

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 433

ISSN 1213-418X

Viliam Vátrt

**VÝVOJ KONSTANTY W_0 -
GEOPOTENCIÁLU NA GEOIDU**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav geodézie

Doc. Ing. Viliam Vatrt, DrSc.

VÝVOJ KONSTANTY W_0 – GEOPOTENCIÁLU NA GEOIDU

**DEVELOPMENT OF THE CONSTANT W_0 – GEOIDAL
GEOPOTENTIAL**

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



BRNO 2012

KLÍČOVÁ SLOVA

geopotenciál na geoidu, geopotenciál, geopotenciální model, družicová altimetrie, hladinový elipsoid, světový výškový systém.

KEY WORDS

geoidal geopotential, geopotential, geopotential model, satellite altimetry, level ellipsoid, world height system

© Viliam Vátrt, 2012

ISBN 978-80-214-4621-2

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD	6
2 TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI GEOPOTENCIÁLNÍCH MODELŮ	7
2.1 Obecná teorie testování	8
3 VÝVOJ HODNOTY GEOPOTENCIÁLU NA GEOIDU W_0 A GEOPOTENCIÁLNÍHO MĚŘÍTKOVÉHO FAKTORU R_0	9
3.1 Stanovení geopotenciálu W_0 na základní hladinové ploše	9
3.2 Stanovení délkového rozměrového faktoru geopotenciálu	12
4 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍ SÍTĚ NA OCEÁNECH, ODVOZENÍ MATEMATICKÝCH VAH MĚŘENÍ ALTIMETRICKÉ DRUŽICE TOPEX/ POSEIDON, JASON-1 A JASON-2 PRO ODVOZENÍ KONSTANTY W_0	13
4.1 Návrh a realizace testovací sítě	13
4.2 Odvození matematických vah měření altimetrických družic	15
5 PRAKTICKÉ VÝSLEDKY MONITOROVÁNÍ GEOPOTENCIÁLU NA GEOIDU W_0 A MĚŘÍTKOVÉHO FAKTORU R_0 Z DRUŽICE TOPEX/POSEIDON	17
5.1 Číselné stanovení konstanty geopotenciálu W_0 a délkového rozměrového faktoru R_0 parametrů hladinového elipsoidu	17
5.2 Odvození parametrů hladinového elipsoidu na základě veličiny W_0	18
6 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ VELIČINY W_0	19
7 ZÁVĚR	19
8 VÝBĚR POUŽITÉ LITERATURY	20
9 PŘEHLED PŮVODNÍCH VĚDECKÝCH PRACÍ V ČASOPISECH	24
9.1 Původní vědecké práce ve vědeckém časopisu s IF	24
9.2 Původní vědecké práce v recenzovaném vědeckém časopisu	25
10 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI	27
11 ABSTRACT	28

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Viliam Vatrt, DrSc.



Narozen: 2. listopadu 1953

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti

- maturita – 1972, Vojenské gymnázium Jana Žižky v Moravské Třebové;
- Ing. – 1978, Fakulta inženýrská pozemních vojsk, VAAZ Brno, obor Geodézie a kartografie;
- CSc. – 1990, Fakulta inženýrská pozemních vojsk, VAAZ v Brno, obor Geodézie a kartografie, téma práce *Výstavba informačního systému geodeticko-geofyzikálních údajů s analyticko-projekční přípravou převodu geodetických základů zájmového území ČSLA do jednotného systému koalice*;
- DrSc. – 2002, Vojenská letecká akademie M. R. Štefánika v Košicích, téma práce *Využití geopotenciálních modelů ve vojenství*;
- Doc. – 2007, fakulta Vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně, obor Geodézie a kartografie, téma habilitační práce *Geopotenciální modely v geodetické obranné strategii NATO*.

Zaměření

Geodézie, informační systémy, automatizace v geodézii, speciální geodetické a geofyzikální mapy, družicová altimetre, geofyzika, globální geodézie, globální výškové systémy, světový výškový systém, geopotenciální modely, modely oceánické topografické plochy.

Zaměstnání

- 1972–1987 VTOPÚ Dobruška (1972–1980 geodet-náčelník měřické skupiny, 1980–1987 inženýr analytik provozu analýzy a projektování);
- 1987–1992 Výzkumné středisko 090 Praha (1987–1990 náčelník skupiny topografického zabezpečení, 1990–1992 náčelník oddělení geodézie, geofyziky a mapování);
- 1992–2003 VTOPÚ Dobruška (1992–1992 analytik provozu výzkumu a vývoje, 1992–1995 vedoucí inženýr provozu výzkumu a vývoje, 1995–1997 náčelník oddělení systémového rozvoje, 1995–2000 vedoucí vědecký pracovník oddělení systémového rozvoje, 2000–2003 náčelník oddělení rozvoje geodézie);
- 2003–2005 Vojenská akademie a Univerzita obrany v Brně (externí učitel);
- 2009–dosud VUT Brno, fakulta stavební Ústavu geodézie (externí učitel);
- 2003–2012 VGHMÚř Dobruška (výzkumný a vývojový pracovník, samostatný vědecký pracovník).

Vyučované předměty a práce v komisích

Geografické zabezpečení AČR, Geofyzika a globální geodézie, Fyzikální geodézie a Geofyzika a geodynamika. Od roku 2009 pracuje v komisích pro státní závěrečné zkoušky na bakalářském a navazujícím magisterském studiu na FAST.

Řešené projekty (odpovědný řešitel/spoluřešitel)

- 2005–2007: Určení změn tenzoru setrvačnosti zemského tělesa z altimetrických údajů družic TOPEX/POSEIDON, JASON-1 a GRACE, grant GAČR č. 205/05/2381;
- 2008–2011: Testování geopotenciálního modelu Země EGM08 vyvinutého Geospatial Intelligence Agency a NASA, grant GAČR č. 205/08/0328.

Doktorandi

- školitel specialista u 4 doktorandů, z nichž dva již úspěšně obhájili své disertační práce, další dvě práce rozpracované;
- členem oborové rady doktorského studia na VUT v Brně.

Publikační činnost do roku 2011

- monografie: 2×;
- původní vědecká práce v impaktovaných časopisech a recenzovaných časopisech: 48×;
- významná inženýrská díla: 5×;
- citace jiným autorem podle *SCI*: 21×;
- příspěvek ve sborníku světového nebo evropského kongresu, symposia, vědecké konference: 10×;
- abstrakt ve sborníku světového nebo evropského kongresu, symposia, vědecké konference: 2×;
- příspěvek ve sborníku národního nebo mezinárodního kongresu, symposia, vědecké konference: 30×;
- publikace v odborném časopise: 23×;
- abstrakt ve sborníku ve sborníku národního nebo mezinárodního kongresu, symposia, vědecké konference, příspěvek ve sborníku odborné konference: 3×;
- citace jiným autorem v publikaci bez *SCI*: 44×;
- odborná příručka v oboru: 7×;
- skripta, odborné příručky, SW;
- posudek zahraniční a domácí publikace nebo projektu, znalecký posudek, expertíza: 12×.

Členství v v současném výboru české vědecké společnosti

- člen Českého komitétu geodetického a geofyzikálního, dekret N GeoSI AČR, od r. 2004 dosud;
- člen Českého komitétu oceánografického, dekret ministra obrany AČR, od r. 2006 dosud.

Mezinárodní odborné aktivity

- člen pracovní skupiny Mezinárodní geodetické unie (IAG) *ICPI.2 Vertical Reference Frames* v rámci *IAG Inter-Commission Project*, 2004–2011;
- člen pracovní skupiny Mezinárodní geodetické unie (IAG) *EGM08 evaluation*, 2004–2011;
- člen pracovní skupiny Mezinárodní geodetické unie (IAG) *Unification vertical datums, GGOS*, 2011–2015;
- člen pracovní skupiny Mezinárodní geodetické unie (IAG) *GRACE models evaluation*, 2011–2015.

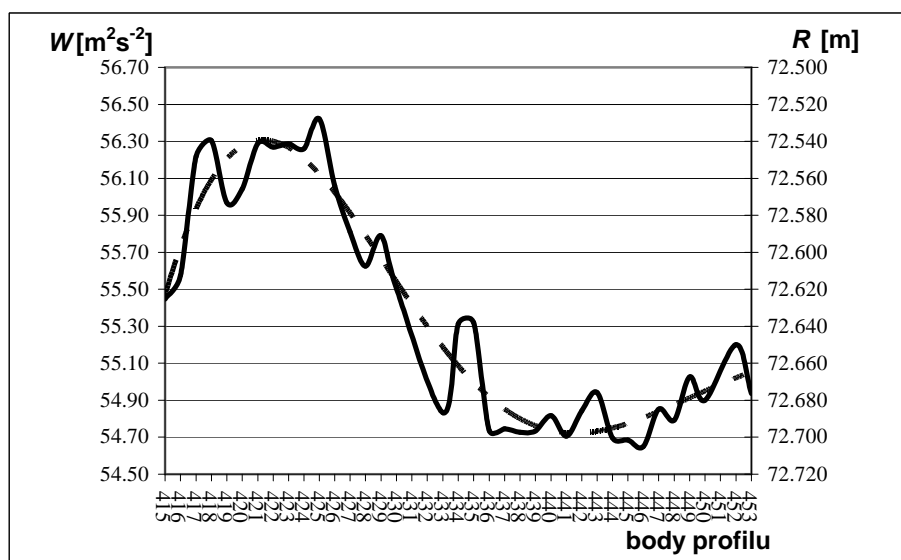
1 ÚVOD

Potřeba znalosti číselné hodnoty konstanty geopotenciálu na geoidu W_0 vyplynula ze zapojení autora do mezinárodního úkolu vývoje světového výškového systému a testování přesnosti geopotenciálních modelů řady EGM.

Geopotenciální modely sehrávají v oblasti fyzikální geodézie, geofyziky, gravimetrie, astronomie a v jiných vědních oborech nezastupitelnou úlohu. Ovšem otázka přesnosti, s jakou je možné geopotenciál a tím i nadmořskou výšku z modelu určit, je prvořadá. Proto testování přesnosti geopotenciálních modelů, jejich zpřesnění a vývoj světového výškového systému je jedním ze základních soudobých úkolů, stanovených International Association of Geodesy (IAG), amerických National Geospatial Agency (NGA), National Imagery and Mapping Agency (NIMA) a Defence Mapping Agency (DMA). Pro zabezpečení tohoto úkolu byla na pracovišti autora vyvinuta **originální metoda testování přesnosti a metoda propojení lokálních výškových systémů do jednotného světového výškového systému**, založená na znalosti přesných geocentrických poloh testovacích bodů a jejich normálních výšek v celosvětovém měřítku. Další nezbytnou podmínkou bylo **vyvinutí parametrů zemského hladinového elipsoidu ve třech slapových systémech**. Pro vyvinutí těchto parametrů však bylo nutné vyvinout hodnotu jedné z fundamentálních geodetických konstant, tj. hodnotu **geopotenciálu na geoidu W_0** . Právě o vývoji konstanty W_0 pojednávají tyto teze.

Stav problematiky před popisovaným řešením byl tedy takový, že byl vyvinut geopotenciální model EGM96 (a další geopotenciální modely různých institucí) pro společné mezinárodní použití, avšak jeho analýza pro použití v různých vědních disciplínách zcela scházela. Tato skutečnost vtiskla aktivitě autora zásadní směr.

Geodetické a další požadavky různých vědních disciplín vyžadují určení geocentrické polohy, geopotenciálu W , měřítkového faktoru R , normální výšky a dalších veličin v libovolném bodě zemského povrchu a to s vysokou přesností. V geocentrické poloze jde už nyní o přesnost v centimetrové úrovni, u geopotenciálu $W \approx \pm 1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (dle druhu modelu), čemuž odpovídá střední chyba $\approx \pm 10 \text{ cm}$ ve svislé poloze místní hladinové plochy geopotenciálu a tím i nadmořské výšky.



