

# DOLOČITEV VPLIVA TROPOSFERE NA OPAZOVANJA GNSS IZ NIZA RADIOSONDAŽNIH MERITEV V LJUBLJANI OD OKTOBRA DO DECEMBRA 2017

# DETERMINATION OF TROPOSPHERIC GNSS IMPACTS FROM A RADIOSONDE DATA SERIES IN LJUBLJANA: CASE STUDY FROM OCTOBER TO DECEMBER 2017

*Alenka Senica, Oskar Sterle, Polona Pavlovčič Prešeren*

UDK: 528.28:551.510.52(497.451.1)  
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01  
Prispelo: 5. 3. 2018  
Sprejeto: 26. 8. 2018

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.03.415-429>  
SCIENTIFIC ARTICLE  
Received: 5. 3. 2018  
Accepted: 26. 8. 2018

## IZVLEČEK

V prispevku obravnavamo vpliv troposfere na opazovanja GNSS, ki smo ga določili iz niza radiosondažnih meritev v Ljubljani za jesensko-zimsko obdobje v letu 2017. Troposfera deluje na kodna in fazna opazovanja GNSS različnih frekvenc enako. Signal se lomi, kar povzroči daljšo pot razširjanja elektromagnetnega valovanja glede na geometrično. Za določitev vpliva bi morali po poti razširjanja signala pridobivati meteorološke parametre. Ker to ni mogoče, pri oceni vpliva uporabimo vrednosti količin iz standardne atmosfere oziroma drugih modelov, ki večinoma ne vključujejo podatkov o vlažnosti. Z radiosondažnimi meritvami lahko občasno preverimo ujemanje dejanskega stanja z modeli. V prispevku smo za oceno vpliva troposfere na opazovanja GNSS uporabili dnevne radiosondažne meritve Agencije Republike Slovenije za okolje ter posebej določili vpliv suhih plinov in vodne pare na razširjanje signalov GNSS. Pri primerjavi vrednosti za vpliv suhih plinov so dnevne razlike znašale več deset centimetrov. Prav tako očitne so bile dnevne in mesečne spremembe precej manjšega vpliva vodne pare, ki so znašale tudi do 25 centimetrov. Ugotovili smo, da vpliva troposfere iz opazovanj z modeli ne moremo v celoti odstraniti, zato je pri obdelavah z visokimi zahtevami po natančnosti določitve položaja treba vpliv troposfere ocenjevati kot dodatno neznancko.

## KLJUČNE BESEDE

opazovanja GNSS, vpliv troposfere, standardna atmosfera, radiosondažne meritve

## ABSTRACT

This paper describes GNSS tropospheric impacts, acquired from radiosonde data in Ljubljana over the autumn-winter period in 2017. The tropospheric effect is the same for code and carrier-phase observations and is not frequency dependent. It appears as a bending path of the signal, which results in a propagation delay of the refracted GNSS-signal acquisition. Precise modelling of tropospheric slant delay requires knowledge of the meteorological parameters from the full signal's path, which is difficult to realize. In GNSS, we use standard atmosphere or other meteorological models as a substitute for the real meteorological data throughout the signal propagation although there is a lack of information on humidity in most cases. However, occasionally we can verify how the impacts from models match the actual impacts. For this, we used radiosonde measurements of the Slovenian Environment Agency to determine the hydrostatic and wet component of the effect. In the first component, the results differed from that of the standard atmosphere in a range of several decimeters. Daily and monthly changes in a much smaller wet component, which were up to 25 cm, were apparent as well. If in GNSS processing only the model removes the impact, the defective part will cause errors in coordinates. Therefore, in high-accuracy positioning requirements we have to estimate the tropospheric impact as an additional parameter.

## KEY WORDS

GNSS observations, tropospheric impacts, standard atmosphere, radiosonde measurements

## 1 UVOD

Za kakovostno določitev položaja z GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*) moramo v obdelavi opazovanj odstraniti vpliv nabitih delcev v ionosferi in sprememb zaradi vremenskih dogajanj v troposferi. Atmosferski vplivi povzročijo spremembo v hitrosti razširjanja elektromagnetnega valovanja in posledično v dolžini poti razširjanja signala od satelita do sprejemnika. Vpliv ionosfere na razširjanje signalov GNSS smo podrobneje že opisali (Sterle, Stopar in Pavlovčič Prešeren, 2013), zato v danem prispevku obravnavamo vpliv troposfere. V troposferi se dogajajo prostorsko in časovno spremenljivi vremenski procesi, pri čemer so posebej problematične izrazite spremembe vodne pare. Za pravilno določitev vpliva bi morali imeti na voljo neprekinjene meritve meteoroloških parametrov vzdolž celotne poti razširjanja signala. To ni vedno izvedljivo, zato vpliv troposfere na opazovanja GNSS računamo z modeli, ki so zasnovani na podatkih iz standardne atmosfere ali iz niza večletnih meteoroloških opazovanj, kot so GPT (angl. *Global Pressure and Temperature*) (Böhm, Heinkelmann in Schuh, 2007), GPT2 (Lagler et al., 2013) in GPT2w (angl. *Global Pressure and Temperature 2 wet*) (Böhm et al., 2015). Z uporabo standardne atmosfere in modelov GPT ter GPT2, ki ne vključujejo vlažnosti, naredimo napako, ki se lahko prenese v končno določitev koordinat. Model GPT2w omogoča tudi računanje vlažnosti v odvisnosti od geografskega položaja, vendar se tudi ta lahko precej razlikuje od dejanskega stanja v atmosferi.

Kakovost izračunanega vpliva troposfere na opazovanja GNSS iz podatkov standardne atmosfere ali drugih modelov lahko občasno ovrednotimo z dejanskimi meritvami meteoroloških parametrov z radiosondami. V Sloveniji jih enkrat dnevno okrog 4. ure zjutraj po času UTC že vrsto let izvajajo na dvorišču *Agencije Republike Slovenije za okolje* (v nadaljevanju: ARSO) v Ljubljani. Balon potuje tudi do višine 25 kilometrov, kar pomeni dve uri leta in pridobivanja meteoroloških podatkov (temperatura, zračni tlak in vlažnost) v točkah vzdolž poti leta s spremembo višine približno 4 metre. Temperaturo meri termistor v razponu od  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  in z natančnostjo  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; meritve relativne vlažnosti so natančne do  $5\%$  in tlaka od  $0,5\text{ hPa}$  do  $2\text{ hPa}$  (Pogačar, 2007).

