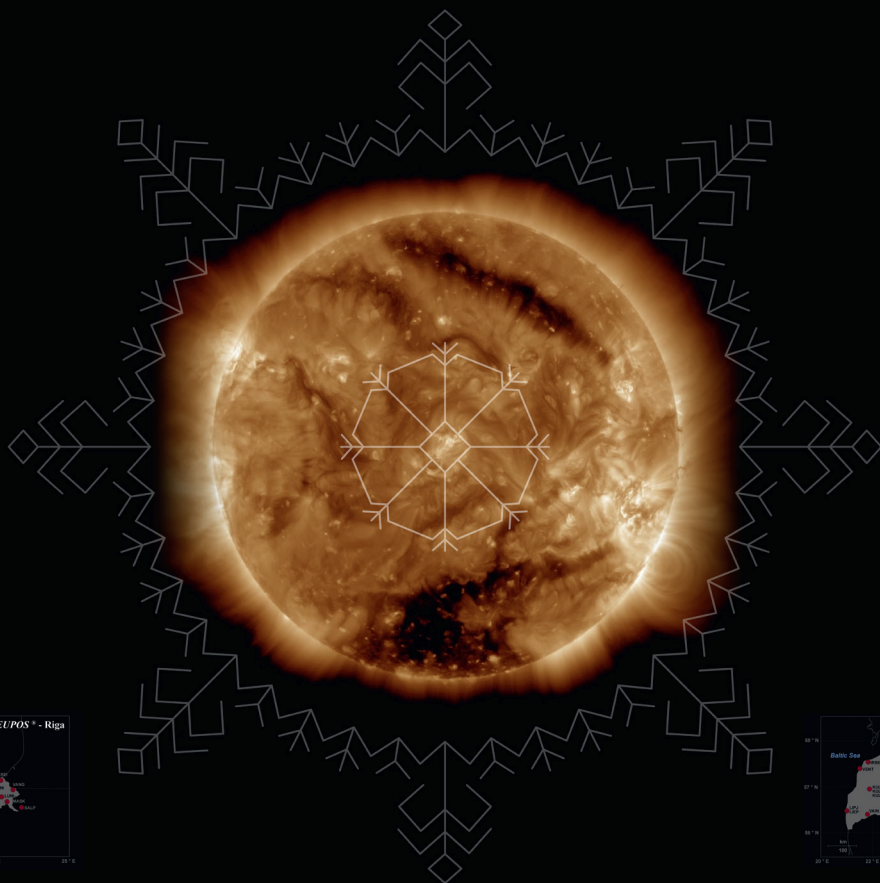


Madara Normanda

KOSMISKO LAIKA APSTĀKĻU IETEKME UZ GPS POZICIONĒŠANAS REZULTĀTIEM LATVIJĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Transportbūvju institūts

Madara Normanda

Doktora studiju programmas “Būvzinātne” doktorante

**KOSMISKO LAIKA APSTĀKĻU IETEKME
UZ GPS POZICIONĒŠANAS REZULTĀTIEM
LATVIJĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. phys.* JĀNIS BALODIS

Dr. sc. ing. INESE VĀRNA

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Normanda M. Kosmisko laika apstākļu ietekme uz GPS pozicionēšanas rezultātiem Latvijā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-06” 2023. gada 13. oktobra lēmumu, protokols Nr. P-04030-9.6.2/7.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.



Vāka attēli no <https://www.spaceweatherlive.com> un autores personīgā arhīva.

<https://doi.org/10.7250/9789934370434>
ISBN 978-9934-37-043-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 26. aprīlī plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 342. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Armands Celms,
Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte

Asociētais profesors *Ph. D.* Harli Jürgenson,
Igaunijas Dzīvības zinātņu universitāte, Igaunija

Profesors *Dr. Eimuntas Kazimieras Paršeliūnas*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Madara Normanda (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 33 attēli, 25 tabulas, divi pielikumi, kopā 93 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 114 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Pētījuma problēmas nostādne	9
Darba mērķis	10
Darba uzdevumi	10
Pētījuma zinātniskā novitāte	11
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums	12
Pētīšanas metodika	13
Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze	13
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas	14
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti	14
Promocijas darba saturs un apjoms	15
PĒTĪJUMA REZULTĀTU APROBĀCIJA	16
Zinātniskās publikācijas	16
Ziņojumi starptautiskās zinātniskās konferencēs	17
PROMOCIJAS DARBA SATURS	18
1. KOSMISKO LAIKAPSTĀKĻU PARĀDĪBAS.....	19
Kosmisko laikapstākļu parādību raksturojums	19
2. KOSMISKO LAIKAPSTĀKĻU IETEKMES ANALĪZES METODOĻĪJA LATVIJAS <i>CORS</i> STACIJĀM NO 2007. LĪDZ 2017. GADAM.....	20
Dati	20
Latvijas <i>CORS</i> tīkli un <i>IGS/EPN</i> stacija RĪGA	20
Datu atlase	20
Izstrādātā metode	21
Datu apstrāde	22
<i>CORS</i> novērojumu datu pirmapstrāde, lietojot <i>bernese gnss</i> programmatūras v5.2	22
Analīzes funkciju un datu plūsmas blokshēma	24
3. REZULTĀTI.....	25
Koordinātu nesaistu vērtību sadalījums.....	25
“Traucējumu viļņu” kustība	26
Signāla zuduma situācijas.....	29
Korelācijas analīze.....	31
<i>ROTI</i> korelācijas analīze.....	33
Sakarības novērtējums starp kļūdaino risinājumu skaitu un maksimālo <i>TEC</i>	34
4. PAPILDU KOSMISKO LAIKAPSTĀKĻU TESTI <i>EGNOS RIMS</i> UZ ZEMES ESOŠAJĀM STACIJĀM	35
SECINĀJUMI.....	36
PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS SARAKSTS.....	39

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Kosmisko laikapstākļu jēdzienu parasti attiecina uz situāciju, kas novērojama uz Saules, Saules vējā, Zemes magnetosfērā, jonosfērā un termosfērā. Kosmiskie laikapstākļi var ietekmēt kosmosā bāzēto un uz Zemes esošo tehnoloģisko sistēmu veiktspēju un uzticamību un apdraudēt cilvēka dzīvību un veselību (definīcija, kas tiek lietota ASV Nacionālajā kosmisko laikapstākļu plānā).

Interese par kosmisko laikapstākļu, tādējādi – jonosfēras īpašību, izpēti pēdējās desmitgades laikā ir palielinājusies.

Vairākas valstis šo tēmu ir izvirzījušas kā ļoti svarīgu valsts līmenī.

Piemēram, viens no trim ASV Nacionālās kosmisko laikapstākļu stratēģijas un rīcības plāna mērķiem ir “izstrādāt un izplatīt precīzu un savlaicīgu kosmisko laikapstākļu raksturojumu un prognozes” (*Weather Operations and Mitigation Working Group*, 2019). Raksturojums ietver kosmisko laikapstākļu vides mērīšanu, novērtēšanu un modelēšanu, lai informētu par pašreizējo situāciju, situācijas izpratni, vēsturiskos pētījumus, juridiskos jautājumus un raksturojošās pazīmes (*Weather Operations and Mitigation Working Group*, 2019). Zināšanu paplašināšana par kosmisko laikapstākļu parādību ietekmi uz Zemi un kosmosa vidē un to raksturošana var uzlabot situācijas izpratni, palīdzēt lēmumu pieņemšanā un dot iespēju izpildīt misijas, kas ir atkarīgas no tehnoloģijām un pakalpojumiem, ko var ietekmēt kosmisko laika apstākļu radītie traucējumi (*Weather Operations and Mitigation Working Group*, 2019).

Ir svarīgi identificēt un pēc vajadzības iepazīstināt ar jaunām vai iepriekš nepietiekami izmantotām datu kopām. Lielāka piekļuve esošajām datu kopām varētu uzlabot kosmisko laikapstākļu raksturošanai un prognozēšanai izmantoto modeļu izstrādi, validāciju un testēšanu (*Weather Operations and Mitigation Working Group*, 2019). Lai prognozētu jonosfēras raksturlielumus, efektīvi ir izmantot modeļus, kas ņem vērā jonosfēras vēsturisko stāvokli, kā arī Saules un magnētiskās aktivitātes parametru vēsturi, kas raksturo galveno ietekmi uz jonosfēru (*Salimov et al.*, 2023).

Apvienotā Karaliste kosmisko laikapstākļu radīto risku 2011. gadā iekļāva Nacionālajā risku reģistrā (*Sverige. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap*, 2012), un vēlāk, 2017. gadā Apvienotā Karaliste kosmiskos laikapstākļus iekļāva Valsts civilo ārkārtas situāciju riska reģistrā (“*National Risk Register Of Civil Emergencies 2017 Edition*”, 2017) kā vienu no dabas apdraudējumu riskiem. Norvēģija 2012. gadā kosmiskos laikapstākļus iekļāva savā

Valsts ievainojamības un sagatavotības ziņojumā (norvēģu val. – *Nasjonal sårbarhets och beredskapsrapport; NSBR*). Nīderlandē kosmisko laikapstākļu ietekme tiek uzskatīta par daļu no darba, kas ir Nacionālās drošības un drošības stratēģijas pamatā. Zviedrija 2012. gadā risināja riska scenāriju, kas ietver globālo navigācijas satelītu sistēmu (angļu val. – *Global Navigation Satellite Systems; GNSS*) traucējumus valsts riska novērtējuma ietvaros, un kopš tā laika turpina darbu pie scenārijiem, kuru pamatā ir kosmisko laikapstākļu ietekme (*Sverige. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2012*).

Šie ASV un Apvienotās Karalistes, kā arī citu iepriekš minēto valstu dokumenti parāda kosmisko laikapstākļu ietekmes nozīmi visā pasaulē un tās atzīšanas nozīmi valsts līmenī. Gan ASV un Apvienotajai Karalistei valsts līmenī ir skaidra vīzija par uzdevumiem, kas jāveic, lai sasniegtu iepriekš aprakstītos mērķus.

Arī Eiropas Kosmosa aģentūra (EKA) ir uzsvērusi šīs tēmas lielo nozīmi.

Lai sasniegtu iepriekš minētos mērķus, tos var viegli vispārināt katrā valstī, kosmisko laika apstākļu tēmai pasaulē ir veltīti vairāki projekti.

Piemēram, vienu no šādām iniciatīvām saskaņā ar Eiropas Komisijas deleģēšanas līgumu ir uzņēmusies EKA. Tā ir “Apvārsnis 2020” ietvarprogramma pētniecībai un inovācijai satelītnavigācijas jomā (angļu val. – *Horizon 2020 Framework Programme for Research and Innovation in Satellite Navigation; HSNANAV*), kur EKA atbild par tās tehnisko īstenošanu un administrēšanu (*H2020 HSNANAV mājaslapa*).

Viens no šīs programmas projektiem ir “Traucējumu viļņu forma un jonosfēru raksturojošais uzraudzības tīkls” (angļu val. – *EVIL WAVEFORM AND IONOSPHERIC CHARACTERIZATION MONITORING NETWORK*) (*H2020 HSNANAV mājaslapa*). Šīs aktivitātes mērķis ir uzraudzīt dažādus GNSS signālus, paplašinot MONITOR tīkla pašreizējās iespējas un izmantot datubāzi, lai sniegtu atbilstošu pienesumu Eiropas ģeostacionārā navigācijas pārklājuma pakalpojuma (angļu val. – *European Geostationary Navigation Overlay Service; EGNOS*) V3 attīstībai (atjaunināti modeļi un references scenāriji, statistika un specifikācijas, sliktākā gadījuma aplēses, reprezentatīvi datu paraugi utt.).

Termins “traucējumu viļņu forma” tiek lietots, lai noteiktā apgabalā apzīmētu tos navigāciju traucējošos datus, ko izraisa globālās pozicionēšanas sistēmas (angļu val. – *Global Positioning System; GPS*) pulksteņa kļūda (*Julien et al., 2017*). ASV *GPS* pazīstama kā navigācijas sistēma laika un attāluma noteikšanai (angļu val. – *NAVigation System Timing And Ranging; NAVSTAR*). Termins “traucējumu vilnis” šajā promocijas darbā ir lietots, lai raksturotu pozicionēšanas nesaistu mainīgo sadalījumu Latvijas teritorijā noteiktā laika periodā.

Iepriekš minētie piemēri un vairāki pētījumi, kas veikti dažādās institūcijās visā pasaulē, liecina par to, ka kosmisko laikapstākļu parādību izpētei ir liela aktualitāte.

Kosmisko laikapstākļu pētījumos jonosfēras vētru ietekmes pētījumi ir ļoti svarīgi (*Yang et al.*, 2020). Kosmisko laikapstākļu parādības daudz vairāk tiek pēfītas augstajos platuma grādos un ekvatoriālajos platuma grādos, jo šajos reģionos to esamība ir biežāka un ietekme ir lielāka. Augstajos platuma grādos to ietekme ir spēcīgāka, savukārt zemajos platuma grādos ietekme ir saistīta ar dažāda veida jonosfēras traucējumiem. Turpretim vidējos platuma grādos neregularitātes ir mazāk izteiktas, tās parasti tiek attiecinātas uz polārblāzmu un/vai ekvatoriālo neregularitāšu paplašināšanos traucētos apstākļos (*Yang et al.*, 2020).

Promocijas darba hipotēze ir šāda: “Vidējos platuma grādos *TEC* neregularitātes un kosmisko laikapstākļu ietekme ir mazāk kritiska (*Yang et al.*, 2020)”. Vai tā ir?

Vēsturiski vidējie platuma grādu apgabali bija maz pētīti, jo šajos reģionos šīm parādībām tika veltītas tikai nelielas investīcijas un arī veikto pētījumu skaits bija neliels (*Skone*, 2001), tomēr situācija ir mainījusies.