Obr. 1.1 Schématické znázornění průběhu hodnot W a R na profilu geoidu: plná čára přesné hodnoty, čerchovaná čára vyhlazené hodnoty stanovené pomocí geopotenciálního modelu.

Geopotenciálním modelem se nazývá soubor Stokesových parametrů (harmonických nebo geopotenciálních koeficientů) $J_n^{(k)}$, $S_n^{(k)}$ stupně n a řádu k , které spolu s geocentrickou gravitační konstantou GM a úhlovou rychlostí rotace Země ω popisují tíhové pole Země. Jedná se ovšem o pole vyhlazené (obr. 1) úměrně maximálnímu stupni \bar{n} udržovaných harmonických členů v rozvoji geopotenciálu do Laplaceovy řady sférických funkcí

$$W = \frac{GM}{\rho} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{k=0}^n \left(\frac{a_0}{\rho} \right)^n \left(J_n^{(k)} \cos k\Lambda + S_n^{(k)} \sin k\Lambda \right) P_n^{(k)}(\sin \Phi) + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} q \left(\frac{a_0}{\rho} \right)^{-3} \left[1 - P_2^{(0)}(\sin \Phi) \right] + (1 + k_s) \frac{GM_M}{GM} \left(\frac{\rho}{\Delta_{ZM}} \right)^3 P_2^{(0)}(\sin \delta_M) P_2^{(0)}(\sin \Phi) + \right. \\ \left. + (1 + k_s) \frac{GM_S}{GM} \left(\frac{\rho}{\Delta_{ZS}} \right)^3 P_2^{(0)}(\sin \delta_S) P_2^{(0)}(\sin \Phi) \right\}; \quad (1.1)$$

$P_n^{(k)}(\sin \Phi)$ je přidružená Legendrova funkce stupně n a řádu k ; $q = \omega^2 a_0^3 (GM)^{-1}$ je koeficient v potenciálu odstředivé síly, a_0 je volitelný délkový faktor normující Stokesovy parametry na bezrozměrné veličiny:

$$\begin{cases} J_n^{(k)} \\ S_n^{(k)} \end{cases} = \frac{(2 - \delta_{k0})(n-k)!}{Ma_0^n (n+k)!} \int_M \rho'^n P_n^{(k)}(\sin \Phi') \begin{cases} \cos k\Lambda' \\ \sin k\Lambda' \end{cases} dm. \quad (1.2)$$

V nich δ_{k0} je Kroneckerovo delta a ρ' , Φ' , Λ' značí geocentrické sférické souřadnice proměnného hmotného elementu dm zemského tělesa. Mohlo by se tudíž zdát, že k jejich číselnému určení potřebujeme znát rozložení hmoty (hustoty) v tělese. Naštěstí, jak praví druhá identita Greenova, lze uvedené konstanty exaktně určit z informací o vnějším gravitačním poli. Tyto informace dnes globálně získáváme z dráhové dynamiky umělých družic a v současné době autor pracuje s modely stupně od $n = 360$, obsahujícími $(361^2 - 3)$ Stokesových parametrů po modely stupně od $n = 2190$, obsahujícími $(2190^2 - 3)$ Stokesových parametrů.

Poslední dva členy ve vzorci (1.1) představují stálý vliv zonálních slapových členů od Měsíce a od Slunce, když za zonální Legendrovy polynomy $P_2^{(0)}$ s argumenty geocentrických deklinací Měsíce δ_M a Slunce δ_S dosadíme dlouhodobé integrální střední hodnoty; Δ_{ZM} , Δ_{ZS} jsou geocentrické vzdálenosti hmotných středů Měsíce a Slunce, k_s je sekulární Loveovo číslo.

Soubor koeficientů $J_n^{(k)}$, $S_n^{(k)}$ spolu s geocentrickou gravitační konstantou GM a nominální střední úhlovou rychlostí rotace Země ω umožňuje určit geopotenciál v libovolném bodě zemského povrchu (nebo nad ním), jehož geocentrické souřadnice jsou známy. Ty jsou určitelné technologií GPS nebo družicovou altimetrií s několikacentimetrovou přesností. To znamená, že na bodech GPS máme k dispozici bez jakýchkoliv dalších měření geopotenciál, a tím i nadmořskou výšku.

2 TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI GEOPOTENCIÁLNÍCH MODELŮ

Jak již bylo uvedeno, geopotenciální modely mají pro praxi nezastupitelnou úlohu. Ovšem otázka přesnosti, s jakou je možné geopotenciál a tím i nadmořskou výšku z modelu určit, je prvořadá. Pro zabezpečení tohoto úkolu se autor podílel na vývoji originální metody testování založené na znalosti přesných geocentrických souřadnic testovacích bodů – zeměpisných geodetických souřadnic φ , λ , h nebo prostorových pravoúhlých souřadnic X , Y , Z a jejich normálních výšek H_q v celosvětovém měřítku.

2.1 OBECNÁ TEORIE TESTOVÁNÍ

Testovací metoda spočívá na výpočtu geopotenciálu v libovolném bodě M zemského povrchu nebo na moři (budeme uvažovat - viz obr. 1.1), jehož normální výška je známa, na základě čtyř daných primárních geodetických konstant, jimiž jsou:

geocentrická gravitační konstanta

$$GM = (398\,600\,441,8 \pm 0,8) \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}, \quad (2.1)$$

nominální úhlová rychlost rotace Země

$$\omega = 7\,292\,115 \times 10^{-11} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (2.2)$$

geopotenciál plochy geoidu

$$W_0 = 62\,636\,856,0 \pm 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \quad (\text{odvození bude uvedeno}) \quad (2.3)$$

a druhý zonální Stokesův parametr

$$J_2^{(0)} = -(1\,082\,635,9 \pm 0,1) \times 10^{-9}. \quad (2.4)$$

Podle Moloděnského teorie existuje na normální tížnici bodu M takový bod N obr. 2.1, v němž platí

$$U(N) = W(M), \quad (2.5)$$

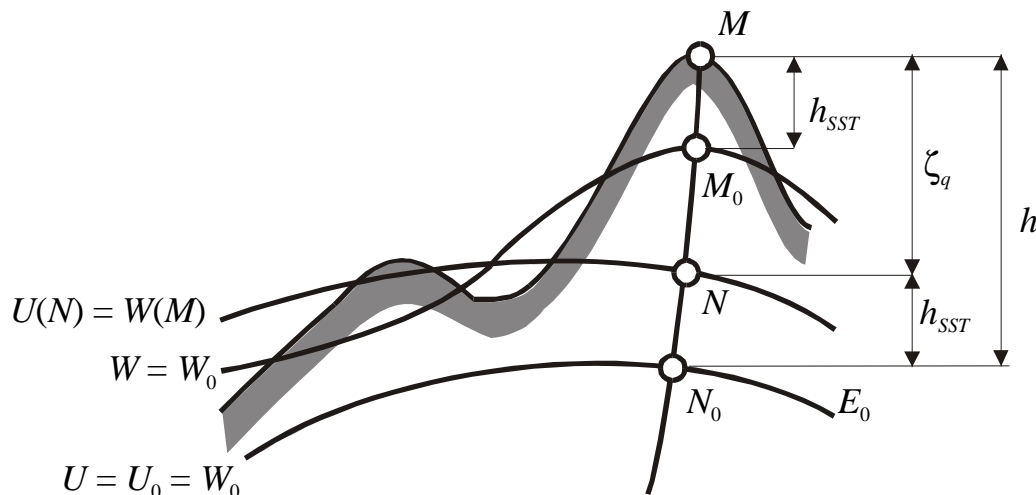
tj. normální potenciál $U(N)$ buzený základními konstantami (2.1)–(2.4) je přesně roven skutečnému geopotenciálu $W(M)$ v bodě $M(X, Y, Z)$ zemského povrchu. Platí pro něj

$$\begin{aligned} & W(X_M, Y_M, Z_M) = U(X_N, Y_N, Z_N) = U(u_N, v_N, w_N) = \\ & = \frac{GM}{ae} \left\{ \operatorname{arccotg}(\sinh w_N) + \frac{1}{3} eq \left[(3 \sinh^2 w_N + 1) \operatorname{arccotg}(\sinh w_N) - 3 \sinh w_N \right] \times \right. \\ & \quad \times \left[\frac{3 - 2e^2}{e^2} \operatorname{arctg} \frac{e}{(1 - e^2)^{1/2}} - 3 \frac{(1 - e^2)^{1/2}}{e} \right]^{-1} e P_2^{(0)}(\cos u_N) + \\ & \quad \left. + \frac{1}{3} q e^3 \cosh^2 w_N \left[1 - P_2^{(0)}(\cos u_N) \right] \right\}, \\ & \quad q = \frac{\omega^2 a^3}{GM}, \quad P_2^{(0)}(\cos u_N) = \frac{3}{2} \cos^2 u_N - \frac{1}{2}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

u_N, v_N, w_N jsou křivočaré elipsoidické souřadnice bodu N . Parametry a, α geometricky určují hladinový elipsoid E_0 , fyzikálně definovaný primárními geodetickými konstantami (2.1)–(2.4):

$$\begin{aligned} a & = R_0 \left(\frac{1}{e} \operatorname{arctg} \frac{e}{1 - \alpha} + \frac{1}{3} \frac{\omega^2 a^3}{GM} \right), \quad (2.7) \\ \alpha & = \frac{1}{2} \alpha^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{a_0}{a} \right)^2 J_2^{(0)} + \frac{2}{15} q \left(\frac{a}{a_0} \right)^3 e^3 \times \\ & \quad \times \left[\frac{3 - 2e^2}{e^2} \operatorname{arctan} \frac{e}{(1 - e^2)^{1/2}} - 3 \frac{(1 - e^2)^{1/2}}{e} \right]^{-1}, \quad e^2 = 2\alpha - \alpha^2. \end{aligned}$$

Při posouzení přesnosti modelu se vychází z rovnice (2.5) a následujících rozborů přesnosti podrobně popsaných v pracích autora.



Obr. 2.1 Testovací bod sítě GMEMN na oceánické topografické ploše SST (Sea Surface Topography); ζ_q je výška kvazigeoidu, h_{SST} je výška bodu M nad hladinovou plochou $W = W_0$.

Z uvedeného je zřejmé, že pro testování geopotenciálních modelů je nezbytná znalost číselné hodnoty konstanty potenciál na geoidu W_0 , která vstupuje do výpočtu parametrů a , α hladinového elipsoidu E_0 (2.7), tedy do vlastního procesu testování. Odvození veličiny W_0 je stěžejní částí přednášky.

3 VÝVOJ HODNOTY GEOPOTENCIÁLU NA GEOIDU W_0 A GEOPOTENCIÁLNÍHO MĚŘÍTKOVÉHO FAKTORU R_0

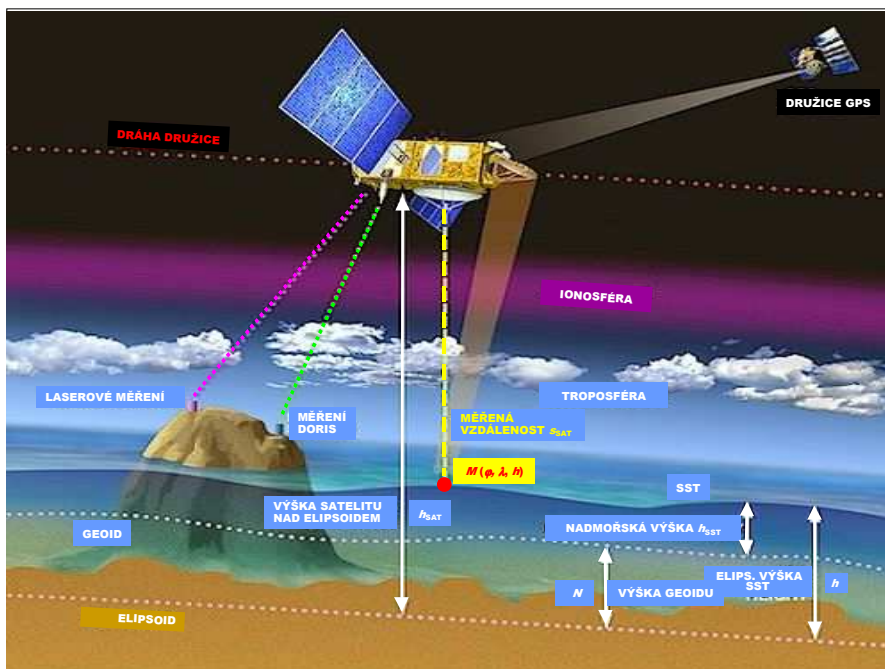
Existují určité globální geodetické konstanty, které nezávisí na slapových ani na některých jiných poruchách a mohou být v globální geodetické obranné strategii použity jako opěrné, a to pro libovolný bod na Zemi i v její blízkosti.