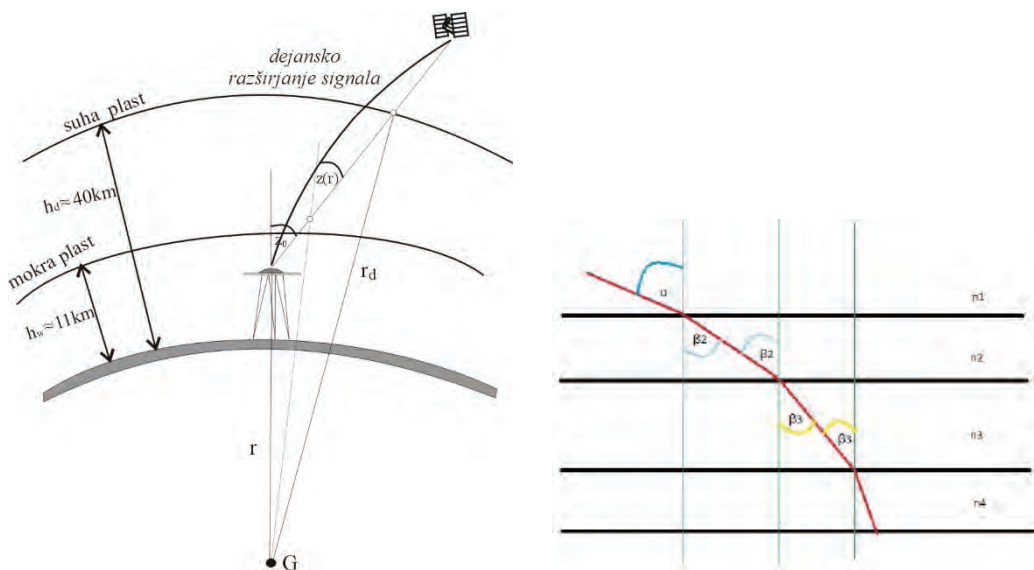
Določitev vpliva troposfere na opazovanja GNSS iz radiosondažnih meritev niso novost. V zadnjem času so raziskave potekale na Kitajskem (Liang et al., 2015), v Egiptu (Abdelfatah, Mousa in El-Fiky, 2015), Alžiriji (Namaoui et al., 2017) in bližini Lizbone na Portugalskem (Benevides et al., 2017) kot tudi na območju Tihega oceana v bližini Japonske (Shoji et al., 2017). Na območju Slovenije je obsežna študija celotnega vpliva atmosfere (troposfere in ionosfere), vendar le za opazovanja GPS (angl. *Global Positioning System*), potekala med izdelavo doktorske disertacije Andreje Sušnik (2013). V študiji so ocenjevali vpliv troposfere iz obdelave opazovanj GPS in ga primerjali z vrednostmi, ki so jih izračunali iz podatkov radiosondažnih meritev, meritev z Ramanskim lidarjem in vrednostmi, izračunanimi na podlagi podatkov meteoroloških opazovalnic na tleh. Glavni namen je bil pokazati način določanja vsebnosti vodne pare v stolpcu zraka iz obdelave opazovanj GPS.

Nasprotno smo v dani študiji želeli določiti velikostni red vpliva troposfere na opazovanja GNSS, ki ga določimo iz različnih modelov in ga pri geodetskih metodah določitve položaja z GNSS lahko uporabimo kot podlago za izbiro ustreznega modela odstranitve vpliva za kakovostno določitev koordinat. Programski paketi za obdelavo opazovanj namreč ne vsebujejo možnosti vključitve radiosondažnih meritev, vsebujejo pa modele, kot so Hopfield, Saastamoinen ali najnovejše predstavljeni VMF1 (angl. *Vienna Mapping Function*) v kombinaciji z modeloma za tlak in temperaturo, UNB3m in GPT2, ki temeljita na globalnih

podatkih centra ECMWF (angl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) (Böhm in Schuh, 2007). V obdelavah GNSS do določitve koordinat obstaja tudi možnost, da vpliv troposfere ocenjujemo kot dodatno neznanko. Odločitev glede izbire določitve vpliva troposfere je pri GNSS odvisna od več dejavnikov, na primer od metode izmere, števila satelitov na obzorju in trajanja opazovanj.

## 2 VPLIV ATMOSFERE NA OPAZOVANJA GNSS

Troposfera je Zemlji najbližja plast atmosfere in sega do višine od 9 do 16 kilometrov nad zemeljskim površjem, odvisno od geografskega položaja in letnega časa (Hofman-Wellenhopf, Lichtenegger in Collins, 2001). Vsebuje 75 % celotne mase atmosfere in skorajda 99 % vodne pare ter aerosolov. Gre za nedisperziven medij razširjanja elektromagnetnega valovanja do frekvenc 15 GHz (Januszewski, 2013). Lom signala zaradi vpliva troposfere ni odvisen od frekvence valovanja ali tipa opazovanj (kodna ali fazna), ampak od meteoroloških dejavnikov. Signal zaradi vpliva troposfere potuje po daljši poti glede na geometrično in v fazni center instrumenta prispe kasneje, kot če bi potoval v vakuumu. Vpliv troposfere je najmanjši za signale s satelitov v zenitu in največji za signale, prispele s horizonta.



Slika 1: Optično podaljšanje poti razširjanja signala (levo) zaradi sprememb lomnosti v plasteh (desno).

V tuji literaturi za podaljšanje poti razširjanja signala uporabljajo pojem zenitna troposferska zakasnitev (angl. *zenith tropospheric delay*), čeprav jo izrazijo metrično. Dodatno je pri tem treba razlikovati med resničnim (drugi člen izraza (1)) in navideznim podaljšanjem poti razširjanja signala, ki nastane zaradi optične zakasnitve, saj je hitrost signala v zraku manjša kot v vakuumu. Seštevek resničnega in navideznega podaljšanja poti opišemo z enačbo (1).

Vpliv troposfere na opazovanja GNSS lahko opišemo kot (Awange, 2012):

- *optično podaljšanje poti razširjanja signala* (slika 1 levo): zmanjšanje hitrosti razširjanja valovanja v mediju z različno gostoto povzroči, da signal GNSS v fazni center prispe kasneje, kot če bi se razširjal v vakuumu,

- *geometrično podaljšanje poti* razširjanja signala (slika 1 desno): različne lastnosti v plasteh atmosfere povzročijo spremembe v lomnosti signala, zato signal potuje po ukrivljeni poti (Snellov zakon).

