

Metodika tvorby 3D modelu glóbů z poledníkových pásů

Jan Havrlant, Klára Ambrožová, Ondřej Böhmi, Milan Talich

Realizováno z programového projektu DF11P01OVV021: Program
aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity financovaného MK
ČR v rámci projektu

„Kartografické zdroje jako kulturní dědictví. Výzkum nových metodik a
technologií digitalizace, zpřístupnění a využití starých map, plánů, atlasů a
glóbů.“

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.
červen 2015

Obsah

1. Předmět metodiky	3
2. Struktura metodiky	4
3. Pořízení digitálních dat.....	5
4. Kartografická zobrazení použita pro poledníkové pásy	6
4.1. Transverzální Mercatorovo zobrazení	6
4.2. Azimutální zobrazení ekvidistantní v polednících	7
4.3. Kuželové zobrazení ekvidistantní v polednících	8
5. Sběr identických bodů	10
6. Georeferencování glóbových pásů.....	11
6.1. Transformace pomocí Thin plate spline	11
7. Vizualizace	13
7.1. Převod mapy do ekvidistantního válcového zobrazení	13
7.2. Barevné korekce	14
8. Zobrazení 3D modelu glóbu.....	15
8.1. Příprava modelu.....	15
8.2. Google Earth.....	15
8.3. Cesium.....	16
9. Závěr	17
10. Pro koho je metodika určena	18
11. Seznam použitých zdrojů	19
8. Přílohy	21
8.1 Struktura souboru kml pro jednoduché zobrazení glóbu uloženého v jednom souboru	

1. Předmět metodiky

Tato metodika je návodem pro tvorbou 3D modelů glóbů z poledníkových pásů a pro jejich zpřístupnění odborné i laické veřejnosti například v aplikaci Google Earth. Tím se umožní vytvořit virtuální modely a studium i těch glóbů, které se dochovaly k dispozici pouze ve formě poledníkových pásů a nemusí již fyzicky existovat. Virtuální 3D modely jsou georeferencované a obsah takto vytvořených modelů glóbů lze následně porovnávat se skutečností, nebo s jinými modely starých glóbů, nebo i s jakoukoliv další georeferencovanou mapou například formou zprůhledňování.

2. Struktura metodiky

Metodika je rozdělena do několika hlavních oblastí, kterými jsou:

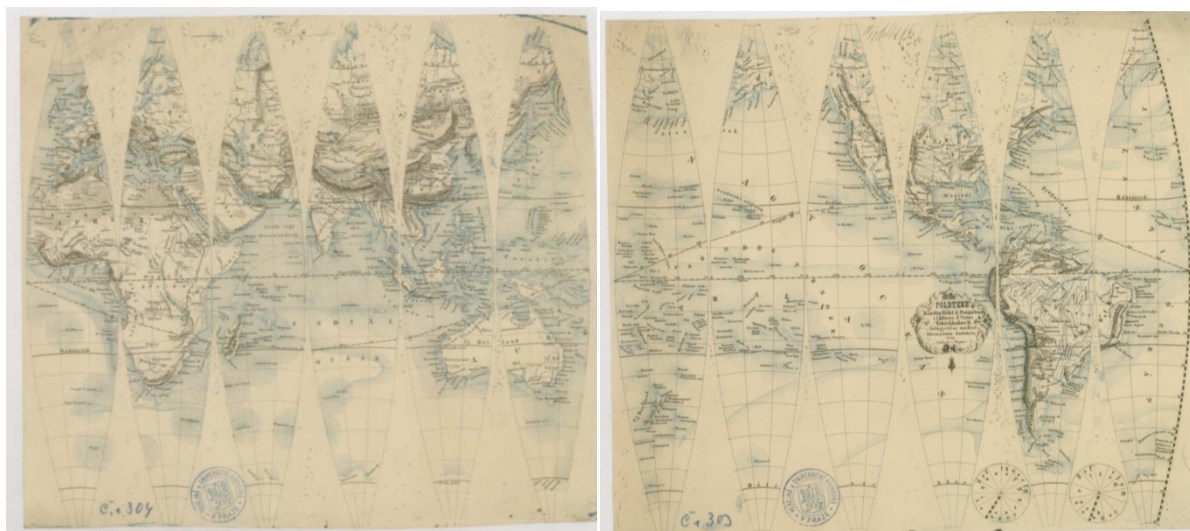
- získání digitálních dat,
- použitá kartografická zobrazení,
- sběr identických bodů: popis sběru identických bodů, množství bodů,
- transformace pásů, další úpravy - dotransformace, barevné korekce
- zpřístupnění: představení možností online zpřístupnění virtuálních glóbů odborné i laické veřejnosti.

3. Pořízení digitálních dat

Digitalizace poledníkových pásů je o mnoho jednodušší než digitalizace skutečných starých glóbů. Stačí je naskenovat jako běžnou mapu. U menších glóbů je možné použít běžný stolní skener. U větších glóbů už je potřeba využít velkoformátový stolní skener nebo průtahový válcový skener.