Jednou z nich je klidná, v integrálním smyslu střední, hladina světového oceánu, kterou od roku 1993 nepřetržitě detekoval v radiálním směru s přesností 3–5 cm družicový altimetrický systém TOPEX/POSEIDON, na nějž nyní navázal ještě přesnější systém Jason-1 a Jason-2. Základem pro výpočty je zejména potřeba aktuální znalosti geocentrických poloh na povrchu oceánu. Ty se počítají z geocentrické polohy altimetrické družice redukované o měřenou vzdálenost mezi vztažným místem polohy satelitu a oceánickou hladinou s_{SAT} . Princip určování geocentrických poloh mořské hladiny je zřejmý z obr. 3.1, kde jsou rovněž uvedeny základní pojmy a veličiny.

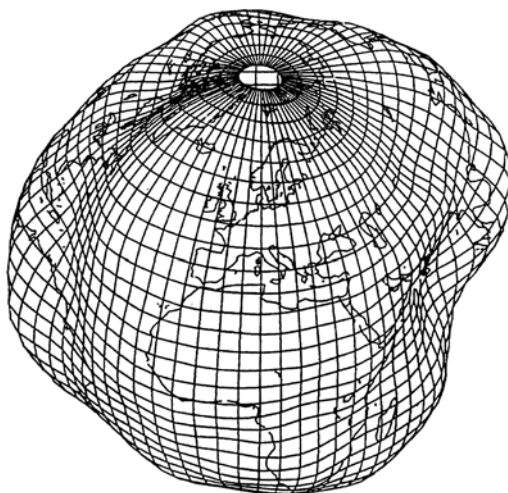
Zemské těleso je tvořeno pevninami a oceány. Pokud by byla Země těleso dokonale tekuté, zaujala by tvar geoidu, jehož schématický tvar je uveden na obr. 3.2. A právě na povrchu této plochy autor určil hodnotu potenciálu W_0 s maximální možnou přesností.

3.1 STANOVENÍ GEOPOTENCIÁLU W_0 NA ZÁKLADNÍ HLADINOVÉ PLOŠE

Geopotenciálním modelem, geocentrickou gravitační konstantou GM (2.1), úhlovou rychlostí rotace Země ω (2.2) a druhým zonálním Stokesovým geopotenciálním harmonickým koeficientem



Obr. 3.1 Princip určení geocentrických souřadnic bodů M oceánické hladiny $M(\varphi, \lambda, h)$ pomocí měření altimetrických družic TOPEX/POSEIDON, Jason-1 a Jason-2.



Obr. 3.2 Grafické vyjádření tvaru geoidu.

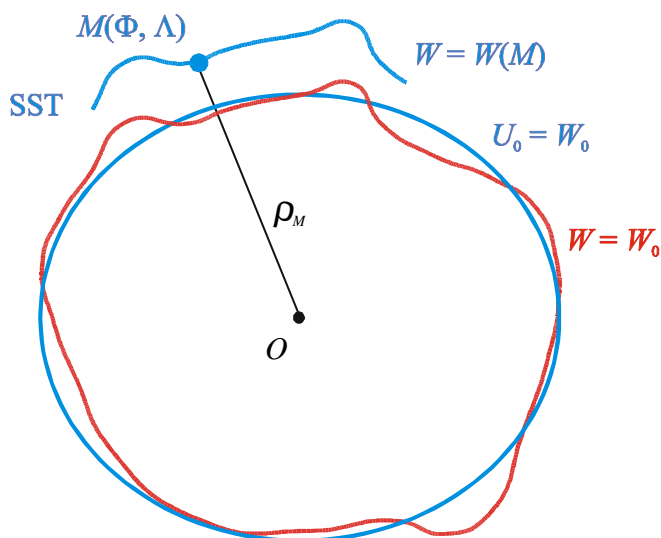
J_2 (2.4) ve slapovém systému TIDE-FREE je popsáno vnější tíhové pole Země v systému TIDE-FREE, vyhlazené příslušně stupni \bar{n} podržených harmonických členů. Tíhový potenciál W ve vnějším bodě M s geocentrickými geodetickými souřadnicemi φ, λ, h , resp. geocentrickými sférickými souřadnicemi ρ, Φ, Λ lze vyjádřit ve tvaru (1.1).

Poněvadž daným bodem prochází jediná hladinová plocha $W = W(M)$, můžeme ze vztahu (1.1) určit její geocentrický průvodič (obr. 3.3)

$$\rho = \rho[W(M); \Phi, \Lambda]. \quad (3.1)$$

To znamená, že pro popis hladinové plochy pomocí modelu je nutno znát hodnotu geopotenciálu na této ploše. Pro řadu aplikací geopotenciálních modelů, zejména v problematice

výškových (vertikálních) systémů i testování geopotenciálních modelů, je nutno definovat jednu základní hladinovou plochu



Obr. 3.3 Průvodič ρ_M obecného bodu $M(\Phi, \Lambda)$ oceánické plochy SST, hladinová plocha $W = W(M)$ procházející bodem M , základní hladinová plocha $W = W_0$, normální potenciál U_0 na hladině elipsoidu Země E_0 .

$$W = W_0 \quad (3.2)$$

a prakticky určit hodnotu W_0 .

Epocha družicové altimetrie, kdy monitoruje povrch středních hladin světových oceánů, umožňuje hodnotu W_0 definovat vztahem

$$\int_{S_0} (W - W_0)^2 dS_0 = \text{minimum}. \quad (3.3)$$

Zde W je hodnota geopotenciálu na tzv. topografické (nehladinové) oceánské ploše S_0 , dS_0 je element jejího plošného obsahu. Střední hladina oceánu znamená, že hlavní časově závislé efekty (poruchy) byly odstraněny.

Pro výslednou hodnotu W_0 autor upravil vztah (3.3) na

$$W_0 = \frac{[pW]}{[p]}, \quad (3.4)$$

kde p je váha měření stanovená dle vzorce (4.3), kapitola 4, W je hodnota potenciálu v konkrétním crossover center.

Formální střední chyba W_0 byla pak stanovena dle známého vztahu

$$m_{W_0} = \sqrt{\frac{[pvv]}{(k-1)[p]}}, \quad (3.5)$$

kde v je oprava dle vztahu $W_0 - W$, k je celkový počet použitých crossover centers pro daný výpočet.

3.2 STANOVENÍ DÉLKOVÉHO ROZMĚROVÉHO FAKTORU GEOPOTENCIÁLU

Hodnotou geopotenciálu W_0 je definován délkový rozměr zemského tělesa. Jeho přímá závislost na geocentrické gravitační konstantě je zřejmá. Proto se vhodnější může jevit poměr

$$R_0 = \frac{GM}{W_0}, \quad (3.6)$$

zvaný délkový faktor geopotenciálu, který prakticky na GM nezávisí. Podobně jako W_0 , vypočítal autor rovněž průběh hodnot veličiny R_0 za období 1993–2003 (tab. 5.1). Dosadí-li se do (3.6) konstanty (2.1) a (2.3), je číselně

$$R_0 = (6\,363\,672,56 \pm 0,05) \text{ m}. \quad (3.7)$$

Velká poloosa a obecného zemského elipsoidu vychází pak na základě teorie hladinového elipsoidu (Pizzetti, 1913)

$$a = R_0 \left(\frac{1}{e} \operatorname{arctg} \frac{e}{1-\alpha} + \frac{1}{3} \frac{\omega^2 a^3}{GM} \right) = 6\,378\,136,70 \text{ m}, \quad (3.8)$$

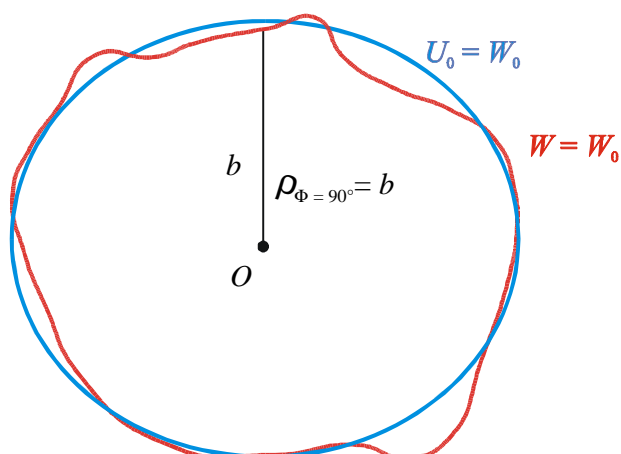
když pro jeho zploštění α byla přijata hodnota (IAG SC3,1995)

$$\alpha = \frac{1}{298,252\,31 \pm 0,000\,01}; \quad (3.9)$$

$e^2 = 2\alpha - \alpha^2$. Přijmeme-li konstantu (3.7), můžeme vyjádřit geocentrický průvodič základní hladinové plochy $W = W_0$ jako funkci geocentrických sférických souřadnic Φ, Λ

$$\rho = R_0 \left[1 + A_0^{(0)} + \sum_{n=2}^{\bar{n}} \sum_{k=0}^n (A_n^{(k)} \cos k\Lambda + B_n^{(k)} \sin k\Lambda) P_n^{(k)}(\sin \Phi) \right]. \quad (3.10)$$

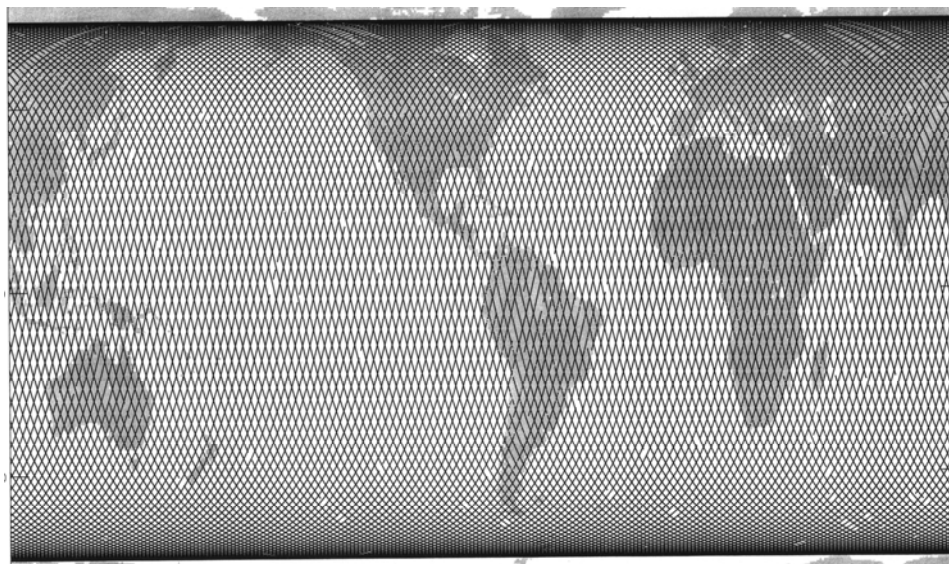
Lze dokázat, že při přijetí některých předpokladů je fyzikální významem délkového rozměrového faktoru geopotenciálu malá poloosa zemského tělesa (obr. 3.4).



