

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
ĢEOGRĀFIJAS NODAĻA

**SENTINEL-1 SINTEZĒTĀS APERTŪRAS RADARA IZMANTOŠANA CIRSMU
KONSTATĒŠANAI
BAKALaura DARBS**

Autors: **Monta Siliņa**

Stud. apl. ms17091

Darba vadītājs: Māris Nartišs

Dr. geogr., docents

RĪGA 2020

ANOTĀCIJA

Bakalaura darbā ir pētīta sintezētās apertūras radara (SAR) Sentinel-1 datu lietderība cirsmu konstatēšanā. Analogi pētījumi, kas pierāda SAR un arī tieši Sentinel-1 sensora lietderību un izmantošanu, mežsaimniecībā ir veikti gan pasaulē, gan Latvijā, taču trūkst pētījumu, kas skaidrotu SAR, mežsaimnieciskās darbības un laikapstākļu likumsakarības. Tāpēc darbā tika pētīta laikapstākļu ietekme uz SAR atpakaļ saņemtās intensitātes vērtībām, jo, mainoties laikapstākļiem, mainās arī veģetācijas un virsmas dielektriskās īpašības, kā rezultātā mainās arī SAR atpakaļ saņemtā signāla vērtības. Pētījums tika izstrādāts balstoties uz faktu, ka ir būtiski veikt mežsaimniecības monitoringu neatkarīgi no laikapstākļiem.

Izmantojot Sentinel-1 datus, klimatiskās laikapstākļu reanalīzes datu kopas ERA5-Land datus un daudzfaktoru regresijas analīzi, tika izveidots modelis, kas ļauj prognozēt galveno dielektrisko konstanti ietekmējošo laikapstākļu komponentu ietekmi uz $\Delta\sigma^0$ vērtībām. Darbā tika pierādīts, ka VH polarizācijā izvēlētajās laikapstākļu komponentes var izskaidrot 62,7% no $\Delta\sigma^0$ vērtībām, bet VV polarizācijas gadījumā 54,0% no $\Delta\sigma^0$ vērtībām var izskaidrot ar izvēlētajām laikapstākļu komponentēm. Pētījumā tika pierādīts, ka VV polarizācijas vērtības ir nestabilākas pret veģetācijas izmaiņām nekā VH polarizācijas vērtības, un tikai VH polarizācijas dati var tikt izmantoti mežsaimnieciskās darbības konstatēšanai, jo VH polarizācijas radītāji uzradīja, ka ir statistiski būtiska atšķirība starp references un cirsmu teritoriju atstarojuma vidējām vērtībām.

Atslēgas vārdi: SAR, Sentinel-1, ERA5-Land, intensitātes izmaiņas, cirsmas, dielektriskā konstante, laikapstākļi.

ANNOTATION

In this scientific research, the utilization of Synthetic Aperture Radar (SAR) Sentinel-1 data has been studied to detect the felling areas. Analogous studies proving the utilization of SAR and also in particular Sentinel-1 sensors in forestry have been conducted both in the world and in Latvia, but there is a lack of studies that explain the correlation of SAR, forestry processes and weather conditions. Therefore the effect of weather conditions on the received SAR backscatter intensity was researched in this paper, because as the weather changes, so do the dielectric properties of the vegetation and the surface, resulting in a change in the values of the received SAR backscatter. The study was developed because it is important to do forestry monitoring regardless of weather conditions.

A model was developed by Sentinel-1 data, ERA5-Land climatic weather reanalysis dataset and multiple regression analysis, that enables to predict the effect of the main dielectric constant influencing weather components on $\Delta\sigma^0$ values. This paper proved that the selected weather components in VH polarization can explain 62,7% of $\Delta\sigma^0$ values, but in the case of VV polarization, 54,0% of $\Delta\sigma^0$ values can be explained. The study showed that VV polarization values, rather than VH polarization values, are more unstable towards vegetation changes, and only VH polarization data can be used for forestry detection, as only VH polarization showed that there is a statistically significant difference between the mean values of forested reference areas and felling areas.

Key words: SAR, Sentinel-1, ERA5-Land, backscatter changes, felling areas, dielectric constant, weather condition.

SATURS

ANOTĀCIJA.....	2
ANNOTATION.....	3
JĒDZIENU UN SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	5
IEVADS	6
1. LĪDZŠINĒJĀ PIEREDZE SAR IZMANTOŠANĀ MEŽSAIMNIECĪBAS MONITORINGĀ	9
1.1. SAR datu izmantošanas pamatprincipi	10
1.1. SAR datu izmantošana mežsaimniecības procesu monitoringā.....	16
1.2. Sentinel-1 misija un tās datu izmantošana mežsaimniecības procesu monitoringā...21	
2. MEŽSAIMNIECĪBAS MONITORINGS LATVIJĀ.....	25
2.1. Mežsaimniecības monitorings, izmantojot tālzipētes metodes pašlaik un tā optimizācijas iespējas nākotnē.....	26
3. MATERIĀLI UN METODES	29
3.1. Pētāmā teritorija.....	29
3.3. ERA5-Land dati	33
3.4. Tālzipētes dati un to apstrāde.....	33
3.4.1. Sentinel-1 datu raksturojums	35
3.4.2. Sentinel-1 datu pirmapstrāde	35
3.4.3. Sentinel-1 datu pielāgošana izpētes teritorijām un to intensitātes izmaiņu aprēķināšana	38
3.5. Laikapstākļu un radara atstarojuma intensitātes likumsakarību izpēte mežsaimniecības teritorijām	41
3.6. Statistiskās datu analīzes metodes	46
4. REZULTĀTI.....	48
4.1. Modeļa izveide atsevišķu laikapstākļu komponentu ietekmes novērtēšanai uz SAR intensitātes izmaiņām.....	48
4.2. Izveidoto modeļu validācija, vienādojumu izveide un laikapstākļu komponentu ietekmes novērtēšana uz SAR intensitātēs izmaiņām.....	57
4.3. Modeļu statistiskā būtiskuma novērtējums.....	59
4.4. Izstrādātās metodes trūkumi un turpmākos pētījumos veicamie uzlabojumi	64
SECINĀJUMI	66
PATEICĪBAS	68
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	69
PIELIKUMI.....	78

JĒDZIENU UN SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

CSP – Centrālā statistikas pārvalde

dB – decibels, relatīva logaritmiskā vienība ar kuru mēra radara intensitāti

DEM – digitālais reljefa modelis

DLR – Vācijas Aerokosmosa aģentūra

DSM – digitālās virsmas modelis

ECMWF – Eiropas vidēja termiņa laika prognožu centrs

EKA – Eiropas Kosmosa aģentūra

EM – elektromagnētisms

ERA5-Land – *ECMWF Reanalysis 5th Generation - Land*

HH – horizontālā – horizontālā radara sensora polarizācija

HV – horizontālā – vertikālā radara sensora polarizācija

InSAR – sintezētās apertūras radara interferometrija

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

LVM – Latvijas valsts meži

LVM GEO – AS “Latvijas valsts meži” ģeotelpiskās informācijas produktu un pakalpojumu kopa

LVMI – Latvijas Valsts mežzinātnes institūts

MRM – meža resursu monitorings

RADAR – *Radio Detection And Ranging*

S-1 – Sentinel-1 satelīts

S-2 – Sentinel-2 satelīts

SAR – sintezētās apertūras radars

SLAR – sānskata radars

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

VH – vertikālā – horizontālā radara sensora polarizācija

VMD – Valsts meža dienests

VV – vertikālā – vertikālā radara sensora polarizācija

IEVADS

Mežu platību ilgtspējīga izmantošana ir svarīga gan tautsaimniecības nozarē, gan ekoloģijā, jo meži ir atbildīgi par dažādām ekosistēmas norisēm, kā, piemēram, tie piesaista oglekļa dioksīdu, samazina siltumnīcefekta gāzu emisiju, kā arī piedalās ūdens aprites ciklā un regulē klimatu, un ir būtiski bioloģiskās daudzveidības saglabāšanā (Foley et al. 2005).

Latvijā meža resursi ir ļoti nozīmīgi tieši tautsaimniecības nozarē, jo meži aizņem 53% no valsts teritorijas (Meža nozare skaitļos un faktos 2020). Latvijā ikgadēji mežu platība turpina pieaugt, kā rezultātā meži no kopējās valsts platības pašlaik aizņem 3,412 milj. hektāru. Latvijas mežos uzkrātās koksnes apjoms pieaug trīs reizes straujāk nekā meža platība, piemēram, 2019. gadā kopējās krājas apjoms valstī sasniedza 679 milj. m³ (LR Centrālā statistikas pārvalde 2019a; LR CSP 2019b; Meža nozare skaitļos un faktos 2020). Mežsaimniecība ir viena no Latvijas svarīgākajām tautsaimniecības nozarēm, kā arī ir būtisks finansiālo ienākumu avots valstī – 2018. gadā mežsaimniecība, kokapstrāde un mēbeļu ražošana veidoja 5,1% no iekšzemes kopprodukta, un to eksporta apjoms sasniedza 2,6 miljonus eiro jeb 21% no valsts kopējā eksporta (Meža nozare skaitļos un faktos 2020). Tomēr ik pa laikam krājas apjoms un meža platības samazinās, jo mežos tiek ierīkotas cirsmas, kas samazina uzkrātās krājas apjomu un meža platību. Latvijā 2018. gadā tika izcirsti 106 tūkst. hektāri meža platību, kur krāja veidoja 12 862 tūkst. m³ (LR Centrālā statistikas pārvalde 2019a; LR CSP 2019c). Mežu lielās nozīmes dēļ ir svarīgi veikt regulāru mežsaimniecības monitoringu.

Meža inventarizācijas veikšanas darbi ir dārgi un laikietilpīgi, tāpēc ir svarīgi izstrādāt rentablas un mazāk laikietilpīgas kartēšanas metodes un atklāt efektīvus veidus, kā pastāvīgi veikt meža monitoringu un iegūt datus par mežā notiekošajiem procesiem, izmaiņām un to mērogu (Gudex-Cross et al. 2017). Nesenie panākumi tālizpētes jomā nodrošina nepieciešamo plaša mēroga telpisko un temporālu informāciju par zemes pārklājumu, kas, savukārt, ļauj veikt zemes pārklājuma monitoringu un dažādu pētījumu izstrādi, tajā skaitā arī meža resursu kartēšanu un uzraudzīšanu (Bae et al. 2019).

Līdz šim mežu novērošanai globālā mērogā galvenokārt tika izmantoti optiskie sensori, ar kuriem tiek veikti dažādi ikgadēji pētījumi, kā arī plaši vairāku gadu pētījumi (Rüetschi et al. 2018). Satelītu optisko sensoru izmantošanai ir divi galvenie trūkumi – pirmkārt, optiskie sensori neuztver veģetācijas struktūru, un, otrkārt, laika ziņā konsekventu datu iegūšana ir gandrīz neiespējama, jo mākoņu sega relatīvi bieži traucē optiskā sensora skatam, kas ir īpaši aktuāli Latvijā, kur klimatiskie apstākļi nodrošina to, ka vidēji gadā aptuveni puse no dienām ir mākoņainas (Kerle, Oppenheimer 2002). Šī iemesla dēļ nozīmīgi dati mežu monitoringa veikšanai ir SAR dati. SAR ir spējīgi uztvert veģetācijas struktūru, un dati tiek iegūti neatkarīgi

no diennakts laika un laikapstākļiem, kā rezultātā ar tiem var iegūt laika ziņā konsekventus datus, un tiem ir plašas izmantošanas iespējas mežā notiekošo procesu uzraudzīšanai un konstatēšanai (Dobson et al. 1992; Dostálová et al. 2016; Kellndorfer et al. 1998). Taču ir svarīgi apzināties, ka laikapstākļi būtiski ietekmē atpakaļ saņemtā signāla intensitāti, kas tiek saņemta no Zemes un uz tās esošajiem objektiem, tādejādi ir svarīgi veikt pētījumus, kas skaidro laikapstākļu un SAR mijiedarbību.

Eiropas Kosmosa Aģentūra (EKA) 2014. gadā uzsāka Sentinel-1 misiju, kuras ietvaros polārajā orbītā tika palaisti divi satelīti: Sentinel-1A un Sentinel-1B (Bae et al. 2019). Abi Sentinel-1 satelīti ir aprīkoti ar C-joslas SAR sensoriem, kas nodrošina augstas telpiskās izšķirtspējas datus (5 – 40 m) ar augstu temporālo izšķirtspēju (6 – 12 dienas). Eiropas Komisijas programmas Copernicus datu politika nodrošina, ka ievāktie SAR dati Latvijā, kā sadarbības valstī, ir brīvi pieejami (Bae et al. 2019; Forkuor et al. 2020; Torres et al. 2012). Sentinel-1 dati tādejādi ir nozīmīgi meža apjoma izmaiņu un kailciršu konstatēšanai, un to pielietojšanas iespējas ir nozīmīgas visā pasaulē, tajā skaitā arī Latvijā, ņemot vērā, ka pašlaik meža monitoringa procesa optimizācija ir ļoti aktuāls temats (Olesk et al. 2015).

Bakalaura darba tematam atbilstoši zinātniski pētījumi jau iepriekš ir veikti gan pasaulē, gan arī Latvijā (piemēram, Cimdiņš 2018), taču pilnīgi funkcionāla metode, kas skaidro SAR datu izmantošanas iespējas cirsmu konstatēšanai neatkarīgi no laikapstākļu ietekmes Latvijā vēl nav izstrādāta. Tāpat, lai veiktu ne tikai lokālu, bet arī reģionālu un globālu mežsaimnieciskās darbības monitoringu, kas saistīts ar lielu datu masīvu apstrādi, ir jāveic datu apstrādes metožu automatizēšana. Lai uzlabotu automātiskās klasifikācijas (izmaiņu detektēšanas) metožu rezultātu pareizību, ir jāizstrādā datu priekšapstrādes metodes, kas palielina interesējošo izmaiņu statistisko atšķirību. Tāpēc bakalaura **darba mērķis** ir izstrādāt metodiku, ar kuras palīdzību būtu iespējams veikt cirsmu konstatēšanu izmantojot Sentinel-1 SAR atstarojuma intensitātes īpašības un ERA5-Land klimatisko laikapstākļu reanalīzes datu kopas rādītājus.

Bakalaura darbā ir izvirzīti šādi **uzdevumi**:

1. noskaidrot, kādi ir līdzšinējie veiktie pētījumi un pieredze SAR datu izmantošanai meža monitoringā;
2. apkopot informāciju, kā līdz šim ir veikts meža monitorings Latvijā;
3. izveidot datubāzi, kurā ir apkopoti etalonteritoriju un references teritoriju raksturojošie parametri (platība, laiks, vieta), kā arī SAR un ERA5-Land dati;
4. veikt atsevišķu notikumu analīzi, aprēķinot nogabalu atstarojuma intensitātes un laikapstākļu izmaiņas;
5. izveidot modeli, kas skaidro galveno dielektrisko konstanti mainošos laikapstākļu rādītāju ietekmi uz signāla intensitāti;

6. veikt cirsmu konstatēšanas datu precizitātes novērtēšanu, izmantojot datu analīzes metodes;

7. izdarīt secinājumus par izstrādātās metodes precizitāti ietekmējošiem faktoriem un izmantošanas iespējām nākotnē.

Darbs sastāv no 4 nodaļām un 13 apakšnodaļām. Darba kopējais apjoms ir 103 lapaspuses. Darbā ir iekļauti 14 attēli, 10 tabulas un 13 pielikumi. Kopējais izmantoto literatūras avotu skaits ir 137, no kuriem 98 ir publicēti, bet 38 ir nepublicēti resursi un darbā ir izmantots viens kartogrāfiskais materiāls.

1. LĪDZŠINĒJĀ PIEREDZE SAR IZMANTOŠANĀ MEŽSAIMNIECĪBAS MONITORINGĀ

Meži ir viena no nozīmīgākajām ekosistēmām pasaulē, un tie aizņem 4000 milj. ha jeb 30,7% no sauszemes platības (Forest area .. S.a.; Pärtikas un .. 2015). Meža monitoringa nozīme ir globāli apzināta, ņemot vērā, ka meži ir viena no bioloģiski visdaudzveidīgākajām sauszemes ekosistēmām, jo meži ir dzīvotne divām trešdaļām sauszemes dzīvnieku un augu sugu. Tajos notiekošie procesi novērš augsnes eroziju, nodrošina ūdens noteci un tie ir galvenais sauszemes oglekļa izmešu līmeņa limitējošais un kontrolējošais faktors, kā arī meži ir nozīmīgs tautsaimniecības resurss (Ojea et al. 2010; Waring, Running 2007; Forest S.a.). Lai meži turpinātu pildīt šādas funkcijas, ir svarīgi veikt ilgtspējīgu mežu apsaimniekošanu (Obersteiner et al. 2010; Schaich, Milad 2013).

SAR dati ir daudzfunkcionāls un unikāls datu avots mežsaimniecības monitoringā – it īpaši apgabalos, kur ir relatīvi augsta mākoņainība un nav iespējams veikt regulāru mežsaimniecības procesu monitoringu ar optiskajiem tālzipētes sensoriem, ka arī vietās, kur ir nepieciešams veikt plaša mēroga kartēšanu (Stellingwerf et al. 1997; Bispo et al. 2019; Balzter 2001; Bae et al. 2019). Mikroviļņu spektrālās joslas dati ir piemēroti meža procesu monitoringam, jo radara dati var tikt iegūti neatkarīgi no mākoņainības un Saules spīdēšanas ilguma, kā arī tie spēj iespiesties veģetācijas slāņos un veikt augu fenoloģijas un struktūras mērījumus. Tas nozīmē, ka ar tiem iespējams veikt tiešus veģetācijas struktūras mērījumus jebkurā diennakts laikā un klimatiskajos laikapstākļos (Ulaby et al. 1990; Tanase et al. 2011; Le Toan et al. 1992; Lewis, Henderson 1999; Balzter 2001; Crockett, Long 2013). SAR tālzipētes dati ir īpaši nozīmīgi vietās, kur tie ir uzņemti jau vēsturiski, jo izmantojot radara datus un analīzes metodes, var veikt dažādu meža parametru monitoringu, salīdzinot dažādas datu laika rindas (Bush, Ulaby 2014). Tomēr SAR datu izmantošana mežsaimniecības procesu monitoringā tiek uzskatīta par specializētu metodi, jo, lai pilnvērtīgi izmantotu un interpretētu datus, ir nepieciešamas specifiskas zināšanas par mikroviļņu un to polarizācijas veidu mijiedarbību ar dažādiem materiāliem un ģeometriju, kā arī ir jāapgūst dažādas sarežģītas datu apstrādes metodes (Franklin 2001).

Jau 1978. gadā, kad zemes orbītā tika palaists pirmais SAR satelīts *Seasat*, tika aktīvi veikti pētījumi par to, kā iespējams izmantot SAR datus mežsaimniecības monitoringā. Pētījumu gaitā gan tika pierādīts, ka pirmā SAR satelīta *Seasat* potenciāls mežsaimniecības procesu monitoringā ir minimāls, jo aptuveni 65% no atpakaļ saņemtā signāla tika saņemts no virsmas topogrāfijas, nevis no veģetācijas, kas traucēja iegūt visaptverošus un kvalitatīvus datus

par virszemes veģetāciju (Rauste 1990). Vēsturē ir pierādījies, ka nozīmīgs šķērslis datu plašākai izmantošanai ir bijis tas, ka, neraugoties uz ievērojamo tehnoloģisko progresu, kas panākts, izmantojot lidmašīnas un satelītus, digitālie dati un līdzekļi nav bijuši brīvi pieejami, kā arī tolaik izstrādātas datu analīzes metodes un datu apstrādes programmatūras ir sarežģītas – ar ierobežotu pieejamību un funkcijām (Quegan 1995). Taču jau kopš 1991. gada radara dati ir nepārtraukti pieejami no dažādiem sensoriem (ERS-1, ERS-2, JERS, SIR-C/X-SAR, RADARSAT, SRTM, EnviSAT-ASAR, RADARSAT-II, LIGHTSAR, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, Sentinel-1A un Sentinel-1B) un tiek izmantoti, lai veiktu mežsaimniecības procesu monitoringu (Dostálová et al. 2016; Franklin 2001).

Pēdējo trīsdesmit gadu laikā SAR datu izmantošana mežsaimniecības procesu monitoringā ir strauji pieaugusi. Ir noskaidrots, ka ar SAR sensoriem var novērtēt un analizēt vairākus mežsaimniecībā svarīgus parametrus, kā, piemēram, mežaudzes blīvumu, mežaudzes platības, koku augstumu un to vecumu. Līdz šim SAR dati mežsaimniecības nozarē ir izmantoti, lai veiktu meža augšanas dinamikas, veselības stāvokļa, oglekļa daudzuma, struktūras un mitruma daudzuma, biotisko (piemēram, kaitēkļu) un abiotisko (piemēram, vēja un ugunsgrēku) faktoru ietekmes novērtēšanu, kā arī lai veiktu mežsaimnieciskās darbības monitoringu, meža tipa kartēšanu un krājas apjoma novērtēšanu (Le Toan et al. 1989; Santi et al. 2017; Tanase et al. 2019; Balzter 2001; Antropov et al. 2014; Englhart et al. 2011; Luckman et al. 1997; Maghsoudi et al. 2013; Reiche et al. 2013; Thiel, Schullius 2016). Tādējādi SAR dati ir alternatīvs un svarīgs datu ieguves avots ekoloģiski nozīmīgai informācijai par veģetācijas struktūru gan reģionālā, gan globālā mērogā (Bae et al. 2019). Lielākā daļa pašreiz izstrādāto pētījumu par SAR izmantošanu mežsaimniecībā ir koncentrēti uz vietējo un reģionālo līmeni, taču dažādu projektu ietvaros ir izstrādāti arī globāli pētījumi par SAR izmantošanu mežsaimniecībā, kā, piemēram, Vācijas Aerokosmosa aģentūrā (DLR) ir izstrādāts pētījums, kurā izmantojot TanDEM-X sintezētās apertūras radara interferometrijas datus tika iegūta globāla mežu klasifikācijas mozaīka (Martone et al. 2018; Tanase et al. 2019). Daudzu pieejamo SAR datu telpiskā un īslaicīgā izšķirtspēja gan ir salīdzinoši zema, tādēļ to izmantošana operatīvā meža monitoringā joprojām ir ierobežota. Taču 2014. gadā palaistā SAR Sentinel-1A datu pieejamība, un vēlāk arī Sentinel-1B satelīta palaišana ir veicinājusi SAR sensoru pētījumu attīstību mežsaimniecības nozarē (Dostálová et al. 2016).

1.1. SAR datu izmantošanas pamatprincipi

Izmantojot tālīzpētes metodes un datus, ir iespējams veikt relatīvi nesenu izmaiņu dokumentēšanu un uz zemes notiekošo procesu monitoringu (Rindfuss et. al. 2004). Tālīzpētes

dati bieži tiek izmantoti, lai noteiktu veģetācijas tipu, struktūru un veiktu dažādus pētījumus saistībā ar biomasu, krāju un tās stāvokli. Šo iepriekš minēto iemeslu dēļ tālīzpētes dati aktīvi tiek izmantoti mežsaimniecības procesu monitoringā (Wulder et al. 2009; Franklin 2001). Taču, lai varētu pietiekami kvalitatīvi izsvērt SAR tālīzpētes datu izmantošanas iespējas mežsaimniecības procesu monitoringā un meža izmaiņu konstatēšanā, ir nepieciešama izpratne par radara tālīzpētes darbības pamatprincipiem, vispārpieņemtiem terminiem un raksturlielumiem (Balzter 2001; Franklin 2001).

Tālīzpētes sensori darbojas elektromagnētiska (EM) spektra mikroviļņu reģionā un tie ir iedalīti divās grupās: (1) aktīvie mikroviļņu sensori, kas pārraida mikroviļņus un mēra atpakaļ saņemtā signāla enerģiju, un laiku starp signāla raidīšanas un saņemšanas brīdi, un (2) pasīvie mikroviļņu sensori, kas mēra mikroviļņu enerģiju, ko izstaro novērotais mērķis. Aktīvo sensoru funkcijas ir radioviļņu atpazīšana (angl. *detection*) un mērīšana (angl. *ranging*), un tos sauc par radariem, no kā ir cēlies akronīms RADAR (angl. *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging), kas nu jau ir kļuvis par patstāvīgu terminu (Kellndorfer, McDonald 2009; Chan, Koo 2008). Radars ir instruments, ar kuru ir iespējams noteikt un lokalizēt objektu trīsdimensiju telpā (Meyer 2019). Radaru sistēmu izmantošana nosaka tas, ka šo datu iegūšanai nav nepieciešams papildus starojums, tādējādi datus var iegūt jebkurā diennakts laikā. Vēl viens izmantošanu ietekmējošs faktors ir tas, ka mikroviļņiem ir spēja iekļūt atmosfērā praktiski jebkuros apstākļos, kas ļauj veikt regulāru teritoriju un procesu monitoringu (Kumar, Patnaik 2013; Meyer 2019; Podest 2017). Papildus tam radara sensori atšķirīgi mijiedarbojas ar Zemes virsmu, nekā vairums tālīzpētes sensori. Tādējādi tie sniedz daudz jaunas informāciju par novēroto vidi (Meyer 2019; Podest 2017).

Aktīvo mikroviļņu sensorus jeb radaru darbību paskaidro un raksturo to sistēmas uzbūve un to, kā radara antenas pārraida un uztver EM enerģiju mikroviļņu formā (Kellndorfer, McDonald 2009). Radari ar kvalitatīvu attēlveidošanas veikspēju kļuva pieejami 1950. gadā, kad tika attīstīti sānskata radari jeb SLAR, kas sastāv no sensora, kas uzstādīts uz kustīgas platformas (satelīta, lidmašīnas u. tml.) un kustās līdz platformai pa taisnu ceļu noteiktā augstumā. Pretēji vairumam optiskajām attēlveidošanas sistēmām, kuru sensors tēmē uz nādīra punktu, SLAR (un jebkura cita radara attēlveidošanas sistēma) sistēma ir vērsta ieslīpi nādīra punktam, un tēmē uz tā saucamo skata leņķi (angl. *look angle*), tā, lai tā atstarotu nepārtrauktu vālu (angl. *swath*) uz Zemes virsmas, kamēr tā pārvietojas līdz platformai (Meyer 2019). Radara sensori pārvietojoties pārraida īsu mikroviļņu impulsu virkni konkrētā staru plaknes platumā (angl. *beamwidth*) (Meyer 2019; Kellndorfer, McDonald 2009). Mikroviļņu enerģija, kas ir fokusēta antenā, tiek ģenerēta raidītājā un tiek atbrīvota īsu impulsu (angl. *bursts*) veidā. Kad enerģija saskaras ar objektu, EM vilnis tiek izkliedēts, un tā daļiņas tiek atstarotas sensora

virzienā. Sensora uztvertā un reģistrētā atpakaļ atgrieztā enerģija tiek saukta par radara atstarojumu (angl. *backscatter*), kā arī par “atbalsi” (angl. *echo*) (Balzter 2001; Kellndorfer, McDonald 2009). Precīzi izmērot laika starpību starp pārraidīto impulsu un atpakaļ atgrieztās enerģijas saņemšanas brīdi, radars spēj noteikt atstarojošā objekta attālumu, kas tiek saukts par diapazonu (angl. *range*) vai slīpo diapazonu (angl. *slant range*) (McCandless, Jackson 2004).