Naopak nevhodné je použití digitálního fotoaparátu, který deformuje obraz středovým promítáním a také má nedostatečné rozlišení.

Protože je kresba glóbů většinou velmi jemná, je nutné, aby měl digitální obraz vysoké optické rozlišení alespoň 600 DPI lépe však 800 DPI. Tím je zajištěno, že není snížena kvalita obrazu a je zachována jeho čitelnost.



Obr. 1: Naskenované poledníkové pásy

4. Kartografická zobrazení použitá pro poledníkové pásy

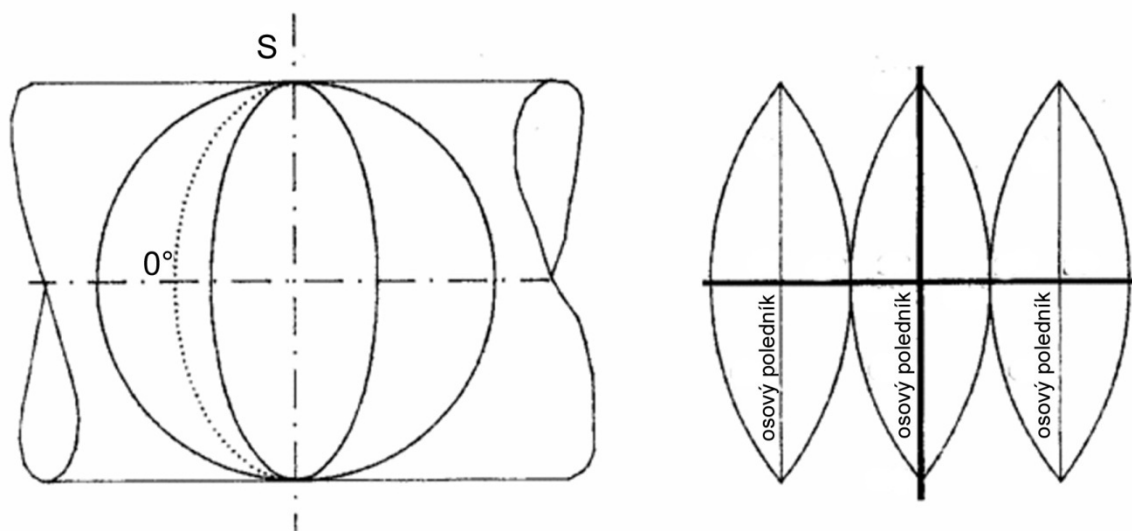
Ve většině případů se pro poledníkové pásy používá transversální Mercatorovo zobrazení. Někdy je pás celý v tomto zobrazení a někdy jsou polární vrchlíky tvořeny zvlášť. Ty jsou potom buď v kuželovém nebo azimutálním zobrazení.

4.1. Transverzální Mercatorovo zobrazení

Transverzální Mercatorovo zobrazení je válcové zobrazení v transversální poloze. Je to hojně využívané zobrazení například pro UTM.

Mezi jeho základní vlastnosti patří:

- zobrazení je konformní,
- osový nebo také centrální poledník se zobrazuje jako přímka,
- ostatní poledníky se zobrazují jako křivky,
- rovník se zobrazuje jako přímka,
- rovnoběžky se zobrazují jako křivky,
- délkově nezkreslený je základní poledník,
- se zvyšující vzdáleností od základního poledníku se také zvětšuje délkové zkreslení.



Obr. 2: Transverzální Mercatorovo zobrazení

Přímé zobrazovací rovnice jsou následující:

$$X = \frac{R}{2} \ln \frac{1 + \sin(D - D_0) \cos S}{1 - \sin(D - D_0) \cos S}$$