Obr. 3.4 Fyzikální význam geopotenciálního měřítkového faktoru R_0 : malá poloosa b zemského tělesa.

4 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍ SÍTĚ NA OCEÁNECH, ODVOZENÍ MATEMATICKÝCH VAH MĚŘENÍ ALTIMETRICKÝCH DRUŽIC PRO ODVOZENÍ KONSTANTY W_0

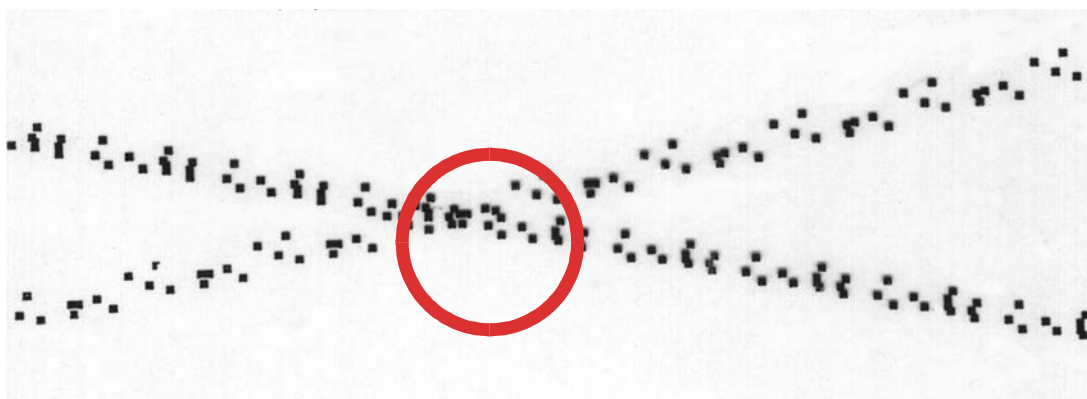
Pro datové zajištění testování geopotenciálních modelů, určení geopotenciálu W_0 na ploše geoidu a geopotenciálního rozměrového faktoru $R_0 = GM/W_0$, jakož i další aplikační a vývojové úkoly, autor stál před problémem, jak vytvořit testovací síť v oblasti světových oceánů. Nabízela se možnost použít družicovou technologii, a to altimetrických dat družice TOPEX/POSEIDON, nyní Jason-1 a Jason-2.



Obr. 4.1 Oblast pokrytá daty altimetrické družice TOPEX/POSEIDON.

4.1 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍ SÍTĚ

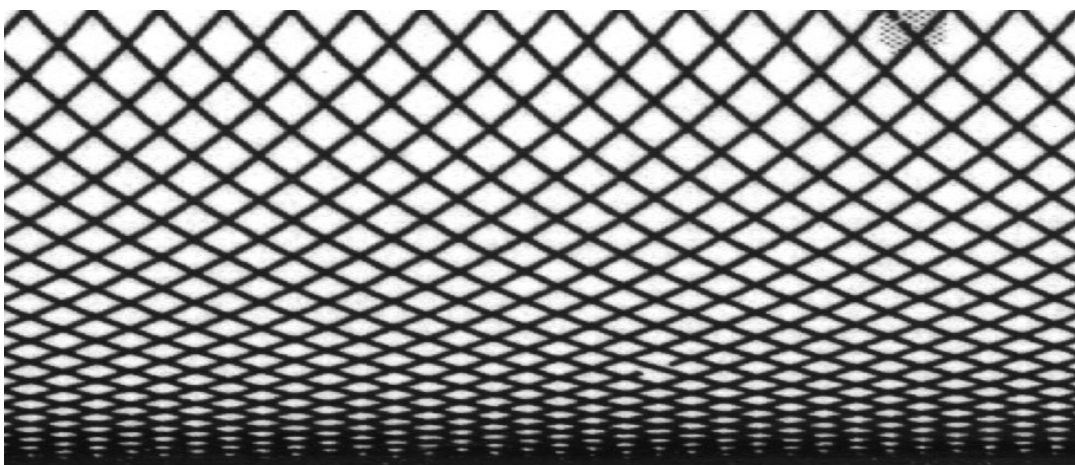
Oblast pokrytá daty družice TOPEX/POSEIDON je uvedena na obr. 4.1. Z analýzy tvaru stopy drah družice se zjistilo, že stopy se protínají podle určitých přesných závislostí. Toho autor využil pro stanovení reprezentativního výběru z měření. Rozhodl se využít právě míst, kde se dráhy družice protínaly, tzv. crossover centers. Detailní ukázka crossover center je uvedena na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Detailní ukázka crossover centr družice TOPEX/POSEIDON (otočeno o 90°).



Obr. 4.3 Stopy drah družice TOPEX/POSEIDON a Jason-1 s crossover center, oblast rovníku.



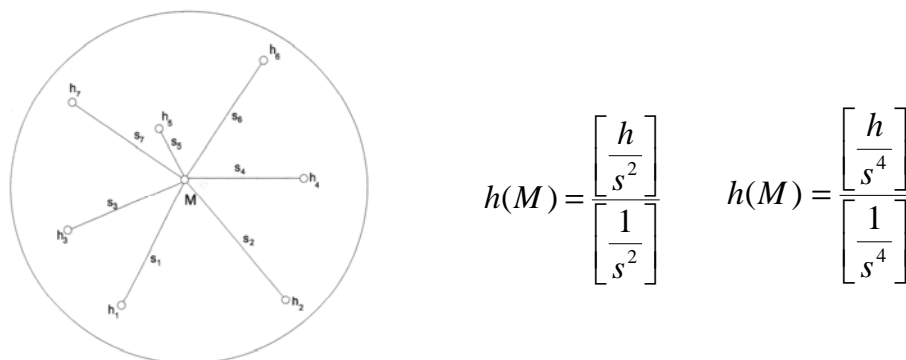
Obr. 4.4 Stopy drah družice TOPEX/POSEIDON a Jason-1 s crossover center, jižní oblasti.

S využitím těchto poznatků autor navrhl a realizoval metodu, pomocí níž zjistil, že stopy dráhy družice protínající se v crossover center tvoří síť rovnoběžek a poledníků - viz obr. 4.3 a obr. 4.4. Autor určil souřadnice, elipsoidické výšky a jejich střední chyby pro všechny crossover centers na oceánech. Protože během letu družice dochází k drobným dráhovým odchylkám (obr. 4.2), rozhodl se autor stanovit elipsoidickou výšku crossover center bodu váženým aritmetickým průměrem s vahou

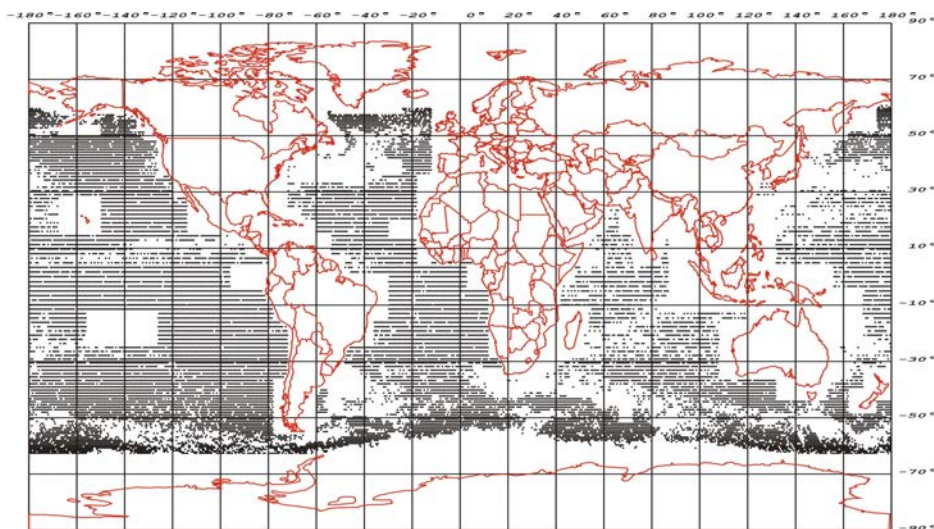
$$p = 1/s^2, p = 1/s^4 \quad (4.1)$$

z nejbližších bodů ležících v okolí $0,05^\circ$ (cca 5 km) crossover center, přičemž s je vzdálenost konkrétního crossover center od teoretického v uvedeném okolí. Obě váhy poskytly prakticky shodné výsledky. Příklad výběru okolních bodů je uveden na obr. 4.5.

Ze souboru bodů testovací sítě byla vyloučena všechna měření, kde byla hloubka podmořského reliéfu pod crossover centers < 2000 m (eliminace systematických chyb). Výsledný počet bodů, které byly použity pro další studie, tím dosáhl počtu 20 768 (obr. 4.6).



Obr. 4.5 Princip výběru bodů stopy dráhy družice TOPEX/POSEIDON v okolí crossover center (bod M) a vztahy pro výpočet elipsoidické výšky bodu M .



Obr. 4.6 Testovací síť GMEMN pro zjišťování přesnosti geopotenciálních modelů na oceánech.

Body uvedené na obr. 4.6 tvoří testovací síť zjišťování přesnosti geopotenciálních modelů na světových oceánech a mořích. Testovací síť na oceánech autor použil však především pro stanovení hodnoty geopotenciálu na geoidu W_0 , resp. geopotenciálního rozměrového faktoru R_0 .

4.2 ODVOZENÍ MATEMATICKÝCH VAH MĚŘENÍ ALTIMETRICKÝCH DRUŽIC

Pro exaktní aplikaci testovací sítě však bylo potřeba vyřešit problém homogenizace nepravidelně rozmístěné crossover centers. Z obr. 4.4 je zřejmé, že nejvyšší hustota dat je v jižních a analogicky i severních přípolárních oblastech. Naopak nejmenší hustota dat je kolem rovníku, obr. 4.3. Z těchto důvodů autor navrhl a zavedl váhu pro každý bod sítě. Princip volby váhy pro konkrétní crossover center je zřejmý z obr. 4.7. Využil přitom skutečnost, že stopy dráhy družice se sbíhají od rovníku směrem k severu a jihu. Tím i plochy, které jsou vymezeny crossover center,

klesají s rostoucí absolutní hodnotou zeměpisné šířky. Pro výpočet plochy byl odvozen následující zjednodušený vztah:

$$P_{\phi} = \left(\frac{a\sqrt{1-e^2}}{1-e^2 \sin^2 \phi} \right) \Delta\phi \Delta\lambda \cos \phi, \quad (4.2)$$

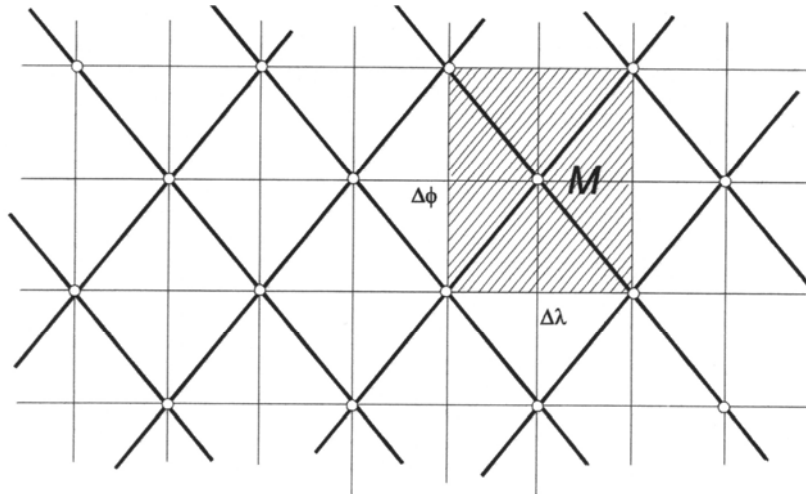
kde a, e jsou parametry použitého elipsoidu (použil jsem altimetrický elipsoid),
 ϕ je zeměpisná šířka bodu GMEMN,
 $\Delta\phi$ je rozdíl zeměpisných šířek nejbližšího severnějšího a jižnějšího crossover center od zadaného crossover center M (viz obr. 4.7),
 $\Delta\lambda$ je rozdíl zeměpisných délek nejbližších crossover center směrem na východ a západ od daného crossover center M (viz obr. 4.7)

Vzhledem k tomu, že velikost plochy P_{ϕ} v zadané zeměpisné šířce je číslo svou velikostí nevhodné pro použití při zpracování v rozsáhlých souborech, provedla se její redukci při výpočtu váhy pro konkrétní bod podle následujícího vzorce:

$$p = \frac{P_{\phi}}{P_e}, \quad (4.3)$$

kde p je matematická váha pro bod sítě GMEMN, $p \leq 1$,
 P_{ϕ} je plocha sférického čtyřúhelníku podle vzorce (4.2) pro konkrétní bod se zeměpisnou šířkou ϕ ,
 P_e je plocha sférického čtyřúhelníku na rovníku pro $\phi = 0^\circ$ dle vzorce (4.2).