Spogli et al. (2009) apsprieda iespēju izpētīt jonosfēras neregularitāšu dinamiku, kas izraisa scintilāciju, apvienojot informāciju no dažādiem platuma grādiem. Autori analizēja jonosfēras scintilācijas datus no 44–88° N platuma grādiem 2003. gada oktobrī, novembrī un decembrī.

Līdzīgu darbu Beļģijā ir veikuši *Stankov et al.* (2009), pētot *GPS* signāla nokavēšanos ģeomagnētisko vētru laikā 2003. gada 29. oktobrī un 20. novembrī. Tika pētīta jonosfēras sienu anomālā kustība (*Stankov et al.*, 2009). Tika atrasti līdzīgi jonosfēras gradienti. Tradicionālās instrumentālās nosēšanās sistēmas (angļu val. – *Instrument Landing System; ILS*) vietā vairākas par prototipiem izvēlētas lidostas izmantojušas *GNSS* nolaišanās un pacelšanās gadījumos. Šīs prototipu lidostas atrodas apgabalos, kuros scintilāciju rašanās ir niecīga (*Mayer et al.* 2009; *Circiu et al.* 2014; *Lee and Lee*, 2019). *Stankov et al.* (2009) rosina novērtēt uz Zemes esošo palīgsistēmu / uz satelītiem bāzēto palīgsistēmu (angļu val. – *Ground Based Augmentation System; GBAS / Satellite Based Augmentation System; SBAS*) pakalpojumu integritātes riskus.

Ķīnas zinātnieki pētījuši uz *GPS* balstītu kopējā elektronu daudzuma (angļu val. – *Total Electron Content; TEC*) svārstību variāciju raksturlielumus 21 Ķīnas reģionā (*X. Liu et al.*, 2016). Viņi pētīja svārstību intensitāti dažādos platuma grādos dienas un nakts laikā, kā arī ziemā un vasarā. *TEC* ātruma izmaiņas indeksi (angļu val. – *Rate Of change of TEC index; ROTI*) tika izmantoti, lai izpētītu jonosfēras *TEC* svārstības 11 gadu Saules cikla laikā no 2002. līdz 2012. gadam (*X. Liu et al.*, 2016).

Lai klasificētu attiecīgās lieluma kārtas un sastopamības biežumu *Hlubek et al.* (2014), izmantoja statistisku pieeju un apkopēja lielus izmērīto datu apjomus. *Hlubek et al.* (2014) secināja, ka dubultpīķa struktūru ar vislielāko scintilācijas intensitāti iespējams novērot pavasara un rudens ekvinokcijas laikā.

Pētījumu par korelāciju starp GNSS atvasinātu jonosfēras telpisko dekorelāciju un kosmisko laikapstākļu intensitāti drošībai kritiskām diferenciālām GNSS sistēmām veica Lī un Lī (*Lee and Lee, 2019*).

Pēdējā desmitgadē Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un ģeoinformātikas institūtā (LU ĢĢI) kosmiskie laikapstākļi ir viena no pētījumu tēmām. Šī tēma ir atspoguļota Balodis *et al.* (2017) un Balodis, *Varna, Normand* (2018) publikācijās, kas bija iedvesmas avots turpmākiem pētījumiem, kas izklāstīti šajā promocijas darbā. Raksts, kas publicēts *Remote Sensing Journal* (Balodis, Normand, Varna, 2021), iepazīstina ar daļu no rezultātiem, kas iegūti, LU ĢĢI īstenojot EKA projektu (2019–2021). Šī pētījuma turpinājums ir atspoguļots rakstā “GPS pozicionēšanas neatbilstības mākoņu kustība vidējā platuma reģionā 2015. gada martā” (*Balodis, Normand, and Zarins, 2023*).

Nemot vērā EKA prioritātes pētniecībā, kas saistīta ar kosmiskajiem laikapstākļiem, kā arī augstāk minēto, tēmas nozīmību pastiprina arī fakts, ka Latvija ir viena no EKA Eiropas sadarbības valstu plāna programmas (angļu val. – *Plan for European Cooperating States; PECS*) valstīm.

2013. gada 19. martā Latvija kļuva par septīto EKA Eiropas sadarbības valsti, un 2020. gada 30. jūnijā tā kļuva par asociēto biedru (*ESA mājaslapa*).

Kosmisko laikapstākļu parādību izpēte Latvijā ir kļuvusi iespējama līdz ar nepārtraukti darbojošos atbalsta staciju (angļu val. – *Continuously Operating Reference Station; CORS*) tīklu izstrādāšanu un to īstenošanu (LatPos tīkls (*Zvirgzds, 2012*) un *EUPOS*[®]-Rīga tīkls (*Silabriedis, 2012*)). LatPos un *EUPOS*[®]-Rīga CORS stacijas darbojas kopš 2007. gada (dažas stacijas – kopš 2006. gada).

Kopš to ieviešanas LatPos un *EUPOS*[®]-Rīga tīkli (kā arī starptautiskā GPS/GNSS servisa (angļu val. – *International GPS/GNSS Service; IGS* / reģionālās atbalsta sistēmas apakškomisiju Eiropai (angļu val. – *European Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe; EUREF*) pastāvīgās darbības GNSS tīkla (angļu val. – *EUREF Permanent GNSS Network; EPN*) stacija RIGA) ir kalpojuši kā lielisks avots dažādu augsta līmeņa pētījumu veikšanai Latvijā. Piemēram var minēt par jonosfēru veiktos pētījumus *Dobelis, Zvirgzds, Kaļinka* (2017), ģeofizikālo procesu pētniecību *Haritonova* (2016), kā arī ar ģeoīdu saistītos pētījumus *Janpaule* (2014), *Kaminskis* (2010) un *Morozova*, (2022). Lielākā daļa no tiem izstrādāta promocijas darbu ietvaros.

Latvijas CORS staciju novērojumu dati tiek plaši izmantoti dažādos augsta līmeņa pētījumos, kā arī inženiertehniskajos uzdevumos, mašīnu vadībā u. c., tāpēc šī promocijas darba pētījums, kas ietver Latvijas CORS stabilitātes kontroli saistībā ar kosmisko laikapstākļu ietekmi 11 gadu laikā, ir būtisks Latvijas CORS staciju analīzē. Analīze tiek veikta visam

iepriekšējam (24.) Saules ciklam. Vēsturisko datu analīze sniedz informāciju par līdzīgām situācijām, kas varētu rasties nākamajā Saules ciklā.

Dati un informācija par ekstrēmu kosmisko laikapstākļu izraisītajiem riskiem ir sadrumstalota starp valdībām un privāto sektoru, un tā joprojām lielākoties nav pieejama lēmumu pieņēmējiem un riska grupām. Pozitīva tendence ir tāda, ka ekstrēmo kosmisko laikapstākļu radītie riski arvien vairāk tiek iekļauti valsts riska novērtējumos. Valstu procesi risku novērtēšanai nodrošina ar svarīgiem instrumentiem saskaņotībā un starpnozaru koordinācijā (*Sverige. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap*, 2012).

Promocijas darba ietvaros veiktais pētījums ir pirmais solis, lai valsts līmenī aktualizētu izpratni par kosmisko laikapstākļu ietekmi uz *GNSS* pozicionēšanas rezultātiem Latvijā.

Pētījuma problēmas nostādne

Kosmisko laikapstākļu ietekme uz *GNSS* pozicionēšanu, navigāciju un laika noteikšanu ir atzīta par nopietnu apdraudējumu (*Sreeja*, 2016) *GBAS* un *SBAS* darbības kvalitātei, kā arī daudziem citiem pozicionēšanas un navigācijas lietojumiem, piemēram, tālzipētes platformām, satelītiem, aviācijai, automašīnām, kravas automašīnām, lauksaimniecībai, celtniecībai, sniega tīrīšanai utt. *GNSS* signālu kropļojumi rada bažas daudzām lietojumprogrammām, īpaši tām, kas saistītas ar dzīvības drošību (angļu val. – *Safety of Life; SoL*).

Pētījuma rezultāti, kas iegūti šī promocijas darba ietvaros varētu liecināt, ka līdzīgi efekti var rasties gan *GBAS* (un, ka tos iespējams konstatēt līdzīgā veidā) un reģionālajā *SBAS* (piemēram, *EGNOS*). Tādējādi ārkārtēju Saules notikumu laikā var tikt apdraudēti kritiskie *SoL* pakalpojumi un to lietojumprogrammas. Cita starpā, galvenais *EGNOS SoL* pakalpojuma mērķis ir atbalstīt civilās aviācijas darbības. Kopš 1993. gada aprīļa arī Latvija ir Eiropas Civilās aviācijas konferences (angļu val. – *European Civil Aviation Conference; ECAC*) dalībvalsts (*ECAC* mājaslapa), un tas nozīmē, ka, lai izpildītu Starptautiskās Civilās aviācijas organizācijas (angļu val. – *International Civil Aviation Organization; ICAO*) precīzās nosēšanās standartus, arī Latvijā tiek izmantota *EGNOS* centrālā apstrādes iekārta (angļu val. – *Central Processing Facility; CPF*). Ņemot vērā to, ka *EGNOS* attāluma mērījumu integritātes monitoringa staciju (angļu val. – *Ranging Integrity Monitoring Stations; RIMS*) tīkla fiziskā robeža gandrīz sakrīt ar Latvijas teritorijas robežu, dzīvības drošības jautājums ekstrēmos kosmiskos laikapstākļos Latvijā varētu kļūt kritisks.

Tādējādi šajā promocijas darbā iegūtie rezultāti varētu kalpot kā brīdinājuma zīme, un tie varētu liecināt par nepieciešamību šo tēmu aktualizēt valsts līmenī.

Visā pasaulē tiek pētītas dažādas pieejas, kā identificēt un raksturot kosmisko laikapstākļu parādības uz Zemes esošajā segmentā un kosmosa segmentā, piemēram, (*Spogli, Alfonsi, de Franceschi et al.*, 2009; *Stankov, Warnant, and Stegen*, 2009; *X. Liu et al.*, 2016; *Hlubek et al.*, 2014; *Lee and Lee*, 2019; *Cherniak, Zakharenkova, and Redmon*, 2015; *Morozova et al.*, 2020; *Elvira Astafyeva, Zakharenkova, and Förster*, 2015; *Jacobsen and Andalsvik*, 2016; *J. Liu et al.*, 2016; *Balasis, Papadimitriou, and Boutsis*, 2019; *Park et al.*, 2017; *Jin et al.*, 2019), un tās ir īsi izklāstītas promocijas darba 1.2. nodaļā.

Arī uz Zemes balstītās infrastruktūras trūkums, piemēram, jonozondes, digitālās jonozondes, dinazondes (*NOAA mājaslapa*), magnetometri utt., dažās teritorijās (platuma grādos) ir ierobežojošs faktors pētniecības metodes izvēlē, risinot šo tēmu. Iepriekš šajā nodaļā tika uzsvērts un norādīts (*Skone*, 2001), ka vidējos platuma grādos vēsturiski ieguldīts mazāk investīciju, līdz ar to veikts mazāk pētījumu.

Tomēr pēdējo 10 gadu laikā par šo tēmu veikto pētījumu skaits vidējo platuma grādu apgabalā pieaug (*Spogli, Alfonsi, De Franceschi et al.*, 2009; *Stankov, Warnant, and Stegen*, 2009; *Mayer et al.*, 2009; *Circiu et al.*, 2014; *Lee and Lee*, 2019; *X. Liu et al.*, 2016; *Hlubek et al.*, 2014). Zinātnieku kopienas izaicinājums ir padarīt pētniecību iespējamu ikvienā pasaules malā, rast veidu, kā identificēt un raksturot kosmisko laikapstākļu parādības, izmantojot infrastruktūru, kas jau ir izveidota konkrētajā apgabalā (platuma grādos), ja tam nav paredzēti papildu līdzekļi, kā arī, ja iespējams, izstrādāt jaunu infrastruktūru, jaunu programmatūru un programmatūras skriptus, kas saistīti ar konkrēto pētījumu.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir pārbaudīt reālā laika kinemātikas (angļu val. – *Real Time Kinematics; RTK*) un statisko mērījumu veikšanai izmantoto Latvijas *CORS* tīklu stabilitāti saistībā ar kosmisko laikapstākļu ietekmi uz pozicionēšanas precizitāti un koordinātu stabilitāti 11 gadu periodā, aptverot visu 24. Saules aktivitātes ciklu, veicot kinemātisko koordinātu neatbilstību statistisko analīzi attiecībā pret publiski pieejamajiem jonosfēras kopējo elektronu daudzuma *TEC* un *ROTI* līmeņiem, vidējo platuma grādu reģionā – Latvijā.

Darba uzdevumi

Galvenie uzdevumi ir šādi:

- 1) atklāt traucēto rezultātu apjomu un raksturot traucējumu lieluma statistiku;

- 2) analizēt traucējumu korelāciju ar *TEC* un *ROTI*;
- 3) atrast visvairāk ietekmētās *CORS* stacijas, raksturot secinājumus par tīkla ietekmētās nestabilitātes iemeslu.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir izstrādātā un pielietotā metodoloģija, kas ir oriģināla un nav iepriekš realizēta un balstās uz šādiem sasniegumiem:

Pirmo reizi Latvijas *CORS* GPS pozicionēšanas dati visam Saules ciklam, t.i., 11 gadiem (2007–2017), tika analizēti un izmantojot *Bernese GNSS* programmatūras v5.2. apstrādāti 90 sekunžu kinemātiskajā pēcapstrādes režīmā.