Oboje združimo v enačbo, ki opisuje seštevek navideznega in resničnega podaljšanja poti razširjanja signala glede na geometrično opredeljeno razdaljo (Awange, 2012):

$$\Delta^{Trop} = \int_L [n(s) - 1] ds + (S - G). \quad (1)$$

$n(s)$  je lomni količnik, ki je odvisen od položaja  $s$  (od geografske širine  $\varphi$ , dolžine  $\lambda$  in elipsoidne višine  $h$ ) vzdolž ukrivljene poti razširjanja signala  $L$ , katere dolžino določimo kot  $S = \int_L ds$ .  $G$  je geometrična razdalja med satelitom in sprejemnikom, po kateri bi potoval signal, če bi bil medij razširjanja vakuum. Lomni količnik  $n$  je odvisen od gostote zraka, zato se vzdolž poti razširjanja signala spreminja. Poznamo približno oceno, da gre za premo sorazmerje:  $n - 1 = A\rho$ , kjer je  $A$  empirično pridobljena konstanta in  $\rho$  gostota zraka, ki se z višino približno eksponentno manjša. Prehod signala iz ene plasti v drugo opišemo z lomnim zakonom (slika 1):

$$n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta_2).$$

Pri prvem prehodu iz vakuumu je  $n_1 = 1$ , medtem ko za naslednje prehode velja:

$$n_2 \sin(\beta_2) = n_3 \sin(\beta_3)$$

$$n_3 \sin(\beta_3) = n_4 \sin(\beta_4)$$

....

$$n_{m-1} \sin(\beta_{m-1}) = n_m \sin(\beta_m). \quad (2)$$

Med lomnostjo  $N$  in lomnim količnikom  $n$  velja zveza:  $N = 10^6 \cdot (n - 1)$ . Pri obravnavanju vpliva troposfere na opazovanja GNSS lomnost predstavimo s funkcijo meteoroloških parametrov (Hobiger in Jakowski, 2017):

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}. \quad (3)$$

$p_d$  predstavlja tlak suhih plinov in dipolne komponente vodne pare,  $T$  temperaturo in  $e$  delni tlak vodne pare.  $Z_d^{-1}$  ter  $Z_w^{-1}$  sta obratni vrednosti stisljivosti suhih plinov in vodne pare, medtem ko so koeficienti  $k_1$ ,  $k_2$  in  $k_3$  določeni empirično. Prvi člen izraza večkrat imenujemo suha komponenta (angl. *dry refractivity*) in preostala člena mokra komponenta (angl. *wet refractivity*) lomnosti. Strogo velja, da je izraz (3) še vedno odvisen od frekvenca in bi moral vključevati tudi vpliv vode v drugih agregatnih stanjih. Vendar padavine podaljšajo pot razširjanja signala za frekvenca, nižje od 40 GHz, največ za 1 milimeter. Zato predpostavimo, da enačba (3) vpliva vode v drugih agregatnih stanjih ne vključuje. Za vodno paro velja, da je prostorsko in časovno spremenljiva količina, vendar redko preseže 1 % celotne mase atmosfere. Z značilnim dipolnim momentom precej vpliva na razširjanje elektromagnetnega valovanja, zato je podatek o delnem tlaku vodne pare vzdolž poti razširjanja signala pomemben in ga ne smemo zanemariti.

V enačbo (3) so vključene tudi empirično določene konstante, katerih vrednosti se med različnimi avtorji

razlikujejo. V danem primeru smo jih privzeli po R ueger (2002):

$$k_1 = 77,695 \pm 0,013 \frac{\text{K}}{\text{hPa}}, k_2 = 71,97 \pm 10,5 \frac{\text{K}}{\text{hPa}} \text{ in } k_3 = 375.406 \pm 0,03 \cdot \frac{\text{K}^2}{\text{hPa}}. \quad (4)$$

Pri uporabi koeficientov  $k_1, k_2$  in  $k_3$  za signale GNSS predpostavimo, da niso odvisni od frekvence. Pravilna ocena vrednosti koeficientov je pomembna, ko iz obdelave opazovanj GNSS ocenimo podaljšanje poti razširjanja signala in potem iz tega računamo vsebnost vodne pare v stolpcu zraka.

S faktorjem stisljivosti  $Z_i$  opišemo razmerje med molarnim volumnom  $V_m$  plina  $i$  glede na idealni plin pri enakem tlaku  $p$  in temperaturi  $T$  (Hobiger in Jakowski, 2017):

$$Z_i = \frac{pV_{m,i}}{RT} = \frac{pM_i}{\rho_i RT}. \quad (5)$$

$R$  je univerzalna plinska konstanta in  $M_i$  molarna masa plina z gostoto  $\rho_i$  ( $i = d, w$ ), velja še  $R_i = R/M_i$ . V izračunu lomnosti uporabimo posebej faktor stisljivosti za suhe pline in vodno paro, saj imata zaradi različne gostote in molarne mase drugačne lastnosti glede na idealni plin. Računamo ju kot (Hobiger in Jakowski, 2017):

$$Z_d^{-1} = 1 + p_d \left( 57,97 \cdot 10^{-8} \left( 1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \frac{T_C}{T^2} \right) \quad (6)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1.650 \frac{p_w}{T^3} \left( 1 - 0,0131 \cdot T_C + 1,75 \cdot 10^{-4} T_C^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_C^3 \right).$$

$p_d$  in  $p_w$  sta izražena v hPa,  $T_C$  je temperatura zraka v  $^\circ\text{C}$  in  $T$  v kelvinih. Večkrat zasledimo tudi drugačen zapis enačbe za lomnost (3), in sicer:

$$N = k_1 R_d \rho + k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}, \quad (7)$$

kjer je  $k_2' = k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} = 22,1 \text{ K} / \text{hPa}$ .  $M_w$  in  $M_d$  sta molarni masi vodne pare in suhih plinov. Vlažnost

$RH$  je funkcija delnega tlaka vodne pare  $e$ :  $RH = 100\% \cdot (e/e_s)$ , kjer je  $e_s$  nasičen parni tlak. V povezavi z modeliranjem vpliva troposfere na opazovanja Younes (2016) med naborom različnih enačb za izračun nasičenega parnega tlaka, poimenovanih po avtorjih (Teten, Magnus, Buck, Wexler, Bolton in Goff-Gratch), navaja, da je izbor konkretne enačbe odvisen od atmosferskih razmer na dani lokaciji. Za območje Egipta je uporabil Boltonov pristop, in sicer  $e_s = 6,112 \cdot \exp\left(\frac{17,67(T - 273,16)}{T - 29,66}\right)$ .

Prvi člen v enačbi (7) predstavlja vsoto sprememb v porazdelitvi elektronov molekul suhih plinov in druga dva za vodno paro. Iz enačbe (7) izhajata hidrostatska lomnost  $N_d$  in lomnost zaradi vodne pare  $N_w$ :

$$N_d = k_1 \frac{p}{T} \quad (8)$$

$$N_w = k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1},$$

da velja:  $N = N_d + N_w$ . Ločeno obravnavanje lomnosti nam omogoča, da določimo podaljšanje poti

