítá ji pomocí třetího Keplerova zákona (v přesném tvaru) ze střední vzdálenosti Měsíce a jeho siderické doby oběhu (v minutách), s hodnotami podle Valouchových tabulek. Označil ji jako k^2 , přičemž v závorce připojil „naše k “ (???). Nejprve dostal $k^2 = 0.00551510$, aneb $k = 0.074263719$. Je to ještě před prvními pokusnými výpočty a odvozováním geocentrické polohy družice. Další výpočet je u revize výpočtu pro Nature. Zde prof. Buchar použil vzorce

$$4.4(3) \quad k^2 = \frac{n^2 a'^3}{m + m'} F .$$

Zde je n střední denní pohyb Měsíce (ze siderické doby oběhu), a' vzdálenost Měsíce (velká poloosa dráhy) v jednotkách rovníkového poloměru Země, m a m' hmotnosti Země (=1) a Měsíce. Veličina F je korekční faktor podle Danjona [16]. Jeho hodnota je 1.002723 a zavádí se tím oprava z poruchového působení Slunce na pohyb Měsíce. Tak byla získána nová hodnota $k = 0.0743648$ (čemuž odpovídá $k^2 = 0.005530123$). Konstatuje se, že $(k \text{ nové}) / (k \text{ staré}) = 1.001362$ (proč takto?) a dále je zapsána převratná hodnota „0.998640 tím násobit“. Je to patrně užito při konečném zpracování článku pro Nature [3] a je uvedeno ve Studiích [5]. - Jistě je pouze půvabnou náhodou, že poslední („novou“) hodnotu k dostaneme zcela přesně, převedeme-li do Bucharovy soustavy jednotek s použitím 4.4(2) staříčkou gravitační konstantu $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$.

4.5 Proměny symboliky

Skutečnost, že Černý sešit [1] zachycuje stopy postupného vývoje myšlenek profesora Buchara, zápisy a zpracování okamžitých nápadů, ilustrují též proměny symboliky, kdy stejná veličina je označena na různých místech různými písmeny. Tak např. pro velkou poloosu zemského elipsoidu nalezneme A i R , pro střední poloměr Země A nebo R_0 (dokonce i s poznámkou „střední průměr“), pro sklon dráhy byly použity symboly γ , i , pro zploštění Země E nebo α a pro poměr odstředivé síly na rovníku k tíži tamtéž dokonce písmena čtyři: φ , q , h a m . V této studii jsou při reprodukci Bucharových záznamů použity symboly nejčastější a ty, které se vyskytují v publikacích.

5. Použitá pozorování a zdroje dalších informací

Některé první pokusné výpočty prováděl prof. Buchar na pozorování z 1. 12. 1957 ze Skalnatého plesa (Záviš Bochníček), na (patrně) vlastním pozorování z 22. 1. 1958 („Praha-technika“), později užil pro aproximaci doby oběhu družice 1957 β užil pozorování ze Skalnatého plesa, Petřína, Bratislavy a „dvou finských stanic“ v období 4. 11. 1957 až 20. 3. 1958.

Pracovní sešit profesora Buchara pak obsahuje **seznam 47 pozorování**, použitých pro první úplné výpočty zploštění Země, a to v rozsahu odpovídajícím publikaci ve Studiích [5]. Šlo většinou o pozorování lidových hvězdáren a astronomů-amatérů, která organizoval doc. Dr. V. Guth. Jsou tam uvedeny observatoře a jiná místa pozorování, observatoři - ale nikoliv **způsoby pozorování**. Ty nalezneme (kromě vzpomínek pamětníků) přehledně shrnuté v XI. části publikace [2]. Šlo velkou většinou o pozorování vizuální: nejjednodušší byl způsob průchodů jasné družice přes spojnici dvou hvězd, pozorovaný prostým okem s odhadem dělicího poměru úhlové vzdálenosti těchto hvězd, dále využití tzv. optické bariéry širokouhlými dalekohledy AT-1 sovětské výroby (podle [2] jich bylo do Československa dodáno 60 ks.), pozorování dalekohledem Somet Binar (25x100 mm); na GO Pecný jsme užívali teodolit Wild T2 opatřený širokouhlým zaměřovacím hledáčkem. Čas se určoval pomocí stopek nebo chronografu. Jen málo bylo pozorování fotografických - a radiotechnická pozorování (měření dopplerovského posunu kmitočtu), konaná již v počátcích na některých československých pracovištích, v práci prof. Buchara využita nebyla. Uvedená **pozorování bral profesor se stejnými váhami**, aniž by rozlišoval jejich potenciální přesnost, což by v té době bylo asi obtížné. A ze sešitu [1] či z publikace ve Studiích [5], kde jedině je výčet pozorování, nelze ani s pomocí [2] pro všechny pozorované polohy družice zjistit, jak byly určeny.