- 1) Apkopota Latvijas *CORS* stabilitātes kontrole saistībā ar kosmisko laikapstākļu ietekmi, atklājot pozicionēšanas rezultātu nesaistes.
- 2) Pīrsona korelācijas analīzes metode ļāva novērtēt saistību starp jonosfēras *TEC* līmeņiem un kļūdaino pozicionēšanas rezultātu biežumu, kā arī to cikliskās nenoteiktības lēcienu biežumu, ko identificēja *Bernese GNSS* programmatūras v5.2; Pīrsona korelācijas analīzes metode deva iespēju novērtēt saistību starp *ROTI* indeksu līmeni un kļūdaino pozicionēšanas rezultātu biežumu.
- 3) Pielietotā metode deva iespēju novērtēt globālo *TEC* un *ROTI* aproksimācijas modeļu piemērotību lokālām jonosfēras anomālijām, kā arī atklāt vienlaicīgas neatbilstības vairākās atsevišķās stacijās. Tādējādi tā ļāva raksturot globālo jonosfēras modeļu neregularitāti.
- 4) Ikmēneša nesaistu diagrammas atklāja kosmisko laikapstākļu ietekmēto “nesaistu mākoņu” kustību, kas tika pēfīta pēcdoktorantūras darba publikācijā (*Balodis, Normand, and Zarins, 2023*).

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Šāda veida informācija par Latvijas *CORS* 11 gadu selektīvo ikdienas *GPS* novērojumu analīzi, uzsvāru liekot uz nozīmīgiem kosmiskiem laika apstākļiem, ir nepieciešama Latvijas reģionā (platuma grādos ap 57° N) tāpat kā citviet pasaulē.

Galvenais praktiskais ieguvums šī promocijas darba mērķa sasniegšanas rezultātā ir kosmisko laikapstākļu parādību un jonosfēras traucējumu ietekmes raksturojums un analīze, kas balstīta uz *GPS* novērojumu datiem, kas savākti Latvijas *CORS* stacijās 11 gadu periodā. Rezultāts ir izpratne par kosmiskiem laikapstākļiem, kas ietekmē *GPS* novērojumu datus vidējā platuma grādu reģionā (ap 57° N); tādējādi tas ir pirmais pētījums, kas veikts Latvijas teritorijā, pamatojoties uz apkopotiem *GPS* novērojumu datiem 11 gadu periodā, kā arī pirmais šāda veida pētījums vidējo platuma grādu reģionā.

Ir svarīgi saprast, ka *GNSS* mērījumus papildus daudzkārtējas atstarošanās kļūdu avotiem būtiski ietekmē arī kosmiskie laikapstākļi un ir jāapzinās jonosfēras *TEC* neregularitātes.

Šis pētījums sniedz zināšanas par nepieciešamību palielināt izpratni par šo tēmu valsts līmenī. Tam ir divkāršs pielietojums:

- 1) tautsaimniecībā, t. i., *GNSS* lietotājiem mērmiecības, inženiertehniskajos uzdevumos un navigācijā (automobiļu vadības iekārtās, ceļu būve utt.) un daudzos citos pozicionēšanas uzdevumos;
- 2) valsts aizsardzībā, kur *GNSS* tiek plaši izmantots bezpilota lidaparātu vadīšanā un artilērijas lietojumos.

Promocijas darbā atklāta kosmisko laikapstākļu parādību aktualitāte un rasta izpratne par to ietekmi uz *GPS* novērojumiem Latvijā.

Promocijas darba ietvaros veiktais pētījums par kosmisko laikapstākļu parādībām kosmosā jau kalpo par pamatu turpmākiem pētījumiem, kā arī par pamatu izpratnes palielināšanai par šo tēmu valsts līmenī.

Ņemot vērā to, ka procesi dabā nemitīgi mainās, mainās arī globālais klimats un atmosfēras neregularitātes, nākotnē šīs tēmas apzināšana platuma grādos ap 57° N ir būtiski svarīga. *GNSS* pozicionēšanas izmantošana dažādās lietojumprogrammās pieaug, kā arī pieaug izpratne par kosmisko laikapstākļu ietekmi uz *GNSS* novērojumiem.

Šī tēma būs īpaši nozīmīga turpmākajos gados, jo ir sācies jauns (25.) Saules aktivitātes cikls.

Līdz šim kosmisko laikapstākļu ietekmes uz *GPS* pozicionēšanas rezultātiem izpētei šāda metodika nav izmantota, tāpēc šis pētījums dod iespēju apvienot apgūtās prakses kopīgu mērķu

sasniegšanai nākotnē, paplašinot pētījumu lielākā teritorijā (apgabalā) un aizpildot plaisu kosmisko laikapstākļu parādību izpētē šajā reģionā.

Pētīšanas metodika

Promocijas darba izstrādes gaitā izmantotas šādas pētījumu metodes:

- a) monogrāfiskā jeb aprakstošā pētījumu metode – izmantota problēmas izpētei un raksturošanai, apkopojot informāciju un pamatojoties uz literatūras avotiem;
- b) skaitliskā metode – izmantota, lai atlasītajiem *GPS RINEX* 30 sekunžu novērojumu datiem, izmantojot *Bernese GNSS* programmatūras v5.2, aprēķinātu Latvijas *CORS* staciju ģeocentriskās koordinātas X, Y, Z, T , kā arī *Fortran g95* un *Python* skripti, kas izstrādāti LU ĢĢI, datu analīzei;
- c) datu matemātiskās statistikas metode – lietota *GNSS* staciju koordinātu transformāciju veikšanā, Pīrsona korelāciju analīzei un rezultātu analīzei (*Microsoft Excel*, *Fortran g95*);
- d) matemātiskās loģikas un kopu teorijas metode – pielietota datu analīzē;
- e) analīzes un sintēzes metode – lietota, lai aprakstītu Latvijas *CORS* staciju nobīdes, kā arī kosmisko laikapstākļu ietekmi uz *GPS* novērojumu rezultātiem (*TEC* un *ROTI* korelācija);
- f) grafiskā metode – izmantota, lai uzskatāmi atainotu iegūtos rezultātus (*Microsoft Excel*, *Python* un *AutoCAD*).

Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze

Promocijas darbā veiktie pētījumi balstās šādās zinātņu nozarēs un apakšnozarēs:

- ģeodēzija un ģeoinformātika;
- matemātika;
- datorzinātne un programmatūras inženierija;
- matemātiskā statistika;
- kosmosa fizika;
- atmosfēras zinātne.

Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas

Promocijas darba pētījums ietver Latvijas *CORS* tīklu: LatPos un *EUPOS*[®]-Rīga (darbojas kopš 2007. gada, dažas stacijas – kopš 2006. gada) un *IGS/EPN* stacija RIGA (darbojas kopš 1995. gada) *GPS* novērojumu datu pēcapstrādi un analīzi no 2007. līdz 2017. gadam.

Izvēlētajā laika posmā jaunas Latvijas *CORS* stacijas tika pievienotas pakāpeniski, dažas stacijas tika pārvietotas uz citām vietām. Kopumā, izmantojot *Bernese GNSS* programmatūras v5.2, tika veikta datu pēcapstrāde 46 vietām, kas kopā ietver 36 728 129 risinājumus.

Izstrādātā metodika un izvēlētais laika posms ļauj novērtēt Latvijas *CORS* staciju uzvedību saistībā ar kosmiskajiem laikapstākļiem visa 24. Saules cikla laikā. Šis ir pirmais šāda veida pētījums Latvijā.

Šo metodiku var izmantot, lai analizētu kosmisko laikapstākļu ietekmi uz jebkurām citām *CORS* stacijām, kā arī reģionālo *SBAS*, piemēram, *EGNOS*. Iegūtā informācija ir būtiska, lai labāk izprastu kosmisko laikapstākļu procesu ietekmi uz *GPS* novērojumu rezultātiem konkrētā teritorijā (reģionā vai valstī) un prognozētu iespējamo staciju uzvedību un datu ticamību.

Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti

Promocijas darba izstrādes gaitā sasniegti šādi rezultāti:

- 1) izstrādāta jauna metodika kosmisko laikapstākļu ietekmes novērtēšanai uz *GPS* novērojumiem;
- 2) novērtēta globālo jonosfēras *TEC* un *ROTI* modeļu atbilstība reālos ģeomagnētiskās aktivitātes apstākļos;
- 3) novērtēta kosmisko laikapstākļu ietekme uz Latvijas *CORS* laika periodā no 2007. līdz 2017. gadam;
- 4) apkopota statistika par Latvijas *CORS GPS* novērojumu apstrādes ar *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 rezultātiem, noteikts kļūdaino rezultātu daudzums un raksturota jonosfēras anomāliju radītā pozicionēšanas nesaistu statistika; šī informācija ir svarīga *GNSS* lietotājiem civilās inženierijas, aviācijas un autonomās navigācijas jomā;
- 5) identificētas visvairāk ietekmētās Latvijas *CORS* stacijas, un izdarīti secinājumi par *EUPOS*[®]-Rīga tīkla un *IGS/EPN* stacijas RIGA nedrošību ģeomagnētisko anomāliju apstākļos.

Promocijas darba saturs un apjoms

Promocijas darbs ir patstāvīgs zinātnisks pētījums. Tajā ir anotācija, ievads, četras nodaļas, galvenie secinājumi, divi pielikumi un izmantotās literatūras saraksts, kas aptver 114 literatūras avotus. Promocijas darbā ietverti 33 attēli, 21 formula, 25 tabulas. Promocijas darba kopējais apjoms ir 93 lappuses.

PĒTĪJUMA REZULTĀTU APROBĀCIJA

Zinātniskās publikācijas

- 1) Balodis, Janis, **Madara Normand**, and Ansis Zarins. 2023. The Movement of GPS Positioning Discrepancy Clouds at a Mid-Latitude Region in March 2015. *Remote Sensing* 15, no. 8: 2032. <https://doi.org/10.3390/rs15082032> (SCOPUS).
- 2) Janis Balodis, **Madara Normand**, and Inese Varna. 2021. Extreme Solar Events' Impact on GPS Positioning Results. *Remote Sensing*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs1318624>. (SCOPUS).
- 3) Balodis, J., Varna, I., Haritonova, D., **Normand, M.**, Jumare, I., 2018. Analysis of CORS positioning results for improvement of GNSS/levelling point ellipsoidal height accuracy. *Geodynamics and Geospatial Research*. Conference papers. University of Latvia. ISBN 978-9934-18-352-2. pp. 8–13.
- 4) **Normand, M.**, 2018. Space weather and GNSS observations. *Geodynamics and Geospatial Research*. Conference papers. University of Latvia, ISBN 978-9934-18-352-2. pp. 48–49.
- 5) Balodis, J., Varna, I., **Normand, M.**, 2018. Removing Space Weather Influence. *Baltic Journal of Modern Computing*. University of Latvia, Vol. 6, No. 4. pp. 387–402. ISSN 2255-8950 (online). ISSN 2255-8942 (Print). <http://www.bjmc.lu.lv/>.
- 6) J. Balodis, D. Haritonova, K. Morozova, I. Janpaule, **M. Normand**, I. Jumare. 2017. Consistency of the LatPos, IGS RIGA and EUPOS®-Riga in framework of EPN network. *Latvijas Universitātes 75. zinātniskā konference. Ģeodinamika un ģeodinamiskie pētījumi. Konferencē tēzes un zinātniskie raksti*. Latvijas Universitāte. ISBN 978-9934-18-237-2. 7.–9. lpp.
- 7) Janpaule, I., Balodis, J., Haritonova, D., **Normand, M.**, 2017. Geomagnetic storms and their influence on GNSS time series. *Latvijas Universitātes 75. zinātniskā konference. Ģeodinamika un ģeodinamiskie pētījumi. Konferencē tēzes un zinātniskie raksti*. Latvijas Universitāte. ISBN 978-9934-18-237-2. 24.–26. lpp.
- 8) Balodis, J., Haritonova, D., **Normand, M.**, Silabriedis, G., 2017. Ground based kinematic GNSS contribution dealing with space weather observations. *Abstract Book. Fourth SWARM Science Meeting and Geodetic Missions Workshop*. Banff, Alberta, Canada. 20–24 March 2017. p. 72. <http://www.swarm2017.org/>.
- 9) Balodis, J., Janpaule, I., **Normand, M.**, Jumare, I. and Silabriedis, G., 2017. 10-year Time Series of GNSS Daily Solutions, Geomagnetic Storms and Biggest Earthquakes. *Abstract*

- Book. Fourth SWARM Science Meeting and Geodetic Missions Workshop. Banff, Alberta, Canada. 20–24 March 2017. p. 26. <http://www.swarm2017.org/>.
- 10) Balodis, J., Varna, I., Haritonova, D., **Normand, M.**, Silabriedis, G., 2017. Ground Based Kinematic GNSS Observation Results Affected by Space Weather Fluctuations in 2015. *Baltic Journal of Modern Computing*. University of Latvia. Vol. 5 (2017) No. 3. pp. 251–268. ISSN 2255-8950 (online). ISSN 2255-8942 (Print). <http://www.bjmc.lu.lv/> http://www.bjmc.lu.lv/fileadmin/user_upload/lu_portal/projekti/bjmc/BJMC_Cover_400.jpg
- 11) Balodis, J., Morozova, K., Reiniks, M., **Normand, M.**, 2017. Normal heights for GNSS reference station antennas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 251, pp. 1–6. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Available: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012063. (SCOPUS, WoS).
- 12) **Caunīte, M.**, 2010. Jonosfēra un NASA Saules dinamikas observatorijas misija. Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. 11. sērija. Ģeomātika. 7. sējums. RTU Izdevniecība, Rīga, 2010. ISSN 1407-7345. 31.–34. lpp. (Publikācija ir publicēta žurnālā, kura raksti ir iekļauti datubāzē EBSCO, <http://search.ebscohost.com> RTU Scientific Proceedings “Ģeomātika”, Rīga: pp. 31–34).

Ziņojumi starptautiskās zinātniskās konferencēs

- 1) **Normand, M.**, Balodis, J., Zarins, A., Studies of space weather impact on GNSS positioning. *28th IUGG General Assembly*, 11–20 July 2023, Berlin, Germany (presentation).
- 2) **Normand, M.**, Balodis, J., Zarins, A., The movement of GPS positioning discrepancy clouds at a mid-latitude region in March 2015. *Geodynamics and Geospatial Research 2023*, 1 June 2023, Riga, Latvia (presentation).
- 3) **Normand, M.**, Balodis, J. Behavior of Latvian GNSS continuously operating reference stations (2007–2017). *63rd International Scientific Conference of Riga Technical University*, 20 October 2022, Riga, Latvia (presentation).
- 4) **Normand, M.**, Balodis, J., Vārna, I. Space weather impact on GPS positioning results in Latvia. *NKG General Assembly*, 5–8 September 2022, Copenhagen, Denmark (presentation).