$$Y = R \tan^{-1} \frac{\tan S}{\cos(D - D_0)}$$

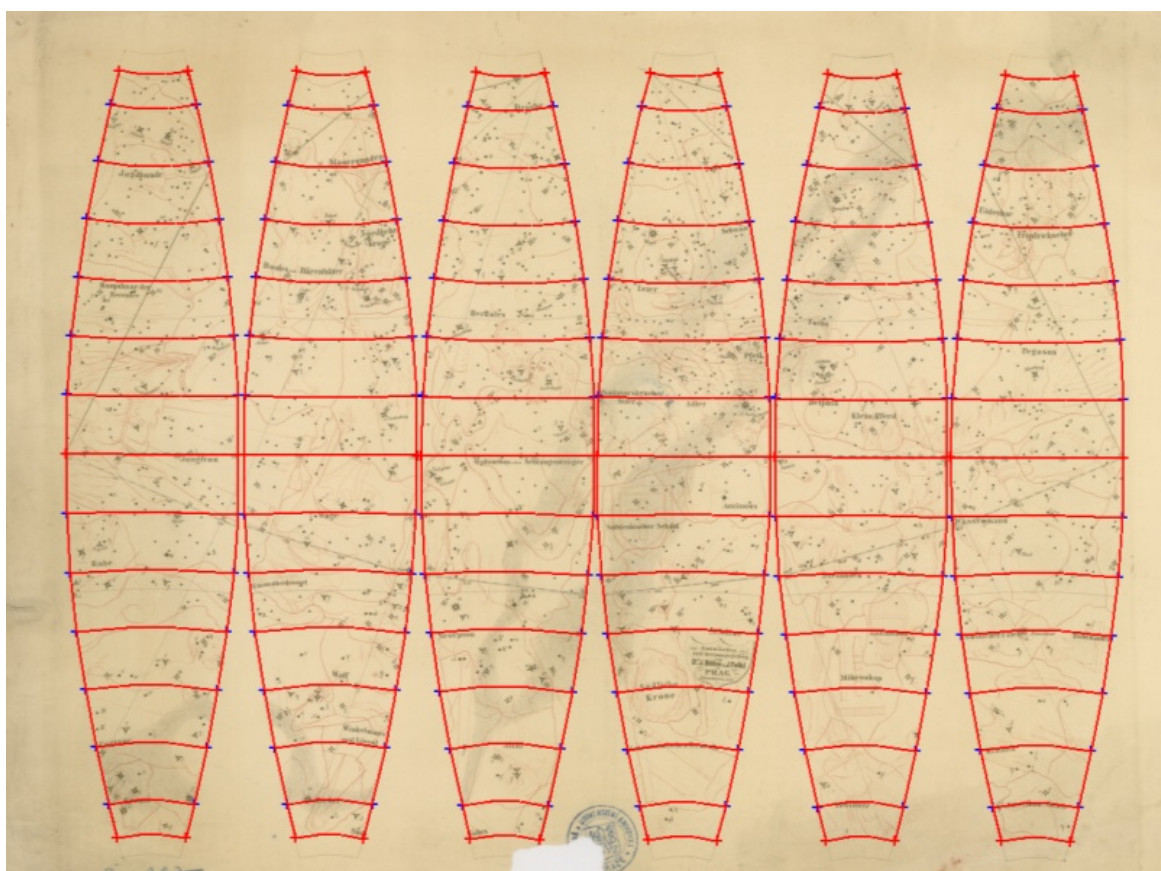
inverzní rovnice:

$$\tan(D + D_0) = \sinh \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{\cos \frac{Y}{R}}$$

$$\sin S = \frac{1}{\cosh \frac{X}{R}} \cdot \sin \frac{Y}{R}$$

kde

R	...	poloměr Země,
S, D	...	zeměpisné souřadnice obrazových bodů (v úhlové míře),
X, Y	...	pravoúhlé souřadnice obrazových bodů v rovině transversálního válcového zobrazení,
D_0	...	zeměpisná délka osového poledníku.



Obr. 3: Poledníkové pásy v Mercatorově zobrazení

4.2. Azimutální zobrazení ekvidistantní v polednících

Zobrazení se používá k zobrazení polárních vrchlíků na glóbu.

$$X = (S - S_0) \cdot \cos D$$

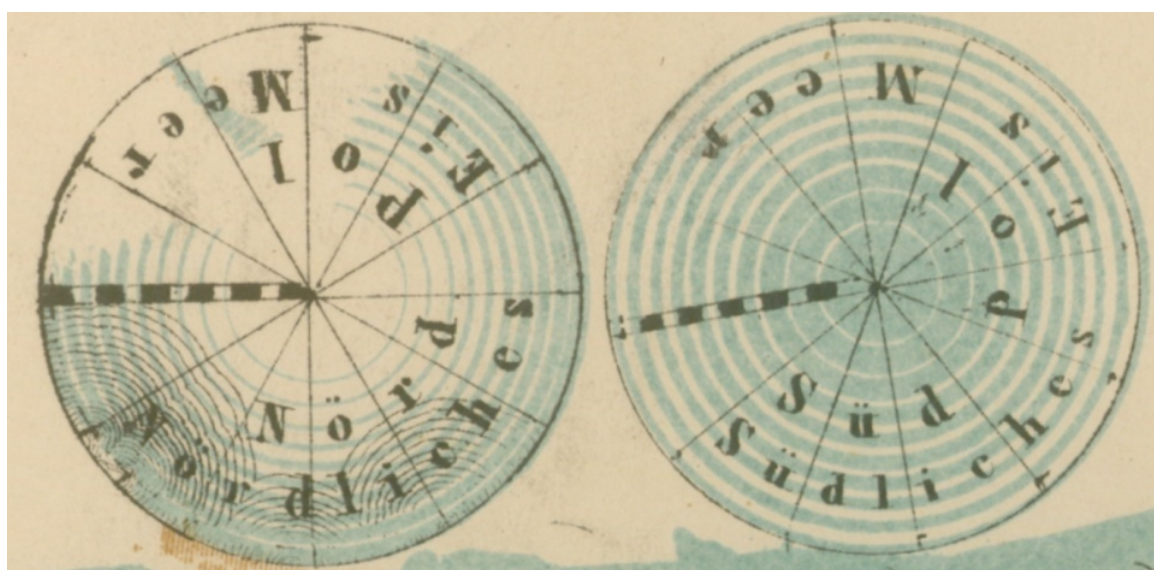
$$Y = (S - S_0) \cdot \sin D$$

inverzní rovnice

$$\tan D = \frac{Y}{X}$$

$$S = S_0 - \sqrt{X^2 + Y^2}$$

S, D	...	zeměpisné souřadnice obrazových bodů (v úhlové míře),
X, Y	...	pravoúhlé souřadnice obrazových bodů v rovině zobrazení,
S_0	...	zeměpisná šířka zobrazovaného pólu.