Ke konci sešitu jsou v „kapitole“ Pohyb uzlu na základě 7 přesných pozorování zpracovány co do způsobu pozorování blíže nedefinované polohy (když „přesné“, tak snad fotografické), pocházející ze stanic Brno (7. 11. 1957), Skalnaté pleso (7. 12. 1957), 125 Rodewisch (22. 1. 1958) a 121 Potsdam (3. 1., 11. 2., 12. 3. a 21. 3. 1958).

Aby bylo možné určit z pozorovaných poloh družice poruchy v její dráze ($d\omega/dt$ a hlavní použitou $d\Omega/dt$), potřebné k výpočtu zploštění Země na základě teoretické poruchové funkce, bylo potřeba znát (alespoň přibližně) některé další elementy dráhy, jako je sklon, excentricita nebo doba oběhu (viz oddíl 3). V době, kdy profesor Buchar prováděl své výpočty, jimiž se zabýváme v této studii, ovšem ještě zdaleka neexistovala systematická služba dráhových elementů UDZ. A tak bral **výchozí údaje** kde se dalo. Najdeme tedy v sešitu číselné hodnoty z běžně dostupného tisku, zpráv rozhlasu a ČTK (ověřil jsem podle vlastních záznamů), z tradičních astronomických cirkulářů pro rychlé informování o nových objevech, z časopisu Nature, který umí velmi rychle publikovat naléhavá stručná sdělení, citují se „Radiobeobachtungen Bonn“ a též např. „zpráva“ nebo „telef. od Gutha“ (např. o vypuštění 3. Sputniku s některými údaji). Doc. V. Guth z ondřejovské observatoře jako koordinátor XI. programu MGR (rakety a satelity) dostával patrně některé aktuální zprávy tohoto typu dálkopisem.

6. Přehled prvních výsledků a jejich publikace

V následující tabulce 1 uvedeme jednotlivé (dokončené a „podtržené“, tj. zvýrazněné) výsledky, a to v pořadí, jak se objevují v Černém sešitu, s bližším určením způsobu jejich výpočtu a s údaji o uveřejnění v trojici prvních publikací [3] - [5]; v [3] a [4] jsou hodnoty $1/\alpha$ zaokrouhleny na 1 desetinné místo.

Tab. 1 Výsledky v pořadí a v hodnotách podle Černého sešitu [1]

$K \times 10^6$	$1 / \alpha$	Vzorce 4.2()	Vzorce 4.3()	h	Poznámky, publikace
1090.9	297.0	(1)	(2a)	0.0034679	[4]
1088.3	297.36	(2a)	(2b)	0.0034679	[3] konečné
1085.6	297.72	(2a)	(2b)	0.0034679	„ <i>a, e</i> jen z 22. I.“ [3]
1085.1	297.78	N ¹⁾	N ¹⁾	N ¹⁾	
1087.1	297.65	(3)	(3b)	0.0034499	
1085.2	297.90	(3)	(3b)	0.0034499	[5]
1084.1	297.92	(1) ?	(3b)	0.0034499	„22. 1.“
1086.8	297.56	(1) ?	(3b)	0.0034499	„z 5 pozor.“ ²⁾
1084.6	297.99	(3)	N ¹⁾	N ¹⁾	„7 přesných pozor.“ ³⁾

Poznámky: ¹⁾ Vzorce nebo hodnoty nejsou uvedeny přímo u výpočtu.