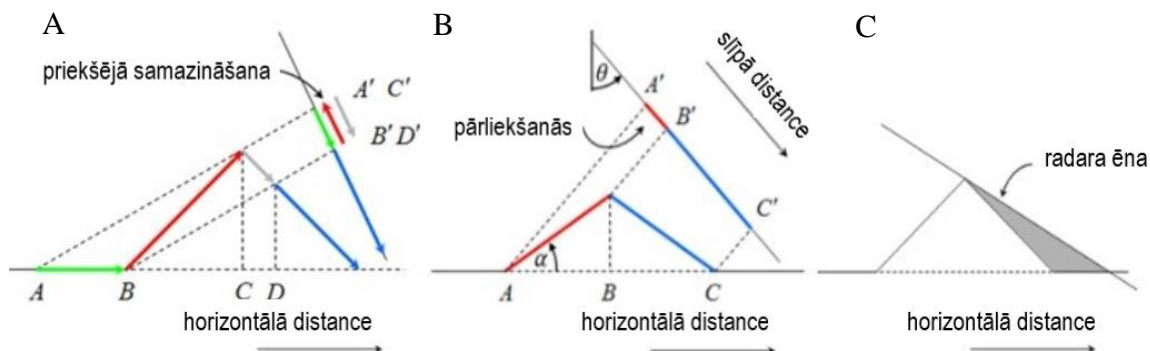
SAR ir viens no radaru veidiem, kas spēj nodrošināt augstas telpiskās izšķirtspējas attēlus. Šis radars ir izveidots, lai uzlabotu azimutālo izšķirtspēju līdz pat pāris metriem (Elachi, Van Zyl 2006). SAR ir viens no sānskata radariem (angl. *side-looking*), kas koherenti reģistrē atstaroto mikroviļņu enerģiju. Tas nozīmē, ka radara sensors ir spējīgs uztvert informāciju gan par viļņu amplitūdu, gan fāzi (Zālīte S.a.; Elachi, Van Zyl 2006, Kellndorfer, McDonald 2009). Ir zināms un praksē pārbaudīts, ka ar kosmosā esošajiem reālās apertūras radaru (angl. *real aperture radar*) sensoriem nav iespējams iegūt pietiekamu azimutālo izšķirtspēju, jo tādejādi būtu jāizveido proporcionāli sistēmai pārāk gara antena, tādēļ tika izveidoti sintezētās apertūras radari. SAR ir uzbūvēti tā, ka tie sastāv no fiziski īsas antenas, kas sintezē garas antenas “efektu”. Šis efekts tiek panākts izmantojot vairākas īsas antenas, Doplera efektu un modificētas datu ierakstīšanas un apstrādes metodes, kā rezultātā ir iespējams apstrādāt vairākus atsevišķus signālus un iegūt augstas azimutālās izšķirtspējas datus (Kumar, Patnaik 2013; Kellndorfer, McDonald 2009). Moderno SAR izšķirtspēja parasti svārstās no 0,5 m līdz 20 m, variējot atkarībā no antenu garuma un sensora specifikācijas. Antenu funkciju un attēlu apstrādes tehnikas attīstība ir ļāvusi veidot augstas izšķirtspējas attēlus, pat lielu vālu platumā (Gebert et al. 2009; Krieger, Moreira 2003; Younis et al. 2003).

SAR attēlos ir redzami ģeometriski sagrozījumi, kas nosaka to, ka pirms datu izmantošanas ir jāveic ainu korekcijas. Ģeometriskie sagrozījumi galvenokārt rodas, jo sistēmas mēra slīpo diapazonu. Ģeometriskos sagrozījumus nosaka arī uzņemtās teritorijas reljefs, kur svarīgs ir lokālā skata leņķa lielums. Visbiežāk ģeometriskie sagrozījumi rodas vietās, kur ir stāvas nogāzes. Visbiežāk esošie sagrozījumi (1.1. attēls) ir:

1. **priekšējā samazināšana** (angl. *foreshortening*) – rodas, jo radars mēra attālumu slīpā diapazonā, kā rezultātā radara stars var sasniegt radara nogāzi, kas ir vērsta pret radaru, ātrāk nekā nogāzes virsotni un šķiet, ka nogāze “noliecas” uz sensora pusi. Tādejādi radaram pretī vērstā nogāze attēlā būs saspiesta un pretējā nogāze izstiepta (1.A. attēls);

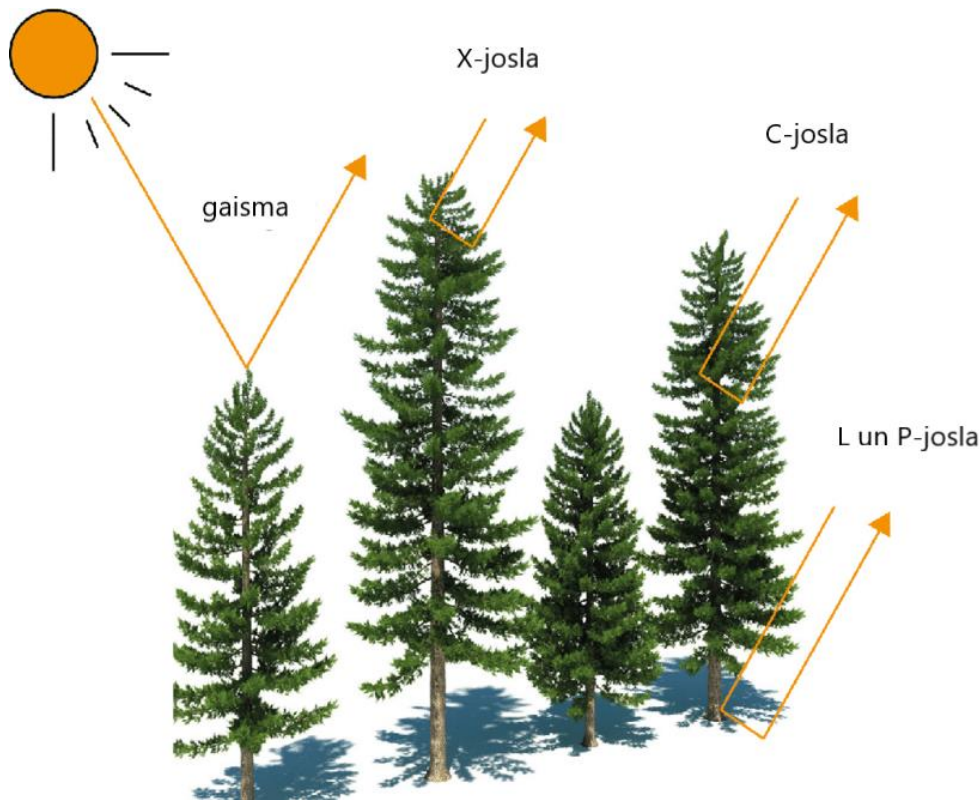
2. **pārliedzšanās** (angl. *layover*) – kad signāls tiek ātrāk iegūts no nogāzes augšas, nevis no nogāzes pamatnes, kā rezultātā nogāzes augšējā daļa uzņēmumā parādās tuvāk radaram, nekā tās pamatnes daļa, tādejādi radot “pārliedzšanās” efektu (1.B. attēls);

3. **radara ēna** (angl. *radar shadow*) – kad nogāzes augšējā daļa aizsedz pretēji radara sensoram vērsto nogāzi, kā rezultātā sensoram pretēji vērstās nogāzes radara uzņēmumā parādās melna, jo signāls šajā reģionā nepienāk vai ir ļoti vājš (1.C. attēls) (Meyer 2019, Lu S.a.; Podest, Mehta 2018).



1.1. attēls. Ģeometriskie sagrozījumi. A - priekšējā samazināšana, B - pārliedzianās, C – radara ēna (pēc Meyer 2019)

SAR sensori pārraida mikroviļņu signālus slīpā leņķī un mērā atstaroto signāla daļu (sensora virzienā), lai varētu analizēt virsmas īpašības (Meyer 2019). SAR pārraida un uztver mikroviļņus, kuru garums ir no 2,4 līdz 100 cm (Moreira et al. 2013). Mikroviļņi tiek bieži raksturoti ar frekvences joslu, kurā radara sensors funkcionē (Kellndorfer, McDonald 2009). Optimālās radara viļņu joslas, kas tiek izmantotas mežu kartēšanā un monitoringā, ir X-josla (2,4 – 3,8 cm), C-josla (3,8 – 7,5 cm), L- josla (15 – 30 cm) un P-josla (30 – 100 cm) (Balzter 2001; Kellndorfer, McDonald 2009). Dažādu mikroviļņu joslām ir atšķirīgas iespiešanās spējas meža stāvos, piemēram, X-joslas dati, galvenokārt, sniedz informāciju par veģētācijas virsējo slāni, jo tie lielākajā daļā gadījumu mijiedarbojas ar lapotni. C-joslas mikroviļņi galvenokārt mijiedarbojas ar zariem un piezariem, tādējādi sniedzot informāciju par mežaudzes vidējo un augstāko slāni. L un P-joslas mikroviļņi pārsvarā mijiedarbojas ar koku stumbriem un zemes virsmu, tādējādi tie sniedz informāciju, par piezemes slāni un reljefu (1.2. attēls) (Franklin 2001).



1.2. attēls. Mikroviļņu joslu – iespiešanās spēja mežā un to mijiedarbība ar meža elementiem (pēc Persson 2014)

Mikroviļņu atstarošanas intensitātes lielumu nosaka ģeometriskās un dielektriskās virsmas vai tilpuma īpašības. Mikroviļņi ir jutīgi attiecībā pret virsmas ģeometriju (topogrāfiju), virsmas raupjumu (virsmas slīpumu, virsmas augstuma izmaiņām, augu ģeometriju), kā arī pret virsmas materiāla dielektrisko konstanti, kas visbiežāk saistītās ar ūdens saturu (augu, augsnes un sniega mitruma daudzumu) (Balzter 2001).

Virsmas raupjums ir viens no faktoriem, kas nosaka, kā signāls tiks atstarots uz sensoru un kāda būs tā intensitāte. To, vai virsma parādās raupja vai mazāk raupja, nosaka SAR sensora raidītā viļņu garums. Virsmas raupjums lielā mēra nosaka arī to, kā signāls tiks izkliedēts, jo raupjāka ir virsma, jo vairāk signāls tiks izkliedēts. Atkarībā no viļņu garuma, virsma attēlā var izskatīties tumšāka vai gaišāka. Palielinoties viļņu garumam, virsma radarogrammas attēlā izskatās arvien tumšāka (Meyer 2019).

Pirms radara datu izmantošanas ir svarīgi arī apzināties un saprast, kādas ir dažādu materiālu dielektriskās īpašības un kā dažādi materiāli mijiedarbojas ar mikroviļņu signālu dažādos viļņu garumos. Dielektriskās īpašības nosaka to, kā saņemtā radiācija atstarosies no Zemes virsmas un cik liels apjoms no signāla nokļūs vidē, un cik daudz enerģijas zudīs absorbējoties. Balstoties uz iepriekš minētajiem faktoriem, mežu kartēšana, izmantojot SAR sensorus, galvenokārt tiek veikta laikā, kad ir sauss vai sals, jo tad veģetācijā ir mazāks mitruma

daudzums un signāla enerģija mazāk tiek absorbēta vai izkliedēta (Meyer 2019). Taču ir pierādīts, ka mitruma satura izmaiņas parasti izraisa ievērojamas dabisko materiālu dielektrisko īpašību izmaiņas, kā rezultātā atpakaļ saņemtā signāla intensitāte pieaug. Meža gadījumā mikroviļņu iespiešanās spēja tā slāņos ir atkarīga no lapu un zaru mitruma, blīvuma un ģeometriskās struktūras (Radar Course 2 S.a.).

SAR, kā jau iepriekš tika minēts, ir aktīvs tālzipētes sensors, kas pats izstaro EM viļņus un uztver tā atstarojumu. Tas ir viens no instrumentiem, kas pilnībā ļauj izmantot un kontrolēt signāla polarizāciju gan, kad signāls tiek raidīts, gan, kad signāls tiek saņemts (Meyer 2019). EM viļņa polarizācija ir saistīta ar elektriskā lauka vektora stāvokli – svārstību plaknes orientāciju un to, kā tas mainās laikā. Radara sensori var būt paredzēti, lai pārsvarā pārraidītu un uztvertu viena stāvokļa polarizāciju – horizontālo (paralēli zemes virsmai) vai vertikālo (perpendikulāri zemes virsmai) (Kellndorfer, McDonald 2009). Lineāri polarizētās sistēmās svārstību plaknes orientācija ir konstanta EM viļņu izplatīšanās ceļā. Lielākā daļa mūsdienu SAR sensoru ir lineāri polarizēti un pārraida horizontāli un/vai vertikāli polarizētu viļņu formas. Daudzi no sākotnējiem SAR pavadoņiem ir sensori, kuri atbalsta tikai vienu lineāro polarizāciju. Šie sensori pārsvarā darbojas HH – polarizācijā (horizontālā polarizācijā pārraidīti viļņi; horizontālā polarizācijā uztverti viļņi) vai VV – polarizācijā (vertikāli pārraidīti; vertikāli uztverti), taču pašlaik daudziem SAR pavadoņiem ir sensori, kas ir spējīgi pārraidīt viļņus vienā polarizācijā un saņemt tos citā polarizācijā, kas izpaužas kā HV (horizontāli pārraidīti, vertikāli saņemti un otrādi VH gadījumā). Jaunākie sensori nodrošina vai nu duālās polarizācijas, vai pilnās (t.i. VV, VH, HH, HV) polarizācijas iespējas. Ir svarīgi zināt, kādā polarizācijā viļņi ir pārraidīti, jo dažādi polarizēti viļņi atšķirīgi mijiedarbojas ar dažādiem objektiem uz Zemes (Meyer 2019). Ir pierādīts, ka VH un HV polarizācijā raidītie signāli sniedz precīzāku informāciju par meža struktūras izmaiņām nekā VV un HH polarizācijā raidītie mikroviļņi, jo VH un HV polarizācijā raidītie signāli vairākkārt izkliedējas koku lapotnē un tos mazāk ietekmē virsmas topogrāfija, tādejādi vērtības ir stabilākas un VH un VV polarizācijas vērtības vairāk reprezentē izmaiņas veģetācijas slāņos (Dobson et al. 1992; Ranson, Sun 1994; Le Toan et al. 1992).

Signāla izkliede tiek raksturota, kā signāla novirzīšana un izkliede dažādos virzienos, kad signāls sasniedz savu mērķi un atstarojas pret to. Tiek izdalīti trīs galvenie **izkļiedes veidi**:

1. **virsmas izkliede** (angl. *surface scattering*) – kad signāls atsit pret līdzenu, homogēnu virsmu un daļa enerģijas tiek atstarota atpakaļ uz sensoru. Virsmas izkļiedes spēku nosaka zemes virsmas īpašības (virsmas raupjums, dielektriskā konstante) un sensora parametri (mikroviļņu garums, skata leņķis). Parasti šāda izkliede notiek virs ūdenstilpnēm, klintīm un citām līdzenām virsmām, taču šāda izkliede

novērojama arī meža augšējās slāņos. Atstarojums no šīm teritorijām parasti ir ļoti zems un radiogrammas ainā tās parādās tumšas;

2. **dubultā atsitienu izkliede** (angl. *double bounce scattering*) – kad signāls atsitas pret divām relatīvi līdzenām virsmām, kas ir perpendikulāras viena otrai. Atpakaļ atgrieztais signāls ir īpaši spēcīgs, jo enerģija tiek atkārtoti atstarota sensora virzienā, tādējādi teritorijas, kur ir šāda izkliede parasti radara ainās parādās ļoti gaišas. Tipiski piemēri, kur notiek dubultā atsitienu izkliede ir apbūves teritorijas, taču šāda izkliede mēdz veidoties arī vietās, kur mežs robežojas ar citu perpendikulāru līdzenumu, un atstarojošu virsmu;

3. **tilpuma izkliede** (angl. *volume scattering*) – kad radara impulss iekļūst trīsdimensionālā ķermenī enerģija tiek vairākkārt izkliedēta dažādos virzienos un tikai daļa signāla tiek atgriezta radara sensoram. Tieši tilpuma izkliede pārsvarā ir novērojama meža teritorijās, jo tur signāls vairākkārt atsitas pret koku zariem, stumbriem un Zemes virsmu (Moghaddam 2009; Meyer 2019).

Ja ir pieejamas vairākas radara frekvences, piemēram, C-josla, L-josla un P-josla, ir iespējami arī vairāki izkļēdes mehānismi dažādos meža slāņos, kas ļauj iegūt datus par tiem. Piemēram, viens izkļēdes mehānisms var dominēt pie zināmas frekvences, bet cits nē. Kā, piemēram, blīva meža gadījumā C-joslas mikroviļņi izraisa vainagu slāņa izkļēdi, bet L un P-joslas mikroviļņi izraisa stumbru un zemes virsmas izkļēdi (Moghaddam 2009).

Katrs radara uzņemtā attēla pikselis satur informāciju par mikroviļņu enerģiju, ko uztver radara sensors un šī enerģija tiek mērīta dB (decibelos) (Kellndorfer, McDonald 2009). Svarīga platformas funkcija ir pieejamais vāla platums, kas nosaka, kādā mērogā ir iespējams izmantot viena uzņēmuma datus meža platību monitoringam tāpat, kā temporālajai izšķirtspējai, kas nosaka, pēc cik ilga laika kopš izmaiņu brīža būs iespējams veikt izmaiņu konstatēšanu (Balzter 2001).

1.1.SAR datu izmantošana mežsaimniecības procesu monitoringā

Mikroviļņu tālīzpētes sensoru (SAR) izmantošanas iespējas mežsaimniecībā tiek pētītas jau no 1978. gada jeb no pirmā SAR satelīta palaišanas kosmosā (Franklin 2001). Lai izprastu un kvantificētu meža stāvokli un tajā esošo procesu dinamiku gan reģionālā, gan globālā līmenī, mūsdienās arvien biežāk tiek izmantoti SAR sensori, jo SAR sensori ir spējīgi nodrošināt informāciju par dažādiem mežsaimniecības inventarizācijas parametriem neatkarīgi no laikapstākļiem un Saules spīdēšanas ilguma (Padalia, Yadav 2016). Līdz šim plaši pētījumi ir veikti par SAR sensora raidītā signāla, meža un to elementu mijiedarbību jeb SAR jutīgumu

pret mežaudzes raupjumu, meža dielektrisko konstanti, atsevišķu koku un vainagu orientāciju un mežaudzes tilpumu (Yunjin, Zyl 2001; Smith, Ulander 2000).

Pieaugot SAR satelītu skaitam, kuriem ir augsta telpiskā un temporālā izšķirtspēja (piemēram – Cosmo-SkyMed, TerraSAR-X, Sentinel-1), aktīvāk tiek veikti arī dažādi pētījumi, kuros tiek izpētīts, kā iespējams pielietot SAR sensorus mežu kartēšanā, meža platību izmaiņu konstatēšanā, biomasas aprēķināšanā, mežaudzes vecuma un koku augstuma noteikšanā (Santi et al. 2017). Kosmosā palaistie SAR satelīti ir aprīkoti ar dažādiem sensoriem, kuriem ir dažādas darbības joslas un polarizācijas veidi (Yunjin, Zyl 2001; Smith, Ulander 2000). Tieši tāpēc tiek izstrādātas metodikas, kuras parāda kā iespējams efektīvi pielietot dažādus sensorus, lai izzinātu svarīgus mežsaimniecības parametrus. Ir veikti vairāki pētījumi, kuros ir izpētīti un izveidoti dažādi algoritmi un metodes dažādu EM frekvenču (X, C, L un P) un polarizācijas veidu (HH, HV, VV un VH) un citu SAR sensoru parametru izskatīšana mežsaimniecības monitoringa veikšanai (Padalia, Yadav 2016; Santi et al. 2017; Yunjin, Zyl 2001; Smith, Ulander 2000). Jaunu SAR sensoru palaišana kosmosā veicina arī jaunu zinātnisku pētījumu attīstību. Tā rezultātā mežsaimniecības nozare gūst labumu, jo tiek izstrādātas jaunas SAR datu pielietošanas iespējas un metodes (Padalia, Yadav 2016; Santi et al. 2017).

SAR sensori ir inovatīvs un efektīvs risinājums uzticamai mežu teritoriju kartēšanai un novērošanai. Izmantojot SAR, tiek veidotas globāla mēroga meža klasifikācijas kartes, pēc kurām tiek veikta meža platību izmaiņu analīze. Pirmā ar SAR sensoru globāla mēroga meža platību karte tika izveidota no L-joslas ALOS PALSAR sensora datiem, izmantojot atpakaļ atgrieztās enerģijas intensitātes izmaiņas HV polarizācijā (Shimada et al. 2014). Globāla mēroga meža platību kartēšana un pētījumi notiek izmantojot arī citus SAR sensorus. Vairāki pētījumi ir pierādījuši, ka ir iespējams veikt meža kartēšanu izmantojot TanDEM-X misijas satelītu (TanDEM-X un TerraSAR-X) datus (Martone et al. 2018; Krieger et al. 2007; Schlund 2014; Martone et al. 2015). Vienu no šiem pētījumiem veica DLR Mikroviļņu un Radara institūts. Pētījuma veicēji globālo meža platību klasifikācijas mozaīku izveidoja, izmantojot sintezētās apertūras radara interferometrijas (InSAR) datus, ko nodrošina TanDEM-X misijas satelīti. Galvenais mērķis, lai veiktu pētījumu, bija iegūt laika ziņā konsekventus datus un ļoti precīzu 3D globālās reljefa virsmas modeli (DEM). Klasifikācijas nolūkos tika izmantoti vairāki novērojami elementi - kalibrētā amplitūda, DEM un interferometriskā koherence. Šos parametrus sistemātiski nodrošināja TanDEM-X sistēma. Starp vairākiem faktoriem, kas izraisīja un veicināja koherences pasliktināšanos, InSAR datus bija tilpuma korelācijas faktors, kas kvantitatīvi izsaka koherences zudumu tilpuma izkliedes dēļ. Tas parasti rodas vietās, kur virsmu sedz veģetācija. Tilpuma korelācijas koeficients ir tieši iegūstams no interferometriskās koherences, un tas ir viens no galvenajiem indikatoriem veģetācijas klāto platību

identificēšanai. Šī iemesla dēļ katram iegūtajam skatam atsevišķi tika pielietota izplūdušā vairāku klasteru klasifikācijas (angl. *fuzzy multi-clustering classification*) pieeja, kas ņem vērā ģeometriju un iegūšanas konfigurāciju. Starp dažādiem meža tipiem tika novērota zināma interferometriskās koherences mainība X-joslā galvenokārt sakarā ar meža struktūras, blīvuma un koku augstuma izmaiņām, kuru dēļ mainījās algoritmā ietvertie mainīgie atkarībā no attiecīgā meža veida. Gala rezultātā tika iegūta globālā meža platību klasifikācijas karte, kas, izmantojot ārējo atsauces informāciju un citas jau esošas mežu klasifikācijas kartes, tika apstiprināta kā relatīvi precīza, jo bieži vien sakrītība ar citām kartēm un ārējo informāciju pārsniedza pat 90%. Pētījumā tika izstrādātas augstas izšķirtspējas (12 m × 12 m) meža platību kartes, kas ir potenciāls datu avots, lai iegūtu datus par mežu izciršanas monitoringu atsevišķos reģionos (Martone et al. 2018). Ir veikti arī pētījumi un padziļināta TanDEM-X SAR funkciju izpēte, lai noskaidrotu, kāda ir šo datu nozīme meža kartēšanā un monitoringā (Schlund et al. 2014). Pateicoties meža augstuma parametriem, SAR sensori tiek izmantoti, lai kartētu meža sukcesijas pakāpes, kā arī lai kartētu tropiskos mežus, veidotu mežu tipu kartes un veiktu biomasas kartēšanu (Bispo et al. 2019; Rauste 2005; Reiche et al. 2013; Rignot et al. 1994).

Meža virszemes biomasas (AGB) ir svarīgs faktors, lai noteiktu veģetācijā uzkrātā oglekļa daudzumu, kas, savukārt, ir būtisks faktors, pēc kura var novērtēt klimata pārmaiņas (Santoro, Cartus 2018; Ghosh, Behera 2018). Starp visiem pieejamajiem tālizpētes datiem un metodēm – SAR datu apvienošana ar mašīnmācīšanās algoritmiem, ir sniegusi vienus no precīzākajiem mērījumiem, lai pilnvērtīgi novērtētu biomasas vērtības (Ghosh, Behera 2018; Cartus et al. 2019). Tādēļ ir veikti ļoti daudz pētījumi, kuros ir pierādīts un analizēts, ka ir iespējams pielietot dažādus SAR sensorus biomasas novērtēšanai un kādas ir pašas labākas metodes, lai iegūtu pēc iespējas precīzākus datus par biomasas apjomu (Santoro, Cartus 2018).

Ir izpētīta arī daudzfrekvences SAR datu izmantošana no dažādiem sensoriem (ALOS PALSAR un EnvSAT/ASAR), lai novērtētu meža biomasu Centrālītālījā (*San Rossore* un *Molise* reģionā), kur ir veikti detalizēti *in situ* mērījumi un aerolāzerskenēšana, kā arī pieejami šo mērījumu dati. Pētījums galvenokārt tika fokusēts uz krājas apjoma (m^3/ha) novērtēšanu, izmantojot inversijas algoritmu, kas tiek balstīts uz mākslīgo neironu tīklu. Mākslīgā neironu tīkla algoritms tika izveidots, izmantojot virszemes biomasas datus, kas iegūti no aerolāzerskenēšanas datiem. Pēc tam šī algoritma potenciāls tika uzlabots, inovatīvi izmantojot modelētu datu kopu, kas tika ģenerēta balstoties uz EM modeli, kas tika pamatots uz radiācijas pārneses teoriju. Pētījumā tika izveidots algoritms, kas ir spējīgs apvienot SAR datus L un C-joslā, lai prognozētu virszemes biomasas apjomu ar pietiekami lielu ticamību (Santi et al. 2017). Ir izstrādāti arī vairāki pētījumi, kuros, lai veiktu biomasu pētījumus, tiek izmantotas dažādu

SAR sensoru (TerraSAR-X un ALOS PALSAR) mikroviļņu joslas (X un L-josla) un LiDAR dati (Lohberger et al. 2011). Lai novērtētu biomasas apjomu, SAR dati mēdz tikt kombinēti ar radiometru datiem. Šādi tas tika darīts pētījumā, kurā veica tropisko mežu biomasas apjoma novērtēšanu, izmantojot multispektrālā radiometra Landsat TM un JERS-1 SAR datus (Cutler et al. 2012). Papildus biomasas krājas pētījumiem, SAR tiek izmantoti, lai noteiktu koku augstumu un novērtētu stumbru tilpumu (Kumar et al. 2017; Santoro et al. 2018). Regulāri tiek veikti analītiski pētījumi, kuros tiek veikta SAR sensoru un dažādu metožu analīze, piemēram, kāda ir biomasas un InSAR attiecības blīvā tropu mežā un kāda ir atpakaļ atgrieztās intensitātes attiecības ar mežu biomasu (Solberg et al. 2017; Luckman et al. 1997). Pētījumos ir pierādījis, ka SAR sensoru dati ir efektīvi un potenciāli datu avoti gan globālā, gan lokālā mērogā meža virszemes krājas noteikšanai. Tāpēc, piemēram, SAR sensori tiek izmantoti, lai pētītu Sibīrijā esošos mežus un novērtētu tur esošo virszemes krāju (Thiel, Schullius 2016).