- 5) **Normand, M.**, Balodis, J., Varna I., Extreme Solar Events' Impact on GPS Positioning Results. *Living Planet Symposium 2022*, 23–27 May, Bonn, Germany (poster).
- 6) **Normand, M.**, Balodis, J., Varna, I. Extreme Solar Events' Impact on GPS Positioning Results. *AGU Fall meeting*, 13–17, December 2021, New Orleans, USA (poster).
- 7) **Normand, M.**, Varna, I. Stations DAU1 (DAUG) and LIMB in LatPos network (2007–2017). *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*, 15.10.2021, Riga, Latvia (presentation).
- 8) Balodis, J., **Normand M.**, Varna, I., Haritonova, D. Space weather impact on the GNSS GBAS station observations in latitudes around 57°N. *AGU Fall Meeting*, 9–13 December 2019, San Francisco, CA, USA (poster, presented by Morozova, K.).
- 9) **Normand, M.**, Balodis, J., Varna., I., Haritonova, D. 2019. Space weather impact on the GNSS GBAS station observations in latitudes around 57°N. *ESA Living Planet Symposium 2019*, 13–17 May, 2019, Milan, Italy (poster).
- 10) **Normand M.**, *AGU Fall meeting*, Washington D.C., 12–16, December, 10–14 December, 2018 (poster).
- 11) **Normand, M.** Space weather and GNSS observations. Geodynamics and Geospatial Research. Conference proceedings. University of Latvia. 2018. ISBN 978-9934-18-352-2. pp. 48–49 (presentation).
- 12) **Normand, M.**, Balodis, J., Haritonova, D., Lasmane, I., Janpaule, I., 2012. GNSS Network time series analysis. *AGU Fall meeting 2012*, 3–7 December 2012, San Francisco, California, United States of America. (poster).
- 13) **Caunite, M.**, Balodis, J., Janpaule, I., Silabriedis, G. EUPOS® NETWORK SOLUTION. *International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications*, 30 November–2nd December 2009, Berlin, Germany. Conference Proceedings. Senate Department for Urban Development, Berlin, Germany 2010; Publication ISBN 978-3-938373-93-4; pp. 61–67 (presentation).

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba ievada nodaļā ir formulēta tēmas aktualitāte, darba mērķis un uzdevumi tā sasniegšanai, kā arī darba zinātniskā novitāte un praktiskais nozīmīgums.

1. KOSMISKO LAIKAPSTĀKĻU PARĀDĪBAS

Kosmisko laikapstākļu jēdzienu parasti attiecina uz situāciju, kas novērojama uz Saules, Saules vējā, Zemes magnetosfērā, jonosfērā un termosfērā. Kosmiskie laikapstākļi var ietekmēt kosmosā bāzēto un uz Zemes esošo tehnoloģisko sistēmu veiktspēju un uzticamību un apdraudēt cilvēka dzīvību un veselību (definīcija, kas tiek lietota ASV Nacionālajā kosmisko laikapstākļu plānā).

Šajā nodaļā galvenā uzmanība ir pievērsta kosmisko laikapstākļu parādībām, īpašu uzsvāru liekot uz tām, kas ietekmē *GPS*/*GNSS* novērojumu datus.

Kosmisko laikapstākļu parādību raksturojums

Kosmiskie laikapstākļi var rasties jebkur – no Saules virsmas līdz Zemes virsmai. Kosmisko laikapstākļu vētrai atstājot Sauli, tā iziet cauri koronai un nonāk Saules vējā. Kad kosmisko laikapstākļu vētra sasniedz Zemi, tā aktivizē Zemes magnetosfēru un pātrina elektronus un protonus līdz Zemes magnētiskā lauka līnijām, kur tie saduras ar neitrālo atmosfēru un jonosfēru, īpaši augstos platumu grādos (NOAA mājaslapa).

Promocijas darba nodaļas “Kosmisko laikapstākļu parādību raksturojums” apakšnodaļās ir ietverta teorētiskā daļa par jonosfēru, tās ietekmi uz *GPS* signāliem, par kopējo elektronu daudzumu, par jonosfēras traucējumu raksturojumu, par *GPS* izmantošanu jonosfēras monitoringam, par jonosfēras ietekmi uz *GNSS* signāliem, par Saules uzliesmojumu, par ģeomagnētiskajām vētrām kā arī par ģeomagnētiskajiem indeksiem. Apakšnodaļā “Datu avoti” ir atklāti dažādi datu ieguves veidi, kas ļauj noteikt dažādus kosmisko laikapstākļu parādību indeksus un tādējādi kosmisko laikapstākļu ietekmi uz konkrētu kosmosā bāzētu un/vai uz Zemes bāzētu infrastruktūru un tālāk veikt iegūto datu analīzi, pamatojoties uz vienu vai kombinētām tehnikām. Pasaulē iegūto datu analīzei tiek pētītas un izmantotas dažādas metodes.

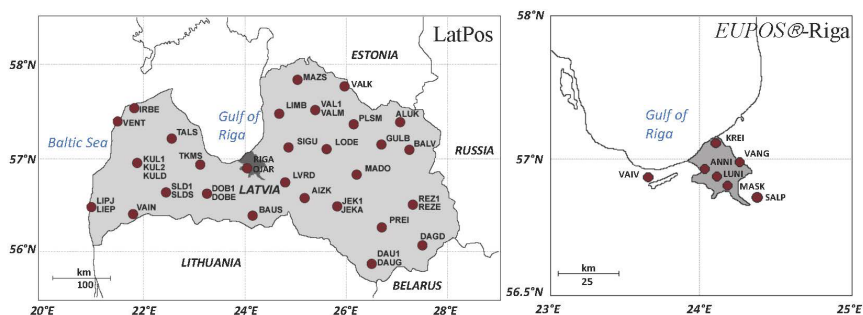
2. KOSMISKO LAIKAPSTĀKĻU IETEKMES ANALĪZES METODOLOĢIJA LATVIJAS *CORS* STACIJĀM NO 2007. LĪDZ 2017. GADAM

Dati

LATVIJAS *CORS* TĪKLI UN *IGS/EPN* STACIJA RIGA

Promocijas darbā veiktais pētījums ietver Latvijas *CORS* tīklu un *IGS/EPN* stacijas RIGA *GPS* novērojumu datu pēcapstrādi un analīzi no 2007. līdz 2017. gadam.

Latvijas *CORS* tīklu LatPos un *EUPOS*[®]-Rīga stacijas darbojas kopš 2007. gada (dažas stacijas – kopš 2006. gada).



2.2. att. LatPos un *EUPOS*[®]-Rīga tīkla un *IGS/EPN* stacijas RIGA izvietojuma shematiskā karte.

2007. gada sākumā darbojās tikai 23 *CORS* stacijas, pakāpeniski tika izveidotas jaunas stacijas, un 2017. gadā darbojošos staciju skaits sasniedza 32. Vairākām stacijām 11 gadu periodā tika mainīta to sākotnējā atrašanās vieta. Tāpēc patiesāk ir atsaukties uz 46 vietām, nevis 46 stacijām.

No visām stacijām, kas šajā promocijas darbā ir iekļautas *GPS* novērojumu datu pēcapstrādē un analīzē, tikai 9 stacijas, 46 mēnešu periodā, netika pārvietotas.

DATU ATLAŠE

Ikdienas *GPS* uztvērēja neatkarīgās apmaiņas formāta (angļu val. – *Receiver Independent Exchange format; RINEX*) novērojumu dati (30 sekunžu uztveršanas ātrums) tika apkopoti pilnam Latvijas *CORS* staciju komplektam izvēlētajiem 4–5 mēnešiem par katru gadu no 2007.

līdz 2017. gadam, ņemot vērā šādus rādītājus:

- a) maksimālās *TEC* vērtības, kas tika iegūtas no orbītu noteikšanas centra Eiropā (angļu val. – *Center for Orbit Determination in Europe; CODE*) jonosfēras karšu apmaiņas formāta (angļu val. – *IONosphere map EXchange format; IONEX*) datu failiem (*CODE Data archive*);
- b) informāciju par nozīmīgiem kosmisko laikapstākļu parādību notikumiem, t. i., datiem par Saules uzliesmojumu klasi (lielumu) un Saules uzliesmojumu skaitu, kā arī par ģeomagnētisko vētru indeksiem *Kp* un *Ap*, tika iegūta no aurorālās un Saules aktivitātes tīmekļa mājaslapas (*SpaceWeatherLive* mājaslapa).

Rezultātā kopējais analizē iekļauto mēnešu skaits bija 46. Piecu mēnešu *GPS RINEX* 30 sekunžu novērojumu dati tika atlasīti 2015. gadam (papildus tika iekļauts marts – Sv. Patrika dienas ģeomagnētiskā vētra) un 2017. gadam (papildus tika iekļauts oktobris – palielinātas Saules aktivitātes dēļ), visiem pārējiem deviņiem gadiem tika atlasīti četru mēnešu *GPS RINEX* 30 sekunžu novērojumu dati.

2.1. tabula

Datu apstrādei atlasītie mēneši

Gads	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Mēnesis	FEB	MAR	JŪL	JAN	MAR	JAN	MAIJS	FEB	MAR	FEB	APR
	JŪN	JŪN	AUG	FEB	AUG	MAR	OKT	JŪN	MAIJS	APR	MAIJS
	SEP	SEP	OKT	APR	SEP	JŪL	NOV	OKT	JŪN	MAIJS	JŪL
	OKT	OKT	DEC	MAIJS	NOV	OKT	DEC	DEC	OKT	JŪL	SEP
	–	–	–	–	–	–	–	–	DEC	–	OKT

Izstrādātā metode

Izstrādātā metode datu pēcapstrādei un analīzei, kā arī kosmisko laikapstākļu ietekmes raksturošanai uz *GPS* novērojumiem Latvijā, t. i., Latvijas *CORS* stacijās, ir balstīta statistikas metodē.

Promocijas darba ietvaros izstrādātā metode koordinātu analīzei tiek ieviesta pirmo reizi.

DATU APSTRĀDE

Izvēlētās datu kopas pēcapstrādei tika izmantota *Bernese GNSS* programmatūras v5.2, pēcapstrādes datu analīzei tika izveidota apstrādes funkciju un saistīto datu kopu blokhēma, kas tālāk ieviesta programmu izstrādē *Fortran g95* un *Python* programmēšanas valodās LU ĢĢI.

CORS NOVĒROJUMU DATU PIRMAPSTRĀDE, LIETOJOT *BERNESE GNSS* PROGRAMMATŪRAS V5.2

Lai identificētu traucētos rezultātus, ko izraisījuši nozīmīgi kosmisko laikapstākļu parādību notikumi, Latvijas CORS 11 gadu selektīvie ikdienas GPS novērojumu dati tika apstrādāti pēcapstrādes režīmā, izmantojot *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 (*Dach et al., 2015*).

Bernese GNSS programmatūras v5.2 tika iestatīti attiecīgie datu pēcapstrādes stratēģijas parametri (skat., 2.2. tab.), lai izvēlētajiem GPS RINEX 30 sekunžu novērojumu datiem aprēķinātu Latvijas CORS staciju Dekarta X, Y, Z, T koordinātas.

2.2. tabula

Galveno datu pēcapstrādes stratēģijas parametru saraksts

Parametrs	Vērtība
Apstrādes stratēģija	Divfrekvenču-starpības metode (kinemātiskā divfrekvenču-starpības tīkla risinājums (angļu val. – <i>kinematic double-difference network solution</i>), no jonosfēras brīvā lineārā kombinācija (LC); <i>MAURPP</i>)
Zemes un satelītu antenas fāzes centra kalibrēšana	Absolūtā, IGS
Izmantotie CODE produkti	Precīzās orbītas, Zemes orientācija, pulksteņa dati, rezultējošie jonosfēras dati, CODE dati – pieejami: http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/ ;
4 IGS/EPN tīkla atbalsta (references) stacijas katra risinājuma aprēķināšanai	<i>LAMA</i> (Olština, Polija), <i>METS</i> (Metsahovi, Somija), <i>VISO</i> (Visbija, Zviedrija), <i>VLNS</i> (Viļņa, Lietuva)
Satelītu sistēma	<i>GPS</i>
Augstuma ierobežojošais leņķis	15° (satelīta novērojumi zem 15° tiek izslēgti)
Uztveršanas intervāls	kinemātiskai pēcapstrādei tika izvēlēts 90 s uztveršanas intervāls
Okeāna plūdmaiņu korekcijas	Tika izmantots <i>FES2004</i> okeāna plūdmaiņu modelis <i>FES2004</i> , ko tiešsaistē nodrošina <i>H.-G. Scherneck</i> (pieejams: (<i>Free ocean tide loading provider</i> mājaslapa)
Cietzemes plūdmaiņas efekta korekcijas	Jā
Troposfēriskās nokavēšanās modelēšana	Sausā globālās kartēšanas funkcija (angļu val. – <i>Dry Global Mapping Function; DRY_GMF</i>)
Cikliskās nenoteiktības lēcīnu korekciju pieņemamais minimālais lielums	10

Katrai Latvijas *CORS* stacijai, katrā 90 sekunžu sesijā tika noteiktas Starptautiskās Zemes atbalsta sistēmas *ITRS* (angļu val. – *International Terrestrial Reference System*), realizācijas (angļu val. – *International Terrestrial Reference Frame; ITRF*) koordinātas. 90 sekunžu kinemātisko risinājumu kopa S n stacijām ar koordinātu apakškopām katrai stacijai tiek apzīmēta ar s_i , attiecīgi:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, \quad (2.1)$$

kur

$$s_i = \{X_i, Y_i, H_i, T_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.2)$$