Na takto vyvinutou technologii již navázal praktický výpočet konstanty W_0 , resp. R_0 dle (3.4), (3.6) a jejich charakteristik přesnosti dle (3.5) pro W_0 a v jeho modifikaci i pro R_0 .



Obr. 4.7 Princip určování váhy crossover centr při výpočtu potenciálu W_0 a měřítkového geopotenciálního faktoru R_0 .

5 PRAKTICKÉ VÝSLEDKY MONITOROVÁNÍ GEOPOTENCIÁLU NA GEOIDU W_0 A MĚŘÍTKOVÉHO FAKTORU R_0 Z DRUŽICE TOPEX/POSEIDON

Číselně, na základě analýzy altimetrických družicových dat systému TOPEX/POSEIDON, autor určil zaokrouhlenou hodnotu W_0 , z ní pak hodnotu měřítkového faktoru R_0 a parametry hladinového elipsoidu. Zkoumána byla stálost konstanty a tím i odvozených veličin v čase.

5.1 ČÍSELNÉ STANOVENÍ KONSTANTY GEOPOTENCIÁLU W_0 A DÉLKOVÉHO ROZMĚROVÉHO FAKTORU R_0

Praktickou realizaci podmínky (3.4) pro výpočet W_0 bylo možné zabezpečit vzhledem k tomu, že byl k dispozici geopotenciální model EGM96. Dnes využíváme geopotenciální modely vzniklé na bázi misí družic CHAMP a GRACE, zejména EIGEN-CG01C, GGM02C a EIGEN-CG03C. Dále byly k dispozici údaje družicové altimetrie TOPEX/POSEIDON (T/P), dnes i Jason-1 a Jason-2. Měření výšky hladiny oceánu pomocí dat mise T/P otevřelo tedy novou éru v určení a monitorování W_0 . Z altimetrických dat T/P (AVISO 1996) během období 1. leden 1993 až 20. prosinec 2003, cykly 11–414 a 2 242 856 diskretních altimetrických bodů, byla odvozena hodnota

$$W_0 = (62\,636\,856,160 \pm 0,002) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}, \quad (5.1)$$

viz tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Střední roční hodnoty geopotenciálu W_0 a délkového rozměrového faktoru $R_0 = GM/W_0$; použito altimetrických dat TOPEX/POSEIDON a modelu EGM96.

Rok	Počet bodů	W_0 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]	střední chyba [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]	R_0 [m]	střední chyba [m]
1993	203 856	62 636 856,157	0,005	6 363 672,5452	0,000 5
1994	206 973	62 636 856,168	0,005	6 363 672,5440	0,000 5
1995	205 746	62 636 856,163	0,005	6 363 672,5445	0,000 5
1996	203 960	62 636 856,158	0,005	6 363 672,5450	0,000 5
1997	216 757	62 636 856,157	0,005	6 363 672,5451	0,000 5
1998	206 803	62 636 856,162	0,005	6 363 672,5446	0,000 5
1999	203 764	62 636 856,162	0,005	6 363 672,5446	0,000 5
2000	208 814	62 636 856,157	0,005	6 363 672,5452	0,000 5
2001	208 402	62 636 856,151	0,005	6 363 672,5457	0,000 5
2002	197 951	62 636 856,149	0,005	6 363 672,5460	0,000 5
2003	179 830	62 636 856,174	0,005	6 363 672,5434	0,000 5
1993–2003	2 242 856	62 636 856,160	0,002	6 363 672,5448	0,000 2

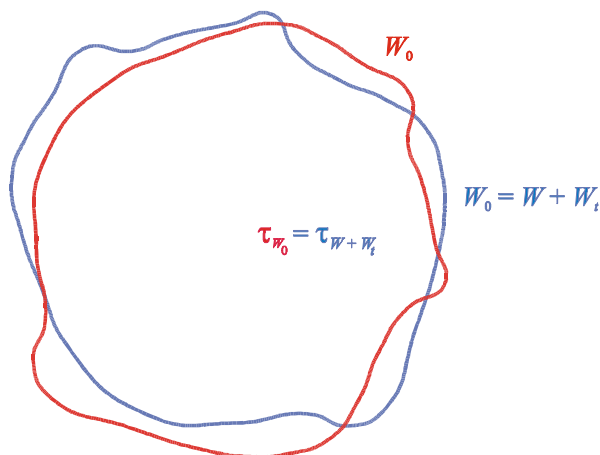
Střední chyba odvozené hodnoty W_0 nevyjadřuje skutečnou přesnost. Ta je limitována chybou kalibrace altimetru a jeho stabilitou. Chyba kalibrace je odhadována na 2–3 cm a odpovídá chybě (0,2–0,3) $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ve W_0 . Tedy odhadnutá střední chyba $\pm 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ by měla být zabezpečena. Jestliže by bylo potřeba snížit střední chybu na 0,3 až 0,1 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, pak by bylo potřeba provést rozsáhlou analýzu dat T/P. Další dodatečné disproporce by mohly být způsobené problémy

troposférické korekce, dynamikou dráhy družice a chybou EGM96. Proto byla doporučena k přijetí průměrná hodnota

$$W_0 = (62\,636\,856,0 \pm 0,5) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}, \quad (5.2)$$

a jako odvozená konstanta

$$R_0 = GM/W_0 = (6\,363\,672,56 \pm 0,05) \text{ m}. \quad (5.3)$$



Obr. 5.1 Plochy $W = W_0$ a $W + W_t = W_0$, tj. plocha slapově neporušená a plocha ovlivněná slapovým potenciálem W_t .

Tato hodnota byla přijata celosvětově, je zahrnuta do IERS Conventions 2003 a 2010 a použita Mezinárodní astronomickou unií pro relativistickou korekci škály atomového času. Znamení vlastností veličiny (5.2) je, že vykazuje značnou stálost v čase (tab. 5.1) střední hodnoty pro jednotlivé roky v období 1993–2003. Dalším výrazným rysem veličiny W_0 je, že nezávisí na slapových jevech. Plochy $W = W_0$ a $W + W_t = W_0$, tj. plocha slapově neporušená a plocha ovlivněná slapovým potenciálem W_t , jsou v prostoru umístěny různě, ale „nesou“ potenciál stejné hodnoty, tedy W_0 . Někde se obě plochy protínají nebo dotýkají, někde probíhá slapově porušená plocha nad neporušenou, jinde pod ní (obr. 5.1). Ale objem τ , který obě plochy vymezují, je stejný.

Dále bylo zjištěno, že konstanta (5.2) je závislá kromě geocentrické gravitační konstantě (2.1), úhlové rychlosti rotace Země (2.2) pouze na objemu $\tau = (108\,320\,710,0 \pm 0,5) \times 10^{13} \text{ m}^3$, který plocha $W = W_0$ vymezuje. Zatím nejsou prokázány žádné geodynamické jevy, které by měnily ve své době přijatou konstantu (5.2). Hodnotu konstanty mohou měnit nová přesnější měření družic Jason-1 a Jason-2, jakož i přesnější geopotenciální modely a přesnější modely oceánické topografické plochy.

Na závěr úvah o konstantě W_0 autor zdůrazňuje, že pro praxi potřebujeme znát pouze hodnotu W_0 a vůbec nemusíme znát průběh základní hladinové plochy $W = W_0$ (obr. 3.2).

5.2 ODVOZENÍ PARAMETRŮ HLADINOVÉHO ELIPSOIDU NA ZÁKLADĚ VELIČINY W_0

V kapitole 2 byl uveden důvod potřeby znalosti hodnoty potenciálu na geoidu, tedy potřeby testovat přesnost geopotenciálních modelů. S využitím hodnoty konstanty W_0 (5.2) a vztahů v kapitole 2 byly odvozeny parametry hladinového elipsoidu ve třech slapových systémech – tabulka 5.2. Ty byly použity při praktickém testování přesnosti geopotenciálních modelů i při vývoji světového výškového systému.

Tabulka 5.2 Číselné hodnoty parametrů hladinového elipsoidu ve třech slapových systémech.

slapový systém	J_2 [10^{-6}]	a [m]	$1/\alpha$	W_0 [$m^2 \cdot s^{-2}$]
mean	1082,666 7	6 378 136,68	298,252 34	62 636 856,0
tide free	1082,626 7	6 378 136,55	298,257 69	62 636 856,0
zero	1082,635 9	6 378 136,58	298,256 45	62 636 856,0

6 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ KONSTANTY W_0

Tato konstanta má mnohostranné praktické využití nejen v geodézii. Bude se jednat zejména o následující využití v současnosti nebo v blízké budoucnosti:

- sjednocení lokálních výškových systémů, vybudovaných na různých kontinentech;
- vybudování celosvětového výškového systému;
- geodetické a výškové připojení geodeticky izolovaného území;
- monitorování lokálního a globálního růstu hladin oceánů;
- sjednocení výpočtu tíhových dat pomocí sjednocených nadmořských výšek;
- sjednocení časových škál v astronomii při měření času na observatořích;
- možnost zvýšení bezpečnosti letecké dopravy, jako zamezení střetu letadla s přirozenou nebo umělou překážkou a při přistávacích manévrech letadel zejména za ztížených povětrnostních podmínek a poruše technického zařízení letiště;
- konstrukce nových geodetických přístrojů pro určování nadmořské výšky pomocí přesného měření času.

7 ZÁVĚR

Geopotenciál na geoidu W_0 má nezastupitelnou úlohu v řešení soudobých problémů globální geodézie. Jeho číselná hodnota je jednou z fundamentálních geodetických konstant. Ve spojení se soudobými geopotenciálními modely totiž umožňuje určit mimo jiné nadmořskou výšku bodů GPS bez dalších informací v libovolné části světa. Dále umožňuje unifikovat lokální výškové systémy nebo definovat a prakticky realizovat výškový systém v geodeticky izolovaném území. Využití konstanty je mnohostranné a multidisciplinární (viz kap. 6).

Pro čistou geodetickou vědu znamená určení $W_0 = (62\ 636\ 856,0 \pm 0,50) m^2 \cdot s^{-2}$ možnost zpřesnění hodnoty velké poloosy a obecného zemského elipsoidu. Ta je však závislá na slapovém systému:

MEAN $a = (6\ 378\ 136,68 \pm 0,02-0,05) m$;

ZERO $a = (6\ 378\ 136,58 \pm 0,02-0,05) m$;

TIDE-FREE $a = (6\ 378\ 136,55 \pm 0,02-0,05) m$.