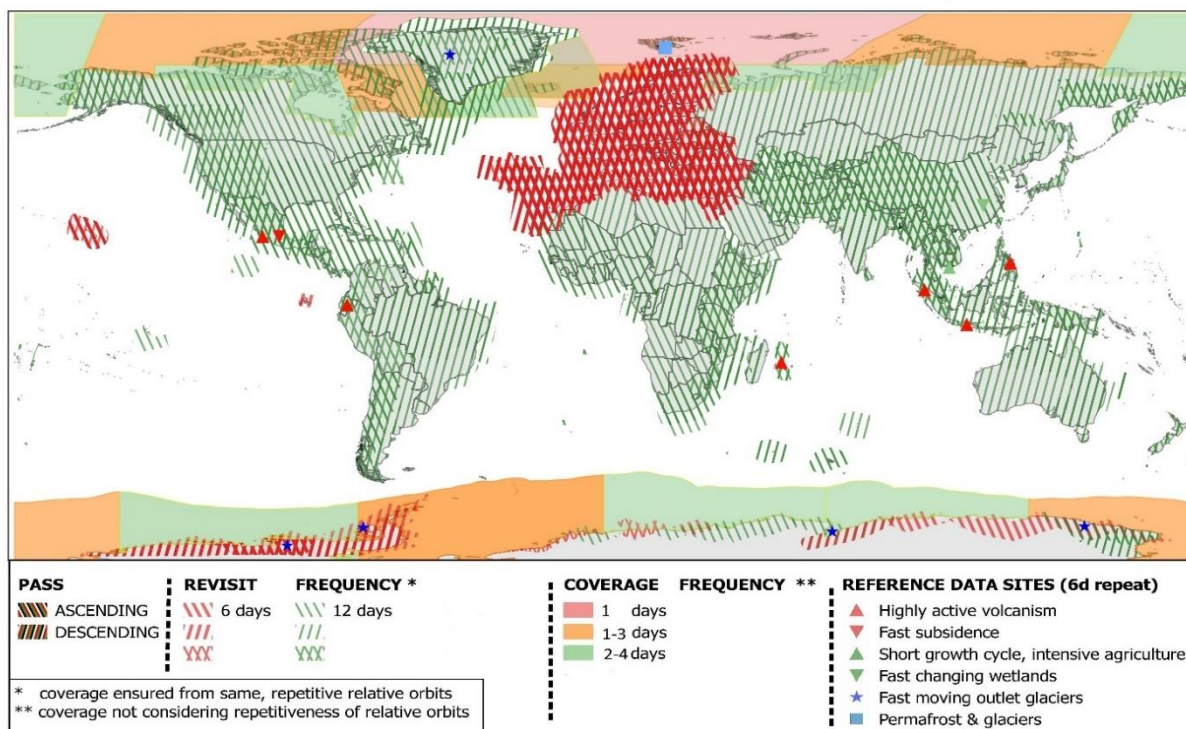
Regulāra kailciršu karšu atjaunošana ir svarīga mežā veikto darbību regulēšanai - īpaši operatīvai nelikumīgo cirsmu konstatēšanai (Smith, Askne 1997). SAR ir efektīvs datu avots, lai pētītu izmaiņas meža platībās un ir veikti vairāki pētījumi, kuru gaitā ir pierādīta SAR sensoru lietderība kailciršu konstatēšanā un kartēšanā. (Khati et al. 2018). Norvēģijas dienvidaustrumos tika veikts pētījums, lai noteiktu veiktās kailcirtes laika posmā no 2000. līdz 2011. gadam. Pētījums tika veikts, lai noskaidrotu vai kailciršu teritorijas ir iespējams noteikt, konstatējot virsmas augstuma samazināšanos, izmantojot TanDEM-X sensora datus un digitālas virsmas modeli (DSM), kas ir iegūts SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) misijas laikā. Lai novērtētu šīs metodes precizitāti, tika izmantoti SRTM X-joslas un C-joslas dati, kas reprezentē augstumu pirms mežizstrādes veikšanas. Digitālās virsmas modeļa izmaiņas 11 gadu griezumā tika interpolētas 10 m x 10 m rastrā, un rastrā tika ietverti mežaudzes aprēķinātie vidējie izmaiņu radītāji. Balstoties uz samazinātajām DSM sliekšņa vērtībām, pikseli un mežaudžu teritorijas tika iedalītas divās kategorijās: "kailcirte" un "nav kailcirte". Ar mērķi pārbaudīt pētījuma gaitā izveidoto klasifikāciju – tā tika salīdzināta ar mežizstrādes uzskaitē pierēģistrētajām kailciršu teritorijām laika periodā no 2000. līdz 2011. gadam. Klasifikācijas precizitāte tika novērtēta kā diezgan laba, jo pareizi tika noteiktas 59% - 67% no kailciršu teritorijām. Rezultāti, kas iegūti ar X-joslas SRTM sensoru, bija tikai nedaudz labāki nekā ar C-joslu iegūtie. Pētījumā secināts, ka izmantojot SRTM un TanDEM-X datu kombināciju, ir iespējams izveidot globālu datu kopu un tādejādi arī veikt plaša mēroga izcirtumu kartēšanu (Solberg et al. 2013). Ir veikts pētījums, kurā tika izmantoti TerraSAR-X satelītuzņēmumi, lai veiktu mežizstrādes jeb kailciršu monitoringu. Šajā pētījumā tika salīdzinātas teritorijā esošas cirsmas ar satelītuzņēmumos izdalītajām desmit teritorijām, kurās tika konstatētas cirsmas noteiktajā laika periodā. Viens no pētījuma secinājumiem ir, ka,

samazinoties entropijai un palielinoties koherences rādītājiem, X-joslas dati var tikt izmantoti cirsmu konstatēšanā (Molinier et al. 2008). Līdzīgas metodes ir izmantotas arī, lai veiktu cirsmu teritoriju konstatēšanu ar citiem SAR sensoriem kā, piemēram, ar ALOS-2 un PALSAR-2 sensoriem. Izmantojot šo satelītu datus tika novērtēts SAR parametru jutīgums mijiedarbojoties ar kailciršu teritorijām, kā rezultātā tika noskaidrots, ka atpakaļ atgrieztā šķērspolarizētā HV mikroviļņu intensitāte un entropijas parametrs ir visjutīgākais mijiedarbojoties ar kailciršu teritoriju. Entropijas vērtību sliekšņa klasifikācija tika veikta, lai ar lielāku precizitāti identificētu skaidras kailciršu teritorijas (Khati et al. 2018). Līdzīgi pētījumi, kuros novērtē uz sensoru atpakaļ atgrieztās intensitātes apjomu, ir veikti saistībā arī ar meža kaitēkļu un vējgāžu noteikšanu, bioloģiskās daudzveidības novērtēšanu, mežu degradācijas dinamikas monitoringu, lai novērtētu mežu ugunsgrēkos skartās teritorijas un to atjaunošanos, un lai veiktu meža monitoringu un scenāriju modelēšanu, kā arī lai veiktu regulāru telpisko un temporālo mežu kartēšanu (Tanase et al. 2018; Joshi et al. 2015; Bae et al. 2019; Mitchell et al. 2017; Koyama et al. 2019; Thapa et al. 2013; Tanase et al. 2011).

Nepārtraukti tiek veikti dažādi pētījumi, kas analizē, pēta un pierāda, ka, izmantojot SAR sensorus, ir iespējams veikt gan biotisko, gan abiotisko, gan antropogēno faktoru ietekmes novērtēšanu uz mežaudzēm. Tieši tāpēc arvien vairāk meža monitoringā tiek izmantoti SAR dati. Tas ir arī viens no iemesliem, kāpēc EKA pašlaik strādā pie septītās zemes pētniecības misijas – BIOMASS. BIOMASS misijas galvenais mērķis ir noteikt meža virszemes biomasas izplatību, lai samazinātu neskaidrības, kas saistītas ar oglekļa krājumu un plūsmu aprēķiniem, kas saistīti ar zemes biosfēru, zemes izmantošanas izmaiņām, mežu degradāciju un mežu atjaunošanos. Lai sasniegtu šo mērķi, pirmo reizi Zemes orbītā palaidīs pilnībā polarimetrisku P-joslas SAR. Misijas ietvaros tiks nodrošināti trīs galvenie produkti: virszemes biomasas, meža augstuma globālās kartes ar telpisko izšķirtspēju 200 m un spēcīgu mežu traucējumu kartes ar 50 m izšķirtspēju. Satelīta palaišana ir paredzēta 2022. gadā, taču pētījumi un metodes, kuras paskaidro, kā būs iespējams izmantot šo SAR sensoru, ir izstrādātas jau tagad (Quegan et al. 2019). Tāpat arī 2021. gada nogalē vai 2022. gada sākumā kosmosā tiks palaists Indijas Kosmosa izpētes organizācijas (Indian Space Research Organization) un ASV Nacionālās aeronautikas un kosmosa administrācijas (NASA) sadarbības projektā radītais polarimetriskais SAR satelīts NISAR, kas nodrošinās L un S-joslās datus, ka rezultātā varēs veikt dažādu meža slāņu monitoringu (Reiche et al. 2018; Kobayashi et al. 2019).

1.2. Sentinel-1 misija un tās datu izmantošana mežsaimniecības procesu monitoringā

Eiropas Kosmosa aģentūra Copernicus programmas ietvaros Zemes orbītā ir palaisti divi mākslīgie pavadoņi, kas nodrošina vēl nepieredzētu apjomu ar datiem, kuriem ir augsta temporālā (6 – 12 dienas) un telpiskā (5 – 40 m) izšķirtspēja (Moreno et al. 2012; Bae et al. 2019). Copernicus programmas gaitā tika izstrādāta Sentinel-1 misija, kuras ietvaros kosmosā tika palaisti divi duāli polarizēti sintezētās apertūras radari, kas iegūst informāciju C-joslas (~5,6 cm) mikroviļņu diapazonā – Sentinel-1A (orbītā tika palaists 2014. gadā) un Sentinel-1B (orbītā tika palaists 2016. gadā) (Torres et al. 2012; Dostálová et al. 2018; Dostálová et al. 2016). Satelīti nodrošina plašu ģeogrāfisko pārklājumu un datus, kas Eiropas Komisijas programmas Copernicus datu atvērtās piekļuves politikas dēļ ir brīvpieejami, tāpēc tie plaši tiek izmantoti dažādu pētījumu veikšanā visā pasaulē (Bae et al. 2019). Sentinel-1 biežā laika rindu pieejamība ļauj iegūt un analizēt signāla atstarojumu, lai veiktu meža izmaiņu monitoringu un kartēšanu, kā arī zemes pārklājuma klasifikāciju (1.3. attēls) (Olesk et al. 2015; Balzter et al. 2015; Antropov et al. 2015; Dostálová et al. 2018; Bae et al. 2019). Ir veikti daudz pētījumi, kas pierāda, ka, izmantojot Sentinel-1 datus, var veikt precīzu meža izmaiņu un procesu monitoringu, taču datu potenciāls ir ievērojams, kas rezultējas vēl unikālos un nebijušos pētījumos (Reiche et al. 2018).



1.3. attēls. Sentienl-1 misijas datu iegūšanas un uzņemšanas biežums (European Space Agency 2019)

Sentinel-1 dati tiek izmantoti, lai veiktu meža platību kartēšanu un meža veidu klasifikāciju. Par to ir veikti vairāki pētījumi (Dostálová et al. 2016; Dostálová et al. 2018). Meža platības, izmantojot satelīta datus, var iegūt pielietojot standarta metodes. Vienā no pētījumiem ir izmantota Otsu – automātiskā sliekšņa vērtības noteikšanas metode, kas ietver atkārtosanos caur visām sliekšņa vērtībām un izrēķina pikseļu līmeņa izkliedes mēru katrā sliekšņa vērtības pusē un nosaka, vai vērtības ietilps priekšplānā vai fonā. Metodes mērķis ir atrast sliekšņa vērtību, kur priekšplāna un fona vērtības sadalījuma summa ir minimāla. Pētījumā ir izmantota arī vidējā K (angl. *K-means*) klasteru - datu kopa atkārtoti tiek grupēta klasteros pēc objektu tuvākas atrašanās klastera centram, analīze (Xu et al. 2011; Dostálová et al. 2016). Sentinel-1 dati, kas tika ievākti 2014. – 2015. gada ziemas sezonā Austrijas austrumos, tika izmantoti, lai iegūtu meža platību maskas ar telpisko izšķirtspēju 10 m un minimālo kartēšanas vienību 500 m². Meža platību maskas sakritība ar lāzerskenēšanas datiem atklāj, ka kopējā pētījuma pareizība var sasniegt pat 92%. Pētījumā tika secināts, ka Sentinel-1 dati un izstrādātās metodes ir piemērotas ikgadēju meža izmaiņu noteikšanai (Dostálová et al. 2016).

Precīza mežaudzes vidējā augstuma un virszemes biomasas kartēšana ar augstu telpisko izšķirtspēju ir svarīga, lai veiktu oglekļa krājumu un plūsmas uzraudzīšanu, mainīgumu un tendenču novērošanu. Ir veikti pētījumi, kuri apliecina, ka ar Sentinel-1 (SAR) un Sentinel-2 (multispektrālie sensori) misijas satelītiem ir iespējams veikt precīzus mežaudzes vidējā augstuma un virszemes biomasas mērījumus. Ir veikts pētījums, kurā virszemes biomasas apjoma un mežaudzes vidējo augstumu izdevās noteikt ar 10 m izšķirtspēju. Pētījums tika veikts par Ķīnas ziemeļaustrumos esošajiem mežiem, integrējot laukuma grafikus, Sentinel attēlus, topogrāfiskos datus un nacionālos ģeogrāfisko apstākļu uzraudzības sistēmas datus. Pirmkārt, tika iegūts telpiski nepārtraukts mežaudzes vidējā augstuma pārklājums, izmantojot empīrisko modeli, kas tika iegūts no Sentinel-1 enerģijas atstarojuma. Tāpat arī tika iegūts veģetācijas segas frakcijas mainīgums no multispektrālajiem Sentinel-2 jeb S-2 attēliem. Pēc tam tika izveidoti trīs virszemes biomasas novērtēšanas modeļi dažādiem meža tipiem, lai varētu lauka mērījums sasaistīt ar vidējo mežaudzes augstumu, biofizikālajiem mainīgajiem, spektrālās veģetācijas indeksu un topogrāfiskajiem mainīgajiem, izmantojot izlases meža (angl. *random forest*) algoritmu. Pētījumā tika noskaidrots arī tas, ka kartēšanas rezultāti ir precīzāki, izmantojot SAR atpakaļstarojumu VH polarizācijā, nekā VV polarizācijā. Turklāt trīs virszemes biomasas novērtēšanas modeļi, kuru pamatā ir trīs dažādi meža tipi, darbojas labāk nekā modelis, kas tika izveidots, grupējot visus meža tipus. Determinācijas koeficienta (R²) diapazons variēja no 0,69 līdz 0,74, kas apliecina, ka Sentinel-1 un Sentinel-2 datus var izmantot, lai veiktu biomasas un meža augstuma mērījumus (Liu et al. 2019). Analogi pētījumi

tika izstrādāti, lai veiktu Rietumāfrikas un Vjetnamas mežu virszemes biomasas novērtēšanu, izmantojot vairāku sensoru datu sinerģiju un mašīnmācīšanās algoritmus (Forkuor et al. 2020; Pham et al. 2019; Ghosh, Behera 2018).

Līdz šim tikai dažos pētījumos ir novērtēta multitemporālā SAR datu kopu izmantojamība meža fenoloģijas un sugu bioloģiskās daudzveidības kontekstā (Rüetschi et al. 2017; Mngadi et al. 2019; Bae et al. 2019). Taču ir veikti daži fenoloģijas pētījumi, kuri balstās uz Sentinel-1 datiem. Šāds fenoloģijas pētījums, izmantojot Sentinel-1 datus, tika veikts par Francijas reģionā *Île-de-France* esošajiem mežiem. Pētījuma ietvaros sezonāli no 2015. gada marta līdz 2016. gada janvārim, tika veikts reģionā esošo mežu monitorings, kā arī analizēta radara atpakaļ saņemtā atstarojuma intensitāte. Radara dati satur informāciju par atstarojuma koeficientu un temporālā interferometriskās koherences profila amplitūdu attiecībā pret vides mainīgajiem kā, piemēram, *in situ* pētījumos iegūtajiem datiem, nokrišņu un temperatūras datiem. Augstā temporālā izšķirtspēja, datu iegūšanas ātrums, apstrāde un duālā konfigurācija ir iemesls, kāpēc tieši Sentinel-1 nodrošina būtiskus datus, lai novērotu meža fenoloģijas izmaiņas. Tieši radara atstarojuma koeficienta attiecība VV un VH polarizācijā parādīja izteiktu sezonālītāti, kas bija saistīta ar veģetācijas fenoloģiju. Tas apstiprinājās arī kad dati tika salīdzināti ar normalizētās veģetācijas indeksa profiliem, kas tika iegūti no Landsat-8 datiem (Frison et al. 2018). Līdzīgi pētījumi ir veikti arī par jauktajiem mērenās joslas mežiem Šveicē. Veikto pētījumu rezultāti pierāda, ka C-joslas atstarojuma intensitātes datiem ir ievērojams potenciāls un tie papildina optiskos tālzipētes datus, to izmantošana ir veiksmīgi integrēta ekoloģiskiem pētījumiem un jauktu mežu kartēšanai (Rüetschi et al. 2017). Kā arī pētījumā, kura tika veikta meža sugu kartēšana, tika pierādīts, ka S-1 un S-2 datu īpašības ir spējīgas nodrošināt relatīvi ticamus rezultātus un ir iespējams noteikt meža klasifikāciju ar 87% ticamību (Mngadi et al. 2019).

Meža platību izmaiņu monitoringu ir iespējams veikt ar SAR Sentinel-1 sensoru, jo SAR attēlos meža izcirtumi uzrāda mazāku atpakaļ saņemtā atstarojuma intensitāti, kā arī uzrāda palielinātu interferometrisko saskaņotību. Tāpēc tika veikts pētījums, kurā, lai noskaidrotu Borneo salā esošo mežu izmaiņas laika periodā no 2017. gada līdz 2018. gadam, tika veikta Sentinel-1 laika rindu analīze, kurā tika izpētīti un apvienoti SAR interferometriskie rādītāji. Pētījuma rezultāti liecina, ka, izmantojot vienkāršus uz koeficienta logaritma balstītus izmaiņu rādītājus, konstatēšanas metodes darbojas līdzīgi kā sarežģīti meža izmaiņu detektēšanas algoritmi. Lai salīdzinātu 2017. gada vidējās kombinētās vērtības ar 2018. gada vidējām kombinētajām vērtībām, tika izveidota logaritma koeficienta metode, kas plaši tiek pielietota, lai noteiktu izmaiņas SAR attēlos, jo veicot logaritmisko transformāciju var ne tikai pārveidot multiplikatīvo troksni (atkarīgs no sistēmas stāvokļa) adiatīvā troksnī (neatkarīgs no sistēmas stāvokļa), bet arī saspīest diapazona vērtības (Zhuang et al. 2019; Durieux et al. 2019).

Izmantojot šo metodi, tika konstatētas 20 000 jaunas neapmežotas vietas, kuru kopējā platībā bija 3000 km². Pētījumā tika noskaidrots, ka, izmantojot SAR datus, lai novērotu izmaiņas meža platībās, ir iespējams sasniegt lielāku precizitāti, nekā izmantojot Landsat datus, kurus plaši izmanto visā pasaulē, lai veiktu meža izmaiņu detektēšanu (Durieux et al. 2019). Kailcirtes un mežizstrādes darbība izraisa viskrasākās izmaiņas, kas ietekmē meža platības. Tieši tāpēc Somijā tika veikts pētījums, kura gaitā tika izstrādāts algoritms priekš cirsmu platību izraisīto izmaiņu telpiskās kartēšanas. Tā rezultātā tika pierādīts Sentinel-1 laika rindu potenciāls izcirtumu kartēšanai (Antropov et al. 2016). Pētījumā, kas tika veikts par Bolīvijas mežiem, pierādījās, ka Sentinel-1 dati ir pietiekami precīzi, lai veiktu meža cirsmu kartēšanu, kā arī tas, ka neapmežotās teritorijas ar S-1 sensoru, tika savlaicīgāk konstatētas nekā tas tika izdarīts izmantojot Landsat un ALOS-2/PALSAR-2 datus (Reiche et al. 2018). Ir veikts pētījums, kura gaitā ir izstrādā arī pavisam jauna pieeja, lai veiktu selektīvās mežizstrādes konstatēšanu, izmantojot Sentinel-1 SAR viena gada laika rindas, pamatojoties uz mūsdienu mākoņdatošanu programmu Google Earth Engine (GEE) un automatizētu algoritmu (Shimabukuro et al. 2019).

Pētījumu rezultāti liecina, ka Sentinel-1 datiem ir augsts potenciāls mežsaimniecības procesu, bioloģiskās daudzveidības un dažādu abiotisko un biotisko faktoru konstatēšanā un monitoringā, un tuvākajā nākotnē to analizēšanai tiks pielietoti dažādi elektromagnētiskie modeļi (Durieux et al. 2019; Frison et al. 2018). Tā pat tiek uzskatīts, ka drīz Sentinel-1 dati tiks patstāvīgi un plaši izmantoti, lai veiktu gan globālu, gan reģionālu, gan lokālu meža platību monitoringu pateicoties to brīvpieejamībai, augstajai telpiskajai un temporālajai izšķirtspējai un lielajam vāla platumam (Mngadi et al. 2019).

2. MEŽSAIMNIECĪBAS MONITORINGS LATVIJĀ

Latvijā meži 2019. gadā aizņēma 3285 tūkst. ha no kopējās valsts platības. No tiem valsts pārvalda un apsaimnieko 1519 tūkst. ha jeb 46,2% no visu mežu platības, savukārt, pārējiem īpašniekiem pieder 1766 tūkst. ha jeb 53,8% no visu mežu platības (LR Centrālā statistikas pārvalde 2019a). Latvija ir viena no mežiem bagātākajām valstīm Eiropā, jo meža platība aizņem 53% no visas valsts teritorijas. Ir svarīgi atzīmēt, ka meža platības nepārtraukti turpina palielināties, jo lauksaimniecībā neizmantotās zemes pamazām aizaug, kā arī notiek mākslīgā apmežošana (Meža nozare skaitļos un faktos 2020; LR Centrālā statistikas pārvalde 2019a). Mežā uzkrātās koksnes apjoms jeb krāja pieaug trīs reizes straujāk nekā meža platības. 2019. gadā mežos uzkrātās koksnes apjoms sasniedza 679 milj. m³. Šie fakti liecina, ka Latvijā tiek veikta mērķtiecīga mežsaimnieciskā darbība (Meža apsaimniekošana S.a.; Meža nozare skaitļos un faktos 2019). Šī iemesla dēļ regulāri ir jāveic meža platību monitorings un meža inventarizācijas.

Meža resursu monitorings atbild par meža sektora plānošanu, statistikas datu apkopošanu, resursu pieejamības analizēšanu, prognožu sastādīšanu, ilgtspējīgu, kā arī ekonomiski pamatotu meža izmantošanas un prognozēšanas modeļu izstrādi un citām valsts līmeņa meža resursu analīzēm. Nacionālo meža monitoringu veic LVMI "Silava" saskaņā ar Meža likumu 29.1 pantu (Nacionālā meža .. 2012). LVMI "Silava" jau kopš 2004. gada vienmērīgi veic visas valsts teritorijas meža resursu monitoringu. Kā rezultātā tiek iegūta informācija par meža platību, meža koksnes resursu struktūru, dinamiku, meža ekosistēmas stāvokli, kā arī tiek iegūti dati par meža bojājumiem un to platību, un bioloģiskās daudzveidības apjomu. Meža resursu monitorings tiek veikts pēc parauglaukumu uzmērījumu metodes un darbs tiek organizēts piecu gadu ciklos. Tādejādi monitoringa cikla beigās tiek iegūta informācija par meža resursiem visā valsts teritorijā. Pēc cikla beigām tiek uzsākts nākamais meža resursu monitoringa piecu gadu cikls. Tā ietvaros secīgi tiek veikti pārmērījumi ierīkotajos parauglaukumos, kas ļauj iegūt informāciju par meža izmaiņām un to dinamiku (Nacionālā meža .. 2012; VARAM 2014).

No meža resursu monitoringa tiek iegūti mežsaimniecībā nepieciešamie pamatdati, kuri vēsta par platības izmaiņām, meža koksnes resursa apjomu un struktūru, dinamiku un arī atmirušo koksni. Iegūtie dati tiek izmantoti gan oficiālās meža statistikas vajadzībām (CSP), gan valsts līmeņa meža resursu analīzēm. MRM dati ir svarīgi un tos izmanto AS "Latvijas valsts meži", kā arī citi mežsaimniecības uzņēmumi un privātīpašnieki (VARAM 2014). Taču reģionāli un lokāli monitoringu veic AS "Latvijas valsts meži" un paši mežu privātīpašnieki, jo

informācija par meža stāvokli ir nepieciešama nepārtraukti, kā arī tā ir ļoti svarīga un nepieciešama ilgtspējīgai mežu apsaimniekošanai.

Tieši tāpēc arvien vairāk mežsaimniecības nozarē tiek integrētas dažādas inovatīvas metodes, ar kuru palīdzību tiek iegūta informācija par mežsaimniecības parametriem un tur notiekošajiem procesiem. Regulāri tiek veikti jauni pētījumi, kuros tiek izstrādātas rentablas metodes, ar kurām ir iespējams veikt Latvijā esošo mežu monitoringu un kartēšanu, izmantojot tālzipētes datus, kas spēj nodrošināt to, ka informācija par meža platībām ir pieejama patstāvīgi un nepārtraukti ar augstu telpisko izšķirtspēju un datu pārklājumu.

2.1. Mežsaimniecības monitorings, izmantojot tālzipētes metodes pašlaik un tā optimizācijas iespējas nākotnē

LVMI “Silava” 2019. gadā noslēdza 3. meža resursu monitoringa (MRM) ciklu (Lazdiņš, Lupiķis 2019). Lai veiktu monitoringu LVMI “Silava” Latvijas teritorijā ir izveidojusi patstāvīgu 4 x 4 km kvadrātisku parauglaukumu tīklu ar nejauši izvēlētu sākumpunktu. Parauglaukumi ir paredzēti, lai veiktu kopējo meža resursu novērtējumu valsts līmenī, jo cikla ietvaros netiek apsektas visas Latvijas meža platības, bet gan kopumā Latvijas teritorijā ierīkotie 16 157 patstāvīgie parauglaukumi, kuri vienmērīgi noklāj visu Latvijas teritoriju (Mūsu Latvijas .. 2019; LVMI “Silava” 2017). Katrs parauglaukums ik pēc 5 gadiem tiek apsektots dabā un tiek veikti lauka darbi. To ietvaros parauglaukumā tiek pārmērīti visi koki, kuriem ir noteikts attālums un azimuts no parauglaukuma centra (LVMI “Silava” 2017; LVMI „Silava” 2019). Tiek veikta analīze, cik koki ir nocirsti vai nozāģēti, cik ir gājuši bojā un cik turpina augt. Papildus tam tiek veikti arī koku augstuma mērījumi. Pēc tam tiek veikta paraugkopu analīze un tālāk pēc šie datiem tiek ģenerēta informācija par visas Latvijas teritorijas jeb ģenerālkopas meža resursu stāvokli (Mūsu Latvijas .. 2019; LVMI “Silava” 2017). Lauka darbos pielietotās metodes un iegūtie dati, protams, ir kvalitatīvs datu avots, taču mežu apsekošana un mērījumu veikšana ir laikietilpīga, tāpēc ar vien biežāk, lai veiktu operatīvu mežsaimniecības monitoringu, mežsaimniecības nozarē tiek integrētas tālzipētes metodes.