²⁾ Pozorování blíže neurčena.

³⁾ Stanice viz oddíl 5.

Jak je z tabulky patrné, ještě po ukončení výpočtů pro první publikace prof. Buchar pokračoval v dalších výpočetních experimentech.

Pokud jde o publikace samotné, občas nějaká ta „chybička se vloudila“. Říše hvězd neměla ve zvyku provádět autorské korektury - takže jsou v článku [4] hned dvě v hlavních vzorcích. Vztah (8) pro $d\Omega/dt$ (inverse našeho 4.2(1)) postrádá exponent 2 u a , zatímco v (11), což je náš 4.2(1), chybí 3 ve jmenovateli. Pozorný čtenář by to jistě postřehl.

V práci publikované ve Studiích [5] jsem nepostřehl tiskovou chybu (kromě chybějícího označení rovnice (24)). Ale čtenář pilný, leč ve zvyklostech klasických nebeských mechaniků nezběhlý, který by si chtěl nějaké hodnoty přepočítat, by narazil na problém. Není tam totiž explicitně zdůrazněno, že vzorec (26), tj. náš 4.2(3), pracuje s gravitační konstantou vyjádřenou ve stupních, s časovou jednotkou minuta a s $d\Omega/dt$ počítaným ve

stupních za den. Výsledkem je, že první člen onoho vzorce (26), tak jak je vytištěn, je třeba ještě dělit číslem $1440 \times \rho^\circ$, aneb počtem minut ve dnu násobeným radiánem ve stupních. Snaživému čtenáři chvíli potrvá, než na to přijde...

Článek v Nature [3] uvádí na počátku zpracování 33 pozorování a pak se zmiňuje o přidání dalších 4. V sešitu se mi je nepodařilo odlišit, takže asi jde o chybu tiskovou nebo rukopisu (mělo snad být 43 + 4 pozorování, což by souhlasilo s jejich původním počtem).

7. Výhledy dále od Země...

Profesor Buchar ovšem pokračoval v další práci (viz např. [6] až [8]), ale neskončil „jen“ u zploštění Země. Po pasážích, jimiž jsme v oddílu 3 dočasně skončili popis Černého sešitu [1], následují odvozování a výpočty směřující dále od Země. Je zkoumán oběh družice Měsíce, rychlost v apogeju na hranici jeho sféry aktivity a podmínky zachycení tělesa Měsícem. Je to ještě před záznamem o „2. Měsíční raketě“. Tam patrně začínaly práce, které později vedly k publikaci [17]. A Černý sešit končí výpočtem hvězdné velikosti rakety a rychlosti (patrně měsíční rakety) „před setkáním“ a „po setkání“. Ale to jsou již věci mimo hlavní téma této studie a Černého sešitu.

8. Závěrem o významu a stopách těchto prací profesora Buchara

Bucharovo určení zploštění Země z pohybu UDZ bylo prací pionýrskou, za kterou následovala přímo exploze zkoumání tohoto druhu, na větších datových souborech, s vyšší přesností a s podstatně podrobnějším popisem tvaru Země, lze-li to tak říci. Není ani divu, že citace Bucharových prací velmi rychle vymizely z literatury. Tak originál knihy Berroth - Hofmann [9] již neobsahuje citace prvních Bucharových prací a jen v ruském překladu je citován článek v Nature [3]. I. I. Mueller má ve svém Úvodu do družicové geodézie [10] velmi podrobnou bibliografii z počátků této oblasti. Z roku 1958 tam má kromě Bucharova článku v Nature [3] pouze dvě další práce, které zde uvádíme jako [11] a [12]. Porovnáme-li citační údaje, které se pro tyto články podařilo převzít z Muellera a doplnit z dostupných originálů, budeme konstatovat, že **profesor Emil Buchar byl opravdu první - a tedy určitě inspiroval další „hledáče tvaru Země“**. **Nebylo by správné ani spravedlivé na to zapomínat - zvláště v našem prostředí.**

Můžeme si povšimnout ještě jednoho aspektu jeho práce. Ve čtyřicátých letech XX. století mívala Říše hvězd pod společným titulem „Astronomie skrovných prostředků“ dosti často články Arnošta Dittricha a dalších autorů, které vedly astronomy amatéry k poznání různých jednoduchých možností pozorování a k pochopení jevů sférické a teoretické astronomie. Podle analogie bychom mohli říci, že prof. Buchar realizoval svým způsobem „Kosmickou geodézii skrovných prostředků“, ale nejen pro amatéry. Ty ovšem mohlo potěšit, že jejich úsilí přispělo k tak světovému úspěchu.