Koordinātu aprēķināšana tika veikta katrai no iepriekš minētajām sesijām, izmantojot *Bernese GNSS* programmatūras v5.2. Risinājumi tika veikti 4–5 Latvijas *CORS* staciju kopām, pastāvīgi izmantojot vienas un tās pašas *IGS/EPN* tīkla atbalsta stacijas. Rezultāti katram 90 sekunžu kinemātiskajam risinājumam tika pārveidoti no ģeocentriskajām koordinātām X, Y, Z, T uz plaknes koordinātām x, y, h ((N) , (E) , (h)), kur (h) ir elipsoidālais augstums. 90 sekunžu kinemātiskā risinājuma rezultātu kopa P katram mēnesim ar m dienām n stacijām iegūta ar koordinātu apakškopām p_{ijk} :

$$P = \{p_{ij1}, p_{ij2}, \dots, p_{ijk}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, 28800, \quad (2.3)$$

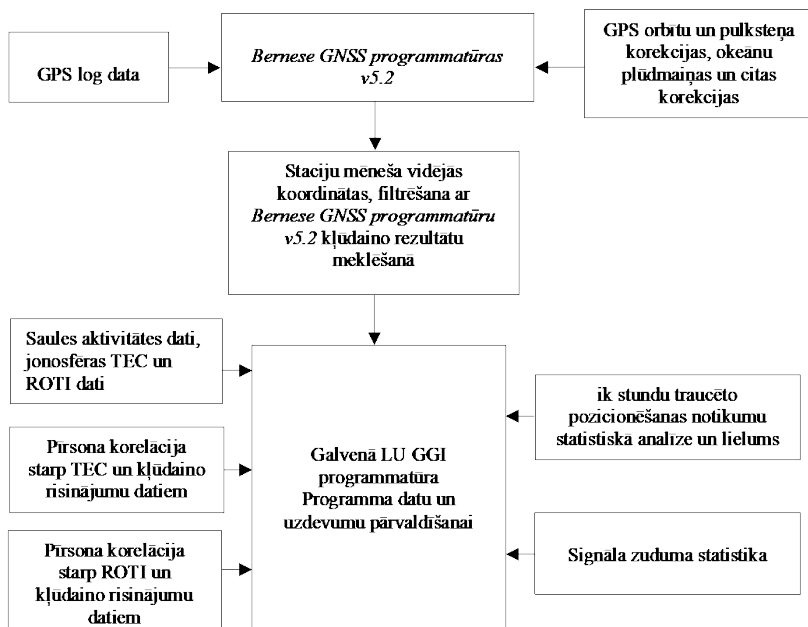
kur

$$p_{ijk} = \{x_{ijk}, y_{ijk}, h_{ijk}, t_{ijk}\}. \quad (2.4)$$

2.3. formulā 30 dienu periodā 960 reizes 90 sekunžu kinemātiskie pēcapstrādes risinājumi dienā veido 28800 kinemātiskos risinājumus katrai stacijai, t. i., 864 000 kinemātiskos risinājumus mēnesī 23–32 *CORS* stacijām (staciju skaits mainās gadu gaitā). Epoha t_{ijk} ir katra kinemātiskā risinājuma epoha.

Visām Latvijas *CORS* stacijām katrai 4–5 staciju kopai 11 gadiem no 2007. līdz 2017. gadam 4–5 mēnešiem gadā tika aprēķinātas ģeocentriskās koordinātas X, Y, Z, T (viens mēneša novērošanas periodam tas aizņem aptuveni 12–14 stundas).

ANALĪZES FUNKCIJU UN DATU PLŪSMAS BLOKSHĒMA



2.3. att. Analīzes funkciju un datu plūsmas blokskhēma.

Rezultātā tika atrasti ikmēneša kļūdainie rezultāti (turpmāk tie būs apzīmēti kā kļūdainie risinājumi, kur viena no koordinātu komponentēm pārsniedz 10 cm sliekšni), tika veikta statistiskā analīze, sagatavoti dati korelācijas analīzei un veikta korelācijas analīze.

Galvenās funkcijas:

- katrai Latvijas *CORS* stacijai katrai dienai katru 90. sekundi, izmantojot *Bernese GNSS* programmatūras v5.2, tika aprēķinātas ģeocentriskās X, Y, Z, T koordinātas;
- katra risinājuma ģeocentriskās koordinātas X, Y, Z, T tika transformētas uz valsts tīkla koordinātām (NEht);
- tika uzskaitīti *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 identificētie cikliskās nenoteiktības lēcieni (angļu val. – *cycle slips*, turpmāk tekstā var tikt apzīmēts arī ar *CSLP*);
- katrai stacijai tika izveidotas ikmēneša kļūdaino risinājumu kopas, kurā viena no koordinātu komponentēm pārsniedz 10 cm;
- mēneša vidējās koordinātu vērtības tika aprēķinātas katrai stacijai katrā mēnesī;
- informācija par ģeomagnētiskajām vētrām virs Latvijas teritorijas, *TEC* maksimālās vērtības un informācija par Saules uzliesmojumiem tika iegūta no publiski pieejamiem datu avotiem (*CODE Data archive*, *SpaceWeatherLive* mājaslapa);

- g) tika veikta kļūdaino risinājumu rašanās analīze, kā arī kļūdaino risinājumu secības, kas veido *LoL*, situācijas analīze;
- h) tika atklāti vienlaicīgi vairākās stacijās radušies kļūdainie risinājumi, kas veido “traucējumu viļņus”;
- i) tika izveidoti ikmēneša saraksti ar kļūdaino risinājumu koordinātu nesaistēm, kas radušās vienlaicīgi katrai atbilstošajai epochai;
- j) katrai stacijai tika veikts kļūdaino risinājumu, cikliskās nenoteiktības lēcienu skaits un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaits kļūdainajos risinājumos katram mēnesim, pievienojot informāciju par ekstrēmamiem Saules notikumiem un maksimālajām *TEC* vērtībām visā Latvijā;
- k) katrai stacijai tika aprēķinātas kovariācijas un regresijas līnijas uz *TEC* un kļūdainajiem risinājumiem katram mēnesim;
- l) lai atrastu sakarību starp *TEC* (ikmēneša kopa x) un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu (ikmēneša kopa y), kā arī starp *TEC* un kļūdaino risinājumu skaitu, kā arī *TEC* un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu kļūdainajos risinājumos un starp cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu un kļūdaino risinājumu skaitu, tika aprēķināti Pīrsona korelācijas koeficienti.

3. REZULTĀTI

Koordinātu nesaistu vērtību sadalījums

Zināšanas par mēneša vidējām, pareizām, netraucētām staciju koordinātu vērtībām ir priekšnoteikums tam, lai identificētu traucējumus. 11 gadu laikā staciju mēneša vidējo koordinātu vērtības mainījās. Lai aprēķinātu ticamas mēneša vidējās koordinātas, pirmajā mēģinājumā tika izslēgtas nesaistes, kas pārsniedz 3σ robežu, t. i., 10 cm. Iegūtās mēneša vidējās koordinātas tika izmantotas, lai identificētu kļūdainos risinājumus visā *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 risinājumu kopā. Katra risinājuma precizitāte tika kontrolēta, pārbaudot katras valsts tīkla komponentes (N, E, Up) nesaistes, salīdzinājumā ar mēneša vidējām koordinātu vērtībām. Mēneša vidējo staciju koordinātu filtrēto risinājumu rezultātu precizitāte ir aptuveni 3 cm.

Pētījuma laikā kopējais *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 risinājumu skaits sasniedza 36 728 129, no kuriem 203 981 (t. i., 0,6 %) risinājumi parādījās ar pozīciju nesaistēm, kas lielāka par 10 cm (3σ). Ieskaitot 10 cm sliekšni, to skaits sasniedza 204 022. *Bernese GNSS*

programmatūras v5.2 identificēja 744 689 cikliskās nenoteiktības lēcienus (CSLP). Tas aptver 2% no visiem *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 risinājumiem. Kļūdaino risinājumu apakškopā *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 identificēja tikai 4849 cikliskās nenoteiktības lēcienus (t. i., 0,6 % no visiem cikliskās nenoteiktības lēcieniem). Koordinātu nesaistu vērtību sadalījums ir klasificēts 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Nesaistu vērtību sadalījums

#	Intervāls (m)	Kļūdaino risinājumu skaits	CSLP	% kļūdainie risinājumi	% CSLP
1	[0,1 1,0)	153592	3781	75,3 %	78,0 %
2	[1,0 5,0)	21533	473	10,6 %	9,8 %
3	[5,0 10,0)	8691	192	4,3 %	4,0 %
4	[10,0 20,0)	7163	141	3,5 %	2,9 %
5	[20,0 30,0)	4196	57	2,1 %	1,2 %
6	[30,0 40,0)	2694	42	1,3 %	0,9 %
7	[40,0 50,0)	1478	33	0,7 %	0,7 %
8	[50,0 100,0)	3401	87	1,7 %	1,8 %
9	[100,0 150,0)	806	26	0,4 %	0,5 %
10	[150,0 200,0)	259	10	0,1 %	0,2 %
11	[200,0 500,0)	204	7	0,1 %	0,1 %
12	[500,0 900,0]	5	0	0,0 %	0,0 %
Kopā	[0,1 900,0]	204022	4849	100,0 %	100,0 %

Geomagnētiskās vētras laikā, kas notika 2015. gada 17. martā (Sv. Patrika dienā), maksimālās nesaistes divās *CORS* stacijās (RIGA un VAIV) sasniedza 500 m. Jonosfēras traucējumu radītā nesaiste 50430 risinājumos ir lielāka par 1 m (skat., 3.1. tab.). Tas ir bīstami dzīvības drošībai kritiskās situācijās.

75 % traucējumu izraisītās nesaistes bija [0,1; 1,0) metru robežās; 10 % traucējumu izraisītās nesaistes bija [1,0; 5,0) metru robežās, 4 % traucējumu izraisītās nesaistes bija [5,0; 10) metru robežās. 10 % traucējumu izraisītās nesaistes bija lielākas par 10 metriem. No 204 022 kļūdainajiem risinājumiem *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 identificēja 2,4 % cikliskās nenoteiktības lēcienus. Diemžēl šajos gadījumos *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 rezultātus neizslēdza.

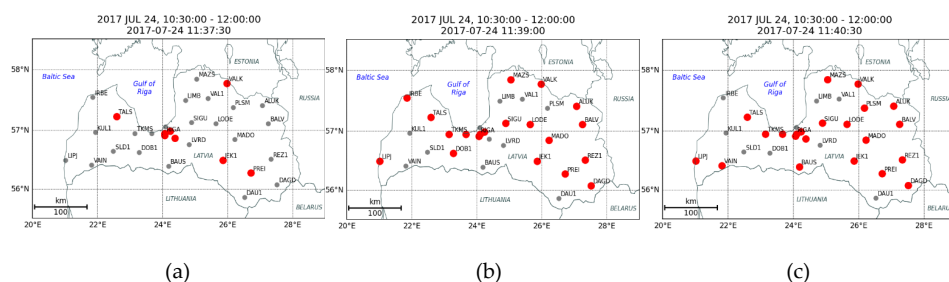
“Traucējumu viļņu” kustība

Termins “traucējumu viļņu forma” (angļu val. – “*evil waveform*”) tiek lietots, lai apzīmētu traucēto navigācijas informāciju kādā apgabalā, ko izraisa *GPS* pulksteņa kļūda (*Julien et al.*, 2017). Termins “traucējumu vilnis” šajā promocijas darbā tiek lietots, lai raksturotu

pozicionēšanas nesaistes vērtību mainīgo sadalījumu Latvijas teritorijā noteiktā laika periodā. “Traucējumu viļņa” kustība parādīta 3.1. attēlā ((a), (b) un (c)). Sarkanie apli 3.1. attēlā apzīmē vienlaikus radušos kļūdainos risinājumus. Katrā no (a), (b) un (c) virsrakstiem augšējā rindā ir norādīts “traucējumu viļņa” periods, otrajā rindā – esošā 90 sekunžu kļūdainā risinājuma sākums.

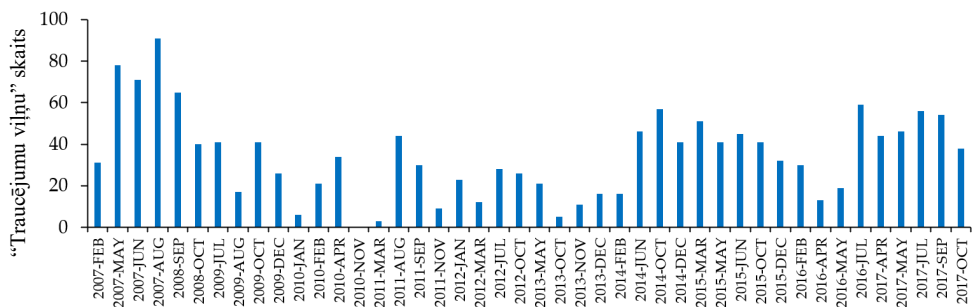
Atlasot kļūdainos risinājumus, to esamība tika konstatēta daudzās stacijās vienlaikus. Šo kļūdaino risinājumu pārvietošanos pāri Latvijas teritorijai var raksturot ar “viļņu formu”. To varētu interpretēt kā jonosfēras traucējumus (skat., 3.1. att.).

“Traucējumu viļņi” tiek skaitīti gadījumos, kad vismaz trīs vienlaicīgas 90 sekunžu secīgas grupas fiksētas vismaz divos vienlaicīgos risinājumos ar vienādiem laika notikumiem.



3.1. att. “Traucējumu viļņa” kustība pār Latvijas teritoriju 2017. gada 24. jūlijā.