Přesnost určení veličin W_0 i a je limitována chybou kalibrace altimetru družicového systému TOPEX/POSEIDONP $\pm(2-5)$ cm. Přesnost veliny i její hodnota se může změnit při použití přesnějších dat altimetrických družic Jason-1 a Jason-2, přesnějšího geopotenciálního modelu EGM2008 a družicových geopotenciálních modelů. K přesnosti řešení přispěje rovněž aktuální modely oceánické topografické plochy. V současné době je veličina W_0 zařazena do IERS Conventions (2003, 2010) k využívání při řešení relativistických úloh astronomie. Zařazení W_0 jako světového standardu ve světové geodézii je na pořadu dne v rámci IAG.

8 VÝBĚR POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AVISO (1995) *User Handbook: Reduced GDRs*. Edition 1, 36, 17 pp.
- [2] AVISO/CALVAL synthesis report: TOPEX/POSEIDON cycles 1 to 181 (1993–1998). *AVI-NT-011-315-CN*, Edition 1. 0, 29.
- [3] AVISO User Handbook. *AVI-NT-02-101-CN*, Edition 3. 0, July 1996.
- [4] AVISO (1998) AVISO/CALVAL synthesis report: TOPEX/POSEIDON cycles 1 to 181 (1993–1998). *AVI-NT-011-315-CN* Edition 1.0, 29.
- [5] ANTONOV, V.A., KHOLSHEVNIKOV, K.V. (1980, 1982) On the possibility of applying the Laplace series for Gravitational potential on the planet's surface (in Russian). *Astr. Journ.*, 57, 1323–1330, *Astr. Journ.*, 59, p. 763–768.
- [6] ANTONOV, V.A., KHOLSHEVNIKOV, K.V. (1985) On the velocity of decreasing of the general term of the Laplace series for gravitational potential (in Russian). *Vestnik Len. Univ., Mathematics, Mechanics and Astronomy*, 22, p. 85–87.
- [7] ANZENHOFER, M., GRUBER, TH., RENCH, M. (1997) Global sea analysis based on ERS-1 altimeter data In Gravity, Geoid and Marine Geodesy. *Int. Symp. IAG No 117*, Tokyo Sep 30–Oct 5 1996, Springer-Verlag, p. 674–681.
- [8] BALAZS, E.I., YOUNG, G.M. (1982) Corrections Applied by the National Geodetic Survey to Precise Leveling Observations. *NOAA Technical memorandum NOS NGS 34*, National Geodetic Survey, Rockville, Md.
- [9] BJERHAMMAR A. (1975) Discrete approaches to the solution of the boundary value problem in physical geodesy. *Boll. Geo. Sci., Affini*, 32, p. 185–240.
- [10] BOUCHER, C., ALTAMIMI, Z., DUCHEM, L. (1993) ITRF 92 and its associated velocity field. *IERS Technical Note*, 15, Observatoire de Paris, 164 pp.
- [11] BROVAR, V.V. (1988) On the Potential Origins of isolated Nets. *Manuscripta Geodaetica*, 13, p. 23–32.
- [12] BURKE, K.P., BURŠA, M., RADĚJ, K., TRUE, S.A. (1996) Accuracy estimates of geopotential models and global geoid. *Proc. Symp. IAG No116*, XXI IUGG General Assembly, Boulder, 1995, Travaux IAG, Springer Verlag, Heidelberg, p. 50–60.
- [13] BURŠA, M. (1995) Geoidal potential free of zero-frequency tidal distortion. *Earth, Moon and Planets*, 71, p. 59–64.
- [14] BURŠA, M., ŠÍMA, Z., KOSTELECKÝ, J. (1992) Determination of the geopotential scale factor from satellite altimetry. *Studia geophysica. et geodaetica*, 36, p. 101–108.
- [15] BURŠA, M., KOUBA, J., KUMAR, M., MÜLLER, A., RADĚJ, K., TRUE, S.A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M. (1999) Geoidal geopotential and World Height System. *Studia geophysica. et geodaetica*, 43, p. 327–337.
- [16] BURŠA M., KOUBA J., RADĚJ K., TRUE, S.A. (1999) Determination of the geopotential at the tide gauge defining the North American Vertical Datum 1988 (NAVD88). *Geomatica*, 53, No. 3, p. 291–296.
- [17] BURŠA, M., GROTEN, E., KENYON, S., KOUBA, J., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M. (2001) Earth's dimension specified by geoidal geopotential. Presented at the IAG 2001 Scientific Assembly, Sep. 2–7, 2001, Budapest, Hungary. *Studia geophysica. et geodaetica*, 46, (2002), p. 1–8.
- [18] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M., ŠIMEK, J. (2002) World height system specified by Geopotential at tide gauge stations. *IAG Symposium, Vertical Reference System*, Cartagena, Colombia, Feb. 20–23, 2001, Proceedings, Springer Verlag, p. 291–296.
- [19] BURŠA, M. (2004) Geopotenciál, teoretické základy a modely. Učebnice, díl I, *Geografická služba AČR*, 2004, 208 stran.

- [20] CAZENAVE, A., DOMINH, K., BROSSIER, C., GENNERO, M.C., BONNEFOND, P., BARLIER, F., EXERTIER, P. (1998) Mean Sea Level Investigation at Global and Regional Scales from TOPEX/POSEIDON. *AVISO Newsletter, No. 6, CNES and NASA*, p. 23–24.
- [21] DORANDEU, J., LE TRAYON, P.Y. (1999) Effects of Global Mean Pressure variations on Sea Level Changes from TOPEX/POSEIDON. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, p. 279–283.
- [22] EREMEEV, V.F., YURKINA, M.I. (1972) Theory of heights in the Earth's gravity field. Nedra. Moscow, pp. 144 (in Russian).
- [23] FUKUSHIMA, T. (1994) Time ephemeris. Proc. of the Twenty-sixth Symp. on Celestial Mechanics, Tokyo, Japan, Jan. 12–13, 1994, Ed. Kinoshita H. and Nakai H., p.149–159.
- [24] GAUSS, C.F. (1828) Bestimmung des Breitenunterschiedes zwischen den Sternwarten von Goettingen und Altona durch Beobachtungen am Ramsdenschen Zenithsector. Vanderschoeck - Ruprecht, Goettingen, p. 48–50.
- [25] TAPLEY, B.D., BETTADPUR, S., WATKINS, M.M., REIGBER, CH. (2004) The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results. *Geophys. Res. Letters*, 31, L09607, doi: 10. 1029/2004GL019920, 2004. Also web pages: <http://www.gfz-potsdam.de/grace> or <http://www.csr.utexas.edu/grace>.
- [26] GROTEN, E. (2004) Fundamental Parameters and Current (2004) Best Estimates of the Parameters of Common Relevance to Astronomy, Geodesy, and Geodynamics. The Geodesist's Handbook 2004, *Journ. of Geodesy*, 77, No. 10, p. 724–731.
- [27] HEISKANEN, W.A., MORITZ, H. (1967) Physical Geodesy, W.H.Freeman and Co.
- [28] HALTINER, G.J. (1971) Numerical Weather Prediction, John Wiley and Sons. Inc. New York, - p. 93–196.
- [29] CHEN, R., KAKKURI, J. (1996) Results of the Baltic Sea Level 1993 Campaign.,95:2 Final Result of the Baltic Sea Level 1993 GPS Campaign. *Research Works of the SSG 5.147 of the International Association of Geodesy*, 1995, eddited by Juhani Kakkuri, p. 21–30.
- [30] CHEN, T.CH., YEN, M.CH., PFAENDTNER, J., SUD, Y.C. (1996) Annual variation of the precipitable water and its maintenance: observation and climate-simulation. *Tellus 48A*, p. 1–16.
- [31] CHEN, J.L., WILSON, C.R., CHAMBERS, D.P., NEREM, R.S., TAPLEY, B.D. (1998) Seasonal global water mass budget and mean sea level variations. *Geophysical Research Letters*, No. 19.
- [32] IERS Standards (Ed. D.D. McCarthy) (1992) *IERS Technical Note 13*.
- [33] IAG SC3 Final Report (1995) Travaux de L'Association Internationale de Géodésie. Tome 30, Paris, p. 370–384.
- [34] IERS Conventions (2003). McCarthy, D.D., Petit, G. (eds.). IERS Conventions Centre, *IERS Technical Note No. 32*, Vlg. des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M., 2004, 127 pp.
- [35] IERS Technical Note No. 29 (2002). Capitaine N. et al. (eds.), Vlg. des Bundesamts für Kartographie und Geodaesie, Frankfurt a. M., 134 pp.
- [36] JEFFREYS, H. (1929) *The Earth*, Cambridge Univ. Press.
- [37] KOUBA, J. (2001) International GPS Service (IGS) and World Height System. World Height System Workshop, Prague, Nov. 8–9, 2000. Proc. *Acta geodaetica*, No. 1, 2001, p. 35–46.
- [38] KOUBA, J. (2004) Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*, Vol. 8, No. 3, p. 170–180.
- [39] LEMOINE, F.G., SMITH, D.E., KUNZ, L., SMITH ,R., PAVLIS, E.C., KLOSKO, S.M., CHINN, D.S., TORRENCE, M.H., WILLIAMSON, R.G., COX, C.H., RACHLIN, K.E., WANG, Y.M., KENYON, S.C., SALMAN, R., TRIMMER, R., RAPP, R.H., NEREM, R.S. (1997) The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model.

- Proceedings of the International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy (GRAGEOMAR 1996)*. The University of Tokyo, Japan, September 30–October 5 1997. Springer Vlg., p. 461–469.
- [40] LE TRAON, P.Y., GASPAR, P., OGOR, F., DORANDEU, J. (1995) Global adjustment of ERS-1 data using T/P as a reference. *Techn. Report contract CNESICLS GOI94/522*, 12. pp.
- [41] LISTING, J.B. (1873) Über unsere jetzige Kenntniss der Gestalt und Groesse der Erde. *Nachrichten von der Koenigl. Gesellschaft der Wissenschaften und der G.A. Universitaet zu Goettingen (1873)*, No 3, Goettingen VLG der Dieterichschen Buchhandlung.
- [42] MAINVILLE, A., VÉRONNEAU, M. (1990) Orthometric Heights Using GPS in Canada. In: R.H. Rapp and Sanso (Eds). *Determination of the Geoid Present and Future, Symp. No. 106*, Milan, Italy, June 11–13, 1990, Springer-Verlag, p. 160–172.
- [43] MAINVILLE, A. (1997) The February 1997 GPS on BM data file from Canada, A distribution data set for 1482 stations in Canada. Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, May 9.
- [44] MALYS, S., SLATER, J.A. (1994) Maintenance and Enhancement of the World Geodetic System WG584 *Pres. at The Institute of Navigation, ION GPS-94*, Salt Lake City, Utah, September 1994, p. 1–8.
- [45] MATHER, R.S., RIZOS, C., MORRISON, T. (1978) On the Unification of Geodetic Levelling Datums Using Satellite Altimetry. *NASA Techn. Mem. 79533*, Goddard Space Flight Center, Greenbelt Md.
- [46] MÉNARD, Y., JEANSOU, E., VINCENT, P. (1994) Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters at Lampedusa: Additional result at Harvest. *J. Geophys. Res.*, 99, No. C12, 24, p. 487–504.
- [47] MILBERT, D.G. (1995) Improvement of high resolution geoid height model in U.S. by GPS heights on NAVD88 benchmarks. *IGeS Bull. N.4*. New Geoids in the World, International Geoid Service, Milan, p. 13–66.
- [48] MOLODENSKIJ, M.S., (1945) Fundamental Problems in Geodetic Gravimetry. GEODEZIZDAT, Moscow 1945, pp. 106 (in Russian).
- [49] MOLODENSKY, M. S. (1945) Basic problems of geodetic gravimetry. *Trudy TsNI-IGAiK*, vyp. 42, 107 pp. The English version by the Office of Technical Services US Department of Commerce. In: Molodensky M. S., 1958: Grundbegriffe der geodätischen Gravimetrie. S. 15–147, VEB Verlag Technik, Berlin. In German.
- [50] MOLODENSKIJ, M.S. (1948) External gravity field and figure of the Earth's surface. *Izv. AN SSSR seriya geograf. i geofiz.* 12, p. 199–211 (in Russian).
- [51] MOLODENSKIJ, M.S., EREMEEV, V.F., YURKINA, M.I. (1960) Methods for Study of external Gravitational Field and Figure of the Earth (in Russian). *Trudy TsNIIGAiK*, Moscow, No 131, pp. 249. English transl.: Israel Program for Sci. Transl. Jerusalem, pp. 248, 1962.
- [52] MORITZ, H. (1980) Advanced physical geodesy. *Abarcus Press*.
- [53] MORITZ, H. (1984) Geodetic Reference System 1980. *Bull. Géod.* 58, p. 388–398.
- [54] MUNK, W.H., MILLER, R.L. (1950) Variations in the earth's angular velocity resulting from fluctuations in atmospheric and oceanic circulation. *Tellus*, Vol. 2; p. 93–101.
- [55] NEREM, R.S., PUTNEY, B.H., MARSHALL, J.A., LERCH, F.J., PAVLIS, E.C., KLOSKO, S.M., LUTHCKE, S. B., PATEL, G.B., WILLIAMSON, R.G., ZELENSKY, N.P. (1993) Expected orbit determination performance for the T/P Mission. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31, p. 333–354.
- [56] NEREM, R.S, MITCHUM, G.T., GIESE, B.S. (1998) An investigation of very low frequency sea level change using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *AVISO Newsletter No. 6, CNES and NASA*, p. 88–89.