Obr. 4: Polární vrchlíky v azimutálním zobrazení

4.3. Kuželové zobrazení ekvidistantní v polednících

Další možností zobrazení polárních vrchlíků je kuželové zobrazení

$$X = (S - S_0) \cdot \cos nD$$

$$Y = (S - S_0) \cdot \sin nD$$

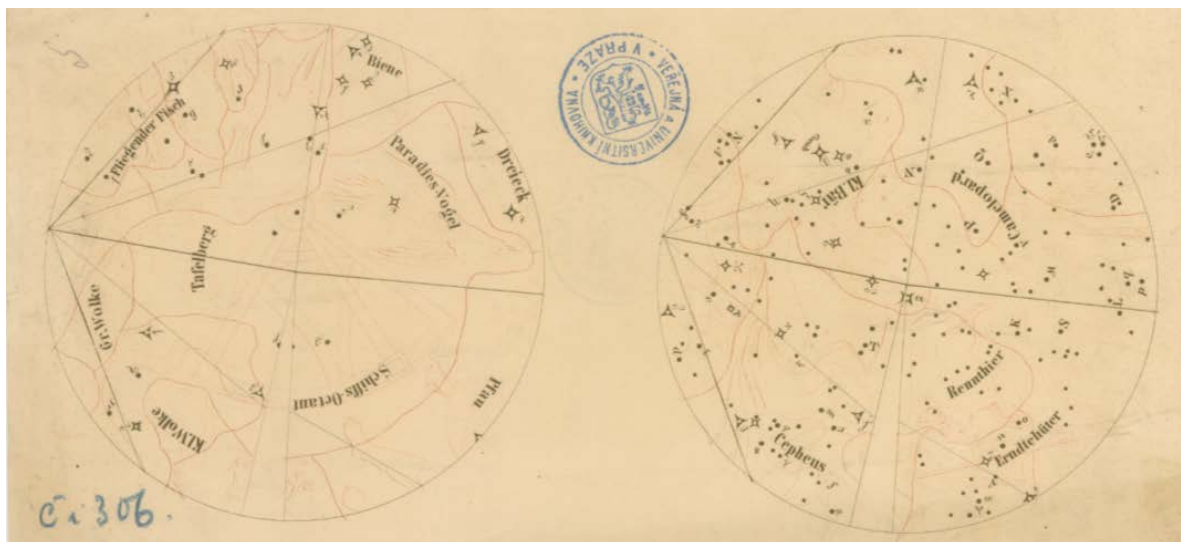
inverzní rovnice

$$\tan nD = \frac{Y}{X}$$

$$S = S_0 - \sqrt{X^2 + Y^2}$$

S, D	...	zeměpisné souřadnice obrazových bodů (v úhlové míře),
--------	-----	---

X, Y ... pravoúhlé souřadnice obrazových bodů v rovině zobrazení,
 S_0 ... zeměpisná šířka zobrazovaného pólu,
 n ... konstanta zkreslení vypočtená z úhlu, který svírají okrajové poledníky.