Latvijā meža attālās izpētes pirmsākumi saistās ar 1995. gadu, kad toreizējais Latvijas mežierīcības institūts bija dalībnieks kopprojektā ar Zviedrijas kosmosa izpētes uzņēmumu “Swedish Space Corporation”. Tādejādi Latvijā mežsaimniecībā sāka izmantot attēlu apstrādes programmatūras, kurās ir iespējams veikt meža nogabalu automātisku izdalīšanu satelītattēlos (LVMI „Silava” 2014). Šī attālās izpētes metode tiek izmantota arī mūsdienās. LVMI “Silava” tiek attīstīta meža resursu noteikšana balstoties uz pieredzi, kas iegūta no ārvalstīm, izmantojot

parauglaukumu metodi un ieviešot arvien vairāk elektroniskos mērinstrumentus un globālās navigācijas sistēmas. Sekojot tendencēm parauglaukumu mērījumu rezultāti tiek interpolēti dažādās programmatūrās, izmantojot satelītu attēlu apstrādes iespējas (LVMI “Silava” 2017). Mežzinātnes institūts ir veicis arī vairākus pētījumus, kas skaidro, kā ir iespējams izmantot multi un hiperspektrālos optiskos satelītu attēlus, un šie pētījumi ir integrēti LVMI “Silava” mežsaimniecības monitoringa veikšanai darbībā. Lai apstrādātu attēlus, tiek izmantoti pašu resursi. Pēc to apstrādes, tie tiek izmantoti:

- meža statistikās inventarizācijas parauglaukumu mērījumu interpolācijai;
- meža attālas inventarizācijas zinātniskās pētniecības projektiem;
- meža veselības stāvokļa zinātniskās pētniecības projektiem;
- CO₂ piesaistes aprēķiniem.

Satelīt dati tiek saņemti no: Landsat – Nasa, Spot Image Corporation, IRS (Awifs, Liis), DMC International Imaging Corporation, kā arī no Latvijas piegādātājiem SIA „Envirotech” un SIA „Baltic Satellite Imagery”. Jaunākajos pētījumos tiek izmantoti arī Eiropas Kosmosa aģentūras Sentinel-2 misijas dati (Liepiņš 2018; Ventspils augsto .. 2012; LVMI “Silava” 2018).

Valsts meža dienests (VMD), lai iegūtu informāciju par meža veselības stāvokli, cirsmu platībām un nesaskaņotām mežsaimniecības darbībām, veic kontroles apsekojumus dabā (Šogad septiņos .. 2019). Meža teritoriju uzraudzība tiek veikta izmantojot arī satelīt tehnoloģijas, lai īstenotu meža saimnieciskās darbības kontroli neveicot apsekojumus dabā. Satelītattēli tiek izmantoti, lai noteiktu, vai starp noteiktiem laika periodiem ir radušās izmaiņas. Dati tiek iegūti no “Landsat-NASA”, SpotImageCorporation (SPOT), DMC International Imaging. Lai veiktu mežu monitoringu un inventarizāciju, VMD tehnoloģiju attīstībā un to pielietojamība ikdienas darbā neatpaliek no mūsdienu tendencēm, jo tiek izmantoti arī bezpilota lidaparāti jeb droni, lai veiktu mežu monitoringu. Tie tiek pielietoti arī mežu ugunsgrēku gadījumos, lai apsekotu teritoriju (Grava 2019; Ventspils augsto .. 2012).

Valsts akciju sabiedrība “Latvijas valsts meži” (LVM) praksē izmanto satelīta datus un tehnoloģijas, lai veiktu meža bojājumu identificēšanu vietās un noteiktu šo bojājumu izplatības robežas. LVM satelīt tehnoloģijas izmanto arī lai: uzmērītu cirsmas ar GPS iekārtām, vienību, jaunaudžu un potenciālo krājas kopšanas ciršu apsekošanai, kā arī, lai pēc iespējas efektīvāk kontrolētu kokvedēju kustību mežā. Nevar nepieminēt arī GPS lomu, lai palīdzētu veiksmīgāk uzmērīt meža autoceļus inventarizācijas nolūkiem, kas palīdz noteikt un precizēt LVM apsaimniekošanā esošos autoceļus. Papildus tam satelīt tehnoloģijas dod pienesumu, lai precizētu konkrētu objektu atrašanos mežā un kā nokļūt līdz tiem. LVM GEO (ģeotelpiskās informācijas tehnoloģijas lietotne) Latvijas mežsaimnieciskās darbības atbalstam ir izveidojuši

LiDAR vainagu virsmas modeli, LiDAR veģetācijas virsmas moduli un LiDAR zemes reljefa modeli. No izstrādātajiem modeļiem ir iegūstama informācija par mežaudžu vecumu, koku augstumu, mežaudze blīvumu, meliorācijas grāvju izvietojumu, gravām, reljefa īpatnībām un citiem raksturojošiem rādītājiem (Attālā izpēte S.a.). Lai veiktu vējgāžu postījumu apsekošanu, LVM izmanto bezpilota lidaparātus jeb dronus, jo vējgāžu postījumu apsekošana ir darbietilpīgs process. LVM cenšas sekot tālizpētes nozares jaunatklājumiem un aktuālākajām tendencēm, un mērķis ir tās realizēt un pielietot ikdienas darbā, lai nākotne uzlabotu darba efektivitāti (Mākslīgais intelekts .. 2018).

Pēdējo gadu laikā Latvijā ir ievērojami pieaugušas iespējas veikt mežsaimniecības monitoringu izmantojot satelītdatus, jo ir pieejami Eiropas Kosmosa aģentūras satelītu sistēmas Sentinel dati. LVMI “Silava” ir izstrādāti un tiek izstrādāti pētījumi, kuros tiek izmantoti optiskie multispektrālie Sentinel-2 un Sentinel-1 dati. No optiskajiem Sentinel-2 datiem tiek iegūtās laika rindas, kas tiek izmantotas meža veselības monitoringam un veģetācijas indeksu aprēķināšanai, taču Sentinel-1 SAR datu izmantošanas iespējas tiek vēl pētītās vējgāžu novērtēšanai un koku augstumu rādītāju iegūšanai. Pašreizējo pētījumu mērķis ir kompleksi, balstoties uz Sentinel datiem un MRM datiem, izveidot datu bāzi ar visas valsts teritorijas zemes lietojuma un mežaudžu kartēm (LVMI “Silava” 2017a). Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē (LU ĢZZF) arī ir veikti pētījumi, kas apliecina tālizpētes metožu izmantošanu mežsaimniecības monitoringā. Piemēram, 2018. gadā tika publicēti pētījumi (Birzgale 2018), kurā tika pētīta hiperspektrālo datu izmantošana egļu (lat. *Picea abies*) sakņu trupes identifikācijai. LU ĢZZF 2018. gadā tika publicēti arī pētījumi (Cimdiņš 2018), kas pierādīja, ka ir iespējams veikt mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu ar SAR Sentinel-1 misijas datiem, ja laikapstākļi kontroles perioda laikā ir stabili.

3. MATERIĀLI UN METODES

Lai sasniegtu bakalaura darbā izvirzīto mērķi un būtu iespējams veikt telpisko analīzi un kvantitatīvo datu iegūšanu, lai varētu veikt kailciršu konstatēšanu un izveidotu modeli, kas paredz intensitātes izmaiņas, ko rada laikapstākļu ietekme jeb dielektriskās konstantes izmaiņas, pētnieciskajā darbā tika izmantotas, tādas metodes, kā monogrāfiskā jeb aprakstošā metode – veicot zinātniskās literatūras izpēti, kā arī netiešā datu iegūšanas metode, jo darbā galvenie datu avoti ir SAR tālīzpētes dati un ERA5-Land klimatiskās reanalīzes datu kopas dati. Pētnieciskā darba mērķa īstenošanai tika izmantota arī matemātiski statistiskā metode, lai veiktu daudzfaktoru regresijas analīzi, korelācijas novērtēšanu, datu normalitātes jeb normāla sadalījuma pārbaudi un datu salīdzināšanu, kā arī datu jeb rezultātu interpretācijas metode.

3.1. Pētāmā teritorija

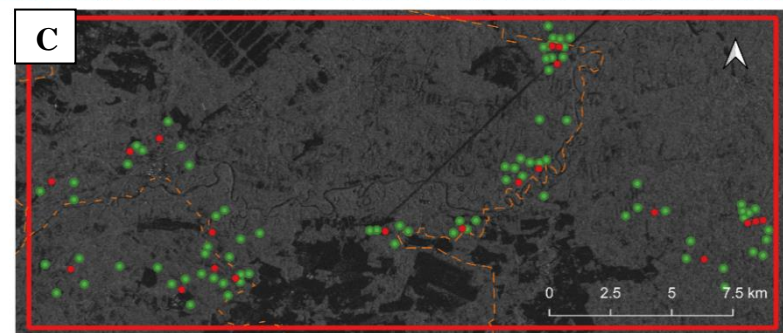
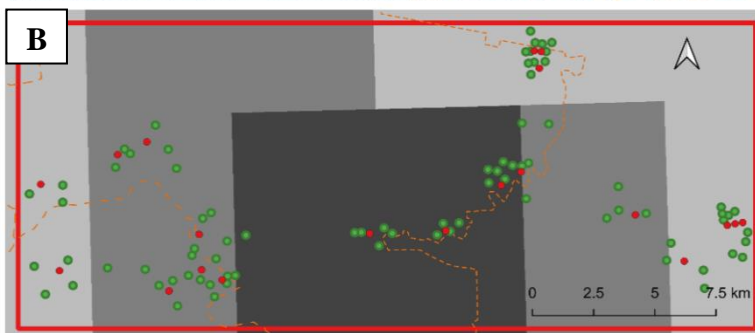
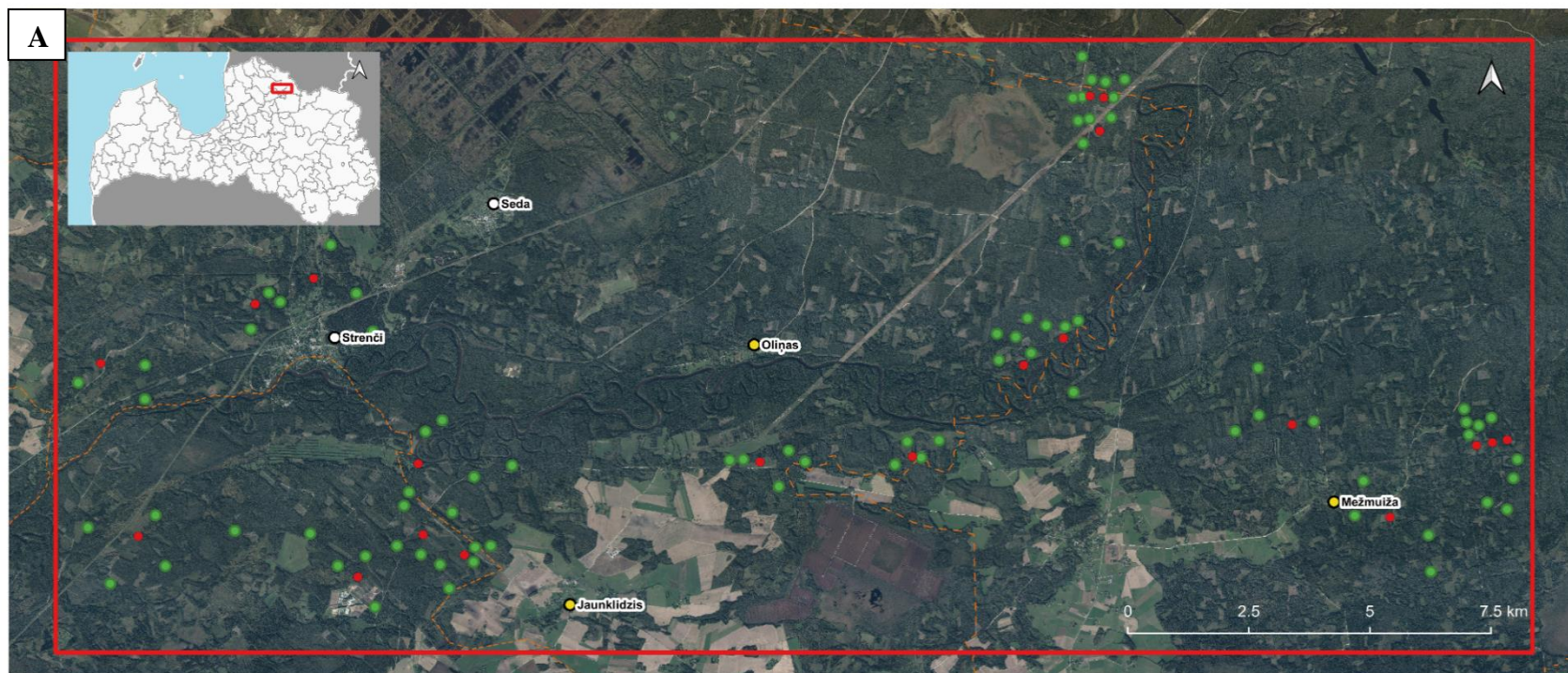
Bakalaura darba izpētes teritorija atrodas Ziemeļvidzemē – Strenču, Beverīnas un Valkas novadā. Pētāmās teritorijas izpētes poligoni atrodas Vidusgaujas mežainē un Sedas purvainē, Gaujai blakus esošajos meža masīvos. Kopējā pētāmās teritorijas platība (cirsmu jeb etalonteritoriju un mežsaimnieciski neskarto jeb references teritoriju platību kopsumma) ir 271,8 ha (3.1. attēls).

Lai sasniegtu bakalaura darbā izvirzīto mērķi tika analizētas intensitātes izmaiņas divdesmit 2019. gadā veiktās cirsmu teritorijās un astoņdesmit references teritorijās jeb vietās, kur 2019. gadā netika veikta mežsaimnieciskā darbība. Dati par divdesmit faktiskās mežizstrādes teritorijām jeb cirmsmām un to veikšanas brīdi (datumu), platību un lokāciju tika iegūti no SIA “PATA Strenči” mežsaimniecības un mežizstrādes uzņēmuma (1. pielikums). References teritoriju dati tika iegūti veicot divu Sentinel-2 satelītu uzņēmumu salīdzināšanu, kas nosedz visu kontroles periodu jeb laiku, kad ir veikta mežsaimnieciskā darbība divdesmit etalonteritorijās, manuāli digitalizējot pēc platības un meža tipa līdzīgus meža apgabalus, kuros nav veikta mežsaimnieciskā darbība (2. pielikums).

Cirsmu teritoriju platība variē diapazonā no 0,8 līdz 5 ha, un to vidējā platība ir 2,3 ha, taču mežsaimniecības neskarto teritoriju platības variē no 0,66 līdz 7,42 ha un to vidējā platība ir 2,8 ha. Izvēlētajās teritorijās 93,3% no platības aizņem skujkoku meži, bet 6,7% jauktā tipa meži (3. pielikums; 4. pielikums).

Bakalaura darba pētītās mežsaimnieciski neskartās teritorijas tika izvēlētas pēc vairākiem kritērijiem. Viens no kritērijiem bija to atrašanās vieta, jo, lai leņupielādējot un apstrādājot datus

nepārslogotu datu apstrāde programmatūras un ierīces, references teritorijas tika izvēlētas tā, lai visa pētāmā teritorija atrastos viena satelītuzņēmuma robežās un nebūtu jāveic papildus ģeometriskā korekcija, kas būtu jāveic satelīta maršruta skata punkta izmaiņu dēļ. Tāpat arī teritorijas tika izvēlētas netālu no cirsmu etalonteritorijām, lai varētu pēc iespējas precīzāk novērtēt līdzīgos apstākļos esošo cirsmu un kontroles periodā neskarto meža teritoriju intensitātēs izmaiņas un to korelāciju ar laikapstākļiem. Vēl viens kritērijs, kas tika izmantots, lai izvēlētos pētāmo teritoriju, ir laiks, kad ir veikta mežsaimnieciskā darbība, jo, lai iegūtu objektīvus rezultātus par intensitātes izmaiņām references teritorijas, tika izvēlētas periodā, kad tika veikta mežsaimnieciskā izstrāde kailcirtēs.



Apzīmējumi

- pilsēta
- cirkas nogabals
- novada robeža
- ciems
- references nogabals
- ▭ pētāmā teritorija

3.1. attēls. (A) Mežizstrādes un mežsaimnieciski nesarkto teritoriju novietojums. (B) Pētāmā teritorijā un ERA5-Land (rasas punkta temperatūra (°C) 2 m augstumā 07.03.2019) dati. (C) Pētāma teritorija un Sentinel-1 (VH polarizācija 07.03.2019) datu piemērs (izstrādājusi autore, izmantojot SIA “Envirotech” GIS Latvija 10.2 datu bāzi 2013, LĢIA 6.cikla ortofotokarti 2017, Copernicus klimata datu krātuves ERA5-Land datus 2019, Copernicus atvērtās datu bāzes Sentinel-1 datus 2019)

3.2. Darbā izmantotās datu iegūšanas un apstrādes programmatūras

SNAP ir brīvpieejas programmatūra, ko nodrošina EKA priekš Sentinel misijas (gan SAR, gan optisko satelītu) datu apstrādes (Delgado-Blasco et al. 2019). Pētnieciskajā darbā SNAP 7.0.3. (*Sentinel Application Platform*) programmatūra tika izmantota, lai veiktu S-1 datu apstrādi un aprēķinātu intensitātes izmaiņas VV un VH polarizācijā, kā arī, lai izveidotu S-2 infrasarkanos attēlus, kas tika izmantoti references teritoriju dešifrēšanai.

Pētnieciskajā darbā tika izmantotas arī ģeogrāfiskās informācijas programmas – QGIS 3.10. un GRASS GIS 7.8.1., kas paredzētas dažādu veidu ģeogrāfisko datu apskatīšanai, glabāšanai, analīzei, pārvaldībai un sagatavošanai (Madeiros, Pires 1994). QGIS 3.10. programmatūra tika izmantota, lai veiktu cirsma dešifrēšanu 04.02.2020. Sentinel-2 infrasarkanajā attēlā, kā arī references teritoriju atlasī un dešifrēšanu, izmantojot Sentinel-2 infrasarkanos attēlus, kas tika uzņemti 23.08.2018. un 04.02.2020. (2. pielikums). QGIS 3.10. programmatūra tika izmantota arī, lai veiktu vektora datu izveidošanu, platību aprēķināšanu un karšu sagatavošanu. Programmatūrā tika aprēķinātas arī radara datu intensitātes vidējās vērtības un Nesterova indeksa vērtības gan references teritorijām, gan cirsēm, pirms un pēc notikuma. Rastra datu vidējās vērtības vektora faila ietvaros tika aprēķinātas izmantojot *Zonal Statistics* komandu, kas aprēķina statistiskās vērtības rastra pikseļiem noteiktā poligonā.

Lai veiktu rastra datu apgriešanu jeb robežpikseļu noņemšanu Sentinel-1 datiem un to vērtības nerobežotos ar vektora faila robežlīniju, kur datu vērtības mēdz būt kļūdainas un tādejādi vidējo vērtību aprēķini var būt neprecīzi, tika izmantota GRASS GIS 7.8.1. programmatūra un Python 3.7.0. programmēšanas vide. PyGRASS 3.7.0., kas ir Python aplikāciju programmēšanas saskarsne (API) ar GRASS ģeogrāfiskās informācijas sistēmu, tika importēts komandrindu fails, kas atlasa no kodā definētas direktorijas Sentinel-1 *.tif* formāta datus un tiem atbilstošos vektora datus *.shp* formātā. Komandrindā tika dota komanda *v.to.raster*, kas pārveido (veic rasterizāciju) vektora datus uz rastra datiem. Tālāk tika dota komanda *r.grow*, kas ģenerē rastra kartes slāņa paplašināšanu jeb šūnas pieaudzēšanu, bet tā kā bija nepieciešams noņemt uz vektora robežas esošos pikseļus, tika norādīts negatīvs paplašinājums (*radius = -1.01*), kā rezultātā visas pikseļu vērtības, kas atrodas ārpus vai uz vektora robežlīnijas tika nomaskētas. Tālāk komandrindā tika dota, komanda *r.out.gdal*, kas eksportēja jauniegūtos rastra datus bez robežpikseļa vērtībām *.tif* formātā (5. pielikums).

Bakalaura darba pētnieciskā darba darbību automatizēšanā tika izmantota Python un R programmēšanas valoda un dažādi interpretatori jeb vides, caur kurām komandas tika izpildītas, kā, piemēram, Anaconda Python 3.7.7. vidē, Jupyter Notebook 6.0.3., PyGRASS 3.7.0. un RStudio 1.2.5042. programmēšanas vide. Anaconda Python 3.7.7. paplašinājums un Jupyter

Notebook 6.0.3. vide tika izmantota, lai veiktu ERA5-Land datu lejupielādi noteiktam laika periodam un atrašanās vietai, kā arī, lai veiktu Nesterova indeksa aprēķināšanu (6. pielikums; 7. pielikums). RStudio 1.2.5042. atvērtā koda programmatūra, tika izmantota, lai izveidotu daudzfaktoru regresijas modeļus un uzzinātu, cik lielu daļu no rezultatīvās pazīmes nosaka faktoriālās pazīmes jeb cik liela ir laikapstākļu komponentu ietekme uz intensitātes izmaiņām, pārbaudītu datu sadalījumu un veiktu modeļa rezultātu novērtēšanu ar Vilkoksona testu (angl. *Wilcoxon test*), kas tiek dēvēts arī par Manna-Vitnija testu (angl. *Mann-Whitney test*) (8. pielikums; 9. pielikums). Tāpat arī RStudio programmatūrā tika izveidoti grafiki.

Lai uzglabātu, organizētu un veiktu aprēķinus tika izmantota Microsoft Office 365 Excel programmatūra. Excel programmatūrā tika veikta arī datu un rezultātu vizualizācija.

3.3. ERA5-Land dati

Meteoroloģiskie dati, kas bija nepieciešami, lai aprēķinātu Nesterova indeksu un izveidotu modeli, tika iegūti no Eiropas vidēja termiņa laika prognožu centra (*ECMWF*) klimatiskās reanalīzes datu kopas ERA5. Klimata reanalīze apvieno iepriekš veiktos meteoroloģiskos novērojumus ar modeļiem, lai ģenerētu konsekventas laika rindas ar dažādiem klimata mainīgajiem rādītājiem (*Climate reanalysis S.a.*). ERA5 izmanto labākos pieejamos novērojumu datus no satelītiem un *in situ* stacijām, kas ir asimilēti un apstrādāti, izmantojot *ECMWF* integrēto prognožu sistēmu (*IFS*). ERA5 datu kopa ir papildināta ar zemes virsmas ERA5-Land datu kopu, kas nodrošina datus ar $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ telpisko izšķirtspēju un 1 h temporālo izšķirtspēju. Datu kopā meteoroloģiskie dati ir pieejami ar 2 līdz 3 mēnešu nobīdi (Yang, Giusti 2020).

ERA5-Land datu kopas dati tika iegūti no Klimata datu krātuves (*Climate data store – CDS*), ko ir izveidojuši Copernicus Klimata pārmaiņu pakalpojuma (*Copernicus Climate Change Service (C3S)*) sniedzēji. Meteoroloģisko datu lejupielāde tika veikta izmantojot Anaconda Python 3.7.7. interpretatoru un *.py* failu ar komandu rindu, kurā ir definēta noteikto meteoroloģisko datu – temperatūras $^\circ\text{C}$ 2 m augstumā (plkst. 12:00), rasas punkta temperatūras $^\circ\text{C}$ 2 m augstumā (plkst. 12:00) un nokrišņu daudzuma mm (visa diena), lejupielāde dienu pirms satelīts ir veicis teritorijas uzņemšanu, pētāmās teritorijas areālā (10.pielikums).

3.4. Tālīzpētes dati un to apstrāde

Pētījumā tika izmantoti Eiropas Komisijas Copernicus programmas Sentinel-1 un Sentinel-2 dati, ko nodrošina EKA. Sentinel-1 SAR dati tika izmantoti, lai iegūtu kvantitatīvus

datu par intensitātes izmaiņām mežsaimnieciskās izstrādes teritorijās un references teritorijās, kur noteiktajā laika periodā netika veikta mežsaimnieciskā darbība. Sentinel-1 dati tika iegūti pirms un pēc notikuma jeb īsi pirms kailcirtes veikšanas un nedaudz pēc kailcirtes veikšanas (3.1. tabula). Šie paši uzņēmumi, kas tika izmantoti, lai veiktu cirsmu izmaiņu konstatēšanu, tika izmantoti arī, lai veiktu intensitātes izmaiņu novērtēšanu kontroles periodā 80 mežsaimnieciski neskartajās references teritorijās. Taču optisko satelītu Sentinel-2 dati jeb satelītuzņēmumi tika izmantoti, lai veiktu cirsmu un references teritoriju dešifrēšanu (2.pielikums).