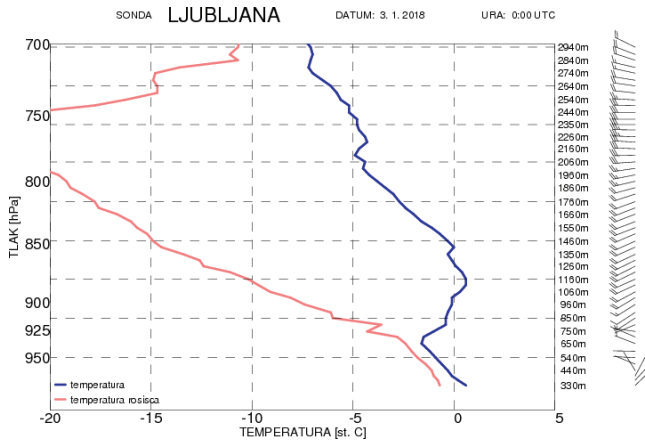
razširjanja signala GNSS glede na geometrično posebej zaradi vpliva suhih plinov in vodne pare. Vpliv pri GNSS najprej obravnavamo v zenitu, ki je izhodišče za izračun vpliva troposfere za signale satelitov zunaj zenita. V dolžinski enoti izraženo zakasnitev signala zaradi vpliva suhih plinov ZHD (angl. *zenith-hydrostatic delay*), kamor uvrščamo tudi dipolno komponento vodne pare (Bevis et al., 1992), in vodne pare ZWD (angl. *zenith-wet delay*) izračunamo z enačbama (Hobiger in Jakowski, 2017):

$$\text{ZHD} = 10^{-6} k_1 \int_{\infty}^h \frac{P}{T} dh \quad \text{ZWD} = 10^{-6} k_2 \int_{\infty}^h \frac{e}{T} Z_w^{-1} dh + 10^{-6} k_3 \int_{\infty}^h \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} dh. \quad (9)$$

### 3 RADIOSONDAŽA IN STANDARDNA ATMOSFERA

Globalna porazdelitev vodne pare v ozračju je enaka plasti tekoče vode, ki bi ob popolni kondenzaciji vodne pare in nadaljnjih padavinah pokrila celotno Zemljo do višine približno 25 milimetrov (Seidel, 2001). To je celotna količina vodne pare v zraku na dani lokaciji (angl. *perceptible water*). Prostorska in časovna razporeditev vodne pare se spreminja z geografskim položajem. Koncentracije vodne pare so različne na polih (do 9 kilometrov) in ekvatorju (do 16 kilometrov). 50 % vodne pare je v pasu do višine od 1 do 2 kilometrov. Količina vodne pare, ki se kondenzira v dežne kaplje, je manj kot 5 milimetrov na polih in 50 milimetrov nad ekvatorjem (Randel et al., 1996). V meteorologiji se vsebnost vodne pare meri z radiometri vodne pare ali radiosondami. Slednje omogočajo tudi določitev vertikalnega profila vodne pare.

#### 3.1 Radiosondažne meritve



Slika 2: Prikaz vertikalne sondaže v Ljubljani za 3. januar 2018 (ARSO, 2018).

Radiosonda je helijev balon s premerom 1,5 metra. Nanj je pritrjena sonda s senzori za merjenje višine in položaja ter meteoroloških parametrov, ki postaji na Zemlji posreduje podatke meritev. Balon se dviga s hitrostjo od 5 do 6 m/s in lahko doseže višino več kot 20 kilometrov. Tam se njegov premer poveča na od 5 do 6 metrov in zaradi redke atmosfere počí. Prve radiosondažne meritve v Sloveniji so občasno izvajali že v letu 1947 (Trontelj, 1995), od devetdesetih let naprej pa jih vsakodnevno izvajajo v Ljubljani.

Uporabljajo jih za izboljšanje prognostičnih meteoroloških modelov za celotno hemisfero. Na spletni strani službe ARSO lahko vsakodnevno pridobimo grafični vpogled v meritve. Na sliki 2 prikazujemo vertikalno sondažo za meglen dan. Na grafu se vidi naraščanje temperature od višine 650 do 1140 metrov. Z modro barvo je predstavljena temperatura zraka, z rdečo pa temperatura rosišča. Večja kot je razlika med njima, manjša je relativna vlažnost zraka. Na višini, kjer (če) se krivulji prekrivata ali sta zelo blizu skupaj, se pojavi oblačnost.

### 3.2 Standardna atmosfera

Mednarodna standardna atmosfera ISA (angl. *International Standard Atmosphere*) je atmosferski model, ki globalno opisuje spremembo tlaka, temperature, gostote in viskoznosti zraka Zemljine atmosfere v odvisnosti od geopotencialne višine. Iz modela lahko pridobimo referenčne vrednosti meteoroloških spremenljivk, ki se od dejanskih razlikujejo bolj ali manj. Mednarodna organizacija za standardizacijo ISO (angl. *International Organization for Standardization*) jo določa kot standard ISO 2533:1975, medtem ko druge organizacije za standardizacijo, na primer ICAO (angl. *International Civil Aviation Organization*), pod svojim okriljem podajajo razširjeno obliko istega atmosferskega modela. Leta 1993 so objavili model atmosfere ICAO, ki obsega modelirane vrednosti atmosferskih plasti do 80 kilometrov nad površjem Zemlje. V izpeljavah so uporabili geopotencialno višino  $H^{geo}$ :

$$H^{geo} = \frac{1}{g_0} \int_0^h g(h) dh \tag{10}$$

in privzeli vrednost težnega pospeška  $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . Iz enačbe (10) sledi, da moramo za povezavo geopotencialnih in elipsoidnih višin poznati funkcijo spremembe gravitacijskega pospeška v odvisnosti od elipsoidne višine  $h$ . Dejanska vrednost težnega pospeška in iz njega izpeljane geopotencialne višine je pomembna pri natančnih izračunih, medtem ko v manj natančnih za izhodišče privzamemo  $g_0$  in predpostavimo kvadratično manjšanje pospeška z višino. Predpostavka temelji na izračunu geopotencialne višine  $H^{geo}$  iz enačbe:

$$H^{geo} = h \cdot R_z / (R_z + h). \tag{11}$$

Preglednica 1: Temperature  $T_0$  in vertikalni temperaturni gradienti  $\beta$  do višine 80 kilometrov (ICAO, 1993).

Geopotencialna višina plasti $H_0$ [km]	Temperatura $T$ [K]	Temperaturni gradient $\beta$ [K/km]
-5,00	320,65	-6,50
0,00	288,15	-6,50
11,00	216,65	0,00
20,00	216,65	1,00
32,00	228,65	2,80
47,00	270,65	0,00
51,00	270,65	-2,80
71,00	214,65	-2,00
80,00	196,65	

Radij Zemlje  $R_z$  so v modelu ICAO privzeli za geografsko širino  $\varphi = 45^\circ 32' 33'' \text{ N}$  in znaša 6356,766 kilometra. Iz enačbe (11) sledi, da se geopotencialna in elipsoidna višina na višini 1000 metrov razli-

kujeta za 0,15 metra in na višini 10 kilometrov za 15 metrov. Privzete vrednosti na višini  $H^{geo} = 0,00$  m ob upoštevanju plinske konstante  $R = 287,053$  J/kgK so:  $T_0 = 288,15$  K,  $p_0 = 1013,25$  hPa in  $\rho_0 = 1,225$  kg/m<sup>3</sup>. Ob znanih vrednostih geoidnih višin ( $N_{geoid}$ ) iz elipsoidnih višin izračunamo nadmorske višine  $H$  ( $H = h - N_{geoid}$ ). V standardni atmosferi so plasti definirane z geopotencialno višino spodnje mejne plasti  $H_0$ . Za posamezno plast so tabelirane vrednosti za temperaturo in temperaturni gradient (preglednica 1), da lahko naprej računamo temperaturo  $T$  in tlak  $p$  na poljubni višini  $H$ .