Obr. 5: Polární vrchlíky v kuželovém zobrazení

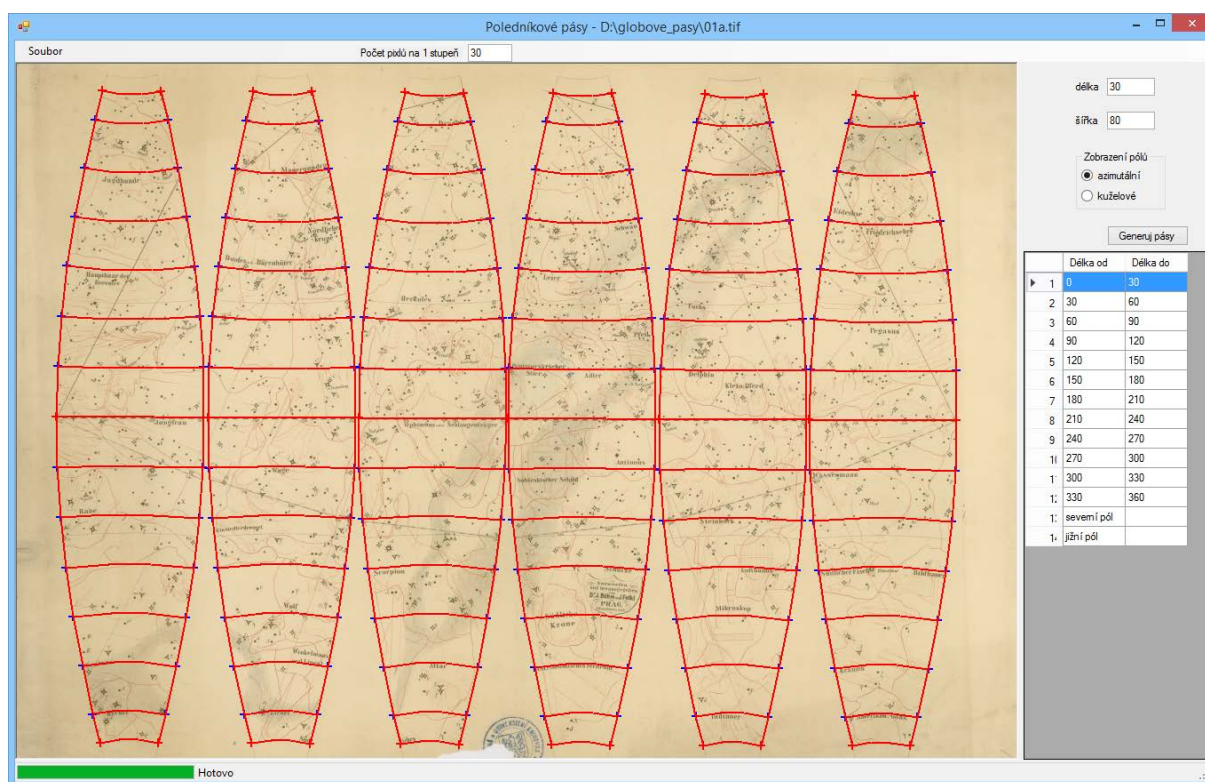
5. Sběr identických bodů

Každý poledníkový pás se musí georeferencovat jako samostatný mapový list. Je tedy nutné definovat identické body na jeho okraji. Vhodné je zadat identické body na průsečíku rovníku a okrajových poledníků. Dále je také vhodné definovat body na pólu nebo krajních rovnoběžkách.

Kvůli srážce papíru a také protože jsou poledníkové pásy většinou kresleny ručně, tak nemají přesný tvar podle zobrazovacích rovnic, proto je dobré definovat i další identické body na okraji pásu, případně i uvnitř na průsečících zeměpisné sítě.

Sběrem identických bodů se získá u každého pásu vždy dvojice souřadnic a to obrazové (snímkové) a zeměpisné.

Pro sběr identických bodů je dobré použít vhodný program, který umožňuje ukládat body definované uživatelem. Tato práce může být velmi náročná, protože se musí u každého pásu definovat minimálně 4 body. Protože jsou však pásy většinou kreslené ručně, musejí se hranice pásů definovat více body. V závislosti na kvalitě pásu je potřeba nasbírat i přes deset identických bodů na jeden pás. Středně velký globus se skládá z 12 pásů, takže je potřeba celkem definovat více než 100 identických bodů na jeden globus.



Obr. 6: Příklad programu pro sběr identických bodů

6. Georeferencování glóbových pásů

Postup georeferencování se provede ve dvou krocích. Do zobrazovacích rovnic se dosadí zeměpisné souřadnice pro každý identický bod a vypočítají se odpovídající kartografické (vzorové snímkové) souřadnice v kartografické rovině. Tím se získá druhá sada rovinných souřadnic identických bodů (první sadou jsou snímkové souřadnice). Nyní se použije vhodná transformace pro převod mezi snímkovými a vzorovými souřadnicemi. Pokud je předloha kvalitní stačí použít afinní transformaci. Jestliže poledníkový pás obsahuje více než tři identické body, provede se vyrovnání metodou nejmenších čtverců.

Často je ale předloha tak zdeformovaná, že ani afinní transformace neodstraní všechny nepřesnosti poledníkových pásů a po transformaci pásy na sebe přesně nenavazují. Proto je někdy nutné použít speciální transformaci, která umožní transformovat identické body bez zbytkových chyb (nereziduální transformaci).

Jednou z možností je využití elastické transformace [11]. Její výhodou jsou široké možnosti nastavení a robustnost. Nevýhodou větší výpočetní náročnost, náročná implementace a také může být problém s vhodným nastavením transformačních koeficientů.

Další možností je Thin plate spline (TPS), která je relativně jednoduchá a také rychlá.

6.1. Transformace pomocí Thin plate spline

TPS je interpolační metoda, která umožňuje vytvořit hladký povrch funkce $z = z(x,y)$, procházející všemi danými body. Při použití metody pro transformaci rovinných souřadnic tedy umožní nulové zbytkové chyby na daných identických bodech.