3.1. tabula

Mežsaimnieciskās darbības un atbilstošā SAR satelītuzņēmuma veikšanas laiks (izmantojot SIA "PATA Strenči" mežsaimniecības uzņēmuma sniegtos datus un Copernicus atvērtās datu bāzes Sentinel-1 datus 2019)

Cirsmas Nr.	Zāģēšanas uzsākšanas datums	SAR attēla datums pirms cirsmas veikšanas	S-1 misijas satelīts	Orbīta	Zāģēšanas beigu datums	SAR attēla datums pirms cirsmas veikšanas	S-1 misijas satelīts	Orbīta
1	26.02.2019	23.02.2019	1A	80	02.03.2019	07.03.2019	1A	80
2	22.02.2019	16.02.2019	1A	153	26.02.2019	28.02.2019	1A	153
3	16.09.2019	15.09.2019	1A	80	20.09.2019	21.09.2019	1B	80
4	07.03.2019	28.02.2019	1A	153	08.03.2019	12.03.2019	1A	153
5	22.09.2019	20.09.2019	1A	153	24.09.2019	27.09.2019	1A	80
6	05.10.2019	03.10.2019	1B	80	08.10.2019	09.10.2019	1A	80
7	20.09.2019	15.09.2019	1A	80	21.09.2019	27.09.2019	1A	80
8	26.03.2019	24.03.2019	1A	153	28.03.2019	31.03.2019	1A	80
9	10.10.2019	09.10.2019	1A	80	12.10.2019	14.10.2019	1A	153
10	05.03.2019	28.02.2019	1A	153	06.03.2019	07.03.2019	1A	80
11	07.10.2019	03.10.2019	1B	80	10.10.2019	14.10.2019	1A	153
12	13.10.2019	09.10.2019	1A	80	15.10.2019	20.10.2019	1B	153
13	05.10.2019	03.10.2019	1B	80	07.10.2019	08.10.2019	1B	153
14	29.09.2019	27.09.2019	1A	80	02.10.2019	03.10.2019	1B	80
15	01.11.2019	27.10.2019	1B	80	02.11.2019	07.11.2019	1A	153
16	17.03.2019	12.03.2019	1A	153	18.03.2019	19.03.2019	1A	80
17	01.03.2019	28.02.2019	1A	153	02.03.2019	07.03.2019	1A	80
18	09.03.2019	07.03.2019	1A	80	10.03.2019	12.03.2012	1A	153
19	28.10.2019	27.10.2019	1B	80	29.10.2019	01.11.2019	1B	153
20	15.04.2019	12.04.2019	1A	80	17.04.2019	24.04.2019	1A	80

3.4.1. Sentinel-1 datu raksturojums

Pētījumā ir izmantoti Sentinel-1A un Sentinel-1B SAR C-joslas mikroviļņu dati, kuri tika iegūti no Copernicus atvērtās piekļuves datu centra mājaslapas. Lai veiktu atsevišķu notikumu analīzi jeb cirsma konstatēšanu kopumā tika lejupielādēti 22 dažādu datumu satelītattēli, kas ir uzņemti neilgi pirms un pēc mežizstrādes veikšanas, sākot ar 16.02.2019. un beidzot ar satelītuzņēmumu, kas ir veikts 07.11.2019. (2. pielikums). Visi satelītuzņēmumi tika lejupielādēti, kad sensors pārvietojās pa dienvidiem - ziemeļu jeb dilstošo (angl. *descending*) maršrutu, lai datos nebūtu būtiski ģeometriskie sagrozījumi, ko rada virziena izmaiņas. Pētījumā izmantotie satelītuzņēmumi ir uzņemti no 80 un 153 relatīvās orbītas un visa pētāmā teritorija ir redzama datu sloksnē Nr. 2, kur skata leņķis mainās 29,1° (tuvais) līdz 46° (tālais) diapazonā. Satelītuzņēmumi pēc vietējā laika ir uzņemti laikā no 07:32 līdz 07:42.

Sentinel-1 satelīta sensors ir spējīgs iegūt datus četros dažādos režīmos. Pētījumā tika izmantoti Interferometric Wide swath (IW) režīma dati, kas ir paredzēti uz Zemes notiekošo izmaiņu novērošanai. IW režīmā vāla (angl. *swath*) platums ir 250 km un azimutālā izšķirtspēja ir 20 m, bet Zemes diapazonā izšķirtspēja ir 5 m, kas kopā nodrošina telpisko izšķirtspēju 5 m x 20 m. EKA pirms satelītuzņēmumu ieviešanas Copernicus atvērtās piekļuves datu mājaslapa veic pirmapstrādi jeb datu korekciju, kā rezultātā ir iespējams lejupielādēt dažāda līmeņa apstrādes produktus, kuriem ir veiktas dažādas korekcijas. Darbā tika izmantoti 1. apstrādes līmeņa produkti – GRD (angl. *Ground Range Detected*). GRD produkti sastāv no fokusētiem SAR datiem, kam ir veikta *multi-looking* korekcija, kas palielina radiometrisko un samazina telpisko izšķirtspēju, aprēķinot un ģenerējot vidējās vērtības diapazona un azimuta izšķirtspējas šūnām, kā rezultātā tiek iegūts satelītattēls ar pikseļu izmēru 10 m x 10 m. GRD dati ir projicēti uz Zemes virsmas izmantojot Zemes elipsoīda modeli WGS84 (Sentinel-1 S.a.).

3.4.2. Sentinel-1 datu pirmapstrāde

Lai gan 1. līmeņa datiem ir veikta pirmapstrāde, lai tos izmantotu pētījumā ir jāveic papildus standarta pirmapstrāde, kas veic datu reljefa un radiometrisko īpašību korekciju. Papildus apstrāde tika veikta SNAP 7.0.3. (*Sentinel Application Platform*) programmatūrā. Datu apstrādes procesa automatizēšanai tika izveidots komandrindu fails *.xml* formātā, kas tika integrēts apstrādes sistēmā. Komandrinda tika izveidota, lai apstrādātu vairākus Sentinel-1

satelītuzņēmumus, nepieļaujot kļūdas, kas iespējams rastos, ja process tiktu darīts manuāli. Pirmapstrādes darbplūsma sastāv no deviņiem apstrādes posmiem (3.2. attēls).



3.2. attēls. Sentinel-1 GRD produkta pirmapstrādes darbplūsma

Pirmā pirmsapstrādes komanda *.xml* failā ir *Read*, šī komanda ir paredzēta, lai norādītu un atlasītu failus, kurus ir nepieciešams tālāk apstrādāt pirmapstrādes procesā. Komandā tiek norādītas no Copernicus atvērtās datu piekļuves mājaslapas lejupielādētās direktorijas, kuras satur satelītuzņēmumus un to metadatus (2.pielikums).

Tālāk komandrindā tiek dota komanda *Subset*, kas veic rastra datu apgriešanu pēc ģeogrāfiskajām koordinātām, kas tiek ievadītas *.wkt* jeb Well-Known Text formātā. Ģeogrāfiskās koordinātas *.wkt* formātā tika iegūtas QGIS 3.10. programmatūrā ar WKT spraudni (angl. *plugin*), kas nolasīja jau iepriekš izveidota vektora faila (poligona), kas ietver visu pētāmo teritoriju, ģeogrāfiskās virsotnes. Šis apstrādēs ķēdes posms ir būtisks, jo veicot apgriešanu ir iespējams samazināt datu apjomu, kā rezultātā tiek veikta darba optimizācija un samazināta datu apstrādes procesa slodze programmatūrai.

Pēc tam komandrindā tiek dota komanda *Apply Orbit File*, kas veic orbītas faila korekciju. Orbītas stāvokļa vektoru informācija, kas ir ietverta SAR produkta metadatu informācijā parasti nav precīzi. Precīzs satelīta orbītu stāvoklis tiek noteikts tikai pēc vairākām dienām un informācija par to ir pieejamas vairākas dienas vai pat nedēļas pēc produkta uzņemšanas. Darbinot šo komandu tiek automātiski lejupielādēta un atjaunināta informācija par orbītas stāvokli, katrai SAR ainai, ko satur produkta metadati, kā rezultātā tiek nodrošināta precīza satelīta atrašanās vietas un ātruma informācija.

Sentinel-1 satelītuzņēmumu intensitātes datus ietekmē aditīvs termiskais troksnis (angl. *thermal noise*), kas rodas mikroskopisku elektronisku kustību rezultātā, tieši tāpēc nākamā komanda apstrādes procesā ir *Thermal Noise Removal*, kas veic termālā trokšņa noņemšanu (Filipponi 2019).

Nākamā komanda komandrindā ir *Calibration*, kas veic radiometrisko kalibrēšanu. Radiometriskā kalibrēšana ir process, kurā digitālo šūnu vērtības tiek radiometriski kalibrētas par σ^0 vērtībām. σ^0 vērtības norāda intensitātes stiprumu jeb vides atstarošanās spēju. σ^0 vērtības

variē mainoties skata leņķim, viļņa garumam, polarizācijas veidam un izkliedes virsmas īpašībām (Portnoi 2017; Filipponi 2019).

Tālāk darbplūsmā tika dota komanda *Speckle Filtering*, kas veic traipu filtrēšanu. Traipi (angl. *speckle*), kas ir SAR attēlos, ir punktveida tekstūras sagrozījumi, kas radušies vilnim izkļiedējoties pret dažādiem elementiem un tiekot reģistrētam vienas šūnas ietvaros, kā rezultātā tiek izmainītas patiesās šūnas vērtības. Tāpēc ir svarīgi veikt traipu filtrēšanu agrīnā SAR pirmapstrādes stadijā, jo tādejādi punktveida tekstūras sagrozījumi nevar ietekmēt nākamo apstrādes procesu darbību rezultātus (t.i. pirms reljefa korekcijas un datu konvertācijas) (Filipponi 2019). Traipu filtrēšanu var veikt izmantojot dažādus apstrādes filtrus, kas parasti sastāv no kustīga attēla šūnu (pikseļu) loga (piemēram 3x3 vai 5x5), kas pārvietojas pa katra attēlā šūnu (pikseli) un veic matemātiskus aprēķinus. Visbiežāk filtri, izmantojot pikseļa vērtības, aprēķina zem kustīgā loga esošo vidējo vērtību un aizstāj centrālā pikseļa vērtības ar aprēķināto vidējo vērtību. Viens no visbiežāk izmantotajiem filtriem, tā precīzās vizuālās interpretācijas dēļ, ir *Lee Sigma* filtrs, jo tas saglabāt datu struktūru, lineārās pazīmes, kā arī punkta un tekstūras informāciju (Filipponi 2019; Meyer 2019). Šis filtrs tika izmantots arī pētījuma SAR datu apstrādei ar kustīga pikseļa loga izmēru 5x5 pikseli.

Tālāk komandrindā tiek dota komanda *Terrain Correction*, kas veic reljefa korekciju. Reljefa korekcija ir jāveic tādēļ, ka SAR dati tiek iegūti no slīpa skata leņķa, kā rezultātā attēlā ir dažādi ģeometriskie sagrozījumi, kas savukārt izraisa kļūdainas atstarojuma vērtības (Filipponi 2019). Šī komanda ļauj labot ģeometriskos sagrozījumus izmantojot dažādus (arī lokālo) DEM. SNAP programmā automātiski piedāvā veikt korekciju ar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) augstuma modeli. Korekcijas rezultātā katra pikseļa vērtībai tiek piešķirta precīzāka ģeolokācijas informācija. Pētījumā korekcija tika veikta izmantojot SRTM (3 sec) augstuma modeli un LKS92 / Latvia TM koordinātu sistēmu.

Parasti radarā esošās intensitātes vērtības variē plašā diapazonā, taču izteikti vairāk ir zemākas vērtības. Lai samazinātu vērtību diapazonu, uzlabotu attēla interpretēšanas spēju un samazinātu multiplikatīvo troksni, ir ieteicams veikt datu transformāciju no σ^0 vērtībām, kas izteikti variē mainoties skata leņķiem, viļņu garumam, polarizācijai un atstarošanās virsmas īpašībām, uz σ^0 dB vērtībām (Kellndorfer 2019; Filipponi 2019). Vērtību logaritmiskā transformācijā tiek veikta ar *Linear To From dB* komandu.

Darbplūsmas beidzamā komanda ir *Write*, kas veic faila saglabāšanu noteiktā direktoriņā BEAM-DIMAP (.dim) formātā ar jau iepriekšējās komandās veiktajām datu korekcijām.

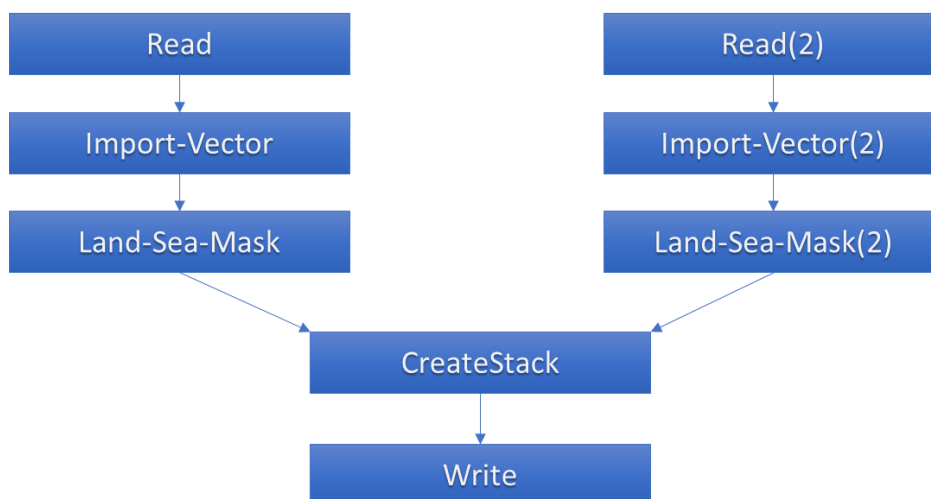
Izveidotais .xml komandrindu fails tika importēts SNAP programmatūras *Batch processing* logā, kas ir paredzēts dažādu apstrādes komandu virkņu automātiskai atpazīšanai, izpildīšanai un realizēšanai. *Batch processing* logā pēc komandrindas integrēšanas, tiek

integrēti arī Sentinel-1 dati un nospiežot pogu *Run* tiek veikta to vienlaicīga automātiska apstrāde (11. pielikums).

3.4.3. Sentinel-1 datu pielāgošana izpētes teritorijām un to intensitātes izmaiņu aprēķināšana

Lai veiktu atsevišķu notikumu analīzi jeb, lai aprēķinātu intensitātes izmaiņas star diviem Sentinel-1 uzņēmumiem, sākumā bija nepieciešams pielāgot Sentinel-1 rastra datus katras izpētes teritorijas lokācijai un izmēram. Sākumā, lai veiktu rastra datu apgriešanu, QGIS 3.10. programmatūrā sagatavotie vektora datu slāņi (*cirsmas.shp* un *references_teritorijas.shp*) tika sadalīti vairākos vektora datu slāņos, jo katrs slānis saturēja vairākas ģeometriskas vienības, kas reprezentē cirsmas un mežsaimnieciski neskartās teritorijas, bet atsevišķu notikumu analīzē, katrs izpētes poligons tiek analizēts neatkarīgi no citiem. Tāpēc QGIS 3.10. programmatūrā attiecīgie slāņi (*cirsmas.shp* un *references_teritorijas.shp*) ar *Split vector layer* funkciju, tika sadalīti vairākos neatkarīgos vektora datu slāņos.

Sentinel-1 datu pielāgošana cirmām un references teritorijām tika veikta SNAP 7.0.3. programmatūra. Lai automatizētu darbību tika izveidota komandu rinda *.xml* formātā, līdzīgi, kā tas tika darīts, lai veiktu pirmapstrādi. Komandrinda sastāv no sešām dažādām komandām, taču trīs no tām dublējas un darbojas paralēli, lai beigās izveidotu vienu datu pāri, kurā pēc vektora datu slāņa ir apgriezti rastra dati abiem Sentinel-1 datu pāriem, kas reprezentē sākuma un beigu datumu (3.3. attēls).



3.3. attēls. Sentinel-1 datu pielāgošana izpētes teritorijām un datu apvienošanas darbplūsma

Pirmā darbplūsmas komanda *.xml* failā ir *Read*, ar šo komandu tiek atlasīts faili. Pirmajā *Read* komandrindā tiek definēts, lai tiek atlasīts fails, kas satur informāciju par situāciju pirms

tika veikts notikums, taču otrajā *Read(2)* komandrindā tiek definēts satelītuņņēmums, kas satur informāciju jeb intensitātes izmaiņas pēc notikuma (12. pielikums).

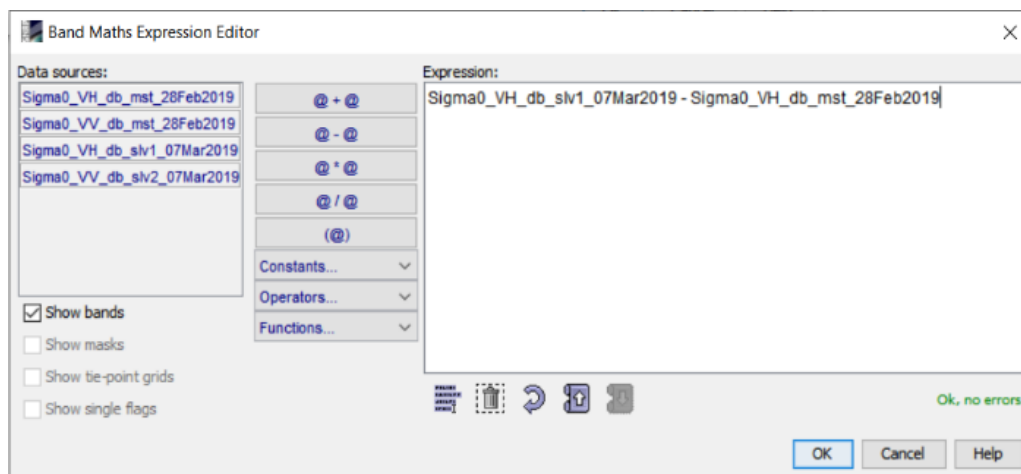
Tālāk tiek dota komanda *Import-Vector*, kas veic vektora failu jeb ģeometrijas importēšanu. Šeit tiek definēti vektora dati, kas atbilst iepriekš *Read* komandā definētajiem satelītattēliem. Abās *Import-Vector* komandās tiek definēts viens vektora slānis, jo tiek veikta intensitātes izmaiņu analīze pirms un pēc par vienu konkrētu teritoriju.

Tālāk *.xml* failā tiek dota komanda *Land-Sea-Mask*, kas pēc importētā vektora slāņa noteiktajām robežām veic vērtību nomaskēšanu. Pēc *Land-Sea-Mask* komandas veikšanas, tiek iegūts satelītuņņēmums, kurā tikai šūnām, kas atrodas vektora faila iekšpusē vai uz tā robežās ir vērtības, pārējās vērtības ir nomaskēts (piešķirta NaN vērtība).

Kad abi satelītattēli satur informāciju tikai par vērtībām, kas atrodas viena vektora datu ietvaros un uz tā robežas, ar komandu *CreateStack* tiek ģenerēts to pāris jeb abi attēli tiek reģistrēti viena produkta ietvaros, kā rezultātā tiek iegūts *.dim* fails ar četriem kanāliem – VH (pirms), VV (pirms), VH (pēc), VV (pēc).

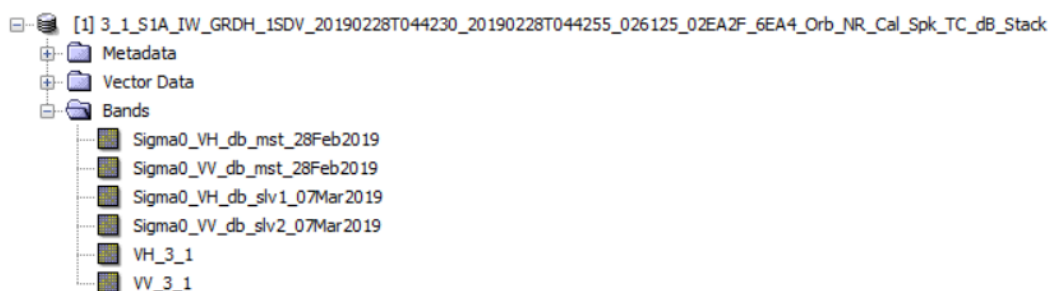
Tālāk komandrindā tiek dota komanda *Write*, kas veic jauniegūtā četru kanālu *.dim* faila saglabāšanu. Fails satur informāciju par intensitāti noteiktajai izpētes teritorijai pirms un pēc notikuma abās polarizācijas (VH un VV).

Tālāk SNAP programmatūras ietvaros izmantojot 20 cirsma *.dim* failus un 80 references *.dim* failus, kas satur informāciju par intensitāti pirms un pēc notikuma, tika veikti intensitātēs izmaiņu aprēķini. Intensitātēs izmaiņas tika aprēķinātas izmantojot SNAP programmatūrā esošo *BandMath* rīku, atņemot pirms notikuma VH polarizācijas SAR uzņēmumu no VH polarizācijas SAR uzņēmuma, kas ticis veikts pēc notikuma, un tā pat arī VV gadījumā, pirms notikuma uzņēmums tika atņemts no pēc notikuma uzņēmuma, kā rezultātā produktā tika izveidoti vēl divi kanāli, kas satur informāciju par intensitātes izmaiņu vērtībām poligona ietvaros (3.4. attēls).



3.4. attēls. Intensitātēs izmaiņu aprēķināšanas piemērs SNAP 7.0.3. programmatūrā

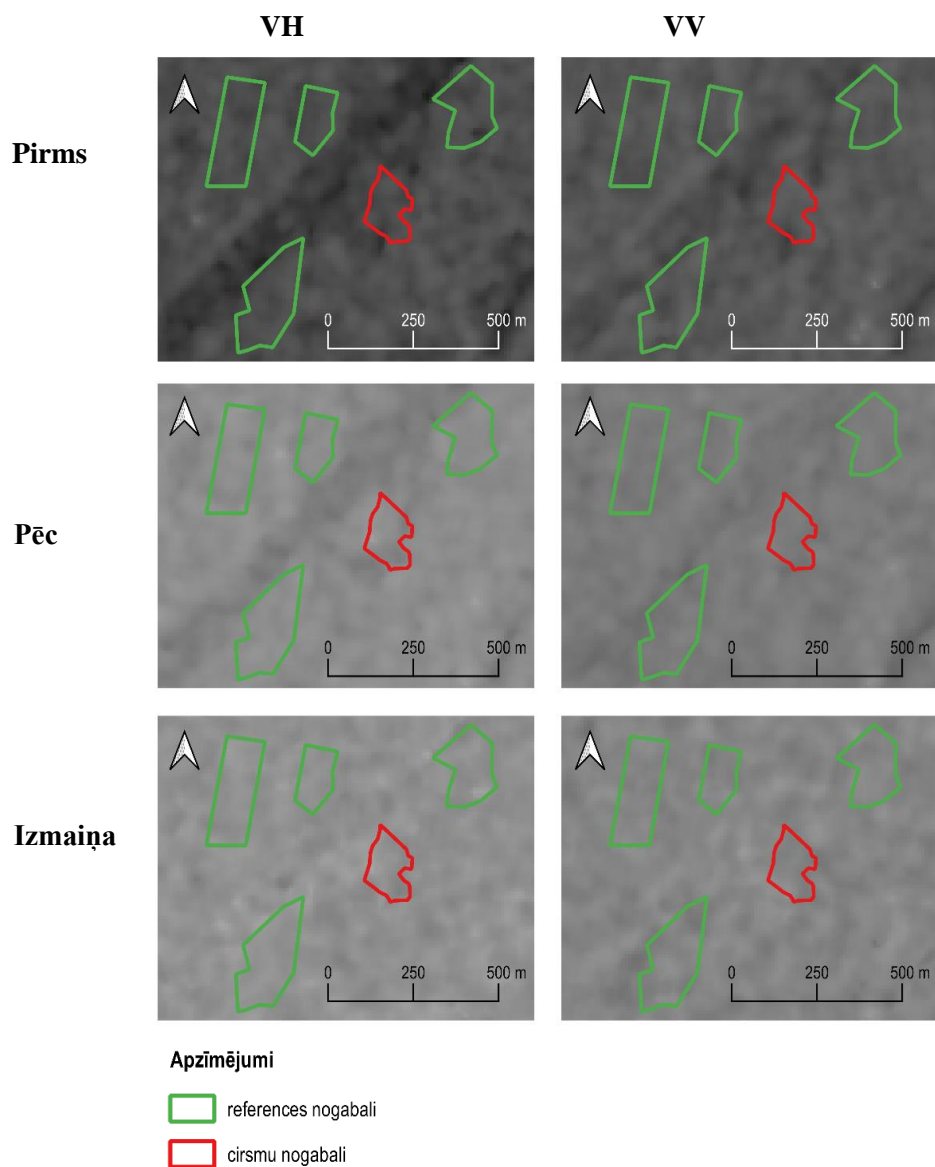
Aprēķinātie intensitātes izmaiņu kanāli, tika pārveidoti par joslām izmantojot komandu *Convert Band*, kā rezultātā viens faila ietvaros tika izveidotas seši slāņi jeb joslas (3.5. attēls).



3.5. attēls. Vairāku Sentienl-1 joslu/kanālu datu piemērs

Tālāk katrs sešu joslu fails, izmantojot *Export* komandu, tika eksportēts mapē, kā vairāku kanālu/joslu GeoTIFF fails, kas satur informāciju par intensitāti pirms notikuma VH un VV polarizācija, intensitāti pēc notikuma VH un VV polarizācija un par intensitāte izmaiņām VH un VV polarizācijā (3.6. attēls).

Satelītattēli *.tif* formātā tika importēti QGIS 3.10. programmatūrā, kur ar *Zonal statistic* spraudni, kas ir paredzēts, lai aprēķināt rastra slāņa pikseļu statistiskās vērtības izmantojot vektora datu slāņus, tika aprēķinātās vidējās intensitātes un to izmaiņu vērtības. Lai automatizētu darbību tika izmantots *Batch processing* apstrādes ietvars, kas ļauj veikt vairāku failu un vektora datu apstrādi vienlaicīgi. Vidējās vērtības tika aprēķinātās vektora slāņa ietvaros un atribūtu tabulā automātiski tika pievienoti seši jauni lauki, kuros bija katra kanāla poligona vidējas vērtības. Tālāk, kad visiem attiecīgajiem cirsma un references teritoriju izpētes poligoniem bija aprēķinātas rastra sešu kanālu vidējās vērtības vektora faila ietvaros, izmantojot *Merge vector layer* tika apvienoti visi references teritoriju *.shp* faili un visi cirsma *.shp* faili. Un izmantojot MMQGIS spraudni cirsma un references teritoriju atribūtu tabulas tika eksportētās *.csv* formātā. Tālāk šajās *.csv* tabulās tika veikti tālākie aprēķini.



3.6. attēls. Sentinel-1 datu piemērs. VH un VV polarizācijas intensitāte pirms notikuma, pēc notikuma, to izmaiņas (izveidojusi autore, izmantojot SNAP 7.0.3. programmatūru un Copernicus atvērtās datu bāzes Sentinel-1 datus 2019)

3.5. Laikapstākļu un radara atstarojuma intensitātes likumsakarību izpēte mežsaimniecības teritorijām

SAR dati par izmaiņām meža platībās ir iegūstami neatkarīgi no laikapstākļiem, taču ir pierādīts, ka laikapstākļi netiešā veidā ir spējīgi mainīt atpakaļ atstarotās enerģijas intensitāti (Olesk et al. 2015; Ang, Hobbs 2014; Cimdiņš 2018). Īpaši būtiska ir informācija par nokrišņu daudzumu un temperatūru pirms satelīta ir veicis teritorijas uzņemšanu un teritorijas uzņemšanas laikā, jo nokrišņu daudzums var būtiski mainīt augu, materiālu vai virsmas dielektrisko konstanti. Kompleksa dielektriskā konstante ir virsmas materiālu elektronisko

īpašību mērs, kas sastāv no divām daļām (caurlaidības un vadītspējas), kas ir atkarīgas no attiecīga materiāla mitruma satura (Radar Course 2 S.a.). Mitrākos apstākļos ir lielāka dielektriskā konstante, kā rezultātā arī palielinās atpakaļ saņemtās intensitātes vērtības jeb $\Delta\sigma^0$ un samazinās mikroviļņa iespēšanās spējas veģetācijas slāņos (Widhalm et al. 2017). Vairākos pētījumos ir pierādīts SAR sensoru jutīgums pret veģetācijas mitrumu. Dobson et al. (1991) pat konstatēja, ka starp divu C-joslas mikroviļņu SAR uzņēmumiem, starp kuru uzņemšanas laiku ir bijusi lietusgāze, skujkoku meža teritorijas intensitātes izmaiņas ir pat 2 līdz 3 dB (Dobson et al. 1991).