Viena “traucējumu viļņa” kustības piemērs ir parādīts 3.1. attēlā. 3.1. (a) attēlā ir tikai astoņas *CORS* stacijas ar kļūdainiem risinājumiem (sarkani punktiņi). 3.1. (b) attēlā – jau ir 20 *CORS* stacijas ar kļūdainiem risinājumiem, stacijām RIGA un SALP ir labs risinājums, salīdzinot ar 3.1. (a) attēlu, ir redzamas 14 jaunas *CORS* stacijas ar kļūdainiem risinājumiem. 3.1. (c) attēlā ir 21 *CORS* stacija. Stacijām DOB1, VANG, IRBE, ALUK ir labs risinājums, un, salīdzinot ar 3.1. (b) attēlu, ir parādījušās jaunas *CORS* stacijas ar kļūdainiem risinājumiem: VAIN, KUL2, BAUS, LVRD, PLSM. “Traucējumu viļņa” turpinājums nav parādīts 3.1. attēlā, un kļūdaino pozīciju “traucējumu viļņa” beigu laiks 2017. gada 24. jūlijā ir plkst. 11:46:30 *UT*. 3.2. attēlā parādīts “traucējumu viļņu” skaits katrā analizētajā mēnesī.



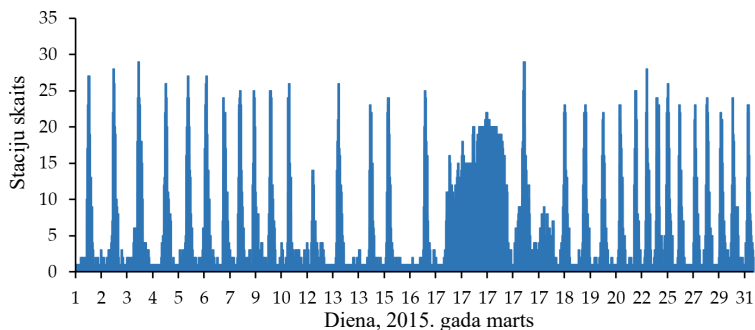
Gads un mēnesis

3.2. att. “Traucējumu viļņu” skaits atlasītajos mēnešos no 2007. līdz 2017. gadam.

2015. gada martā notika spēcīgas ģeomagnētiskās vētras, spēcīgākā no tām bija Sv. Patrika dienā, 17. martā. Šīs 17. marta ģeomagnētiskās vētras ietekme ir plaši aplūkota vairākās publikācijās (*Cherniak, Zakharenkova, Redmon, 2015; A. L. Morozova, Barlyaeva, Barata, 2020; Elvira Astafyeva, Zakharenkova, Förster, 2015; Jacobsen, Andalsvik, 2016; J. Liu et al., 2016; Balasis, Papadimitriou, Boutsis, 2019*).

Ģeomagnētiskās vētras izraisītā ziemeļblāzma Sv. Patrika dienā, 2015. gada 17. martā, tika novērota plašā teritorijā vairākās valstīs, tostarp arī Latvijā (Jauns mājaslapa) un (LSM mājaslapa).

3.3. attēlā parādīts vienlaicīgi notikušo kļūdaino risinājumu grafiks 2015. gada martā.



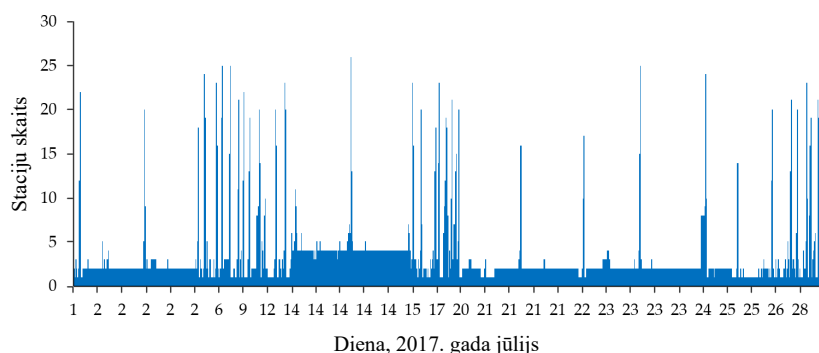
3.3. att. Vienlaicīgi notikušo kļūdaino risinājumu sadalījuma grafiks 2015. gada martā.

RIGA stacijas augstuma komponentes nesaistes 2015. gada 17. martā plkst. 17:09:00 *UT* sasniedza $-531,42$ m.

Signāla zuduma situācijas

Jonosfēras scintilācijas ietekme uz *GNSS* veiktspēju nebeidzas ar cikliskās nenoteiktības lēcieniem. Nopietni un ilgstoši cikliskās nenoteiktības lēcieni rada signāla zudumu. Jonosfēras nevienmērību izraisītā *GPS* signāla mainība, kas izpaužas kā signāla stabilitātes zudums, angļu valodas tehniskajā terminoloģijā – *Loss of Lock (LoL)*. *LoL* nozīmē, ka *GNSS* uztvērējs vairs precīzi neizseko signālam; šādā statusā navigācijas ziņojumi tālāk nevar tikt dekodēti, tādējādi pozicionēšanai iespējams izmantot mazāk satelītu, rezultātā pasliktinot pozicionēšanas precizitāti. Ņemot vērā iepriekš minētos pētījumus, ir būtiski noskaidrot, kā *GPS* uztvērējs cieš no *LoL* jonosfēras scintilācijas apstākļos (Yang Liu et al., 2017).

3.4. attēlā parādīts 2017. gada jūlijā vienlaikus radušos kļūdaino risinājumu sadalījuma grafiks. Taisnstūra forma grafikā, kas aptver 2017. gada 14. jūliju, parāda to, ka šajā datumā ir atkārtota vienāda skaita *CORS* staciju secība ar vienlaikus sastopamiem kļūdainajiem risinājumiem.

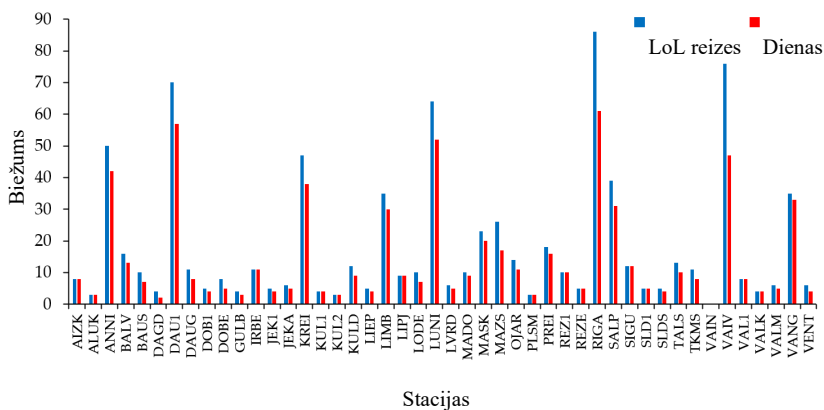


3.4. att. Vienlaicīgi notikušo kļūdaino risinājumu sadalījuma grafiks 2017. gada jūlijā.

Citos datumos līdzīgas atkārtotu kļūdaino risinājumu secības ir arī citās LatPos tīkla stacijās un *IGS/EPN* stacijā RIGA.

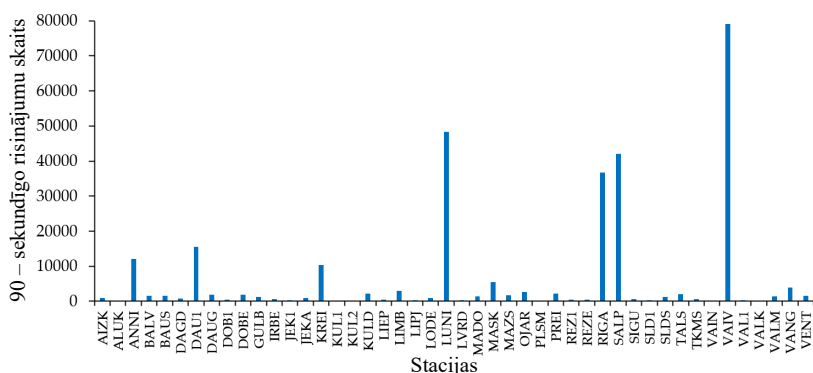
3.4. attēlā redzamo situāciju var pieņemt kā attiecīgās stacijas uztvērēja *LoL*. 3.5. attēls parāda atkārtojumu skaitu un to, cik bieži pieņemtais *LoL* (zilā krāsā) ir noticis.

LatPos tīkls (šobrīd 32 stacijas) aptver visu Latvijas teritoriju. Analīze atklāj, ka šis tīkls ir visstabilākais ar retākām *LoL* situācijām, izņemot DAV1 un LIMB stacijas.



3.5. att. LoL biežums CORS stacijās.

Histogrammā (skat., 3.6. att.) ir attēlots 90 sekunžu risinājumu kopsavilkums, kas saistīts ar LoL sekvencēm, kur katrai stacijai tiek parādīts kļūdaino risinājumu skaits.



3.6. att. Kopējā secīgo 90 sekunžu kļūdaino risinājumu skaita sadalījums.

3.6. attēls parāda, ka CORS stacijai VAIV ir vislielākais kopējais 90 sekunžu LoL kļūdaino risinājumu skaits. CORS stacija VAIV atrodas ļoti tuvu jūras krastam. CORS stacija LUNI atrodas Rīgas pilsētas centrā, rosīgas satiksmes ieskaustā vietā. Redzams, ka visvairāk uztvērēju LoL ietekmētas ir EUPOS®-Rīga tīkla stacijas un stacija RIGA.

CORS stacijas DAU1 LoL gadījumi ir ļoti vienkārši. Pēc datumiem tie ir neregulāri, sekvenču nav garas, un nesaistes ir aptuveni 15–20 cm. Tomēr kopš 2011. gada 58 dienās ir 70 sekvenču. Nesaistes sadalījuma diagrammu forma ir viendabīga un atšķiras no citu staciju nesaistes diagrammām.

Korelācijas analīze

Korelācijas analīzei sagatavotajās ikmēneša datu apakškopās tika iekļauta apkopotā ikdienas informācija par maksimālajām *TEC* vērtībām visā Latvijas teritorijā, cikliskās nenoteiktības lēcieni (*CSLP*) skaits visos risinājumos un kļūdainajos risinājumos (*CSLP* (F)) un kļūdaino risinājumu skaits (> 10 cm).

Tika aprēķināts Pīrsona korelācijas koeficients, kovariācijas koeficients, regresijas līnijas koeficients, risinājuma vidējā kvadrātiskā kļūda, gan skaitītājs, gan saucējs no 3.6. formulas, R^2 un t testa vērtība, un katram mēnesim tika iegūts rezultāts.

Pīrsona korelācijas koeficients tika aprēķināts šādi:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

Kovariācija tika aprēķināta, izmantojot 3.2. formulu,

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n}. \quad (3.2)$$

Tika aprēķināta regresijas līnija

$$Y_i = \hat{a} + \hat{b}X_i, \quad (3.3)$$

kur

$$\hat{b} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

un

$$\hat{a} = Y_i - \hat{b}X_i. \quad (3.5)$$

R^2 tika aprēķināts pēc formulas

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3.6)$$

Stjudenta sadalījuma t tests tika aprēķināts, izmantojot 3.7. formulu,

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{\frac{1-r_{xy}^2}{n-2}}}. \quad (3.7)$$

Šāda veida aprēķini tika veikti divās dažādās versijās. Pirmajā versijā ar visiem līdz šim minētajiem datiem, otrajā – ar modificētām datu kopām, kurās tika ņemtas 90 sekunžu sekvenses, kas, šķiet, ir *GNSS* uztvērēja *LoL* rezultāts. Iegūtie korelācijas koeficienti ir parādīti 3.2. tabulā un 3.7. attēlā.

3.2. tabulā apkopota Pīrsona koeficientu rezultātu analīze abās versijās – pilns ievades datu komplekts (1. rinda) un ievades dati bez *LoL* situācijām (2. rinda). Katra datu tipa rezultāti apkopoti četrās kolonnās: Pīrsona korelācijas koeficients [0; 0,4) robežās nozīmē ļoti vāju

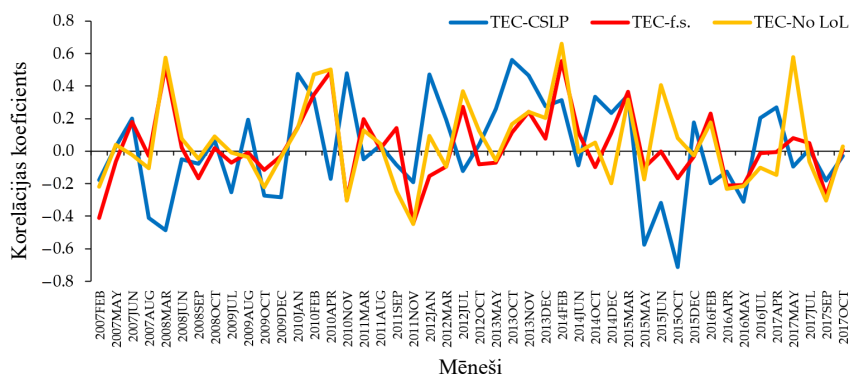
korelāciju, [0,4; 0,7) – vidēja korelācija, robežās no [0,7; 1] – ļoti laba korelācija, robežās no [0; -1] – negatīva korelācija. Pirmās un otrās versijas rezultāti ir ļoti līdzīgi – novērojama vāja korelācija un negatīva korelācija starp *TEC* un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu, *TEC* un kļūdaino risinājumu skaitu, *TEC* un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu kļūdainajos risinājumos, kā arī starp cikliskās nenoteiktības lēcieniem un kļūdainajiem risinājumiem. Tikai divos gadījumos korelācija starp cikliskās nenoteiktības lēcieniem un kļūdaino risinājumu skaitu ir ļoti laba. Viens no šiem gadījumiem ir 2015. gada 17. marts.