Máme danou množinu kontrolních bodů C počtu p , regularizační parametr λ

$$C_{p \times 3} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_p & y_p & z_p \end{bmatrix}$$

a počítáme neznámé w a a ze systému lineárních rovnic

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{w} \\ \vec{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{v} \\ \vec{o} \end{bmatrix}$$

kde $\mathbf{K}$, $\mathbf{P}$ a $\mathbf{O}$ jsou submatice a w , a , v a o jsou vektory

$$K_{ij} = U\left(\left\| [x_i, y_i] - [x_j, y_j] \right\|\right) + I_{ij} \cdot \alpha^2 \cdot \lambda \quad i, j \in [1 \dots p] \wedge \lambda \geq 0$$

$$U(r) = \begin{cases} r^2 \cdot \log r & r > 0 \\ 0 & r = 0 \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \left\| [x_i, y_i] - [x_j, y_j] \right\|$$

$$\mathbf{P}_{p \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & \vdots & \vdots \\ 1 & x_p & y_p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{O}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{v}_{p \times 1} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_p \end{bmatrix}, \quad \bar{o}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{w}_{p \times 1} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_p \end{bmatrix}, \quad \bar{a}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

Funkční hodnotu (souřadnici) z libovolného bodu (x, y, z) na ploše poté můžeme vypočítat pomocí vztahu:

$$z(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + \sum_{i=1}^p w_i U(|[x_i, y_i] - [x, y]|)$$

Transformační vztah touto metodou musíme počítat dvakrát. Odděleně pro souřadnici X a Y. Výsledkem je získání kartografických souřadnic X, Y všech obrazových bodů snímku. V dalším kroku se z těchto kartografických souřadnic X, Y určí, s využitím inverzních zobrazovacích rovnic příslušného kartografického zobrazení, zeměpisné souřadnice S, D všech obrazových bodů snímku.

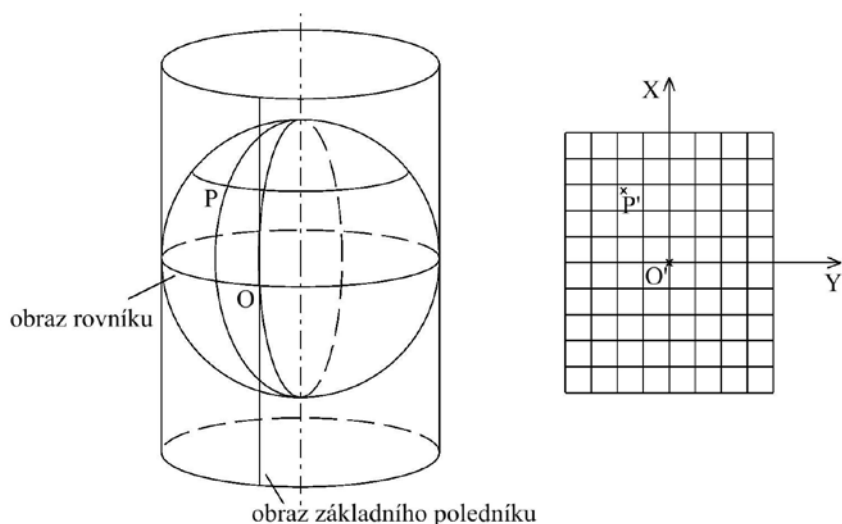
7. Vizualizace

Pro vytvoření 3D modelu glóbu je potřeba nejprve poledníkové pásy transformovat do vhodného kartografického zobrazení, kterým může být například ekvidistantní válcové zobrazení. Následně se pásy spojí a vytvoří tak souvislou mapu.

7.1. Převod mapy do ekvidistantního válcového zobrazení

Transformaci do ekvidistantního válcového zobrazení je nutno provést z důvodu následné vizualizace modelu v aplikaci Google Earth.

U ekvidistantního válcového zobrazení dochází k převedení zobrazení mapy na plášť válce, který se poté rozvine do roviny. Jelikož se jedná o zobrazení ekvidistantní, tedy délkojevné, nezkrslují se vzdálenosti podél určitého systému čar. Zobrazovací válec u použitého zobrazení je v normální poloze, což znamená, že osa válce je totožná s osou glóbu. Obrazem zeměpisné sítě je tedy soustava vzájemně ortogonálních přímek, kdy obrazy poledníků a rovnoběžek jsou od sebe stejně vzdálené.



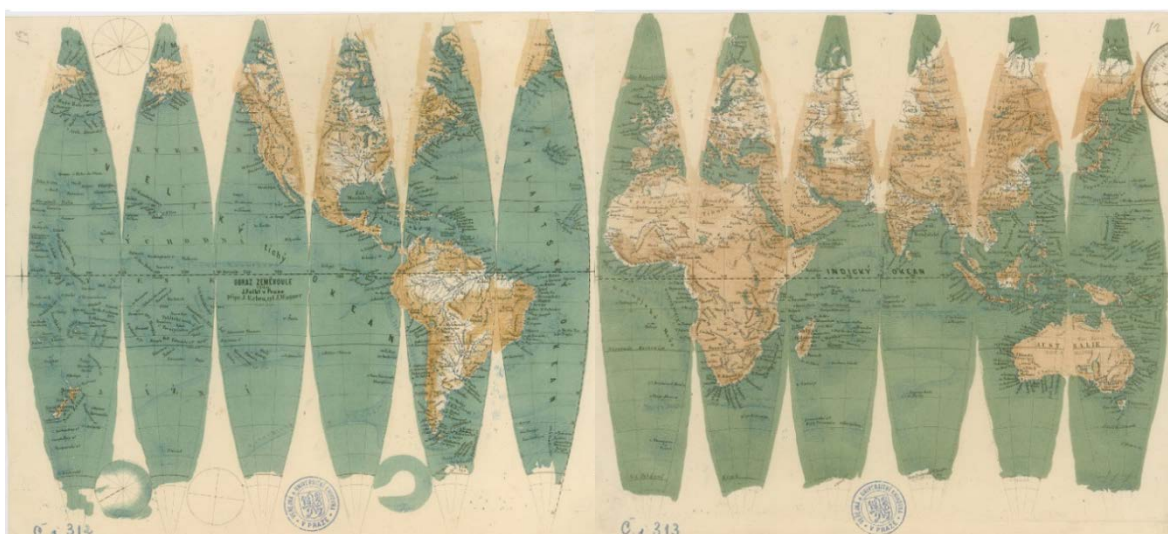
Obr. 7: Ekvidistantní válcové zobrazení v normální poloze