Ņemot vērā, ka literatūrā mitruma izmaiņas tiek minētas kā viens no galvenajiem atstarojuma intensitātes izmaiņu cēloņiem, darba izstrādes sākumā tika nolemts tām pievērst vislielāko uzmanību. Ņemot vērā līdzšinējos pētījumos konstatēto laikapstākļu ietekmi uz $\Delta\sigma^0$, kas apgrūtina patiesu izmaiņu nošķiršanu no laikapstākļu izraisītām īslaicīgām izmaiņām, darbā uzmanība tika koncentrēta uz modeļa izveidi, kas ļauj prognozēt izmaiņas $\Delta\sigma^0$ vērtībās pēc noteiktajiem meteoroloģiskajiem datiem, kas izsaka vides mitruma, tādejādi arī veģetācijas dielektrisko īpašību mēru. Pētījuma un modeļa izveide balstās uz fizikas formulas, kas skaidro atstarojuma intensitātes fizikālās komponentes (3.1.):

(3.1.)

$$\Delta\sigma^0 = n_1\sigma^0 - n_2\sigma^0 = \Delta\sigma^0_A + \Delta\sigma^0_G + \Delta\sigma^0_D + \varepsilon = \Delta\sigma^0_L + \Delta\sigma^0_S + \varepsilon,$$

kur

$\Delta\sigma^0$ – atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$n_1\sigma^0$ – atstarojuma intensitāte n_1 satelītuzņēmumā;

$n_2\sigma^0$ – atstarojuma intensitāte n_2 satelītuzņēmumā;

$\Delta\sigma^0_A$ – atmosfēras radītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_G$ – ģeometrijas radītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_D$ – dielektriskās konstantes izmaiņu radītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

ε – troksnis jeb nejaušie faktori;

$\Delta\sigma^0_L$ – laikapstākļu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_S$ – struktūras izmaiņu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas.

Funkcija skaidro, ka izmaiņas starp $n_1\sigma^0$ un $n_2\sigma^0$ ir vienādas ar $\Delta\sigma^0$, kas nozīmē, ka intensitātes izmaiņas starp diviem atsevišķiem vienas lokācijas satelītattēliem var iegūt satelītattēlu rastra datus atņemot vienu no otra. Atstarojuma intensitātes izmaiņas ($\Delta\sigma^0 > 0$) rodas, ja laika intervālā kopš abiem satelītuzņēmumiem ir notikušas kādas izmaiņas, jebkurā no to veidojošajām komponentēm — atmosfēras (σ^0_A), atstarojošās virsmas ģeometrijas (σ^0_G) vai atstarojošās virsmas dielektriskās konstantes (σ^0_D). Izmaiņas atstarojošās virsmas ģeometrijā ir

saistītas ar mežaudzes struktūras izmaiņām kā, piemēram, ja tiek veikta cirsma vai šajā laika periodā ir notikusi vējgāze, vai snieglauze, vai cita veida dabiskā vai mežsaimnieciskā darbība, kas maina mežaudzes struktūru un koki šajā teritorijā vairs neatrodas vertikālā stāvoklī, kas maina σ^0_G rādītājus. Īpaši svarīgi izmaiņas izsauc nokrišņi, kā rezultātā mainās augu dielektriskā konstante, kas, savukārt izmaina σ^0_D lielumu. Tāpēc īpaši svarīgi pirms SAR datu analīzes veikšanas ir veikt arī laikapstākļu analīzi. Taču ir daļa $\Delta\sigma^0$, ko nevar izskaidrot - šo daļu parasti sauc par troksni un to izraisa dažādi nejaušie faktori kā, piemēram, ja signālam priekšā ir kāds objekts, kas aizsedz staru. Tā kā troksnis (neizskaidrojamās izmaiņas) eksistē vienmēr, praktiskai SAR attēlu izmantošanai tiek pieņemts, ka tas ir būtiski mazāks par pārējo (izskaidrojamo) faktoru ietekmi, respektīvi (3.2.) (3.3.):

(3.2.)

$$\varepsilon \ll \Delta\sigma^0_A + \Delta\sigma^0_G + \Delta\sigma^0_D,$$

kur

ε – troksnis jeb nejaušie faktori;

$\Delta\sigma^0_A$ – atmosfēras radītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_G$ – ģeometrijas radītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_D$ – dielektriskās konstantes izmaiņu radītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

(3.3.)

$$\varepsilon \ll \Delta\sigma^0_L + \Delta\sigma^0_S$$

ε – troksnis jeb nejaušie faktori;

$\Delta\sigma^0_L$ – laikapstākļu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_S$ – struktūras izmaiņu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas.

Ņemot vērā, ka laikapstākļi var ietekmēt gan dielektriskās konstantes izmaiņu izraisītās izmaiņas ($\Delta\sigma^0_D$), gan ģeometrijas izmaiņu izraisītās izmaiņas ($\Delta\sigma^0_G$) piemēram, pēc lietus lapas un zari var noliekties uz leju), gan, protams, tiešā veidā reprezentējot arī atmosfēras izmaiņu komponenti ($\Delta\sigma^0_A$), $\Delta\sigma^0$ var izteikt arī kā laikapstākļu un ģeometrijas izmaiņu ietekmes summu (3.1.).

Tādējādi atstarojuma izmaiņas ($\Delta\sigma^0_I$) notikumu (cirsmu, vējgāžu) vietās var izteikt šādi (3.4.):

(3.4.)

$$\Delta\sigma^0_I = \Delta\sigma^0_L + \Delta\sigma^0_s + \varepsilon,$$

kur

$\Delta\sigma^0_I$ – atstarojuma intensitāte izmaiņas vietā, kur ir noticis notikums (cirsmā);

$\Delta\sigma^0_L$ – laikapstākļu izmaiņu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

$\Delta\sigma^0_s$ – struktūras izmaiņu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

ε – troksnis jeb nejaušie faktori.

Savukārt teritorijām, kur būtiskas izmaiņas meža struktūrā nav notikušas, $\Delta\sigma^0_s$ var pieņemt par 0 (3.5.):

(3.5.)

$$\Delta\sigma^0_N = \Delta\sigma^0_L + \varepsilon,$$

kur

$\Delta\sigma^0_N$ – atstarojuma intensitātes izmaiņas mežsaimnieciski neietekmētās teritorijās;

$\Delta\sigma^0_L$ – laikapstākļu izmaiņu izraisītās atstarojuma intensitātes izmaiņas;

ε – troksnis jeb nejaušie faktori.

Abas formulas skaidro, ka ja ir zināma $\Delta\sigma^0_L$ ir iespējams noteikt intensitātes izmaiņas, ko izraisa $\Delta\sigma^0_s$, jo uzzinot laikapstākļu ietekmi uz $\Delta\sigma^0_N$ jeb atstarojuma intensitāti mežsaimnieciski neietekmētās teritorijās ir iespējams prognozēt $\Delta\sigma^0_L$ ietekmi uz $\Delta\sigma^0_I$ jeb atstarojuma intensitāti vietās, kur ir veikta mežsaimnieciskā darbība. Protams, šis ir iespējams, kamēr ir spēkā (3.2.) un (3.3.) formulās izteiktā aksioma. No (3.4.) un (3.5.) formulām izriet, ka, lai noteiktu intensitātes izmaiņu, ko izraisa laikapstākļu ietekme uz veģetācijas atstarošanās spējām, ir jāveic laikapstākļu komponentu analīze pēc formulas (3.6.):

(3.6.)

$$\Delta\sigma^0_L = f(ERA - Land),$$

kur

$\Delta\sigma^0_L$ – laikapstākļu izmaiņu izraisītās atstarojuma intensitāte izmaiņas;

$f(ERA5 - Land)$ – funkcija no ERA5 izvēlētajiem laikapstākļu rādītājiem.

Lai novērtētu meža mitruma apstākļu izmaiņas laika posmam starp diviem satelītuzņēmumiem, tika nolemts izmēģināt izmantot Ņesterova indeksu. Tas ir PSRS

Hidrometeocentrā izstrādātais kompleksais ugunsbīstamības rādītājs. Ņesterova indeksa (3.7.) aprēķināšana balstās uz formulu (Jansons et al. 2015):

(3.7.)

$$NI = \sum_{i=1}^W T_i \times (T_i - Di),$$

kur

NI – Ņesterova indekss;

W – dienu skaits kopš lietus > 3 mm;

T_i – i -tās dienas pusdienas laika t (°C);

Di – i -tās dienas rāsas punkta t (°C).

Ņesterova indeksa aprēķināšanas metodika nosaka, ka indeksa uzskaitīšana ir sākama pavasarī pēc sniega nokušanas, kad vidēja diennakts temperatūra paaugstinās virs 0 °C un turpināma, līdz nokrišņu daudzums diennaktī pārsniedz 3 mm. Ja diennakts laikā nokrišņu summa pārsniedz 3 mm, tiek pieņemts, ka Ņesterova indeksa vērtība ir atbilstoša 0. Indeksa uzskaitīšana ir izbeidzama rudenī, kad vidējā diennakts temperatūra ir zemāka par 0 °C (Jansons et al. 2015). Ņesterova indekss ir kumulatīvs indekss, kas reprezentē koksnes izzūšanas potenciālu, un tādējādi varētu palīdzēt prognozēt mitruma izmaiņu izraisītās izmaiņas σ^0 vērtībās. Augstas indeksa vērtības (4000 – 10000) liecina, par relatīvi nelielu vai ārkārtīgi mazu mitruma daudzumu, taču zemas indeksa vērtības liecina (0 - 1000), par augstiem mitruma apstākļiem mežā (Mavrakis et al. 2013). Ņesterova indekss tādejādi norāda sausumu līmeni mežā. Ņesterova indeksa aprēķināšana tika izmantoti ERA5-Land klimatiskās reanalīzes dati. Indekss tika aprēķināts izmantojot Python integrēto vidi un iegūts telpiskā (GeoTIFF) formātā izveidojot Python programmēšanas valodā komandu rindu, kas tika integrēta brīvpieejas un atvērto datu Python un R programmēšanas valodas paplašinājumu platformā Anaconda, kur tālāk tika izpildīta caur Jupyter Notebook vidi (7. pielikums). Pēc aprēķiniem tika secināts, ka indekss nav piemērots, lai konstatētu, kādi ir mitruma apstākļi mežā, jo tikai 15 % no aprēķinātajiem laika intervāliem, indeksa vērtības atšķīrās no 0, savukārt pārējiem 85 % rādītāji bija 0, kas nozīmē, ka mitruma daudzums mežā ir pietiekams, lai nebūtu ugunsbīstamības draudi. Taču šādas Ņesterova indeksa vērtības neļauj prognozēt mitruma izmaiņu izraisītās izmaiņas σ^0 vērtībās jeb $\Delta\sigma^0$. Ņesterova indeksa komponentes inversā rakursā izsaka vides mitrumu, tieši tādēļ laikapstākļu ietekmes modeļa izveidei no Ņesterova indeksa tika aizgūtas meteoroloģiskās komponentes – gaisa temperatūra, rāsas punkta temperatūra un nokrišņu daudzums.

3.6. Statistiskās datu analīzes metodes

Lai novērtētu korelāciju starp ERA5-Land datiem un SAR sensora atpakaļ atgrieztās intensitātes pikseļu vērtībām, tika izveidoti modeļi, kas spēj noteikt atsevišķu laikapstākļu komponentu ietekmi uz C-joslas SAR intensitātes izmaiņām. Respektīvi, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi un savstarpējo faktoru korelācijas rādītājus, tika pārbaudīts, vai $\Delta\sigma^0_L$ vērtības jeb vietas, kur notikusi mežsaimnieciskā darbība, var precīzāk noteikt skatot likumsakarības ar $\Delta\sigma^0_L$ jeb laikapstākļu izraisītajām atstarojuma izmaiņām. Lai izveidotu modeļi un novērtētu tā rezultātus dati izgāja vairākus apstrādes etapus un tika novērtēti ar dažādām statistikas datu analīzes metodēm (3.7. attēls).

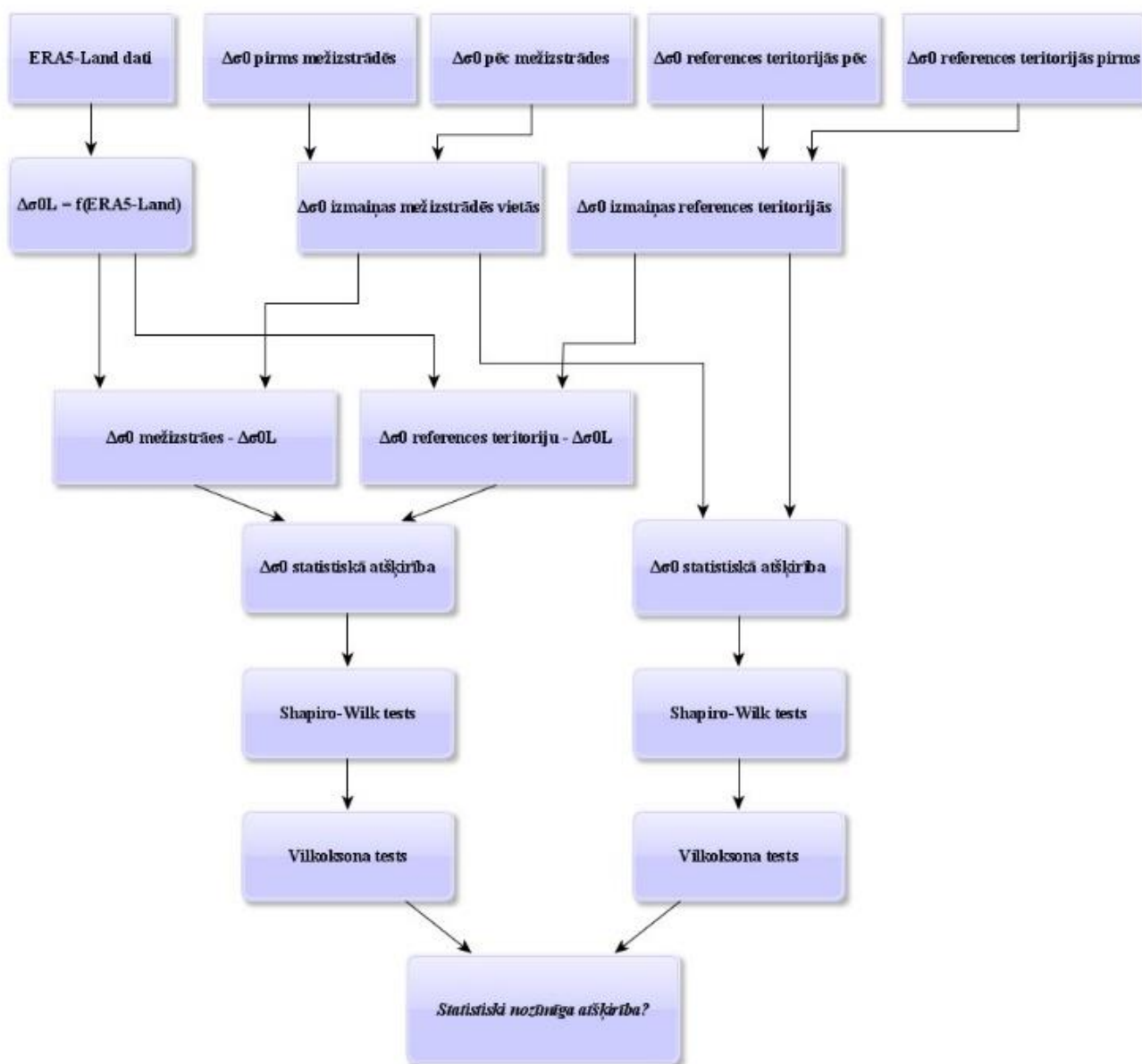
Lai uzzinātu $\Delta\sigma^0_L$ jeb lai izveidotu $f(ERA5 - Land)$ funkciju tika izveidoti vairāki daudzfaktoru regresijas modeļi, kas skaidroja gan katras laikapstākļu komponentes individuālo ietekmi uz intensitātes izmaiņām, gan to kopēju ietekmi uz intensitātēs izmaiņām. Daudzfaktoru regresijas modeļu izveidei RStudio vidē tika izmantota funkcija $lm()$, kurā kā pirmo argumentu ievieto rezultatīvo pazīmi, tālāk aiz tildes zīmes tiek liktas faktoriālās pazīmes, kas tiek atdalītas ar plus zīmi, ja ir nepieciešams uzzināt faktoru ietekmi uz rezultatīvo pazīmi neatkarīgi no citiem (funkcijas piemērs - `model <- lm(VH.VH ~ D + T + P, data = df)`), bet reizināšanas zīmi, ja ir nepieciešams uzzināt katra rādītāja ietekmi un to mijiedarbības ietekmi (funkcijas piemērs - `model2 <- lm(VH.VH ~ D*T*P, data = train.data)`), faktorus ar kolu atdala, tad ja ir zināms, ka abi rādītāji ir būtiski un tiek izveidota funkcija, kas ņem vērā tikai būtiskās komponentes un to mijiedarbības (funkcijas piemērs - `model3 <- lm(VH.VH ~ D+P+D:T:P, data = df)`). Pēdējais arguments $lm()$ funkcijā apzīmē tabulu, kurā atrodas izejas informācija par pazīmēm – intensitātes un laikapstākļu izmaiņas. Regresijas analīzes rezultātu apskatīšanai tika izmantota `summary()` funkcija, kurā kā noslēdzošais arguments tiek norādīts objekts, kas satur regresijas modeļu statistisko kopsavilkumu (9. pielikums).

Daudzfaktoru regresijas analīzes modeļi un to aditīvi modeļi tika veidoti par VH polarizācijas intensitātes izmaiņām un par VV polarizācijas intensitātēs izmaiņām, gan ar robežpikseļa vērtībām, gan bez robežpikseļa vērtībām. Izveidoto modeļu koeficienti tika pārbaudīti, gan uz datiem uz kuriem tie tika veidoti, gan uz datiem, kas netika izmantoti modeļa izstrādes gaitā, lai pārbaudītu modeļa prognozēšanas spēju.

Iegūto modeļi var uzskatīt par derīgu, ja tas uzlabo spēju nodalīt izcirtumus no teritorijām, kurās izmaiņas nav notikušas. Lai to pārbaudītu, savā starpā tika salīdzinātas sākotnējās $\Delta\sigma^0$ vērtības izcirtumiem un references teritorijām, kā arī $\Delta\sigma^0$ vērtības pēc to koriģēšanas ar modeļa palīdzību iegūtajām $\Delta\sigma^0_L$ vērtībām (3.7. attēls). Vispirms abām datu kopām tika izmantots Šapiro-Vilka normalitātes tests (angl. *Shapiro-Wilk test*), kas paredzēts, lai pārbaudītu, vai dati

atbilst normālajam sadalījumam. Pēc testa rezultātiem var noteikt kāda divu paraugkopu salīdzināšanas metode ir jāizmanto, jo ja dati atbilst normālajam sadalījumam, tiek izmantotas parametriskās salīdzināšanas metodes jeb testi, bet ja sadalījums neatbilst normālajam sadalījumam paraugkopu salīdzināšanai tiek izmantoti bezparametriskie testi.

Lai novērtētu modeļu uzlabojums, tika izmantota Vilksona tests, kas paredzēts lai novērtētu vērtību izvietojumu pa paraugkopām, kā rezultātā tiek uzzināts vai paraugkopas savā starpā būtiski atšķiras. Tests tika izmantots, lai salīdzinātu, kā uzlabojas intensitātes izmaiņu prognozēt spēja, ja tiek ņemtas vērā laikapstākļu komponentu vērtības.



3.7. attēls. Modeļa izveides un statistiskās datu analīzes metodes etapi

4. REZULTĀTI

Pētījumā tika izstrādāti vairāki konceptuāli modeļi, kas skaidro atsevišķu laikapstākļu komponentu ietekmi uz SAR atpakaļ saņemtās intensitātes izmaiņām. Pēc to statistiskajiem rezultātiem, tika izvēlēti divi modeļi (VH polarizācijā un VV polarizācijā), kas vislabāk reprezentē laikapstākļu izmaiņu un SAR intensitātes izmaiņu korelāciju. Pētījumā izstrādātie modeļi ir paredzēti, lai veiktu mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu, veicot laikapstākļu ietekmes novērtēšanu uz intensitātes izmaiņu vērtībām.

4.1. Modeļa izveide atsevišķu laikapstākļu komponentu ietekmes novērtēšanai uz SAR intensitātes izmaiņām

Laikapstākļu atsevišķu komponentu modeļa izveide balstās uz statistiskās analīzes metodēm – daudzfaktoru regresijas analīzi un faktoru savstarpējās korelācijas novērtēšanu. Lai izstrādātu modeli tika izmantoti iegūtie kvantitatīvie dati par SAR Sentinel-1 intensitātes izmaiņām, kā arī kvantitatīvie ERA5- Land klimatiskās reanalīzes datu kopas rādītāji, par 2 m temperatūru (°C) 12:00 dienā (pirms satelītuņēmuma veikšanas; T parametrs formulās), 2 m rasas punkta temperatūru (°C) 12:00 dienā (pirms satelītuņēmuma veikšanas; D parametrs formulās) un nokrišņu summu (mm) (dienā pirms satelītuņēmuma veikšanas; P parametrs formulās). Iepriekšējās dienas laikapstākļu rādītāji tika izvēlēti, jo tie vislabāk reprezentē mitruma stāvokli meža, neveicot vidējo rādītāju analīzi vairākām dienām.

Modeļa izveide tika veikta RStudio programmatūrā izmantojot *R_modelis.xlsx* datubāzi, kurā atradās rādītāji par intensitātes izmaiņām abas polarizācija (VH un VV) ar robežpikseli un bez robežpikseļa, kā arī laikapstākļu komponentu izmaiņas (9. pielikums; 13. pielikums). RStudio vidē modeļa izveide tika veikta balstoties uz daudzfaktoru regresijas vienādojumu (4.1.), kura formula (Keith 2015) ir:

(4.1.)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon,$$

kur

x – regresori;

β_n – regresijas koeficienti, kas raksturo konkrētā regresora jeb faktoriālās pazīmes ietekmi uz regresentu, jeb atkarīgo pazīmi;

β_0 – regresijas vienādojuma brīvais loceklis, kas raksturo y vērtību vidējo izmaiņu līmeni;

ε – nejaušo faktoru ietekme uz regresentu.

Sākumā tika izveidoti modeļi, kas skaidro laikapstākļu komponentu ietekmi uz VH un VV polarizācijas intensitātēs izmaiņām, kurās vēl kopējās vidējās vērtības veido robežpikseļi (1. modelis (ar robežpikseļu vērtībām), kas izveidots RStudio vidē ar komandu ($lm(VH.VH \sim D + T + P)$) un $lm(VV.VV \sim D + T + P)$). Pēc VH daudzfaktoru regresijas modeļa izveides var secināt, ka atsevišķo laikapstākļu komponentu izmaiņas ietekmē intensitātes izmaiņas un modelis ir būtisks, jo *p-value* jeb p-vērtība ir 0,000, kas ir mazāka par būtiskuma līmeni, tādejādi tiek noraidīta nulles hipotēze H_0 , kas norāda, ka faktori būtiski neietekmē rezultātīvo vērtību. Tāpat arī VV polarizācijas modelis ir būtisks, jo arī VV polarizācijas modeļa *p-value* jeb p-vērtība ir 0,000. Abu daudzfaktoru regresijas analīžu p-vērtības ir 0,000 rāsas punkta temperatūras ($^{\circ}C$) rādītājiem, kas norāda uz to, ka tikai rāsas punkta temperatūrai ir būtiska ietekme uz intensitātes izmaiņu rādītājiem. VH polarizācijas modelis paredz, ka ar tā β jeb aprēķinātajiem regresijas vienādojuma koeficientiem ir iespējams izskaidrot 42,6% no intensitātes izmaiņām, jo tā koriģētā determinācijas koeficienta jeb *Adjusted R²* vērtība ir 0,426. VV polarizācijas modelis paredz, ka ar tā aprēķinātajām koeficienta vērtībām jeb β var izskaidrot 34,5% no VV polarizācijas aprēķinātajām intensitātes izmaiņām, jo tā R^2 vērtība ir 0,345. Rādītāju determinācijas koeficientu būtiskumu un statistisko nozīmīgumu pierāda arī abu polarizāciju F-tests jeb kopējās F-vērtības, kas VH polarizācijas gadījumā ir 20,56 (3 *df* un 76 *df*) un VV polarizācijas gadījumā 14,89 (3 *df* un 7 *df*). Salīdzinot abus modeļus tika secināts, ka arī statistiski pierādās, ka VH polarizācijas intensitātes izmaiņas labāk reprezentē izmaiņas mežsaimnieciskās izstrādes teritorijas, jo kā jau citos pētījumos ir norādīts (Dobson et al. 1992, Ranson, Sun 1994, Le Toan et al. 1992), VH polarizācijas vērtības ir stabilākas attiecībā pret veģetācijas izmaiņām un signāls vairāk tiek saņemts tilpuma izkliedes rezultātā nevis no Zemes virsmas, kā tas ir VV polarizācijas gadījumā (4.1. tabula). Tas pierādās arī, ja tiek aprēķināts vidējās izmaiņas cirsma teritorijā ar robežpikseļa vērtībām, jo VH polarizācijas gadījumā intensitātes vērtību izkliede ir -8,23 dB, bet VV polarizācijas gadījumā vērtību izkliede ir -5,24 dB, kas liecina, ka VV polarizācijas signāls ir mazāks jūtīgs pret veģetācijas izmaiņām.

1. modelis VH un VV polarizācijai ar robežpikseļu vērtībām

	VH polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām				VV polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām				
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value	
<i>konstante</i>	0,217	0,169	1,278	0,205	0,133	0,118	1,131	0,262	
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,153	0,036	4,302	0,000***	0,093	0,025	3,767	0,000 ***	
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	0,011	0,042	0,276	0,783	0,000	0,029	0,008	0,994	
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,001	0,008	0,151	0,880	0,002	0,006	0,323	0,748	
RSE	1,467 (76 df)				1,019 (76 df)				
R ²	0,448				0,370				
Adjusted R ²	0,426				0,345				
F-test	20,56 (3 df un 76 df)				14,89 (3 df un 76 df)				
p-values	0,000				0,000				
p-value = 0	****	0.001	***	0.01	**	0.05	.	0.1	' ' 1

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

Tālāk RStudio programmatūrā tika izveidotas modelis, kas skaidro VH un VV polarizācijas intensitātes izmaiņas, kurās nav vērā ņemtas robežpikseļa vērtības, jo tika izvirzīta hipotēze, ka robežpikseļu vērtības mēdz saturēt kļūdainas vērtības (vērtības, kas reprezentē ārpus izpētes teritorijas intensitāti) un tādejādi ir nobīdītas patiesās vidējās intensitātes izmaiņu vērtības. Modeļi tika izveidoti RStudio vidē, pēc tādām pašām formulām, kā iepriekš tika izveidots VH un VV polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām, tikai tika nomainīta datu atlases aile, kas reprezentē vērtības bez robežpikseļa (1.modelis (bez robežpikseļu vērtībām), kas izveidots RStudio vidē ar komandu $lm(RP_VH.VH \sim D + T + P)$ un $lm(RP_VV.VV \sim D + T + P)$). VH un VV daudzfaktoru kopējas regresijas modeļi, kuros nav ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, tā pat kā iepriekš izveidotie modeļi ar robežpikseļu vērtībām, ir būtiski un tiek pierādīts, ka izmaiņas laikapstākļos ietekmē intensitātes izmaiņas, jo *p-value* jeb *p*-vērtība abos gadījumos ir 0,000, kas ir mazāka par būtiskuma līmeni, tādejādi tiek noraidīta nulles hipotēze H_0 . Tāpat kā modeļos, kuros tika ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, arī modeļos, kuros ne tika ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, tikai rasas punkta temperatūra izrādījās būtisks rādītājs, kas maina intensitātes izmaiņas. Taču VH polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām spēj mazāk izskaidrot laikapstākļu komponentu ietekmi uz intensitātes izmaiņām, nekā modelis ar robežpikseļu vērtībām, kas iet pretrunā ar izvirzīto H_0 , ka robežpikseļu vērtības nobīda intensitātes izmaiņu vērtības, jo modeļa koriģētā R² vērtība ir 0,399 jeb modelis spēj izskaidrot 39,9% no izmaiņām, taču VH polarizācijas modelis ar robežpikseļa vērtībām spēj izskaidrot 42,6%. Taču VV polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām apstiprina izvirzīto hipotēzi, ka bez robežpikseļu vērtībām ir iespējams iegūt

precīzākus rezultātus, jo modelis prognozē, ka ar šī modeļa izveidotajiem koeficientiem ir iespējams izskaidrot 35,2% no intensitātes izmaiņām, bet ar robežpikseli VV polarizācijas modelis spēja izskaidrot 34,5 % (4.2. tabula). VH polarizācijas vērtības ticamības samazināšanas varētu būt skaidrojuma, ar to, ka atņemot robežpikseļu vērtības mazām teritorijām atstarojuma izmaiņas varētu tikt negatīvi koriģētas jeb teritorijas vidēji intensitātes rādītāji varētu būt nobīdīti.