- [57] NEREM, R.S., SCHRAMA, E.J., KOBLINSKY, C.J., BECKLEY, B.D. (1994) A preliminary evaluation of ocean topography from the T/P mission. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, No. C12, 24, p. 565–583.
- [58] NESVORNÝ, D., ŠÍMA, Z. (1994) Refinement of the geopotential scale factor R_0 on the satellite altimetry basis. *Earth, Moon and Planets*, 65, p. 79–88.
- [59] NRC (1997) Satellite Gravity and Geosphere, Contributions to the Study of the Solid Earth and Its Fluid Envelope. *Commission on Geosciences, Environment, and Resources, Chair Jean Dickey*, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 112.
- [60] PAN, M. SJÖBERG, L.E. (1993) Baltic Sea Level Project with GPS. *Bull. Géod.* 67, p. 51–59.
- [61] PEIXOTO, J.P., OORT, A.H. (1992) Physics of climate, American Institute of Physics. New York, p. 135–137.
- [62] PETIT, G. (1998) Importance of a Common Framework for the Realization of Space-Time Reference Systems; in: *Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS)* (Eds. R. Rummel, H. Drewes, W. Bosh and H. Hornik), *International Association of Geodesy Symposia*, vol. 120, Springer pub., p. 1–7.
- [63] PETROVSKAYA, M. S. (1976) Generalization of Laplace's expansion to the Earth's surface. *The Journal of the International Association of Geodesy, Bulletin Géodésique*, Volume 51, Paris, p. 53–62.
- [64] PIZZETTI, P. (1907) Höhere Geodäsie. Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen. *Des sechsten Bandes erster Teil. Heft No. 2*, Geodäsie und Geophysik, Leipzig, Verlag und Druck von B. G. Teubner, p. 117–243.
- [65] PIZZETTI, P. (1913) Principii della teoria meccanica della figura dei pianeti. Pisa. E. Spoerri, XIII, 251 pp. (In Italian).
- [66] RADĚJ, K. (1996) Geopotential model testing sites in the central part of Europe. *Studia geophysica et geodaetica*, 40, p. 130–135.
- [67] RAPP, R.H., WANG, Y.M., PAVLIS, N.K. (1991) The Ohio state 1991 geopotential and sea surface topography harmonic coefficient models. Dept. Of Geod. Sci. and Surv., Ohio State University, Columbus Rep., 410.
- [68] RAPP, R.H. (1994) Separation between Reference Surface of Selected Vertical Datums. *Bulletin Géodésique*, 69, p. 26–31.
- [69] RAPP, R.H., ZHANG, C., YI Y. (1996) Analysis of dynamic ocean topography using TOPEX data and orthonormal functions. *J. Geophys. Res. - Oceans XX*, 101, No. C 10, p. 22485–22494.
- [70] RIES, J.C., EANES, R.J., SHUM, C.K., WATKINS, M.M. (1992) Progress in the determination of the gravitational coefficient of the Earth. *Geophys. Res. Letters*, 19, 529–531.
- [71] SOMIGLIANA, J.C. Teoria generale del campo gravitazionale dell' ellisoide rotazione. *Mem. Soc. Astron: Ital.*, IV.
- [72] SEIDELMANN, P. K., FUKUSHIMA T. (1992) Why New Time Scales? *Astron. Astrophys.*, 265, p. 833–838.
- [73] SOFFEL, M. H., MULLER J., WU X., XU C. (1991) *Consistent Relativistic VLBI Theory with Picosecond Accuracy*. *Astron. Journal*, 101, p. 2306–2310.
- [74] TRENBERTH, K.E. (1981) Seasonal variations in global sea level pressure and the total mass of the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No.C6, 5328.
- [75] VATRT, V. (jun) (2006) Ověření stálosti hodnoty potenciálu na geoidu s využitím altimetrických dat a různých geopotenciálních modelů. Diplomová práce. ČVUT Praha.

- [76] WOLF, P., PETIT G. (1995) Relativistic theory for clock syntonization and the realization of geocentric coordinate times. *Astron. Astrophys.*, 304, p. 653–661.
- [77] YURKINA, M.I. (1981) Geopotential at the Vertical Datum and controlling the leveling, (in Russian). *Geodesy and Cartography* 10, p. 11–15.
- [78] YURKINA, M.I. (1996) Gravity Potential at the Major Vertical Datum as Primary Geodetic Constant. *Stud. geophys. et geod.*, 40, p. 9–13.
- [79] ZADRO, M.B., MARUSSI, A. (1973) On the static effect of Moon and Sun on the shape Earth. In: *AATTI Proceedings V, Simp. sulla Geod. Matem*, Firenze, October 25–26, 1972, Firenze 1973, p. 249–267.
- [80] ZHONGOLOVICH, I.D. (1957) The geopotential. *Bull. Inst. Teor. Astron.*, 81, p. 505–523 (in Russian).

9 PŘEHLED PŮVODNÍCH VĚDECKÝCH PRACÍ V ČASOPISECH

9.1 PŮVODNÍ VĚDECKÉ PRÁCE VE VĚDECKÉM ČASOPISU S IF

- [1] BURŠA, M., KOUBA, J., VATRT, V., VÍTEK, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: TOPEX/POSEIDON Altimetry and Dynamics of the Ocean-Athmosphere system. *Studia geophysica et geodaetica*, 44, 2000, p. 1–12.
- [2] BURŠA, M., KOUBA, J., MÜLLER, A., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Determination of geopotential differences between local vertical datums and realization of a World Height System. *Studia geophysica et geodaetica*, 45, 2001, p. 127–132.
- [3] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., MÜLLER, A., RADĚJ, K., VATRT, V., VÍTEK, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Long-term Stability of Geoidal Geopotential from Topex/Poseidon Satellite altimetry 1993–1999. *Earth, Moon, and Planets*, 84, 2001, no. 3, p. 163–176.
- [4] BURŠA, M., GROTEN, E., KENYON, S., KOUBA, J., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Earth's dimension specified by geoidal geopotential. *Studia geophysica et geodaetica*, 46, 2002, p. 1–8.
- [5] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., RADĚJ, K., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Dimension of the Earth's General Ellipsoid from TOPEX/POSEIDON altimetry 1993–1999. *Earth, Moon, and Planets*, 91, 2002, p. 31–41.
- [6] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., RADĚJ, K., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VÍTEK, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Temporal Variations in the Second-degree Stokes Tesseral Geopotential Coefficients from TOPEX/POSEIDON Altimetry. *Earth, Moon, and Planets*, 93, 2003, p. 37–64.
- [7] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: A Global Vertical Reference Frame Based on Four Regional Vertical Datums. *Studia geophysica et geodaetica*, 48, 2004, p. 493–502.
- [8] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VÍTEK, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Second Tesseral Harmonics Torque due to the Dynamics of the Ocean Surface Layer as Detected by TOPEX/POSEIDON Altimetry 1993–2000. *Studia geophysica et geodaetica*, 49, 2005, p. 13–22.
- [9] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VÍTEK, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Long-Term Variations in the Second Sectorial Stokes Harmonics on the Basis of TOPEX/POSEIDON Altimetry between 1993 and 2000. *Studia geophysica et geodaetica*, 50, 2006, p. 509–524.

- [10] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, J., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VÍTEK, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: The Geopotential Value W_0 for Specifying the Relativistic Atomic Scale and Global Vertical Reference Frame. *Studia Journal of Geodety*, 81, 2007, p. 103-110.

9. 2 PŮVODNÍ VĚDECKÉ PRÁCE V RECENZOVANÉM VĚDECKÉM ČASOPISU

- [1] BURŠA, M., BYSTRZYCKÁ, B., RADĚJ, K., VATRT, V.: Estimation of the accuracy of geopotential models. *Studia geophysica et geodaetica*, 39, 1995, p. 365–374.
- [2] VATRT, V.: Zero-Frequency tidal distortion due to the orbital elements of tide-forming bodies. *Studia geophysica et geodaetica*, 40, 1996, p. 119–124.
- [3] VATRT, V.: Mean equatorial gravity derived from various geopotential models. *Studia geophysica et geodaetica*, 40, 1996, p. 125–129.
- [4] BURŠA, M., RADĚJ, K., ŠÍMA, Z., TRUE, S. A., VATRT, V.: Determination of the geopotential scale factor from TOPEX/POSEIDON satellite altimetry. *Studia geophysica et geodaetica*, 41, 1997, p. 203–216.
- [5] DUŠÁTKO, D., KOPECKÝ, R., VATRT, V.: Quasigeoid of the central Europe from the multinational data. *International Geoid Service Bulletin No 6*, D.I.I.A.R. Politecnico di Milano, Italy, p. 165–166, 1997.
- [6] VATRT, V.: Accuracy estimated of normal heights computed at GPS sites. *Studia geophysica et geodaetica*, 41, 1997, p. 221–224.
- [7] BURŠA, M., RADĚJ, K., ŠÍMA, Z., TRUE, S. A., VATRT, V.: Test for accuracy of recent geopotential models. *International Geoid Service Bulletin No 6*, D.I.I.A.R. Politecnico di Milano, Italy, 1997, p. 167–188.
- [8] BURŠA, M., KOUBA, J., RADĚJ, K., ŠÍMA, Z., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Ocenka točnosti geopotencialnych modelej EGM X01-X05, EGM 96. *Geodezija i kartografija*, 8, 1998, s. 10–13 (Moskva).
- [9] BURŠA, M., KOUBA, J., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Monitoring geoidal potential on the basis of TOPEX/POSEIDON altimeter data. *AVISO Altimetry Newsletter*, Number 6, *TOPEX/POSEIDON: 5 Years of Progress*, CNES, NASA, 1998, p. 130–131 (Toulouse).
- [10] BURŠA, M., RADĚJ, K., ŠÍMA, Z., TRUE, S. A., VATRT, V.: Final report on testing accuracy of geopotential models EGM01-X05, EGM96. *International Geoid Service Bulletin No 7*, D.I.I.A.R. Politecnico di Milano, Italy, 1998, p. 14–23.
- [11] VATRT, V.: Methodology of Testing geopotential models specified in different tide systems. *Studia geophysica et geodaetica*, 43, 1999, p. 73–77.
- [12] VATRT, V.: Truncation error due to geopotential model EGM96. *Studia geophysica et geodaetica*, 43, 1999, p. 223–227.
- [13] VATRT, V.: Long-term stability of sea surface topography from TOPEX/POSEIDON altimetry. *Studia geophysica et geodaetica*, 43, 1999, p. 338–344.
- [14] BURŠA, M., KOUBA, J., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Mean Earth's equipotential surface from TOPEX-POSEIDON altimetry. *Studia geophysica et geodaetica*, 42, 1998, p. 459–466.
- [15] BURŠA, M., KOUBA, J., MÜLLER, A., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Differences between Mean Sea Levels for the Pacific, Atlantic and Indian Oceans from Topex/Poseidon altimetry. *Studia geophysica et geodaetica*, 45, 1999, p. 1–6.
- [16] BURŠA, M., KOUBA, J., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Temporal Variations in Sea Surface Topography and Dynamics of the Earth's Inertia Ellipsoid. *Studia geophysica et geodaetica*, 43, 1999, p. 7–19.