3.2. tabula

Pīrsona korelācijas koeficientu skaits pirms *LoL* noņemšanas (1. rinda) un pēc *LoL* noņemšanas (2. rinda)

<i>TEC</i> un cikliskās nenoteiktības lēcieni				<i>TEC</i> un kļūdainie risinājumi				<i>TEC</i> un cikliskās nenoteiktības lēcieni no kļūdainajiem risinājumiem				Cikliskās nenoteiktības lēcieni un kļūdainie risinājumi			
[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]	[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]	[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]	[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]
18	5	0	23	18	4	0	24	25	4	0	17	25	1	2	18
19	5	0	22	16	6	0	24	26	3	0	17	21	0	2	23

3.7. attēlā parādītas Pīrsona korelācijas koeficienta variācijas trīs gadījumos: 1) starp *TEC* un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu; 2) *TEC* un kļūdaino risinājumu skaitu (angļu val. – *faulty solutions (f. s.)*); 3) *TEC* un kļūdainiem risinājumiem ar izslēgtām *LoL* sekvencēm (*No LoL*). Secinājums ir tāds, ka vairumā gadījumu maksimālais *TEC*, kas tiek definēts kā vienmērīga vērtība pār Latvijas teritoriju, nav salīdzināms ar *TEC* sporādisko dabu, kurai ir momentāns telpiskais sadalījums reālā laikā (*Pi et al., 1997*).



3.7. att. Pīrsona koeficientu vērtību grafiks trīs gadījumos.

ROTI korelācijas analīze

Galvenās funkcijas, kas tika veiktas *ROTI* korelācijas analīzei:

- a) katram kļūdainajam risinājumam tika aprēķināts magnētiskais vietējais laiks (angļu val. – *Magnetic Local time; MLT*);
- b) katram risinājumam no Nacionālās Aeronautikas un kosmosa administrācijas (angļu val. – *National Aeronautics and Space Administration; NASA*) datubāzes tika atrasta *ROTI* vērtība;
- c) *ROTI* un kļūdainajiem risinājumiem katram mēnesim katrai stacijai tika aprēķinātas kovariācijas un regresijas līnijas;
- d) Pīrsona korelācijas koeficienti tika aprēķināti, lai atrastu sakarību starp *ROTI* (ikmēneša kopa x) un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu (ikmēneša kopa y), līdzīgi arī starp *ROTI* un kļūdaino risinājumu skaitu, kā arī *ROTI* un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu kļūdainajos risinājumos un starp *ROTI* un *TEC*.

3.3. tabulā līdzīgi kā 3.2. tabulā apkopota Pīrsona koeficientu rezultātu analīze katram datu tipam, tie apkopoti četrās kolonnās. Pārskats par *ROTI* korelāciju dots 3.10. tabulā.

3.3. tabula

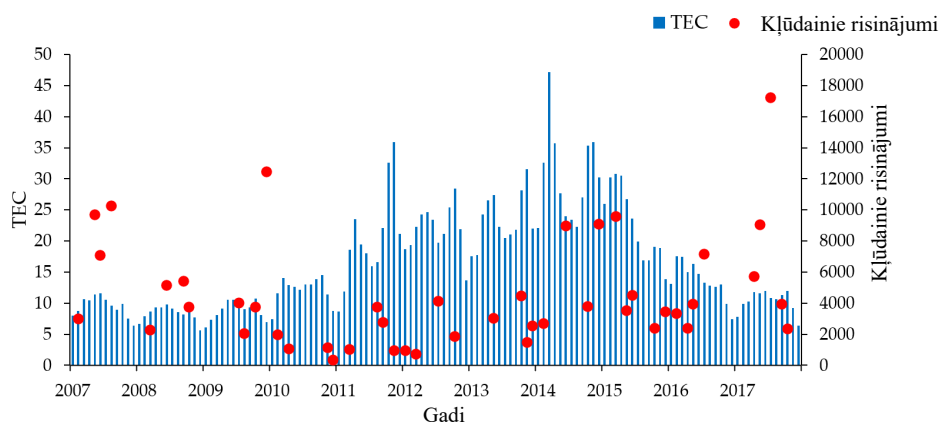
Pīrsona korelācijas koeficientu skaits starp *ROTI* un kļūdainajiem risinājumiem

<i>ROTI</i> un cikliskās nenoteiktības lēcieni				<i>ROTI</i> un kļūdainie risinājumi				<i>ROTI</i> un cikliskās nenoteiktības lēcieni no kļūdainajiem risinājumiem				<i>ROTI</i> un <i>TEC</i>			
[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]	[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]	[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]	[0; 0,4)	[0,4; 0,7)	[0,7; 1]	[0; -1]
18	5	3	8	13	6	1	14	15	4	1	14	18	7	0	9

Piemēram, 2015. gada 16. martā divas stundas *ROTI* vērtības (0,5830) ir ārkārtīgi augstas. Maksimālā pozicionēšanas nesaiste ir 31,32 metri. Savukārt ģeomagnētiskās vētras dienā, 17. martā, astoņas stundas maksimālā *ROTI* vērtība ir zemāka (0,1174), un maksimālā nesaiste sasniedz 533,04 metrus. Jonosfēras neregularitāte un korelācija starp traucējumu skaitu vai cikliskās nenoteiktības lēcienu skaitu ir grūti definējama.

Sakarības novērtējums starp kļūdaino risinājumu skaitu un maksimālo *TEC*

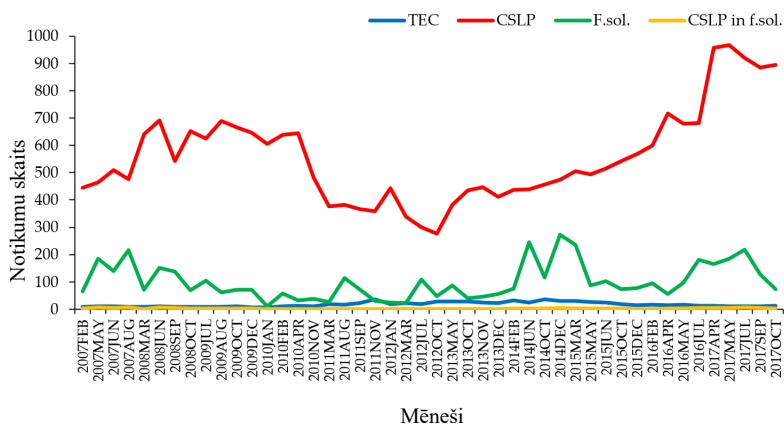
Geomagnētiskās vētras un Saules uzliesmojumi ir kosmisko laikapstākļu ārkārtējas parādības. 3.8. attēls atspoguļo mēneša vidējo dienas maksimālo *TEC* vērtību un Latvijas *CORS* tīklu vidējo kļūdaino 90 sekunžu risinājumu skaitu katrā stacijā katrā mēnesī. Šeit neparādās cieša korelācija starp vidējo *TEC* maksimālo vērtību indeksiem un kļūdainajiem risinājumiem. Vidējais rādītājs 11 gadu laikā tiek salīdzināts ar sporādiskiem notikumiem, tādējādi nav gaidāma cieša korelācija.



3.8. att. Mēneša vidējais dienas maksimālais *TEC* un vidējais kļūdaino risinājumu skaits mēnesī.

3.8. attēlā parādītas mēneša vidējās dienas maksimālās *TEC* neregularitātes un vidējais kļūdaino risinājumu skaits mēnesī. 3.9. attēls parāda mēneša vidējās vērtības:

- maksimālās *TEC* vērtības virs Latvijas teritorijas;
- *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 atrasto cikliskās nenoteiktības lēcien skaita vidējo vērtību visā reducēto risinājumu apjomā, ieskaitot kļūdainos risinājumus (*CSLP*);
- vidējo kļūdaino risinājumu skaitu (*F. sol.*);
- *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 konstatēto vidējo cikliskās nenoteiktības lēcien skaitu kļūdainajos risinājumos.



3.9. att. Vidējās maksimālās TEC vērtības, vidējais cikliskās nenoteiktības lēcienu skaits, kļūdaino risinājumu skaits un cikliskās nenoteiktības lēcienu skaits kļūdainajos risinājumos.

Cikliskās nenoteiktības lēcienu skaits ir lielāks kā kļūdaino risinājumu skaits. *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 identificēja lielāko daļu ietekmēto pozīciju, tomēr daļu kļūdaino risinājumu *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 neidentificēja.

4. PAPILDU KOSMISKO LAIKAPSTĀKĻU TESTI *EGNOS RIMS* UZ ZEMES ESOŠAJĀM STACIJĀM

Papildus ir veiktas kosmisko laikapstākļu pārbaudes trim *EGNOS RIMS* uz Zemes esošajām stacijām (GVL, LAP un WRS). Stacijām GVL un GVLB, LAPA un LAPB, WRS un WRSB, GPS analīze veikta datiem, kas iegūti laika posmā no 2015. gada 16. marta līdz 18.martam.



4.1. att. *RIMS* stacijas GVL, LAP un WRS (*ESA* mājaslapa).

Pozicionēšanas nesaistes RIMS stacijās: WRSA, LAPA un LAPB, un GVL A un GVLB 2015. gada 17. martā plkst. 15:28:30 UT un nākamajās 90 sekundēs

Nesaiastes			#	dx (m)	dy (m)	dh (m)	Dist (m)	Az (dg)	
754	2015 MAR	17 15:28:30 UT	WRSA	1101	0.000	0.009	0.120	0.120	90.0
			LAPB	1100	-0.087	0.033	0.436	0.446	159.2
			GVLB	1098	0.700	-1.622	-0.649	1.882	-66.7
			GVL A	1097	-53.826	-19.559	-12.408	58.598	-160.0
			LAPA	1099	-16.684	46.905	-199.657	205.770	109.6
755	2015 MAR	17 15:30: 0 UT	WRSA	1106	-0.012	0.012	0.106	0.107	135.0
			LAPB	1105	-0.083	0.025	0.539	0.546	163.2
			GVLB	1103	0.715	-1.655	-0.653	1.917	-66.6
			GVL A	1102	-53.469	-18.643	-15.603	58.736	-160.8
			LAPA	1104	-16.844	47.730	-203.047	209.261	109.4

Izvēlēto *RIMS* staciju *GPS* datu, kas iegūti laika posmā no 2015. gada 16. marta līdz 18. martam, analīze atklāj, ka pozicionēšanas rezultātus ietekmē ļoti spēcīga Sv. Patrika dienā notikusī ģeomagnētiskā vētra (Kp indekss +8). Visvairāk tika ietekmētas GVL A un GVLB stacijas. Mazāk ietekmētas bija WRSA un WRSB stacijas.

Salīdzinot maksimālās nesaistes *RIMS* stacijās ar Latvijas *CORS* stacijām 2015. gada 17. martā, atklājās, ka *RIMS* stacijās maksimālās neatbilstības tiek konstatētas aptuveni 3 h agrāk, nekā tās parādās Latvijas *CORS* stacijās.

SECINĀJUMI

Promocijas darba ietvaros veiktā pētījuma novitāte ir izstrādātā un lietotā metodoloģija kosmisko laikapstākļu ietekmes analīzei uz *CORS* stacijām.

Promocijas darba izstrādē sasniegtais:

1. Atklāts kļūdaino rezultātu daudzums un raksturota nesaistu lieluma statistika.
 - a) Kopējais *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 risinājumu skaits sasniedza 36 728 129, no kuriem 203 981 (t. i., 0,6 %) risinājums uzrādīja pozīcijas nesaistes, kas pārsniedza 10 cm (3σ). Ieskaitot 10 cm sliksni, skaits sasniedza 204 022.

Bernese GNSS programmatūras v5.2 identificēja 744 689 cikliskās nenoteiktības lēcienus (*CSLP*). Tas aptver 2 % no visiem *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 risinājumiem. Kļūdaino risinājumu apakškopā *Bernese GNSS* programmatūras v5.2 identificēja tikai 4849 cikliskās nenoteiktības lēcienus (t. i., 0,6 % no visiem cikliskās nenoteiktības lēcieniem).

- b) Laika posmā no 2007. līdz 2017. gadam lielākie pozicionēšanas traucējumi un to biežums parādījās 2015. gada martā 24. Saules cikla lielākās aktivitātes laikā. Tas bija vienīgais atklātais gadījums, kad Saules aktivitāte korelēja ar koordinātu nesaistēm. 2015. gada 17. martā Saules aktivitāte izraisīja ievērojamu ģeomagnētisko vētru, kas radīja nopietnus pozicionēšanas traucējumus Latvijas *CORS* stacijās. Dažos gadījumos koordinātu nesaistes sasniedza vairāk nekā 500 m. 2017. gada septembrī virs Kanādas un ASV teritorijas notika ļoti spēcīga ģeomagnētiskā vētra, tomēr Latvijas teritoriju tā neietekmēja.
2. Ņemot vērā kosmisko laikapstākļu indeksus un jonosfēras *TEC* un *ROTI* līmeņus, atlasītajiem mēnešiem laika periodā no 2007. līdz 2017. gadam tika meklēta korelācija un izdarīts secinājums, ka veiktā Pīrsona korelācijas analīze atklāj, ka globālie *TEC* un *ROTI* aproksimācijas modeļi nav piemēroti lokālo *TEC* un *ROTI* anomāliju izpētei.
3. Tika atklātas visvairāk ietekmētās *CORS* stacijas un izdarīti secinājumi par tīkla nestabilitātes cēloni:
 - a) visvairāk ietekmētās ir *EUPOS*[®]-Rīga tīkla stacijas. Vidēji 3,9 % no visiem kļūdainajiem risinājumiem attiecas uz *EUPOS*[®]-Rīga stacijām, tikai 1,8 % – uz *LatPos* stacijām.
 - b) Varētu domāt, ka iespējama atkarība starp *GNSS* uztvērēju *LoL* biežumu un uztvērēju tipu. Tomēr šķiet, ka lielāka nozīme ir *CORS* staciju skaitam un nosegtās teritorijas lielumam (*LatPos* uzrāda labākus rezultātus).
 - c) statistiskā analīzē tika atklāts, ka *LatPos* tīkla funkcionalitāte ir ar augstu kvalitāti, savukārt kosmisko laikapstākļu ietekme uz *EUPOS*[®]-Rīga tīklu ir kritiska.
4. Šī promocijas darba ietvaros iegūtie pētījuma rezultāti, veicot papildu testa analīzi *EGNOS RIMS* uz Zemes esošajām stacijām *WRSB* un *WRSB*, *GVLB* un *GVLB*, *LAPA* un *LAPB*, apstiprina, ka, izmantojot piedāvāto metodiku, skarbo kosmisko laikapstākļu (ģeomagnētiskās vētras) ietekmi var konstatēt arī reģionālajā *SBAS* (konkrētajā gadījumā – *EGNOS*).