Temperaturo računamo kot linearno funkcijo geopotencialne višine:

$$T = T_0 + \beta(H - H_0). \quad (12)$$

Za situacije, ko velja:  $\beta \neq 0$ , računamo tlak kot:

$$p = p_0 \left[ 1 + \frac{\beta}{T_0}(H - H_0) \right]^{-g_0/\beta R} \quad (13)$$

in drugače z izrazom

$$p = p_0 \exp \left[ -\frac{g_0}{RT}(H - H_0) \right]. \quad (14)$$

#### 4 OBDELAVA MERITEV

Za analizo smo uporabili radiosondažne meritve v Ljubljani od oktobra 2017 do začetka januarja 2018. Meritve smo interpolirali, da smo pridobili podatke na vsakem metru (v izvorni datoteki so podatki dani na približno vsake štiri metre). Enačbi (9) smo rešili s trapeznim pravilom:

$$\text{ZHD} = 10^{-6} \sum_{i=1}^m \frac{N_{d_{i-1}} + N_d}{2} \Delta h_{i-1,i}, \quad (15)$$

kjer je  $m$  število zaporednih radiosondažnih meritev. Enak postopek smo uporabili za vpliv vodne pare. Meje integriranja so se nanašale na višino, na kateri je bila sonda spuščena, in višino, na kateri je balon počil. Med izračunom zakasnitve signala v zenitu (v dolžinski enoti) zaradi vpliva troposfere smo predpostavili, da se je balon vseskozi premikal vertikalno, kar pomeni, da smo zanemarili vpliv vetrov. Velja poudariti, da lahko vetrovi balon zanesejo od deset do, v najslabšem primeru, sto kilometrov stran od izhodiščne točke. Enak postopek smo uporabili na podatkih iz standardne atmosfere ICAO, le da smo v danem primeru lahko računali le podaljšanje poti razširjanja signala za vpliv suhih plinov v troposferi.

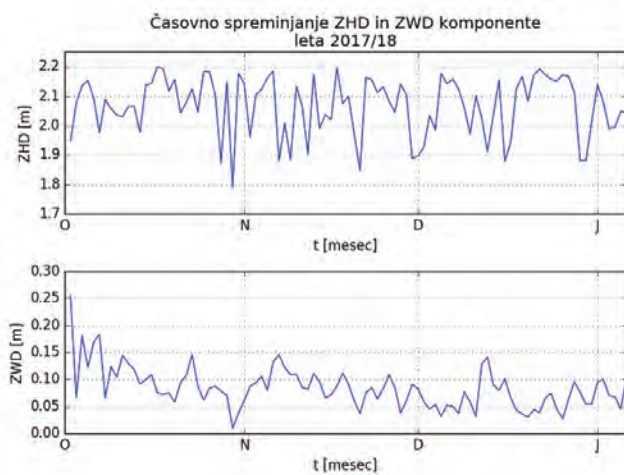
#### 5 REZULTATI IN RAZPRAVA

Za podrobnejšo oceno vpliva troposfere na opazovanja GNSS smo iz različnih podatkov (standardna atmosfera in radiosondaža) za tri mesece določili dnevne vrednosti vpliva za suhe pline in dipolno komponento vodne pare (ZHD) ter vodno paro (ZWD) v obliki izračuna daljše poti razširjanja signala GNSS glede na geometrično. Na sliki 3 prikazujemo rezultate za celotno obravnavano obdobje, medtem ko smo vpliv naprej obravnavali po mesecih (slike 4–9).

Izmed obravnavanih datotek radiosondaž so se najnižje meritve končale na višini 12,539 kilometra. V



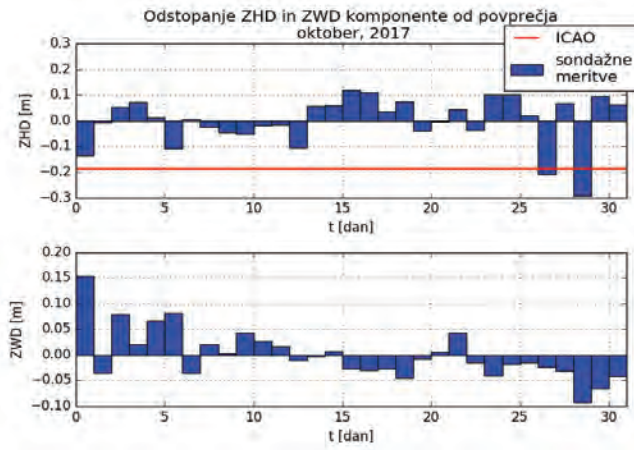
raziskavi smo se v vseh izračunih omejili na obravnavanje vpliva do te višine, zato da smo lahko primerjali izračunane vplive med zaporednimi dnevi. Razlike radiosondažnih meritev za posamezni mesec (slike 4, 6 in 8) so porazdeljene okrog srednje vrednosti za posamezni mesec. Če je bilo povprečje meseca večje od dnevnih vrednosti, so razlike negativne. V preglednicah 2–4 podajamo srednje vrednosti in standardne odklone za komponenti ZHD in ZWD, medtem ko je srednja vrednost na slikah 4, 6 in 8 označena z 0,00 metra. Iz podatkov ICAO smo do višine 13 kilometrov izračunali najnižjo vrednost ZHD (rdeča črta na slikah 4, 6 in 8), ki je znašala 1,899 metra. Ker ICAO ne vključuje podatkov o vlažnosti, rezultate prikazujemo le za komponento ZHD.



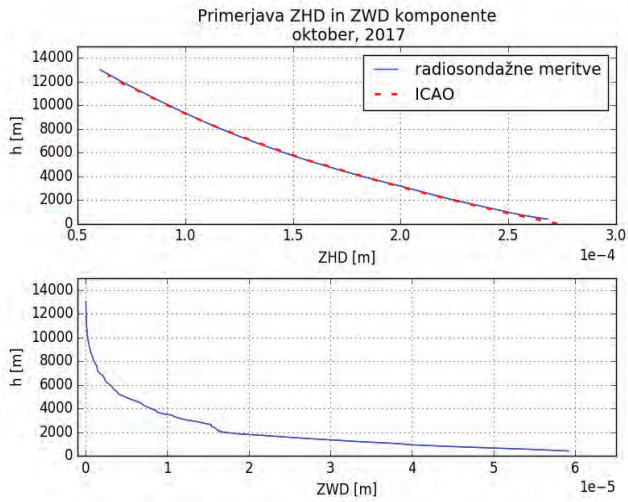
Slika 3: Vpliv troposfere na opazovanja GNSS od oktobra 2017 (O) do januarja (J) 2018 (vir podatkov: radiosondaža).