- [17] BURŠA, M., KOUBA, J., KUMAR, M., MÜLLER, A., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Geoidal Geopotential and World Height System. *Studia geophysica et geodaetica*, 43, 1999, p. 327–337.
- [18] BURŠA, M., KOUBA, J., RADĚJ, K., TRUE, S. A., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Determination of the geopotential at the tide gauge defining the North American Vertical Datum 1988 (NAVD 88). *Geomatica*, 53, 1999, no. 3, p. 157–162.
- [19] BURŠA, M., KOUBA, J., VÍTEK, V., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: TOPEX/POSEIDON altimetry and dynamics of the ocean-atmosphere system. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 1999.
- [20] TENZER, R., VATRT, V., 2001: Accuracy of estimation of geopotential model EGM 96 at territory of Slovakia. *Civil Engineering Series*, 24, Publisher University in Žilina, 2001, 139–148.
- [21] BURŠA, M., KOUBA, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Geopotential at tide gauge station used for specifying a World Height System. *Acta geodaetica 2001* (1), ISSN 1801-8483, str. 87–96.
- [22] BURŠA, M., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Určení posunů nul vodočtů lokálních výškových systémů. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 1–10.
- [23] BURŠA, M., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M., VÍTEK, V.: Družicová altimetre TOPEX/POSEIDON a dynamika systému oceán-atmosféra. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 11–20.
- [24] BURŠA, M., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Časové změny topografické oceánické plochy a jejich vliv na dynamiku zemského elipsoidu setrvačnosti. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 21–34.
- [25] BURŠA, M., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Rekonstrukce geodetického referenčního systému. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 35–42.
- [26] BURŠA, M., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Rekonstrukce geodetického referenčního systému na území Afganistánu. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 43–44.
- [27] DUŠÁTKO, D., VATRT, V.: Geocentrický systém WGS 84 (G873) na území České republiky. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 107–111.
- [28] BURŠA, M., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Určování azimutu a výškového úhlu směru letu na základě prostorových poloh monitorovaných palubní aparaturou GPS. *Acta geodaetica 2001* (2), ISSN 1801-8483, str. 112–117.
- [29] BURŠA, M., KOUBA, K., ŠÍMA, Z., VATRT, V., YURKINA, M. I.: Opredelenie obchevo ellipsoida pri uslovii V.V.Brovvara. *Geodezija i kartografija*, 11, 2002, s. 6–9, (Moskva).
- [30] BURŠA, M., KOUBA, K., ŠÍMA, Z., VATRT, V., YURKINA, M. I.: Dimension of the Earth's mean ellipsoid specified by Brovar's modified conditions. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 39 (1), 2004, p. 15–25.
- [31] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, K., ŠÍMA, Z., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Global Vertical Reference Frame. *Acta geodaetica 2006*, ISSN 1801-8483, str. 14–19.
- [32] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, K., ŠIMEK, V., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: World Height System at Tide Gauge Stations. *Acta geodaetica 2006*, ISSN 1801-8483, str. 20–27.
- [33] BURŠA, M., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Practical Realisation of Geodetic Reference Frame on the Basis of Geopotential Models. *Acta geodaetica 2006*, ISSN 1801-8483, str. 28–31.
- [34] BURŠA, M., GROTEN, M., KENYON, S., KOUBA, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Earth's Dimension Specified by geopotential Models. *Acta geodaetica 2006*, ISSN 1801-8483, str. 32–37.
- [35] BURŠA, M., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: The Way forward to Come to EGM96 Improved. *Acta geodaetica 2006*, ISSN 1801-8483, str. 45–54.

- [36] BURŠA, M., RADĚJ, K., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Geocentr Motions and Geodynamic Consequentces Due to Dynamic of Sea Surface Topography from TOPEX/POSEIDON Altimetry 1993-2004. Acta geodaetica 2007, ISSN 1801-8483, str. 129–159.
- [37] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, K., ŠÍMA, VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Results of EGM08 geopotential models testing and its comparison with EGM96. International Geoid Service, Joint Bulletin, „Newton´s Bulletin“, External Quality Evaluation Reports of EGM08, Issue n^o 4, April 2009, International Association of Geodesy and International Gravity Field Service, ISSN 1810-8555, str. 50–56.
- [38] BURŠA, M., KENYON, S., KOUBA, K., ŠÍMA, VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M.: Global Vertical Reference Frame. Acta geodaetica 2009, ISSN 1801-8483, str. 53–63.

10 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Další svou vědeckou, odbornou a pedagogickou činností autor naváže na dosavadní stěžejní aktivity v oblasti fyzikální geodézie a družicové geodézie s cílem udržení a zvýšení současné úrovně aktivit se zapojením dalších zejména mladších vědeckých pracovníků do konkrétních vědeckých aktivit.

Konkrétně je možné zdůraznit následující oblasti vědecké činnosti

- zpracování aktuálních dat altimetrických družic Jason 1 a Jason 2 s aplikací inverzní barometrické korekce pro zpřesnění výsledků zpracování;
- využívání dat modelu oceánické topografické plochy DNSC08 a pro polární oblasti i DNSC10 pro zjišťování nadmořské výšky mořské hladiny, výšky kvazigeoidu na oceánech a tíhových dat;
- testování přesnosti aktuálních geopotenciálních modelů, speciálně pak družicových geopotenciálních modelů GRACE a GOCE pomocí dosud používaných dat GPS a nivelovaných výšek, nově pak pomocí tíhových dat a dat tížnicových odchylek;
- lokální zpřesnění testovaných geopotenciálních modelů pomocí residui vzniklých jako výsledek testování přesnosti geopotenciálních modelů;
- zpřesnění konstanty geopotenciálu na geoidu W_0 s využitím zmíněných dat altimetrických družic a vybraných (testovaných) geopotenciálních modelů;
- odvození parametrů zemského hladinového elipsoidu a jeho tíhových parametrů v různých slapových systémech s využitím zpřesněné hodnoty geopotenciálu na geoidu W_0 ;
- cyklické zjišťování časové stability zpřesněné konstanty W_0 a odvození analytického vztahu pro vyjádření této závislosti;
- aplikace analytické závislosti na prognózování globálního růstu hladin světových oceánů i růstu hladin ve vybraných lokálních mořích;
- zavádět do výuky geodézie, geofyziky a fyzikální geodézie na VUT v Brně současné poznatky domácí i světové vědy v této oblasti;
- zvýšit zapojení doktorandů do řešení mezinárodních vědeckých úkolů;
- ve výuce fyzikální geodézie zdůraznit efektivitu a praktické aplikace přednášených metod s důrazem na jejich samostatného používání absolventy studia geodézie a kartografie;

Pro podporu vědecké činnosti, doktorského studia i možnosti prosazovat a prezentovat výsledky výzkumu na mezinárodních vědeckých konferencích, symposiích a kongresech hodlá autor usilovat o získávání grantů GAČR, Czech Invest, ale i grantů zahraničních, zejména Evropské unii a USA.

Autor bude úzce spolupracovat s Mezinárodní geodetickou unií zejména v projektech GGOS (Global Geodetic Observing System) „Unification vertical datums“ na léta 2011–2015 a „GRACE

models evaluation“ na léta 2011–2015, ve kterých pracuje již dnes jako člen mezinárodního řešitelského týmu. Pro lepší koordinaci národní a mezinárodní vědecké a výzkumné činnosti bude autor i nadále působit v Českém národním komitétu geodetickém a geofyzikálním, jakož i v Českém národním výboru oceánografickém.

11 ABSTRACT

Geopotential models are irreplaceable in the sphere of physical geodesy, geophysics, gravity surveying, astronomy, and other spheres of science. Therefore the pursuit of accuracy in this field is very important for various scientific applications. Original technology for testing of geopotential models has been developed. The geocentric coordinates, normal heights, and the development of the parameters of the Earth's level ellipsoid (ELE) in the three tide systems are necessary for technology exploitation. The parameters of the ELE were developed on the basis of the geopotential value W_0 , which is one of fundamental geodetic constants. This article describes the development of W_0 and its applications.

The TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data from January 1, 1993 to January 3, 2001 was used for investigating long-term variations of the geoidal geopotential W_0 , and the geopotential scale factor $R_0 = GM/W_0$ (GM geocentric gravitational constant). The mean values over the whole period covered are $W_0 = (62\,636\,856.160 \pm 0.002) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, $R_0 = (6\,363\,672.544\,8 \pm 0.000\,2) \text{ m}$. However, the actual accuracy of the W_0 value is limited by the altimeter calibration error (2-3cm), and it is conservatively estimated to be about $\pm 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ($\pm 5 \text{ cm}$).

The yearly mean values of W_0 were found to be quite stable, so that the rounded value of W_0 was adopted as $W_0 = (62\,636\,856.0 \pm 0.5) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ and $R_0 = (6\,363\,672.56 \pm 0.05) \text{ m}$. It represents the geopotential value of an equipotential surface, which best fits the mean ocean level. Note that it is independent of the tide reference system, even though the space location of the equipotential surface $W = W_0$ strongly depends on the used tide reference system (i.e. the mean, zero, and tide-free). However, the surface $W = W_0$ is not needed, only the reference value W_0 is required.

The value W_0 depends only on the adopted GM , ω (the angular velocity of the Earth's rotation), and the volume enclosed by the surface $W = W_0$. W_0 can also uniquely define the reference (geoidal) surface that is required for a number of applications, including the World Height System and General Relativity in precise time keeping and time definitions. This is why W_0 is considered to be suitable for adoption as a primary astrogeodetic parameter. Furthermore, W_0 provides a scale parameter for the Earth that is independent of the tidal reference system.

After adopting the value for W_0 , the semi-major axis a , and the flattening α of the Earth's level ellipsoid were derived (it is necessary for the geopotential models testing), namely in tide systems: **zero: $a = 6\,378\,136.58 \text{ m}$, $1/\alpha = 298.256\,45$, mean: $a = 6\,378\,136.68 \text{ m}$, $1/\alpha = 298.252\,33$, tide-free: $a = 6\,378\,136.55 \text{ m}$, $1/\alpha = 298.257\,68$.**

Many other applications for the W_0 value have been found, e.g. the previously mentioned geopotential model testing, connecting of geodetic insolated territories, monitoring increases in the oceans surface, unified computing of gravity in gravity surveying, increasing safety in aircraft transportation, constructing geodetic instruments for height measurement, etc.

The geoidal geopotential W_0 was included in the IERS Conventions (2003, 2010) and it is in use by the International Astronomy Union (see above). W_0 adoption as a worldwide geodetic standard is a long-term goal of the International Association of Geodesy for the years 2011–2015.