4.2. tabula.

1.modelis VH un VV polarizācijai bez robežpikseļu vērtībām

	<i>VH polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībā</i>				<i>VV polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām</i>			
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	-0,038	0,182	-0,208	0,836	-0,016	0,116	-0,141	0,888
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,163	0,038	4,258	0,000***	0,098	0,024	4,009	0,000 ***
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	-0,009	0,044	-0,198	0,844	-0,017	0,029	-0,585	0,560
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,006	0,009	0,621	0,537	0,005	0,006	0,945	0,343
RSE	1,578 (76 df)				1,005 (76 df)			
R ²	0,422				0,376			
Adjusted R ²	0,399				0,352			
F-test	18,51 (3 df un 76 df)				15,27 (3 df un 76 df)			
p-values	0,000				0,000			

p-value = 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

Lai iegūtu precīzākus rezultātus dati tika pēc nejaušības principa sadalīti divās grupās – 80% (64 references nogabalu dati) tika izmantoti priekš prognozes modeļa izveides, taču pārējie 20 % (16 references nogabalu dati) tika izmantoti priekš modeļa precizitātes novērtēšanas.

Tālāk tika izveidoti aditīvi modeļi, kas kā jau iepriekš izveidotie modeļi, neņēma vērā savstarpējo korelāciju starp faktoriem, bet tika izveidoti uz modeļa paredzētajiem datiem un β jeb aprēķināto regresijas vienādojuma koeficientu lietderība tika pārbaudīta uz datiem, uz kuriem nebalstās modeļa izveide. Modeļu *p-values* jeb būtiskuma līmeņi līdzīgi, kā iepriekš liecina, ka tikai rasas punkta temperatūra, no izvēlētajiem rādītājiem, ietekmē izmaiņas SAR intensitātes izmaiņu rādītājos. VH polarizācijas modelis, kurā ir ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, spēj izskaidrot 44,4% no rezultatīvās pazīmes jeb intensitātes izmaiņas ar laikapstākļu rādītājiem, bet VV polarizācijas modelis 31,9%. VH polarizācijas modeļa aprēķinātie regresijas koeficienti, tika pārbaudīti uz modeļa izveidē neiesaistītu datu kopu un tika iegūts, ka šo regresijas vienādojumu koeficientu piemērotība, lai noteiktu izmaiņas modeļa izveidē neiesaistītai kopai, ir 33,2%, jo tā determinācijas koeficients, kas norāda kāda rezultatīvās pazīmes variācijas daļa ir tieši atkarīgā no faktoriālās pazīmes variācijas, ir $R^2 = 0,332$. VV

polarizācijas koeficientu piemērotība, lai noteiktu laikstākļu izraisītās SAR intensitātēs izmaiņas, ir 47,3% (4.3. tabula).

4.3. tabula

2. modelis VH un VV polarizācijai ar robežpikseļu vērtībām

	<i>VH polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām</i>				<i>VV polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām</i>			
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	0,198	0,186	1,069	0,290	0,118	0,137	0,865	0,391
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,160	0,038	4,200	0,000***	0,070	0,028	3,187	0,002 **
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	0,015	0,046	0,336	0,738	-0,001	0,034	-0,031	0,976
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	-0,006	0,009	-0,651	0,518	0,002	0,007	0,359	0,721
RSE	1,440 (60 df)				1,055 (60 df)			
R ²	0,471				0,3509			
Adjusted R ²	0,444				0,3185			
F-test	17,80 (3 df un 60 df)				10,81 (3 df un 60 df)			
p-values	0,000				0,000			

p-value = 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

VH polarizācijas modelis, kurā netika ņemtās vērā robežpikseļa vērtības, prognozē, ka atsevišķās laikstākļu komponentes var izskaidrot 39,7% no radara intensitātēs izmaiņām, bet VV polarizācijas modelis var izskaidrot 38,3%. Taču arī šajā modelī netiek ņemta vērā korelācija starp faktoriem un tikai rasas punkta temperatūra (°C) tiek identificēta kā būtisks faktors, kas ietekmē SAR intensitātes izmaiņas. VH polarizācijas izmaiņas bez robežpikseļu vērtību modeļa ticamība bija zemāka (39,7%) nekā VH modelim, kurā ir ņemtās vērā robežpikseļu vērtības (44,4%), taču VV polarizācijas modeļa faktoriālo pazīmju spēja skaidrot rezultātīvo pazīmi salīdzinājumā ar modeli, kurā ir ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, ir uzlabojusies par 6,4%, kas varētu būt skaidrojams ar VV polarizācijas ekstremālo vērtību mainīgumu. VH polarizācijas modeļa koeficientu piemērotība datiem, kas nav izmantoti modeļa izveidē ir 40,5%, taču VV polarizācijas modeļa, bez robežpikseļu vērtībām, piemērotība ir tikai 20,3%, kas saistīts ar VV vērtību nestabilitāti un manīgumu un ar to, ka daļa no atstarojuma tiek saņemta no zemes virsmas (4.4. tabula).

2. modelis VH un VV polarizācijas modeļi bez robežpikseļu vērtībām

	VH polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām				VV polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām			
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	-0,057	0,203	-0,279	0,781	-0,006	0,130	-0,047	0,963
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,173	0,044	3,950	0,000***	0,090	0,025	3,601	0,001**
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	-0,016	0,047	-0,344	0,732	-0,003	0,029	-0,108	0,914
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,003	0,010	0,323	0,748	0,006	0,007	0,978	0,332
RSE	1,546 (60 df)				1,002 (60 df)			
R ²	0,425				0,412			
Adjusted R ²	0,397				0,383			
F-test	14,80 (3 df un 60 df)				14,03 (3 df un 60 df)			
p-values	0,000				0,000			
p-value = 0	****	0.001	***	0.01	**	0.05	*	0.1

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

Iepriekš izveidotie modeļi ir aditīvi modeļi, jo tie neizskaidro savstarpējo faktoru ietekmi, bet gan izskaidro tikai atsevišķu laikapstākļu komponentu ietekmi uz intensitātēs izmaiņām neatkarīgi no citām laikapstākļu komponentēm. Taču, kā zināms, starp laikapstākļu komponentēm pastāv cieša korelācija. Starp rasas punkta temperatūru (°C), kas iepriekš izveidotajos modeļos, bija vienīgais būtiskais laikapstākļu rādītājs, kas nosaka intensitātes izmaiņas, un nokrišņu daudzumu (mm) un temperatūru (°C) pastāv tieša korelācija, tieši tāpēc ir svarīgi veikt daudzfaktoru analīzi, kas skaidro korelāciju starp faktoriem.

Tālāk tika izveidoti modeļi, kas skaidro savstarpējo korelāciju starp rādītājiem. RStudio komandringā dodot komandu - $lm(formula = VH.VH \sim D * T * P)$ un $lm(formula = VV.VV \sim D * T * P)$. Kā rezultātā tiek noskaidrota korelācija starp faktoriālajām pazīmēm jeb laikapstākļu komponentēm. Modeļi, kuros ņemta vērā faktoru savstarpēja korelācija, uzrādīja daudz augstākas vērtības nekā modeļi, kuri tikai izveidoti neņemot vērā faktoriālo pazīmju jeb regresentu savstarpējo korelāciju. Daudzfaktoru regresijas analīzes modeļi, kuros tika veikta korelācijas analīze starp faktoriem pierāda, ka intensitātes izmaiņas nosaka – rasas punkta temperatūra (°C), nokrišņu summa (mm), kā arī visu trīs laikapstākļu rādītāju - rasas punkta temperatūras (°C), temperatūras (°C) un nokrišņu summa (mm) mijiedarbība. VH polarizācijas modelis, kas izveidots ņemot vērā robežpikseļu vērtības un savstarpējo faktoriālo pazīmju korelāciju, ir spējīgs izskaidrot 56,6% no intensitātes izmaiņām, jo tā koriģētā R² = 0,566. VV polarizācijas modelis, kurā ir vērā ņemtas robežpikseļu vērtības ir spējīgs noteikt 42,7% no laikapstākļu komponentu ietekmes. P-value jeb būtiskuma rādītāji abos polarizāciju gadījumos

norāda, ka raras punkta temperatūra (°C) visvairāk korelē ar intensitātes izmaiņām, jo tā *p-value* VH polarizācijas gadījumā ir 0,001, bet VV gadījumā, tā ir 0,003. Būtiski intensitātes izmaiņas ietekmē arī visu trīs rādītāju mijiedarbība, jo to *p-value* VH gadījumā ir 0,001, bet VV gadījumā tā ir 0,004. Abos modeļos pierādās, ka arī nokrišņu summa (mm) dienā pirms satelīts ir veicis teritorijas uzņemšanu, ir nozīmīgs faktors, kas nosaka intensitātēs izmaiņas, jo nokrišņiem ir tieša ietekme uz veģetācijas slāņa dielektriskajām īpašībām. VH polarizācijas modeļa piemērotība uz modeļa izveidē neiesaistītiem datiem ir 65,5%, taču VV polarizācijas modeļa piemērotība uz modeļa neatkarīgu datu kopu ir 78,4%, taču jāņem vērā, ka VV polarizācijas vērtības ir ļoti mainīgas un nestabilas (4.5. tabula).

4.5. tabula

3. modelis VH un VV polarizācijas modeļi ar robežpikseļu vērtībām

	VH polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām				VV polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām			
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	-0,401	0,298	-1,345	0,184	-0,230	0,243	-0,947	0,348
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,167	0,047	3,581	0,001**	0,110	0,036	3,056	0,003**
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	0,036	0,056	0,638	0,526	-0,003	0,044	-0,076	0,940
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,050	0,017	2,883	0,006**	0,050	0,017	2,883	0,006**
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā; temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	0,006	0,006	0,962	0,340	0,006	0,005	1,175	0,245
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā; nokrišņu summa (mm)</i>	0,002	0,003	0,666	0,508	0,002	0,002	0,692	0,492
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā; nokrišņu summa (mm)</i>	-0,001	0,005	-0,139	0,890	-0,003	0,004	-0,852	0,398
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā; temperatūra (°C) 2 m augstumā; nokrišņu summa (mm)</i>	-0,002	0,001	-3,340	0,001**	0,001	0,000	-3,030	0,004**
RSE	1,273 (56 df)				0,968 (56 df)			
R ²	0,614				0,491			
Adjusted R ²	0,566				0,427			
F-test	12,72 (7 df un 56 df)				7,707 (7 df un 56 df)			
p-values	0,000				0,000			
p-value = 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' ' 1								

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

Tālāk tika izveidota modeļi, kas skaidro VH un VV intensitātēs izmaiņa, kurās nav ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, taču ir ņemta vērā savstarpējā faktoru korelācija. Šo modeļu ģenerētie koeficienti tika pārbaudīti uz datiem, kas tika izmantoti modeļa izveidē, kā rezultātā to vērtības ir augstākas nekā datiem, kas tiek pārbaudīti vai nu uz visu ģenerālkopu vai tās daļu, kas netika pielietota modeļa izveidē. Modeļa koeficienti norāda uz to, ka ne tikai laikapstākļu komponentēm ir ietekme uz SAR intensitātes izmaiņām, bet gan arī ir konstanta vērtība, kas tiek definēta kā atkarīgā mainīgā vidējā vērtība, ja pārējo mainīgo vērtība būtu nulle. Konstante

ir būtiska regresijas vienādojuma daļa, kas jāņem vērā modeļa izveidē. Modeļa regresijas koeficienti norāda uz to, ka būtiski faktori regresijas analīzes formulai ir konstante, rasas punkta temperatūra (°C), nokrišņu summa (mm), rasas punkta temperatūras (°C) un nokrišņu summas (mm) korelācija, kā arī visu trīs laikapstākļu rādītāju kopējā korelācija. Kopējā modeļa prognozēt spēja VH polarizācijas gadījumā ir 68,8%, bet VV polarizācijas gadījumā 63,2%, taču jāņem vērā, ka modeļa rezultāti ir pārbaudīti uz tā veidošanas izejas datiem kā rezultātā tiem ir augsta ticamība. Taču to piemērotība datiem, uz kuriem nebalstās modeļa izveide, VH gadījumā ir 45,8%, bet VV gadījumā tā ir 21,2% (4.6. tabula).

4.6. tabula

3.modelis VH un VV polarizāciju vērtības bez robežpikseļu vērtībām

	<i>VH polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām</i>				<i>VV polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām</i>			
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	-1,032	0,258	-4,007	0,000***	-0,631	0,194	-3,249	0,002**
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,179	0,043	4,210	0,000***	0,111	0,028	3,917	0,000***
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	0,016	0,049	0,318	0,752	-0,003	0,034	-0,086	0,932
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,097	0,020	4,775	0,000**	0,063	0,013	5,008	0,000***
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā; temperatūra (°C) 2 m augstumā</i>	0,008	0,006	1,482	0,144	0,007	0,004	1,622	0,110
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā; nokrišņu summa (mm)</i>	0,005	0,003	1,914	0,061 .	0,004	0,002	2,458	0,017*
<i>temperatūra (°C) 2 m augstumā; nokrišņu summa (mm)</i>	-0,003	0,005	-0,575	0,568	-0,003	0,003	-1,101	0,276
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā; temperatūra (°C) 2 m augstumā; nokrišņu summa (mm)</i>	-0,002	0,000	-4,602	0,000***	-0,001	0,000	-4,228	0,000***
RSE	1,112 (56 df)				0,774 (56 df)			
R ²	0,722				0,673			
Adjusted R ²	0,688				0,632			
F-test	20,82 (7 df un 56 df)				16,46 (7 df un 56 df)			
p-values	0,000				0,000			
p-value = 0	**** 0.001 *** 0.01 ** 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1							

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

Zinot būtiskākos rādītājus un to korelāciju, kas nosaka intensitātes izmaiņas, tika izveidoti modeļi, kas iekļauj tikai statistiski būtiskos rādītājus un to statistiski būtiskās mijattiecības. Modeļi tika izveidoti RStudio komandrindā dodot komandu $lm(RP.VH.VH \sim D+P+D:P+D:T:P)$ vai $lm(RP.VV.VV \sim D+P+D:P+D:T:P)$. Rādītāju prognozētspēja tika pārbaudīta uz kopējo datu kopu, kurā atradās gan modeļa izveidē pielietotie dati, gan dati, kas netika izmantoti modeļa izveidē, tādējādi neitralizējot ietekmi, ko varētu izraisīt ekstremālo datu vērtību ietekme datu kopā, kas netika izmantota modeļa izveidē, kā arī nepielāgojot datus

tikai modeļa izveidē izmantotajiem datiem. Kā rezultātā tika iegūti četri modeļi, kas reprezentē tikai statistiski būtisko datu variāciju un to izmaiņu un ietekmes īpatsvaru uz SAR atstarojuma izmaiņām. VH polarizācijas modelis, kurā tiek ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, spēja izskaidrot 57,2% no izvēlētajiem rādītājiem, taču VV polarizācijas modeļa rezultāti reprezentēja, ka ar laikapstākļu komponentšu izmaiņām ir iespējams noteikt tikai 47,9% no SAR intensitātes izmaiņām starp diviem uzņēmumiem (4.7. tabula).

4.7. tabula

4. modelis VH un VV polarizāciju modeļi ar robežpikseļu vērtībām

	<i>VH polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām</i>				<i>VV polarizācijas modelis ar robežpikseļu vērtībām</i>			
	B	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	-0,046	0,155	-0,299	0,766	-0,033	0,111	-0,294	0,769
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,175	0,021	8,403	0,000***	0,102	0,015	6,852	0,000***
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,071	0,015	4,599	0,000***	0,045	0,011	4,072	0,000***
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā, temperatūrā (°C) 2 m augstumā, nokrišņu summa (mm)</i>	-0,002	0,000	-5,088	0,000***	-0,001	0,000	-4,406	0,000***
RSE	1,267 (76 df)				0,910 (76 df)			
R ²	0,588				0,498			
Adjusted R ²	0,572				0,479			
F-test	36,14 (3 df un 76 df)				25,17 (3 df un 76 df)			
p-values	0,000				0,000			
p-value = 0	****				0,001 ***			
	0,01 **				0,05 *			
	0,1 ' .				1 ' ' 1			

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

Taču modelis, kurā netika ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, uzrādīja statistiski visbūtiskākos rezultātus. Modelis arī līdzīgi, kā iepriekš izstrādātie modeļi pierādīja, ka VH polarizācijas vērtības ir noturīgākas un ir labāk piemērotas mežsaimniecības procesu monitoringam nekā VV polarizācijas vērtības. Gan VH, gan VV modelis, kurā netika ņemtas vērā intensitātes izmaiņas, labāk pierāda laikapstākļu komponentšu ietekmi uz rādītājiem, nekā VH un VV modelis, kurā tika vērā ņemtas robežpikseļu vērtības, kas arī statistiski apliecina, ka robežpikseļu noņemšana uzlabo vidējo vērtību rādītājus un tie ir precīzāki un mazāk variē. VH polarizācijas modeļa, kurā netika ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, koriģētais determinācijas koeficients jeb koriģētais R² ir 0,627, kas nozīmē, ka laikapstākļu komponentes ir spējīgas izskaidrot 62,7%, no SAR intensitātes izmaiņām, bet VV polarizācijas gadījumā laikapstākļu komponentes spēj izskaidrot 54,0% no SAR intensitātes izmaiņām. Tāpēc šie modeļi tika izvēlēti, lai skaidrotu laikapstākļu ietekmi uz SAR intensitātes izmaiņām un tika pielietoti, lai

izveidotu funkciju, pēc kuras tika aprēķināta atsevišķu laikapstākļu komponentu ietekme uz SAR intensitātes rādītājiem (4.8. tabula).

4.8. tabula

4. modelis VH un VV polarizācijas modeļi bez robežpikseļu vērtībām

	<i>VH polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām</i>				<i>VV polarizācijas modelis bez robežpikseļu vērtībām</i>			
	β	SE	t-value	p-value	β	SE	t-value	p-value
<i>konstante</i>	-0,627	0,170	-3,694	0,000***	-0,307	0,116	-2,656	0,009 **
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā</i>	0,175	0,020	8,533	0,000***	0,098	0,014	7,039	0,000 ***
<i>nokrišņu summa (mm)</i>	0,080	0,015	5,310	0,000***	0,054	0,010	5,245	0,000 ***
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā un nokrišņu summa (mm)</i>	0,004	0,001	3,847	0,000***	0,001	0,001	1,839	0,069 .
<i>rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā, temperatūrā (°C) 2 m augstumā, nokrišņu summa (mm)</i>	-0,002	0,000	-4,947	0,000***	-0,001	0,000	-5,001	0,000***
RSE	1,243 (75 df)				0,846 (75 df)			
R ²	0,646				0,564			
Adjusted R ²	0,627				0,540			
F-test	34,26 (4 df un 75 df)				24,22 (4 df un 75 df)			
p-values	0,000				0,000			
p-value = 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1								

β = aprēķinātie regresijas vienādojuma koeficienti; SE = koeficientu standartklūdas; t-value = t vērtība katram koeficientam; p-value = būtiskums; RSE = atlikuma standartklūda, df = brīvības pakāpes; R² = determinācijas koeficients; Adjusted R² = koriģētais determinācijas koeficients; F-test = kopējā F- vērtība

4.2. Izveidoto modeļu validācija, vienādojumu izvide un laikapstākļu komponentu ietekmes novērtēšana uz SAR intensitātēs izmaiņām

Pēc statistiski ticamākajiem modeļiem tika izveidoti vienādojumi, kas skaidro laikapstākļu komponentu ietekmi uz VH polarizācijas SAR intensitātēs izmaiņām un VV polarizācijas SAR intensitātēs izmaiņām. Abos gadījumos tika izmantotas vērtības, kas tika iegūtas ar modeli kurā tika ņemta vērā laikapstākļu komponentu ietekme, kā arī to korelatīvo būtisko rādītāju vērtības, taču netika ņemtas vērā robežpikseļu vērtības, kā rezultātā vienādojumi un laikapstākļu ietekme tika novērtēta cirsma datiem bez robežpikseļu vērtībām. Tika izveidots daudzfaktoru regresijas vienādojums, kas skaidro laikapstākļu komponentu ietekmi uz VH polarizācijas intensitātes izmaiņām (4.2.):

(4.2.)

$$y = -0,627 + 0,175 * X_1 + 0,080 * X_2 + 0,004 * X_1 * X_2 - 0,002 * X_1 * X_3 * X_2,$$

kur

y – laikapstākļu komponentu izraisītās izmaiņas uz SAR intensitātēs izmaiņām;

X₁ – rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā;

X₂ – nokrišņu summa (mm);

X₃ – temperatūra (°C) 2 m augstumā.

Daudzfaktoru regresijas vienādojums, kas skaidro laikapstākļu komponentu ietekmi uz VV polarizācijas intensitātes izmaiņām, ir ļoti līdzīga VH intensitātes izmaiņu vienādojumam, taču ņemot vērā, ka VV polarizācijas mijiedarbība ar veģetāciju ir savādāka nekā VH polarizācijas mijiedarbība un vērtību izkliede ir mazāk noturīga pret veģetācijas izmaiņām, vienādojuma koeficienti ir savādāki un tā formula ir (4.3.):

(4.3.)

$$y = -0,307 + 0,098 * X_1 + 0,054 * X_2 + 0,001 * X_1 * X_2 - 0,001 * X_1 * X_3 * X_2,$$

kur

y – laikapstākļu komponentu izraisītās izmaiņas uz SAR intensitātēs izmaiņām;

X₁ – rasas punkta temp. (°C) 2 m augstumā;

X₂ – nokrišņu summa (mm);

X₃ – temperatūrā (°C) 2 m augstumā.

Pēc vienādojumu koeficientiem var secināt, ka pastāv neatkarīga konstante, kas nosaka, ka vērtību izmaiņas, gadījumā, ja visi regresori jeb laikapstākļu ietekme būtu nulle, izmaiņas būtu negatīvas. Rasas punkta temperatūra (°C) paaugstināšanās, kas nozīmē, ka gaiss ir mitrāks, izsauc arī SAR atpakaļ saņemtās intensitātes palielināšanos, jo gaisam esot mitrākam, palielinās arī veģetācijas dielektriskās īpašības, kam esot lielākām pieaug arī veģetācijas atstarošanās spēja. Negatīvas rasas punkta temperatūras (°C) izmaiņas jeb mitruma samazināšanās izsauc arī negatīvas izmaiņas intensitātēs izmaiņās. Respektīvi, ja dienu pirms satelītuzņemšanas, kad mežizstrāde vēl nav veikta, rasas punkta temperatūras vērtības ir bijušas augstas, bet dienā pirms satelītuzņēmums ir fiksējis mežsaimnieciski darbību, rasas punkta temperatūra ir zemāka nekā pirms mežizstrādes veikšanas, intensitātes izmaiņas kritīsies. Nokrišņu summai (mm) arī ir tieša ietekme uz intensitātes izmaiņām, jo lielā mērā veģetācijas dielektriskās īpašības,

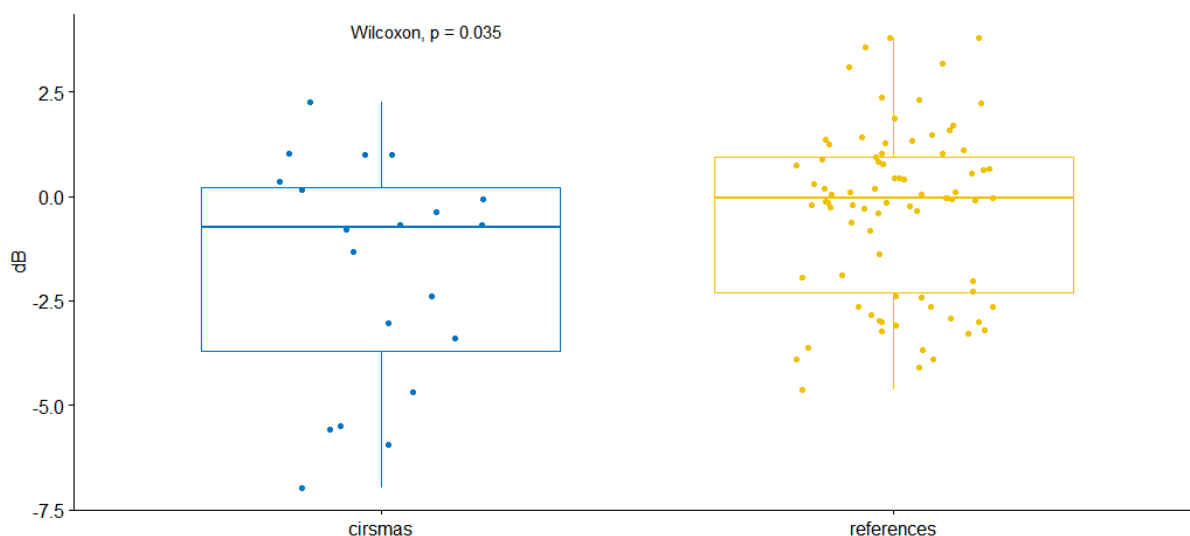
tādejādi arī atstarošanās spēja, ir atkarīga no vides mitruma. Nelieli nokrišņi mazā laika periodā var neizsaukt dielektriskās konstantes izmaiņas, taču ilgstoši vai spēcīgi nokrišņi var izsaukt, to, ka veģetācijas dielektriskās īpašības un to atstarojuma vērtības ir augstākas nekā tās bija pirms nokrišņiem. Temperatūras (°C) izmaiņas tieši neietekmē atstarojuma intensitāti un tā izmaiņas, taču, temperatūras izmaiņas ir būtiskas, ja tiek skatītas kopā ar nokrišņu un rasas punkta vērtībām, jo temperatūrā veicina iztvaikošanu, kā arī nosaka rasas punkta temperatūru (°C) un mitruma kapacitāti, ko gaiss var saturēt. Pētījumos, kas līdz šim ir veikti par Sentinel-1 datu izmantošanu mežsaimniecībā (piemēram Cimdiņš 2018; Olesk et al. 2015) temperatūras rādītāji ir skatīti kā neatkarīgs laikapstākļu rādītājs, kas maina intensitātes izmaiņas, taču šajā pētījumā tika pierādīts, ka temperatūras rādītāji, kā neatkarīgs rādītājs būtiski nemaina atstarojuma izmaiņas un temperatūras rādītājiem ir būtiska nozīme tikai tad, ja tie tiek skatīti kopā ar rasas punkta temperatūru un nokrišņiem. Tādejādi var secināt, ka šīs izmaiņas ir būtiskas un jāņem vērā veicot mežsaimnieciskās darbības kontrolēšanu vai monitoringu ar SAR sensoru.