Zdroj: Sborník příspěvků přednesených na setkání při příležitosti stého výročí narození prof. Emila Buchara. Praha, VÚGTK, 2002, s. 69-87.

Literatura

Poznámka: Tečky ●●● oddělují logické skupiny citované literatury.

- [1] [Buchar E.:] Zploštění Země. Černý pracovní sešit A4. [1957-1958.] (Uložen na Astronomické observatoři katedry vyšší geodézie Stavební fakulty ČVUT v Praze - původní název sešitu „Astronomie“ přepsán autorem silnou modrou tužkou.)
-
- [2] International Geophysical Year and Cooperation in Czechoslovakia 1957 - 1959. Praha 1960.
-
- [3] Buchar E.: Motion of the Nodal Line of the Second Russian Earth Satellite (1957 β) and Flattening of the Earth. *Nature*, Vol. 182, 198-199 (No. 4629 - July 19, 1958).
- [4] Buchar E.: Vliv zploštění Země na pohyb umělých družic. *Říše hvězd*, 39 (1958), 121-128.
- [5] Buchar E.: The Motion of the Orbital Node of Sputnik 2 (1957 β) and the Oblateness of the Earth. *Studia geoph. et geod.*, 2 (1958), 306-321.
-
- [6] Buchar E.: Die Bestimmung der Erdabplattung aus der Bewegung von Sputnik II. *Wiss. Zft. Techn. Hochschule Dresden*, 8 (1958/59), 282-284.
- [7] Buchar E.: Determination of the Flattening of the Earth by means of the Displacement of the Second Soviet Satellite (1957 β). *Ann. Intern. Geophys. Year*, 12 (1960), 174-176.
- [8] Buchar E.: Determination of some Parameters of the Gravity Field of the Earth from the Rotation of the Nodal Line of Artificial Satellites. *Bull. Géod., Nouvelle Série* (1962), No. 65, 269-271.
-
- [9] Berroth A., Hofmann W.: *Kosmische Geodäsie*. Karlsruhe 1960 (ruský překlad *Kosmičeskaja geodezija*. Moskva 1963).
- [10] Mueller I. I.: *Introduction to Satellite Geodesy*. New York 1964 (ruský překlad *Vvedenije v sputnikovuju geodeziju*. Moskva 1967).
- [11] Cook A. H.: Determination of the Earth's Gravitational Potential from the Observations of Sputnik II (1957 β). *Geophys. Journ. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 1 (1958), No. 4, 341-345 (Received 1958, Sept. 24).
- [12] Merson R. H., King-Hele D. G.: Use of Artificial Satellites to Explore the Earth's Gravitational Field; Results from Sputnik 2 (1957 β). *Nature*, Vol. 182, 640-641 (1958).
-
- [13] Escobal P. R.: *Methods of Orbit Determination*. New York - London - Sydney 1965 (ruský překlad *Metody opredelenija orbit*. Moskva 1970).
- [14] Burša M. - Karský G. - Kostelecký J.: *Dynamika umělých družic v tíhovém poli Země*. Praha 1993, 71-72.
- [15] Burša M. - Pěč K.: *Tíhové pole a dynamika Země*. Praha 1988, 54-58.
- [16] Danjon A.: *Astronomie générale. Astronomie sphérique et éléments de mécanique céleste. Seconde Edition, revue et corrigée*. Paris 1959, 275.
- [17] Buchar E.: Variational Orbits of Lunar Satellites and their Stability. *Space Research III. Proc. 3-rd Internat. Space Sci. Symp.*, Washington, April 30 - May 9, 1962. Amsterdam 1963, 999-1005.