Šis pētījums apstiprina, ka mīts par vājo kosmisko laikapstākļu ietekmi vidējos platumu grādos ir maldīgs, tas secināts, pamatojoties uz 11 gadu laikā uzkrāto *CORS GPS* novērojumu datu analīzi.

Šo metodoloģiju var izmantot, lai analizētu kosmisko laikapstākļu ietekmi uz jebkurām citām *CORS* stacijām, kā arī reģionālo *SBAS* (piemēram, *EGNOS*). Iegūtā informācija ir būtiska, lai labāk izprastu kosmisko laikapstākļu procesu ietekmi uz *GPS* novērojumu rezultātiem konkrētā teritorijā (reģionā vai valstī) un prognozētu iespējamo stacijas uzvedību un datu ticamību.

Runājot par Latviju, promocijas darba autore domā, ka vispirms nopietni jāstrādā, lai radītu sapratni par šīs problēmas esamību *GNSS* pozicionēšanā, navigācijā un precīzā laika sinhronizēšanā ne tikai Latvijā, bet visās “*mid latitude*” valstīs, tai skaitā Latvijā, Igaunijā un Lietuvā. Tikai tad būs iespēja pievērst valdības uzmanību šai tēmai, kad plašai *GNSS* lietotāju auditorijai būs izskaidrota kosmisko laikapstākļu izraisīto kļūdu ietekme. Latvijas sabiedrības informēšanas darbu promocijas darba autore uzskata par savu pirmo uzdevumu tuvāko mēnešu un gadu gaitā. Kosmisko laikapstākļu ietekmi ļoti nopietni pēta Polijā, Spānijā un citās Eiropas Kosmosa aģentūras dalībvalstīs.

PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Astafyeva, Elvira, Irina Zakharenkova, and Matthias Förster. 2015. "Ionospheric Response to the 2015 St. Patrick's Day Storm: A Global Multi-Instrumental Overview." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120 (10): 9023–37. <https://doi.org/10.1002/2015JA021629>.
2. Balasis, G., C. Papadimitriou, and A. Z. Boutsis. 2019. "Ionospheric Response to Solar and Interplanetary Disturbances: A Swarm Perspective." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 377 (2148). <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0098>.
3. Balodis, Janis, Madara Normand, and Inese Varna. 2021. "Extreme Solar Events' Impact on GPS Positioning Results." *Remote Sensing*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs13183624>.
4. Balodis, Janis, Madara Normand, and Ansis Zarins. 2023. "The Movement of GPS Positioning Discrepancy Clouds at a Mid-Latitude Region in March 2015." *Remote Sensing* 15 (8). <https://doi.org/10.3390/rs15082032>.
5. Balodis, Janis, Inese Varna, Diana Haritonova, Madara Normand, and Gunars Silabriedis. 2017. "Ground Based Kinematic GNSS Observation Results Affected by Space Weather Fluctuations in 2015." *Baltic Journal of Modern Computing* 5 (3). <https://doi.org/10.22364/bjmc.2017.5.3.01>.
6. Balodis, Janis, Inese Varna, and Madara Normand. 2018. "Removing Space Weather Influence." *Baltic Journal of Modern Computing* 6 (4). <https://doi.org/10.22364/bjmc.2018.6.4.05>.
7. Cherniak, Iurii, Irina Zakharenkova, and Robert J. Redmon. 2015. "Dynamics of the High-Latitude Ionospheric Irregularities during the 17 March 2015 St. Patrick's Day Storm: Ground-Based GPS Measurements." *Space Weather* 13 (9): 585–97. <https://doi.org/10.1002/2015SW001237>.
8. Circiu, Mihaela-Simona, Michael Felix, Patrick Remi, Lai Yi, Boubeker Belabbas, and Sam Pullen. 2014. "Evaluation of Dual Frequency GBAS Performance Using Flight Data." In: Proceedings of the ION ITM. ION ITM, 27.-29. Jan. 2014, San Diego, CA, USA.
9. CODE Data archive. <Ftp://Ftp.Unibe.Ch/Aiub/BSWUSER50/ATM/>.
10. Dach, Rolf, Simon Lutz, Peter Walser, and Pierre Fridez. 2015. "Bernese GNSS Software Version 5.2." <https://doi.org/10.7892/boris.72297>.

11. Dobelis, Didzis, Zvirgzds Jānis, and Kaļinka Māris. 2017. "High Ionospheric Activity Effects on LatPos RTK Network Performance in Latvia." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 251. Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012064>.
12. ECAC mājaslapa. "<https://www.ecac-ceac.org/latvia>."
13. ESA mājaslapa. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/file:RIMS.png>.
14. ESA mājaslapa. https://www.esa.int/about_us/corporate_news/member_states_cooperating_states.
15. Free ocean tide loading provider mājaslapa. <http://holt.oso.chalmers.se/loading/index.html>.
16. H2020 HSNV mājaslapa. <https://h2020nav.esa.int/page/about-h2020>.
17. H2020 HSNV mājaslapa. <https://h2020nav.esa.int/project/h2020-037>.
18. Haritonova, Diana. 2016. "Evaluation of high-precision technique application for observations of Earth's crust movements in Latvia". Riga: Riga Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatics. Doctoral Thesis.
19. Hlubek, Nikolai, Jens Berdermann, Volker Wilken, Stefan Gewies, Norbert Jakowski, Mogese Wassai, and Baylie Dantie. 2014. "Scintillations of the GPS, GLONASS, and Galileo Signals at Equatorial Latitude." *Journal of Space Weather and Space Climate* 4. <https://doi.org/10.1051/swsc/2014020>.
20. Jacobsen, Knut Stanley, and Yngvild Linnea Andalsvik. 2016. "Overview of the 2015 St. Patrick's Day Storm and Its Consequences for RTK and PPP Positioning in Norway." *Journal of Space Weather and Space Climate* 6 (February): A9. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016004>.
21. Janpaule, Inese. 2014. "Methods for the Determination of High Precision Latvian Geoid Model [in Latvian]." Riga: Riga Technical University Faculty of Civil Engineering Institute of Transport Structures. Doctoral Thesis.
22. Jauns mājaslapa. <http://jauns.lv/raksts/zinas/56804-latvija-novero-pedejo-gadu-spilgtako-ziemelblazmu- foto-video>.
23. Jin, Yaqi, Andres Spicher, Chao Xiong, Lasse B. N. Clausen, Guram Kervalishvili, Claudia Stolle, and Wojciech J. Miloch. 2019. "Ionospheric Plasma Irregularities Characterized by the Swarm Satellites: Statistics at High Latitudes." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 124 (2): 1262–82. <https://doi.org/10.1029/2018JA026063>.
24. Julien, Olivier, Ikhlal Selmi, Pagot Jean-Baptiste, Jaron Samson, and Francisco Amarillo Fernandez. 2017. "Extension of EWF Threat Model and Associated SQM." In

- Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, ITM 2017.* <https://doi.org/10.33012/2017.14873>.
25. Kaminskis, Janis. 2010. "Latvian Geoid Model and Its Development [in Latvian]." Riga: Riga Technical University, Faculty of Civil Engineering Institute of Transport Structures. Doctoral Thesis.
 26. Lee, Jinsil, and Jiyun Lee. 2019. "Correlation between Ionospheric Spatial Decorrelation and Space Weather Intensity for Safety-Critical Differential GNSS Systems." *Sensors* 19 (9): 2127. <https://doi.org/10.3390/s19092127>.
 27. Liu, Jing, Wenbin Wang, Alan Burns, Xinan Yue, Shunrong Zhang, Yongliang Zhang, and Chaosong Huang. 2016. "Profiles of Ionospheric Storm-enhanced Density during the 17 March 2015 Great Storm." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 121 (1): 727–44. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>.
 28. Liu, Xifeng, Yunbin Yuan, Bingfeng Tan, and Min Li. 2016. "Observational Analysis of Variation Characteristics of GPS-Based TEC Fluctuation over China." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5 (12): 237. <https://doi.org/10.3390/ijgi5120237>.
 29. Liu, Yang, Lianjie Fu, Jinling Wang, and Chunxi Zhang. 2017. "Study of GNSS Loss of Lock Characteristics under Ionosphere Scintillation with GNSS Data at Weipa (Australia) During Solar Maximum Phase." *Sensors* 17 (10): 2205. <https://doi.org/10.3390/s17102205>.
 30. LSM mājaslapa. <http://www.lsm.lv/raksts/laika-zinas/laika-zinas/foto-un-video-nakti-daudzviet-latvija-un-citur-pasaule-noverota-spilgta-ziemelblazma.A121924/>.
 31. Mayer, Christoph, Boubeker Belabbas, Norbert Jakowski, Michael Meurer and Winfried Dunkel. 2009. "Ionosphere Threat Space Model Assessment for GBAS." ION GNSS 2009, 22.-25. Sep. 2009, Savannah, GA, USA.
 32. Morozova, A. L., T. V. Barlyaeva, and T. Barata. 2020. "Variations of TEC Over Iberian Peninsula in 2015 Due to Geomagnetic Storms and Solar Flares." *Space Weather*. <https://doi.org/10.1029/2020SW002516>.
 33. Morozova, Katerīna. 2022. "Parameter estimation on hybrid zenith camera and gravimeter data for integrated gravity field and geoid determination based on spherical-cap-harmonics modelling." Riga. <https://doi.org/10.7250/9789934228162>.
 34. "National Risk Register Of Civil Emergencies 2017 Edition." 2017. www.official-documents.gov.uk.
 35. NOAA mājaslapa. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/iono/dynasonde/>.
 36. NOAA mājaslapa. <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena>.

37. Park, Jaeheung, Hermann Lühr, Guram Kervalishvili, Jan Rauberg, Claudia Stolle, Young-Sil Kwak, and Woo Kyoung Lee. 2017. "Morphology of High-latitude Plasma Density Perturbations as Deduced from the Total Electron Content Measurements Onboard the Swarm Constellation." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 122 (1): 1338–59. <https://doi.org/10.1002/2016JA023086>.
38. Pi, X., A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, and C. M. Ho. 1997. "Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network." *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/97GL02273>.
39. Silabriedis, Gunārs. 2012. "EUPOS®-RĪGA ģeodēziskais atbalsta tīkls un tā daudzfunkcionālā lietošana." Promocijas darba kopsavilkums.
40. Skone, S H. 2001. "The Impact of Magnetic Storms on GPS Receiver Performance."
41. SpaceWeatherLive mājaslapa. <https://www.spaceweatherlive.com>.
42. Spogli, L., L. Alfonsi, G. De Franceschi, V. Romano, M. H. O. Aquino, and A. Dodson. 2009. "Climatology of GPS Ionospheric Scintillations over High and Mid-Latitude European Regions." *Annales Geophysicae* 27 (9): 3429–37. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3429-2009>.
43. Sreeja, V. 2016. "Impact and Mitigation of Space Weather Effects on GNSS Receiver Performance." *Geoscience Letters*. SpringerOpen. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0057-0>.
44. Stankov, S.M., R. Warnant, and K. Stegen. 2009. "Trans-Ionospheric GPS Signal Delay Gradients Observed over Mid-Latitude Europe during the Geomagnetic Storms of October–November 2003." *Advances in Space Research* 43 (9): 1314–24. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.12.012>.
45. Sverige. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. 2012. *Conference Proceedings : International Round-Table on Extreme Space Weather : Geomagnetic Storms, GNSS Disruptions and the Impact on Vital Functions in Society : Stockholm, 5–6 September 2012*. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB).
46. Weather Operations, Space, and and Mitigation Working Group. 2019. "National Space Weather Strategy and Action Plan." <http://www.whitehouse.gov/ostp>.
47. Yang, Zhe, Y. T. Jade Morton, Irina Zakharenkova, Iurii Cherniak, Shuli Song, and Wei Li. 2020. "Global View of Ionospheric Disturbance Impacts on Kinematic GPS Positioning Solutions During the 2015 St. Patrick's Day Storm." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 125 (7). <https://doi.org/10.1029/2019JA027681>.
48. Zvirgzds, Janis. 2012. "Rational System LatPos [in Latvian]." Riga: Riga Technical University, Department of Geomatics. Doctoral Thesis.



Madara Normanda (dzim. Caunīte) dzimusi 1979. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi būvzinību bakalaura grādu ģeodēzijā un kartogrāfijā (1999), inženiera kvalifikāciju ģeodēzijā un kartogrāfijā (2001) un inženierzinātņu maģistra grādu būvzinātnē (2005). *École Nationale des Sciences Géographiques* (Francija) ieguvusi maģistra grādu ģeomātikā (2009). No 1999. gada līdz 2005. gadam strādājusi Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un ģeoinformātikas institūtā (LU ĢĢI), ieņemot inženieres programmētājas amatu. No 2000. gada februāra līdz jūnijam studējusi Dānijas Tehniskajā universitātē *Socrates/Erasmus* programmā.

No 2002. gada februāra līdz jūnijam strādājusi RTU, ieņemot asistentes amatu. No 2003. gada aprīļa līdz 2005. gada septembrim bijusi SIA "Mūsu mērnieks" izpilddirektore. No 2003. gada jūnija līdz janvārim strādājusi RTU, piedaloties *COST G9* projektā. No 2004. gada jūnijam līdz septembrim strādājusi *The Southwestern Company*, Nešvilā, ASV, ieņemot profesionāla izglītības konsultanta/pārdevēja amatu. No 2006. gada maija līdz decembrim, studējot maģistra programmā, stažējusies *Société EXAGONE* (Francija). Kopš 2007. gada strādā LU ĢĢI, ieņemot pētnieces amatu.