## 5.1 Rezultati izračunov vpliva troposfere za oktober 2017

S slike 4 je razvidno, da so vrednosti komponente ZHD, izračunane iz standardne atmosfere, za vse dni enake. Če ZHD računamo iz radiosondažnih meritev, so razlike med dnevi očitnejše. Od rezultatov standardne atmosfere se razlikujejo za več kot 20 centimetrov, medtem ko je največja razlika od povprečja v oktobru 30 centimetrov. Izrazite dnevne spremembe so vidne tudi v komponenti ZWD, katere največja razlika od povprečja meseca znaša 15 centimetrov. Na sliki 5 prikazujemo vpliv troposfere v odvisnosti od višine, česar splošno iz rezultatov obdelav opazovanj GNSS ne moremo določiti (v tem primeru dobimo le končni rezultat v obliki podaljšanja poti razširjanja signala GNSS). S spodnje slike 5 je očitno, da je večina vodne pare v nižjem delu atmosfere. Celotna vrednost vpliva troposfere na opazovanja GNSS, izračunana iz radiosondaže za oktober (vsota delnih vplivov, ki so izrisani na sliki 5 v odvisnosti od višine), znaša okrog  $2,18 \text{ m} \pm 0,14 \text{ metra}$  (preglednica 2). Po velikosti precej manjša komponenta ZWD za oktober, ki je iz standardne atmosfere ne moremo določiti, je velikostnega reda  $10,2 \text{ cm} \pm 0,048 \text{ centimetra}$ .



Slika 4: Vpliv troposfere zaradi prisotnosti suhih plinov (ZHD) in vodne pare (ZWD) za oktober 2017.



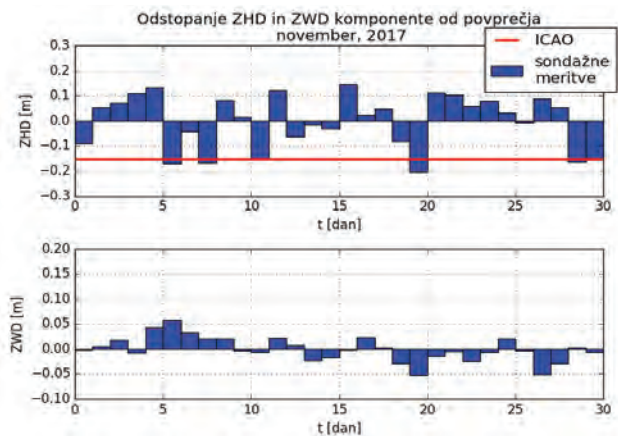
Slika 5: Spremembe vpliva troposfere v odvisnosti od višine, ločeno za vpliv suhih plinov (ZHD) in vodne pare (ZWD); oktober 2017.

Preglednica 2: Za oktober izračunane srednje vrednosti in standardni odkloni komponent ZHD in ZWD.

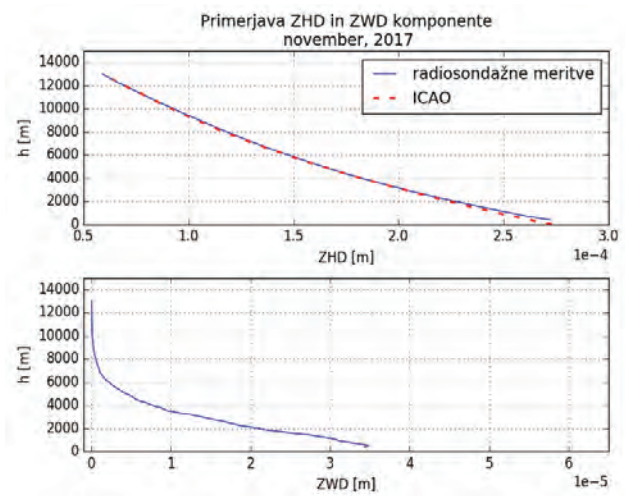
OKTOBER			
ZHD (m)		ZWD (m)	
srednja vrednost	standardni odklon	srednja vrednost	standardni odklon
2,082	0,093	0,102	0,048
2,082 ± 0,093		0,102 ± 0,048	

## 5.2 Rezultati izračunov vpliva troposfere za november 2017

Tudi iz rezultatov za november lahko vidimo očitne razlike v izračunanih vrednostih ZHD glede na ICAO ter razlike med izračunanimi vrednostmi po dnevih. Za november je podaljšanje poti razširjanja signala zaradi celotnega vpliva troposfere velikosti  $2,14 \text{ m} \pm 0,12 \text{ metra}$ , kar je nekoliko manj kot v oktobru. Precej manjše vrednosti glede na oktober dobimo pri izračunu komponente ZWD. Največje dnevne razlike od srednje vrednosti so v novembru manjše kot v oktobru in znašajo največ 6 centimetrov. To pomeni, da je ozračje med izvajanjem radiosondažnih meritev vsebovalo precej manj vodne pare kot predhodni mesec. Na sliki 7 lahko vidimo enakomernejši potek krivulje (glede na sliko 5), ki prikazuje odvisnost vpliva vodne pare glede na višino. V nižjih plasteh v oktobru je vpliv vodne pare izrazitejši kot v novembru, kar je razvidno iz zamika krivulje v nižjih plasteh glede na oktobrske rezultate. Zopet lahko potrdimo, da je večina vodne pare v spodnjem delu atmosfere in da pri višini 10 kilometrov komponenta ZWD nima več bistvenega vpliva na rezultate izračuna.



Slika 6: Vpliv troposfere zaradi prisotnosti suhih plinov (ZHD) in vodne pare (ZWD) za november 2017.



Slika 7: Spremembe vpliva troposfere v odvisnosti od višine, ločeno za vpliv suhih plinov (ZHD) in vodne pare (ZWD); november 2017.