Aby byla provedena transformace všech obrazových bodů do ekvidistantního válcového zobrazení, dosadí se výše určené zeměpisné souřadnice S , D do zobrazovacích rovnic ekvidistantního válcového zobrazení.

$$X_j = R \cdot S$$

$$Y_j = R \cdot D$$

R	...	poloměr Země
S, D	...	zeměpisné souřadnice obrazových bodů (v úhlové míře)
X_j, Y_j	...	pravoúhlé souřadnice obrazových bodů v rovině ekvidistantního válcového zobrazení



Obr. 8: Příklad poledníkových pásů



Obr. 9: Poledníkové pásy transformované do válcového zobrazení

7.2. Barevné korekce

Poledníkové pásy mohou být tištěny na více listech. Vlivem stáří a žloutnutí papíru je potom možné, že při transformaci jednotlivých pásů do společného zobrazení bude vidět barevný přechod mezi jednotlivými listy. Proto je vhodné sjednotit barvu jednotlivých pásů ještě před vlastní transformací. Záleží případ od případu, ale většinou jsou takovéto odchylky dosti rušivé a kazí to dojem z jinak dobře transformovaného glóbu, viz obr. 9.

8. Zobrazení 3D modelu glóbu

8.1. Příprava modelu

Při zpřístupňování glóbů je velkým problémem značná velikost výsledného modelu. Aby nemusel uživatel při prohlížení na internetu zbytečně čekat, až se mu model nahraje do počítače, je výhodné před vlastní vizualizací vytvořit náhledy s menším rozlišením, které urychlí zobrazení glóbu ve webovské aplikaci. Snímky jsou tedy rozděleny na menší části tzv. dlaždice, které jsou vytvářeny pro různé úrovně zvětšení obrazu obvykle tak, že jedna dlaždice na určité úrovni má poloviční rozlišení než dlaždice na další úrovni.

8.2. Google Earth

Po zpracování poledníkových pásů a transformaci do ekvidistantního válcového zobrazení je vytvořena vrstva v datovém formátu KML (Keyhole Markup Language). KML je formátem pro modelování a ukládání geografických funkcí, jako jsou body, čáry, obrázky, mnohoúhelníky a modely, které mají být zobrazeny v aplikaci Google Earth, ve službě Mapy Google a v dalších aplikacích. Pomocí jazyka KML je možné sdílet místa a informace s dalšími uživateli těchto aplikací.

Výsledným produktem celého zpracování pořízených snímků jsou tedy dlaždice pokrývající celou plochu glóbu a KML soubor, který popisuje polohu těchto dlaždic ve virtuálním modelu. Tato data se dají jednoduše zobrazit v desktopové aplikaci Google Earth, což je virtuální glóbus složený z družicových snímků, který umožňuje prohlížet si jak satelitní snímky, tak i mapy, terén, 3D budovy a další. Po načtení souboru KML do Google Earth je vytvořena nová vrstva pokrývající tento virtuální glóbus a je tak možné si vytvořený model snímaného glóbu prohlédnout.

Použití KML jazyka pro vizualizaci glóbu bylo vybráno z důvodu jeho jednoduché struktury a také díky schopnosti aplikace Google Earth pracovat s velkým množstvím dat s vysokým rozlišením.



Obr. 10: Glóbus vytvořený z poledníkových pásů zobrazený v aplikaci Google Earth

8.3. Cesium

Další možností je zobrazení modelu glóbu pomocí javascriptové knihovny Cesium. Tato knihovna umožňuje zobrazit virtuální glóbus přímo ve webovém prohlížeči bez nutnosti instalovat další doplňky, což značně usnadňuje uživatelskou dostupnost.

Pro zobrazení glóbu vytvoříme dlaždice ve formátu TMS (Tile Map Service) a pomocí jednoduché konfigurace přidáme tuto obrazovou vrstvu na virtuální glóbus, která se potom přímo zobrazí v internetovém prohlížeči.

9. Závěr

Tvorba modelů glóbů představuje zajímavou možnost, jak vzkřísit již neexistující staré glóby pokud máme alespoň jejich tiskové podklady. Navíc může být takovýto model přesnější a kvalitnější, protože nedošlo k deformování poledníkových pásů při lepení na glóbovou kouli. Také mohou být poledníkové pásy zachovalejší než samotný glóbus, který je většinou vlivem jeho vystavování v různých expozicích dost opotřebovaný a poničený. To dává naději na tvorbu velmi kvalitních modelů glóbů.