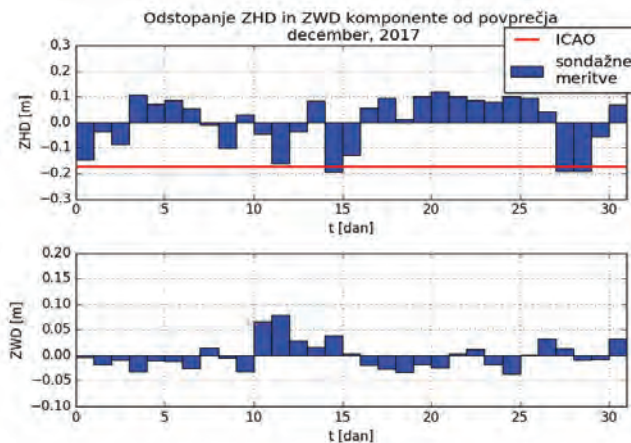
Preglednica 3: Za november izračunane srednje vrednosti in standardni odkloni komponent ZHD in ZWD

NOVEMBER			
ZHD (m)		ZWD (m)	
srednja vrednost	standardni odklon	srednja vrednost	standardni odklon
2,052	0,104	0,089	0,024
2,052 ± 0,104		0,089 ± 0,024	

### 5.3 Rezultati izračunov vpliva troposfere za december 2017

V decembru smo dobili podobne srednje vrednosti kot v novembru ( $2,14 \text{ m} \pm 0,12 \text{ m}$ ). S slike 8 vidimo dnevne spremembe v komponenti ZHD, ki se od povprečne vrednosti meseca razlikujejo od  $-20$  centimetrov do 10 centimetrov. Vpliv vodne pare je manjši glede na pretekla meseca in znaša  $0,063 \text{ m} \pm 0,028 \text{ metra}$ . Enako kot pri rezultatih za prejšnja meseca vidimo, da se vpliv troposfere na opazovanja GNSS spreminja z višino in pri višini 10 kilometrov nima več izrazitega vpliva.

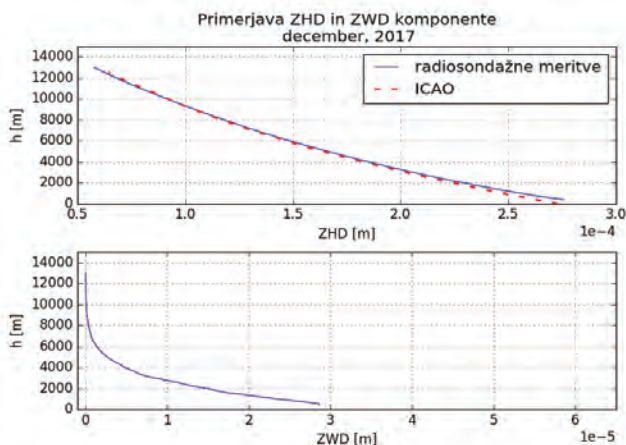
V decembru smo z izračunom pridobili precej manjše vrednosti vpliva vodne pare glede na prejšnja meseca, predvsem glede na oktober. To je verjetno povezano tudi z nižjimi temperaturami pozimi ter dejstvom, da lahko hladno ozračje vsebuje manj vodne pare kot v toplejših obdobjih. Hipoteze na danem mestu ne moremo povsem potrditi in je lahko podlaga za nadaljnje študije obravnavanja vpliva troposfere na opazovanja GNSS med celim letom.



Slika 8: Vpliv troposfere zaradi prisotnosti suhih plinov (ZHD) in vodne pare (ZWD) za december 2017.

Preglednica 4: Za december izračunane srednje vrednosti in standardni odkloni komponent ZHD in ZWD.

DECEMBER			
ZHD (m)		ZWD (m)	
srednja vrednost	standardni odklon	srednja vrednost	standardni odklon
2,072	0,102	0,063	0,028
2,072 ± 0,102		0,063 ± 0,028	



Slika 9: Spremembe vpliva troposfere v odvisnosti od višine, ločeno za vpliv suhih plinov (ZHD) in vodne pare (ZWD); december 2017.

Rezultati izračunov potrjujejo pravilo, da je pri obdelavah opazovanj GNSS z visokimi zahtevami po natančnosti določitev položaja vpliv troposfere primerneje ocenjevati kot dodatno neznanko kot uporabiti modele. Če med obdelavo vpliva troposfere sploh ne upoštevamo, se to prenese v kakovost določitev prostorskih koordinat, predvsem v določitev elipsoidne višine (razlike so reda velikosti več centimetrov). Vključitev radiosondažnih opazovanj v obdelavo opazovanj GNSS ima svoje prednosti in pomanjkljivosti. Ker so na voljo le enkrat dnevno in se končna meritev ne nanaša vedno na isto višino, jih moramo uporabiti ob uvedbi predpostavk. Ob tem pa so neprecenljiv vir meteoroloških podatkov o dejanskem stanju atmosfere v odvisnosti od višine in geografske lokacije, ki vključuje tudi podatke o vlažnosti. Zato jih uporabimo kot referenčni podatek za oceno kakovosti izračuna vplivov troposfere na opazovanja GNSS iz modelov ali iz njihove ocene na podlagi obdelave opazovanj GNSS.

## 6 SKLEP

Glavni namen prispevka je bil določiti velikostni red vpliva troposfere na opazovanja GNSS iz radiosondažnih meritev v Ljubljani za jesensko-zimsko obdobje 2017. V obdelavi opazovanj GNSS vpliv troposfere odpravimo z modeli, medtem ko ga v zahtevnejših nalogah ocenjujemo. To naredimo zato, ker z modeli vpliva v celoti ne moremo odstraniti, saj ne vključujejo dejanskega podatka o časovno in prostorsko spremenljivi vodni pari v ozračju. Uporaba radiosondažnih meritev pri določitvi vpliva je bila poseben izziv, saj teh podatkov v obdelavi opazovanj GNSS ne vključujemo. Z izračuni smo za niz trimesečnih dnevni meritev določili spremembe v velikosti vpliva, ločeno za prispevek suhih plinov in vodne pare. Poglavitni cilj je bil pripraviti podlago za morebitno možnost uporabe radiosondažnih meritev pri opredelitvi kakovosti določitev položaja z uporabo različnih troposferskih modelov, ki so vključeni v programske pakete obdelave opazovanj GNSS.

Vpliv smo ocenjevali kot podaljšanje poti razširjanja signala glede na geometrično za satelite v zenitu, podobno kot so zasnovani modeli vpliva troposfere na opazovanja GNSS. Ob tem smo predpostavili, da se radiosondažni balon giblje pretežno v vertikalni smeri, kar zaradi vpliva vetrov splošno ne velja. Druga pomanjkljivost radiosondažnih meritev je bila, da smo vpliv lahko določili do tam, kjer je balon počil. Vpliv vodne pare

tako vseeno lahko dobro ocenimo, saj je skoncentrirana do tropopavze, medtem ko vpliv suhih plinov lahko računamo iz standardne atmosfere. Vpliv suhih plinov in vodne pare smo predstavili ločeno in pri slednji do obravnavane višine zaznali dnevne spremembe velikostnega reda nekaj decimetrov. Pri prehodu iz jesenskega v zimsko obdobje smo ugotovili očitne spremembe v vplivu vodne pare na razširjanje signalov. V nadaljevanju, ob obravnavanju daljšega niza radiosondažnih meritev, bi bilo to mogoče lahko izhodišče za določitev značilnih lastnosti vpliva troposfere v odvisnosti od letnih časov, kar se odraža v kakovosti določitve položaja.