10. Pro koho je metodika určena

Uplatnění metodiky je především v paměťových institucích, jako jsou muzea nebo knihovny, které vlastní glóby ve formě poledníkových pásů a chtějí zpřístupnit z nich vytvořené modely glóbů široké veřejnosti ke studiu prostřednictvím internetu. Dále pak organizacím, které se zabývají digitalizací historických sbírek kartografických děl.

11. Seznam použitých zdrojů

- [1] AMBROŽOVÁ K., TALICH M.: Metoda digitalizace starých glóbů. In: Sborník referátů z vědecké konference "Historické mapy", 24. 10. 2013, Bratislava, Katedra mapování a pozemkových úprav, SvF STU, 2013, str. 7 - 16, ISBN 978-80-89060-22-1, http://naki.vugtk.cz/media/doc/publikace/HM_2013_Ambrozova_Talich.pdf
- [2] ANTOŠ F., TALICH M., BÖHM O., HAVRLANT J., AMBROŽOVÁ K., SOUKUP L.: Virtuální mapová sbírka Chartae-Antiquae.cz - důležitý výsledek projektu Kartografické zdroje jako kulturní dědictví. In: INFORUM 2014: 20. ročník konference o profesionálních informačních zdrojích, Praha 27.-28. května 2014 [online]. Praha: Albertina icome Praha, 2014. s. 11, ISSN 1801-2213, <http://www.inforum.cz/cs/sbornik>.
- [3] BUCHAR, P. *Matematická kartografie*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 197 s. ISBN 978-80-01-03765-2.
- [4] *Cesium - WebGL Virtual Globe and Map Engine* [online]. Analytical Graphics, Inc. 2015. Dostupné z: < <http://cesiumjs.org/> >.
- [5] GEDE M, MÁRTON M.: *Globes on the Web—Technical Background and First Items of the Virtual Globes Museum*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] GEDE M.: The Projection Aspects of Digitising Globes. *ICC 2009*, 2009.
- [7] *Google Developers: Google Earth API Reference* [online]. Google, 2015. Dostupné z: < <https://developers.google.com/earth/documentation/reference/> >.
- [8] *Google Developers: KML Reference* [online]. Google, 2015. Dostupné z: < <https://developers.google.com/kml/documentation/kmlreference> >.
- [9] *Google Earth: Plugin Google Earth* [online]. Google. Dostupné z: < <http://www.google.com/earth/explore/products/plugin.html> >.
- [10] MÁRTON M, GERCSÁK G.: *Virtual Globes Museum*. In: Proceedings of the XXIV International Cartographic Conference. International Cartographic Association, Santiago, 2009, pp. 1-9. ISBN 978-1-907075-02-5.
- [11] SOUKUP L., HAVRLANT J., BÖHM O., TALICH M.: *Elastic Conformal Transformation of Digital Images*. In: FIG Working Week 2012 – Territory, environment, and cultural heritage, Rome, Italy, 6-10 May 2012, str. 10, ISBN 97887-90907-98-3.
- [12] TALICH M., AMBROŽOVÁ K.: Digitization of old globes. In: 8th International Workshop on Digital Approaches to Cartographic Heritage, Rome, Italy, 19-20 September, 2013.
- [13] TALICH M., ANTOŠ F.: *Metody a postupy digitalizace a zpřístupnění starých kartografických děl*. INFORUM 2011: 17. konference o profesionálních informačních zdrojích, Praha, 24. - 26. 5. 2011.

- [14] TALICH M., SOUKUP L., HAVRLANT J., AMBROŽOVÁ K., BÖHM O., ANTOŠ F.: *Metodika georeferencování map III. vojenského mapování. 2013.* Dostupné z: <http://naki.vugtk.cz/media/doc/metodika-3_voj_mapovani.pdf>.
- [15] *Thin plate spline* [online]. Wikipedia, 2015 Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thin_plate_spline>.
- [16] *Virtual Globes Museum* [online]. Department of Cartography and Geoinformatics, Eötvös Loránd University. Budapest, Hungary, 2009. Dostupné z: <<http://terkeptar.elte.hu/vgm/info.php?lang=en>>.
- [17] ŽÁRA J., BENEŠ B., SOCHOR J., FELKEL P.: *Moderní počítačová grafika*, Brno 2004.

8. Přílohy

8.1 Struktura souboru kml pro jednoduché zobrazení glóbu uloženého v jednom souboru

```
<?xml version='1.0' encoding='utf-8'?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2" xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom"
xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2"
xmlns:kml="http://www.opengis.net/kml/2.2">
  <Document>
    <name>Resam</name>
    <open>1</open>
    <GroundOverlay>
      <name>0x0.jpg</name>
      <Icon id="i0"><href>globus.jpg</href></Icon>
      <LatLonBox>
        <north>90</north>
        <south>-90</south>
        <west>-180</west>
        <east>180</east>
      </LatLonBox>
    </GroundOverlay>
  </Document></kml>
```