Glede na raziskavo Sušnikove (2013), ki je iz modeliranega vpliva troposfere primerjala določitev vodne pare z radiosondami in iz obdelave opazovanj GPS ter ugotovila, da različne parametrizacije srednje temperature vplivajo na končno vrednost določitve vpliva, je bil cilj danega prispevka drugačen. Pokazali smo, da se v dnevu velikost mokre komponente vpliva na opazovanja zelo spreminja, in s tem utemeljili, da je pri različnih strategijah določitve položaja, predvsem pri absolutni določitvi iz faznih opazovanj ali pri izrazitih višinskih razlikah krajišč baznega vektorja, v obdelavi opazovanj vpliv dobro ocenjevati kot dodatno neznanko. Zato želimo v nadaljevanju tudi empirično preveriti oceno kakovosti modeliranja vpliva troposfere na opazovanja GNSS v obliki natančnosti določitve položaja v različnih situacijah ter z različnimi metodami izmere GNSS.

## Zahvali

Zahvaljujemo se Agenciji Republike Slovenije za okolje (Oddelku za kontrolo meteoroloških podatkov in arhiv) za posredovanje podatkov radiosondažnih meritev.

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227)* Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

## Literatura in viri:

- Abdelfatah, M. A., Mousa, A., El-Fiky, G. (2015). Precise troposphere delay model for Egypt, as derived from radiosonde data. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 4 (1), 16–24.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nriag.2015.01.002>
- Awange, J. L. (2012). *Environmental Monitoring using GNSS*. New York: Springer.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88256-5>
- ARSO (2018). [http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/vertikalna\\_sondaza.html](http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/vertikalna_sondaza.html), pridobljeno 3. 1. 2018.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: remote sensing of water vapour using Global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97, 15787–15801.  
DOI: <https://doi.org/10.1029/92jd01517>
- Benevides, P., Nico, G., Catalão, J., Miranda, P. M. A. (2017). Analysis of Galileo and GPS integration for GNSS tomography. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 55 (4), 1936–1943. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2631449>
- Böhm, J., Heinkelmann, R., Schuh, H. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81 (10), 679–683.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>
- Böhm, J., Schuh, H. (2007). Troposphere Gradients from the ECMWF in VLBI analysis. *Journal of Geodesy*, 81 (6–8), 409–421.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0126-9>
- Böhm, J., Möller, J., Schindelegger, M., Pain, M., Weber, R. (2015). Development of and improved blind model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, 19 (3), 433–441.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0403-7>
- Hobiger, T., Jakowski, N. (2017). *Atmospheric Signal Propagation*. V: P. J. G. Teunissen (ur.), O. Montenbruck (ur.), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (str. 165–193), Cham: Springer.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_6)
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2001). *GPS theory and practise*. Tretja izdaja. New York: Springer-Verlag.
- ICAO, International Civil Aviation Organisation (1993). *Manual of the ICAO standard atmosphere (extended to 80 kilometres)*, Doc 7488/, Secretary General of the International Civil Aviation Organization. Tretja izdaja, 305 str., [http://code7700.com/pdfs/icao\\_doc\\_7488\\_standard\\_atmosphere.pdf](http://code7700.com/pdfs/icao_doc_7488_standard_atmosphere.pdf), pridobljeno 26. 1. 2018.
- Januszewski, J. (2013). How the Troposphere Affects Positioning Solution Using Satellite Navigation Systems. V: J. Mikulski (ur.), *Activities of Transport Telematics, 13th International Conference of Transport Systems Telematics* (str. 275–283). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_34)
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research*

Letters, 40 (6), 1069–1073. DOI: <https://doi.org/10.1002/grl.50288>

Liang, H., Cao, Y., Wan, X., Xu, Z., Wang, H., Hu, H. (2015). Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China. *Geodesy and geodynamics*, 6 (2), 135–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.03.001>

Namaoui, H., Kahlouche, S., Belbachir, A. H., Van Malderen, R., Brenot, H., Pottiaux, E. (2017). GPS Water Vapor and its comparison with radiosonde and ERA-Interim Data in Algeria. *Advances in atmospheric sciences*, 34 (5), 623–634. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6111-1>

Pogačar, T. (2007). Vertikalna sondaža atmosfere. *Fizika v šoli*, 13 (1–2), 25–32.

Seidel, D. J. (2002). Water Vapor: Distribution and Trends. V: T. Munn (ur.), *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Chichester, John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com//legacy/wileychi/egec/pdf/GB085-W.PDF>, pridobljeno 28. 1. 2018.

Shoji, Y., Sato, K., Yabuki, M., Tsuda, T. (2017). Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific in the seas adjacent to Japan. *Earth, Planets and Space*, 69 (153), 2–13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0740-1>

Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. (2013). Modeliranje ionosferske refrakcije za izboljšavo absolutnega GNSS-položaja s kodnimi instrumenti: priprava na 24. Sončev cikel. *Geodetski vestnik*, 57 (1), 9–24. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.01.009-024>

Randel, D. L., Vonder Haar, T. H., Ringerud, M. A., Stephens, G. L., Greenwald, T. J., Combs, C. L. (1996). A New Global Water Vapor Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1233–1246. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<1233:ANGWVD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<1233:ANGWVD>2.0.CO;2)

Rüeger, J. M. (2002). Refractive Index Formulae for Radio Waves. *Proceedings. V XXII FIG International Congress: ACSM/ASPRS Annual Conference and Technology Exhibition 2002: congress/conference proceedings*. Washington D. C., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig\\_2002/Js28/JS28\\_rueger.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2002/Js28/JS28_rueger.pdf), pridobljeno 28. 1. 2018.

Sušnik, A. (2013). Uporaba sistema globalnega določanja lege za raziskave vremena in vesoljskega vremena (GPS for weather and space weather studies). *Doktorska disertacija*. Nova Gorica: Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za podiplomski študij. <http://www.ung.si/~library/doktorati/fizika/16Susnik.pdf>, pridobljeno 4. 5. 2018.

Trontelj, M. (1995). Radiosondažne meritve tudi v Sloveniji. *Ujma*, 9, 190–193. [http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/1995/190\\_193.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/1995/190_193.pdf), pridobljeno 5. 1. 2018.

Younes, S. A.-M. (2016). Modeling investigation of wet tropospheric delay error and precipitable water vapor content in Egypt, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Spece Sciences*, 19, 333–342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.05.002>



Senica A., Sterle O., Pavlovčič Prešeren P. (2018). Določitev vpliva troposfere na opazovanja GNSS iz niza radiosondažnih meritev v Ljubljani od oktobra do decembra 2017. *Geodetski vestnik*, 62 (3), 415–429. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.03.415-429>

**Alenka Senica**

Študentka na Univerzi v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko  
e-naslov: [alenka.senica@student.fmf.uni-lj.si](mailto:alenka.senica@student.fmf.uni-lj.si)

**Asist. dr. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-naslov: [oskar.sterle@fgg.uni-lj.si](mailto:oskar.sterle@fgg.uni-lj.si)

**Doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-naslov: [polona.pavlovic@fgg.uni-lj.si](mailto:polona.pavlovic@fgg.uni-lj.si)