4.3. Modeļu statistiskā būtiskuma novērtējums

Modeļa būtiskums tika novērtēts savā starpā salīdzinot cirsma un references teritoriju atstarojuma intensitātes izmaiņas nekoriģētiem un ar izstrādāto modeli ((4.2.) un (4.3.)) koriģētiem datiem. Vilkoksona testa rezultāti liecina, ka pastāv statistiski būtiska atšķirība starp nekoriģētiem datiem un ar modeli koriģētiem datiem, kas savukārt pierāda darbā izvirzīto hipotēzi, ka izvēlētajām laikapstākļu komponentēm ir ietekme uz veģetācijas atstarošanās spēju jeb dielektrisko konstanti un ir iespējams noteikt laikapstākļu komponentu ietekmi uz $\Delta\sigma^0$ vērtībām jeb SAR atstarojuma intensitātes izmaiņām. Statistiskie rādītāji jeb *p-values* norāda uz to, ka VH polarizācijas intensitātes izmaiņas ir stabilākas, taču VV polarizācijas vērtības ir mazāk stabilas pret izmaiņām veģetācijas slāņos, jo tikai VH vērtības gan nekoriģētās, gan koriģētās ir būtiskas (4.9. tabula).

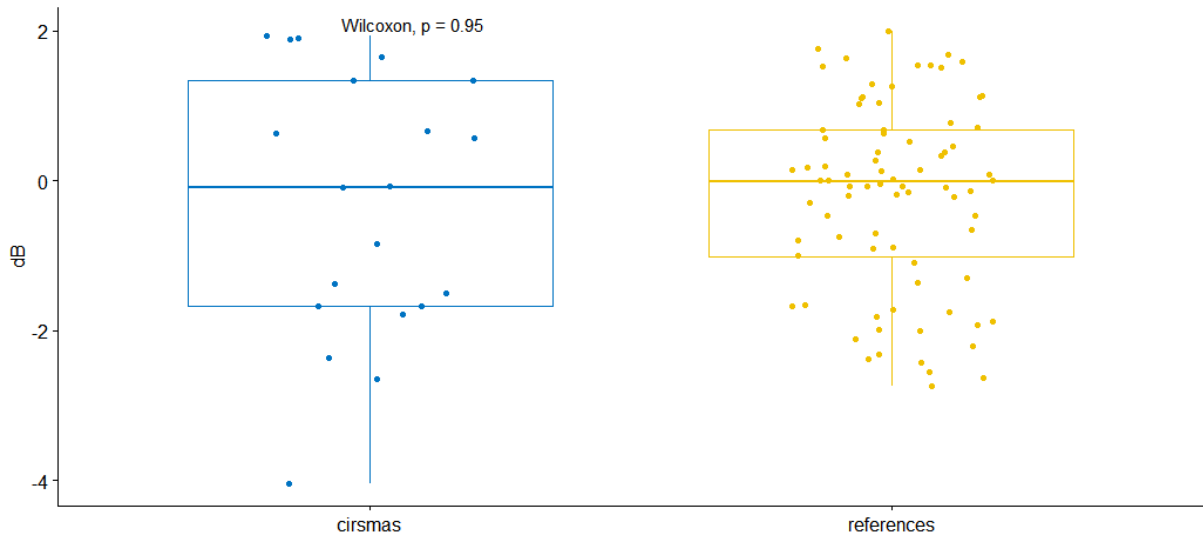
VH polarizācijas nekoriģēto vērtību izkliede references teritorijām ir daudz mazāk kā cirsmu vērtību izkliede, jo datu vērtību izkliedi nosaka tikai dielektrisko īpašību izmaiņas un nejaušie faktori. Cirsmu mediāna ir -0,734 dB, bet references teritoriju mediāna ir -0,046 dB, pēc kā ir iespējams noteikt, ka cirsmu vērtības tiecas uz negatīvām vērtībām, bet references

teritoriju vērtības sliecas uz nulli, kas liecina par mežsaimnieciskās darbības veikšanu (4.1. attēls; 4.9. tabula).



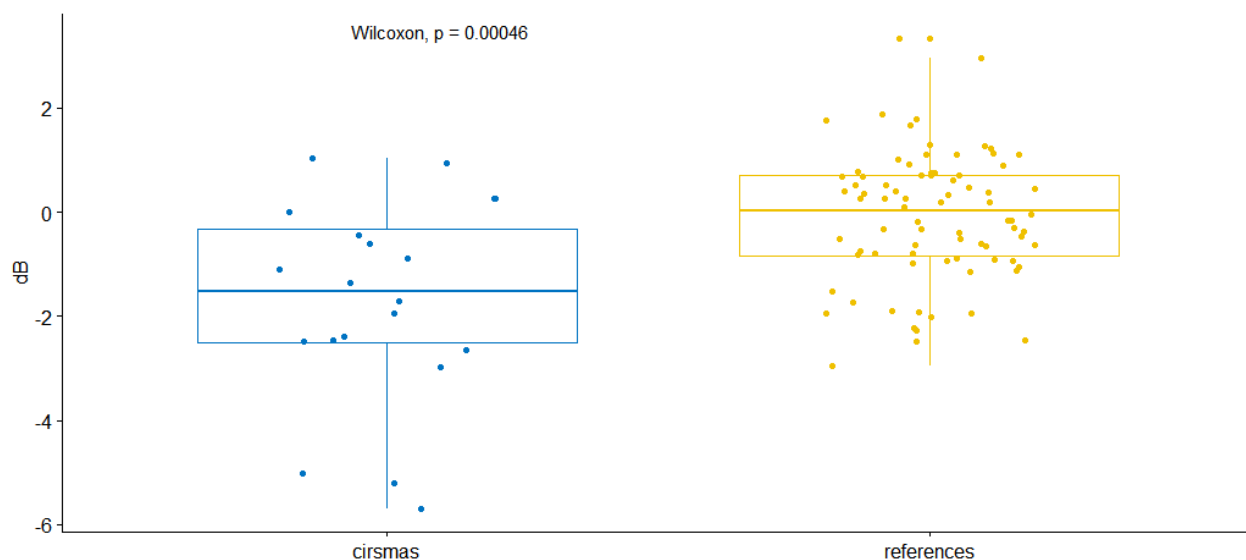
4.1. attēls. Nekoriģētās VH polarizācijas intensitātes izmaiņas

VV polarizācijas nekoriģētās vērtības gan references teritoriju, gan cirsmu gadījumā ir difūzi izkliedētas. Vērtību izkliede ir saistīta ar faktu, ka VV polarizācijā atstarojuma vērtībās vairāk reprezentē virsmas īpašības, jo VV polarizācija ir mazāk jūtīga pret veģētācijas slāni, līdz ar to sensors mazāk uztver tilpuma izkļiedes vērtības, bet vairāk uztver virsmas izmaiņas. VV intensitātes mediānas vērtības references teritorijām ir -0,088 dB, bet cirsmu teritorijām - 0,020 dB, kas nozīmē, ka mežsaimniecisko darbību ar VV polarizācijas nekoriģētajām vērtībām ir grūti konstatēt, jo relatīvā starpība starp references teritoriju un cirsmu mediānu vērtībām ir 0,068 dB, un šī atšķirība ir pārāk maza, lai veiktu mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu (4.2. attēls; 4.9. tabula).



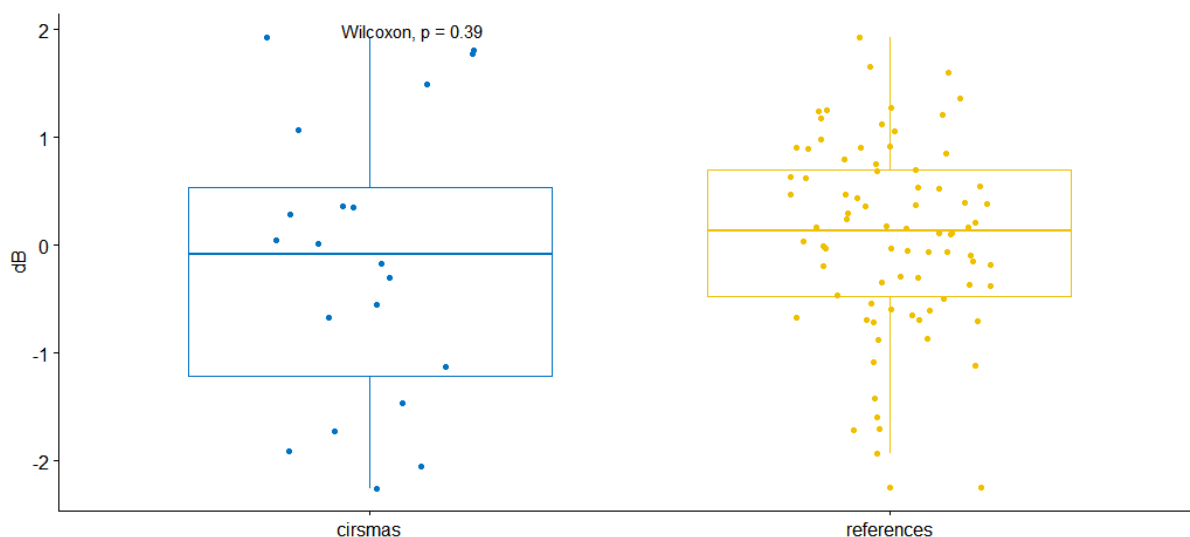
4.2. attēls. Nekoriģētās VV polarizācijas intensitātes izmaiņas

Ar modeli koriģētās vērtības ir mazāk izkliedētas ap mediānas vērtību un ir iespējams izšķirt cirsmu un references teritoriju vērtības. Intensitātes izmaiņu vērtības cirsmu gadījumā izmaina tikai struktūras izmaiņas jeb mežsaimnieciskās izstrādes radītās izmaiņas, kā arī modelī ņemto laikapstākļu rādītāju ietekme, un paša meža tipa jeb veģetācijas izmaiņas, jo vienādojumā netika ņemts vērā meža tipa veids. VH polarizācijas ar modeli koriģētās cirsmu mediānas vērtības ir -1,530 dB, bet references teritorijām mediāna ir 0,028 dB, kā rezultātā relatīvā starpība starp cirsmu un references teritoriju intensitātes izmaiņām ir 1,557 dB. Relatīvā atšķirība ir pietiekama, lai veiktu mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu, pēc kā var secināt, ka modeļa koriģētās vērtības un laikapstākļu komponentes, pēc kurām tika izveidots vienādojums, ir spējīgas skaidrot laikapstākļu ietekmi uz SAR atstarojuma vērtībām. Taču jāņem vērā, ka arī modeļa variācijas amplitūda gan cirsmu, gan references teritoriju gadījumā ir salīdzinoši liela, pēc kā var secināt, ka modelis ir jāuzlabo tā, lai arī ekstremālās vērtības, kas pašlaik ir augstākas vai zemākas par kopējo vidējo novirzi, iekļautos novirzes vērtību reģionā (4.3. attēls).



4.3. attēls. Ar modeli koriģētās VH polarizācijas intensitātes izmaiņas

VV polarizācijas vērtības, kas ir koriģētas izmantojot laikapstākļu modeli, ir difūzi izkliedētās. Cirsma mediānas vērtība koriģētām VV polarizācijas intensitātes izmaiņām ir -0,078 dB, bet references teritorijām 0,135 dB, kā rezultātā cirsmu un references teritoriju mediānu vērtības relatīvi atšķiras tikai par 0,213 dB, pēc kā var secināt, ka izmantojot VV polarizācijas modeļa koriģētās vērtības nevar veikt vērtību mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu (4.4. attēls).



4.4. attēls. Ar modeli koriģētās VV polarizācijas intensitātēs izmaiņas

P-value rādītāji norāda, ka mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu var veikt izmantojot VH polarizācijas datus – gan nekoriģētus, gan koriģētus, jo abu datu *p-values* liecina, ka starp datu kopām, references teritorijām un cirsmu teritorijām, ir būtiska statistiska atšķirība. Nekoriģēto datu *p-value* ir 0,035, bet ar modeli koriģēto datu *p-value* ir 0,000, kas nozīmē, ka

izmantojot izstrādāto modeli ir iespējams būtiski mainīt datu izkliedes rādītājus un precizēt references teritoriju un cirsmu teritoriju intensitātes izmaiņas. References teritoriju intensitātes izmaiņas tiecas uz nulli, taču cirsmu teritoriju rādītāji tiecas uz lielāku negatīvu vērtību, kas arī izsaka struktūras jeb ģeometrijas izmaiņas, kas rodas mežsaimnieciskās darbības rezultātā. Taču VV polarizācijas *p-value* gan koriģētiem, gan nekoriģētiem datiem norāda, ka nepastāv statistiski būtiska atšķirība starp references teritoriju un cirsmu intensitātes izmaiņām jeb izmantojot VV polarizācijas datus nav iespējams veikt mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu. Pēc VV polarizācijas vērtību atšķirībām gan var secināt, ka izveidotais laikapstākļu modelis ir spējīgs izskaidrot lielu daļu no intensitātes izmaiņām, jo nekoriģēto datu *p-value* ir 0,950, kas liecina, ka nepastāv būtiska statistiska atšķirība starp šīm paraugkopām, taču VV polarizācijas koriģēto intensitātes izmaiņu *p-value* ir 0,390, pēc kā var secināt, ka koriģētie dati, lai gan tie nav statistiski būtiski, jo VV polarizācijas intensitātes izmaiņas jeb $\Delta\sigma^0$ vērtības ir ļoti nestabilas, ir 2,4 reizes būtiskāki nekā nekoriģētie dati, kas nozīme, ka uzlabojot modeli, iespējams, arī VV polarizācijas $\Delta\sigma^0$ izmaiņu vērtībās būtu statistiski būtiskas (4.9. tabula).

4.9. tabula

VH un VV polarizācijas ar modeli koriģēto un nekoriģēto datu salīdzinājums

	teritorijas	skaits	mediāna	variācijas amplitūda	r	r rangs	p-value
<i>VH intensitātes izmaiņas</i>	cirsmas	20	-0,734	3,91	0,211	mazs	0,035*
	references	80	-0,046	3,26			
<i>VV intensitātes izmaiņas</i>	cirsmas	20	-0,088	3,01	0,007	mazs	0,950
	references	80	-0,020	1,69			
<i>VH koriģētās intensitātes izmaiņas</i>	cirsmas	20	-1,530	2,18	0,351	vidējs	0,000***
	references	80	0,027	1,56			
<i>VV koriģētās intensitātes izmaiņas</i>	cirsmas	20	-0,078	1,75	0,087	mazs	0,390
	references	80	0,135	1,16			

p-value = 0 **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05 . 0.1 ' ' 1
r rangs = 0,10 – < 0,30 (mazs) 0,30 – < 0,50 (vidējs) ≥ 0,50 (liels)
p-value = būtiskums; r - efekta mērs

Pēc Vilkoksona testa rezultātiem var secināt, ka SAR intensitātes izmaiņu, koriģēšanu izmantojot laikapstākļu komponentu modeli, ievērojami uzlabo atstarojuma intensitātes izmaiņu būtiskumu starp cirmām un mežsaimnieciskās darbības neskartām teritorijām. Izmantojot modeļa vienādojumus, var veikt mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu izmantojot VH polarizācijas datus, taču izmantojot VV polarizācijas datus nav ieteicams veikt mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu, jo starp references un cirsmu teritoriju datiem nav būtiska statistiska atšķirība un pēc $\Delta\sigma^0$ izmaiņām nevar izšķirt cirsmu teritorijas.

4.4. Izstrādātās metodes trūkumi un turpmākos pētījumos veicamie uzlabojumi

Pētījuma rezultāti liecina, ka, izmantojot VH polarizācijas datus un modeļa koriģētās vērtības, ir iespējams veikt cirsmu konstatēšanu un izstrādātos vienādojumus ir iespējams izmantot par pamatu mežsaimnieciskās darbības jeb cirsmu automātiskā klasifikatora izveidei, kas ļautu veikt mežsaimniecības monitoringu gan lokālā, gan reģionālā, gan globālā līmenī. Taču, lai izveidotu automātisko klasifikatoru, būtu jāveic modeļa uzlabojumi, lai palielinātu cirsmu konstatēšanas precizitāti, kā rezultātā references teritoriju un mežsaimnieciskās darbības teritorijām būtu lielākas dB starpības, kā tika iegūts šajā pētījumā, kur VH polarizācijas intensitātes starpība starp cirsmu un mežsaimnieciski neskartajām teritorijām ir -1,530 dB. Modeļa precizitātes uzlabošanai ir izstrādāti 9 priekšlikumi:

1. turpmākā pētījuma modeļa ticamības līmeni un mežsaimnieciskās darbības konstatēšanas spēju varētu uzlabot, ja palielinātu pētāmo references teritoriju skaitu, jo palielinot paraugkopu apjomu, vidējās vērtības sliecas uz patieso ģenerālkopas vidējo vērtību jeb patiesajām intensitātes izmaiņām un precīzāk tiek skaidrota laikapstākļu ietekme uz intensitātēs izmaiņām. Tāpat palielinot paraugkopas apjomu, palielinās arī modeļa lietderība ģeogrāfiski plašākam areālam un ir iespējams veikt ne tikai lokālu, bet arī reģionālu un iespējams pat globālu mežsaimniecības monitoringu, kā rezultātā modelim palielinās universālums;
2. noteikti veicot turpmākus pētījumus būtu jāizskata dažādas laikapstākļu komponentu kombinācijas un variācijas, kas varētu tikt izmantotas priekš modeļa izveides, jo šajā pētījumā tika apskatīta tikai viena laikapstākļu komponentu kompleksa ietekme uz SAR intensitātēs izmaiņām, taču ir zināms, ka ir arī citas laikapstākļu komponentes, kas ietekmē $\Delta\sigma^0$ vērtības, kā piemēram, sniega segas biezums, sniega albedo un vēja ātrums un citus laikapstākļu rādītājus. Veicot turpmāku pētījumu, būtu nepieciešams arī veikt ne tikai dažādu komponentu variāciju, bet arī dažādu laikapstākļu datu laika soļa vērtību izskatīšanu pētījumā, kā piemēram, turpmākā pētījumā varētu izmantot laikapstākļu vidējos datus, kas ir iegūti vairākas dienas pirms satelītuzņemšanas brīža, kā arī ņemt vērā laikapstākļus tā uzņemšanas brīdī;
3. lai uzlabotu modeļa kvalitāti un varētu veikt mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu dažādos laika periodos, nepieciešams ņemt vērā ne tikai mežizstrādes veikšanu un references teritoriju stāvokli un laikapstākļu datus viena gada griezumā, bet ņemt vērā dažādu gadu un sezonu mežizstrādes notikumus un references teritoriju stāvokli un laikapstākļu rādītājus un izmaiņas;

4. tāpat modeļa precizitātes uzlabošanai vajadzētu ņemt vērā arī meža tipu, jo dažādiem meža tipiem ir dažāda atstarošanās intensitāte, kā rezultātā, turpmākos pētījumos varētu izstrādāt vairākus modeļus, kas paredzēti dažādu meža tipu mežsaimnieciskās darbības konstatēšanai;
5. modeļa precizitātes uzlabošanai varētu veikt arī dažādu laikapstākļu datu avotu salīdzināšanu, kā, piemēram, varētu izveidot vairākus modeļus, kas balstās uz reģionālajiem laikapstākļu datiem (LVĢMC) un uz globālajiem datiem ERA5-Land, kas ir asimilēti no reģionālajiem un globālajiem novērojumiem;
6. turpmākos pētījumos varētu izskatīt laikapstākļu komponentu ietekmi uz intensitātes izmaiņām jeb $\Delta\sigma^0$ vērtībām, ja VH un VV polarizācijas dati ir apvienoti vienā kanālā;
7. būtu nepieciešams izskatīt, kāda ir robežpikseļa noņemšanas ietekme uz intensitātēs izmaiņu radītājiem, jo robežpikseļu vērtībās var būt iekļautas arī vērtības, kas reprezentē intensitātes izmaiņas un tos noņemot mainās vidējie $\Delta\sigma^0$ vērtību rādītāji;
8. pēc uzlabota modeļa izveides tā lietderību varētu pārbaudīt arī uz vējgāžu teritorijām, jo šajās teritorijas konceptuāli jābūt līdzīgām intensitātes izmaiņām, kā cirsmu teritorijās, tā pat varētu pārbaudīt, kā SAR $\Delta\sigma^0$ vērtības ietekmē zari un krūmi un citi objekti, kas klāj zemsedzi pēc kailcirtes veikšanas vai vējgāzes;
9. lai veiktu rentablu mežsaimniecības procesu monitoringu ar modeli un novērstu kļūdas, ko varētu radīt manuāla datu lejupielādēšana un apstrāde, būtu jāveic pilnīga procesa automatizēšana jeb jāizveido viena komandu virkne, kas gala rezultātā dod jau gatavas mozaīkas, kurās ir konstatēs izmaiņas meža teritorijās.

Ņemot vērā uzskaitītos priekšlikumus priekš modeļa izveides, tiek uzskatīts, ka ir iespējams ievērojami uzlabot modeļa kvalitāti un izstrādāt automātisko klasifikatoru, kas paredzēts mežsaimnieciskās darbības konstatēšanai, kurā ir novērsta laikapstākļu ietekme uz SAR $\Delta\sigma^0$ vērtībām.

SECINĀJUMI

Pētījuma ir noskaidrots, ka izmantojot brīvpieejas SAR Sentinel- 1 misijas un ERA5-Land klimatiskās reanalīzes datu kopas datus un neveicot tiešu mērījumus dabā, ir iespējams veikt mežsaimnieciskās darbības konstatēšanu, jo ir iespējams iegūt statistiski būtiskus rezultātus, kas liecina par mežsaimnieciskās darbības veikšanu, veicot tālzipētes datu un laikapstākļu datu apstrādi un modelēšanu.

Pētījuma gaitā tika noskaidrots, ka Nesterova indeksa nav piemērots, lai izteiktu vides mitrumu meža teritorijas, jo Latvijā nokrišņi bieži pārsniedz 3 mm, tādējādi Nesterova indeksa vērtības bieži ir nulle, kā rezultātā Nesterova indeksa vērtības nevar pielietot, lai novērtētu laikapstākļu komponentu ietekmi uz SAR intensitātes izmaiņām. Taču Nesterova indeksa laikapstākļu komponentes inversā rakursā ir spējīgas izskaidrot dielektrisko īpašību izmaiņas mežā, kas savukārt izskaidro izmaiņas SAR atpakaļ saņemtās intensitātes izmaiņās. Modeļa izveides gaitā tika noskaidrots, ka iepriekšējās dienas rādītāji - rasas punkta temperatūra ($^{\circ}\text{C}$) 2 m augstumā, nokrišņu summa (mm), un rasas punkta temperatūra ($^{\circ}\text{C}$) 2 m augstumā, nokrišņu summas (mm) un temperatūras ($^{\circ}\text{C}$) 2 m augstumā korelācijas rādītāji būtiski maina SAR intensitātes vērtības. Pētījumā gaitā tika noskaidrots, ka temperatūrā ($^{\circ}\text{C}$), kā atsevišķa laikapstākļu komponente neietekmē SAR intensitātes izmaiņas, taču tā ietekmē SAR $\Delta\sigma^0$ ja tiek skatīta kopā ar rasas punkta ($^{\circ}\text{C}$) temperatūru un nokrišņu summu, kas ir saistīts ar to, ka temperatūra veicina iztvaikošanu, tādējādi arī gaisa mitrumu, kas savukārt nosaka augu dielektrisko konstanti. VH polarizācijā konkrētās laikapstākļu komponentes var izskaidrot 62,7% no SAR atstarojuma intensitātes izmaiņām, bet VV polarizācijas gadījumā 54,0%.

Veicot modeļu salīdzināšanu, tika noskaidrots, ka robežpikseļa noņemšana veicina datu precizitātes uzlabošanu, jo noņemot robežpikseļu vērtības VH polarizācijas gadījuma modeļa prognozēt spēja palielinājās par 5,58%, bet VV polarizācijas gadījumā par 6,18%.

Pētījumā tika noskaidrots, ka tikai VH polarizācijas dati var tikt izmantoti mežsaimnieciskās konstatēšanai, jo tikai VH polarizācijas rādītāju *p-value* uzradīja, ka ir statistiski būtiska atšķirība starp references un cirsmu teritoriju atstarojuma vidējām vērtībām. Izmantojot VH polarizācijas modeļa koriģētās vērtības ir iespējams aptuveni divas reizes labāk veikt cirsmu konstatēšanu, jo pirms vērtības koriģēšanas, cirsmu atstarojuma intensitātes mediāna, kas norāda par intensitātes izmaiņu kopas vidējā vērtību, ir -0,734 dB, bet references teritoriju mediāna ir -0,046, bet lietojot VH polarizācijas koriģētos datus cirsmu mediāna ir -1,530 dB, bet references teritorijas mediāna ir 0,027 dB, kas būtība skaidro, ka noņemot laikapstākļu komponentu ietekmi uz atstarojumu, references teritoriju vērtības tiecas uz nulli, savukārt mežizstrādes teritoriju vērtības tiecas uz negatīvu vērtību un ir iespējams konstatēt

mežsaimniecisko darbību. VV polarizācijas gadījumā *p-values* nekoriģētai datu kopai ir 0,950, bet koriģētai datu kopai 0,390, kas liecina, ka nav statistiski būtiskas atšķirības starp cirsmu un references teritoriju intensitātes izmaiņām, jo būtiskums ir *p-value* > 0,05, bet salīdzinot VV ar modeli koriģēto vērtību *p-values*, var secināt, ka modelis uzlabo datu kopas rādītājus un cirsmu un references teritoriju mediānas vērtību diferences ir izteiktākas, cirsmu mediānas vērtības atšķiras pat 7,7 reizes. Taču jāņem vērā, ka intensitātes izmaiņas jeb $\Delta\sigma^0$ tiek mērītās decibelos, kam ir veikta logaritmiskā transformācija, kas nozīme, ka salīdzinoši liela daļa no $\Delta\sigma^0$ vērtībām ir iespējams izskaidrot ar laikapstākļu komponentēm. Pētījumā apstiprinājās arī citos pētījumos iekļautā tēze, ka VV polarizācijas vērtības ir nestabilākas pret veģetācijas izmaiņām nekā VH vērtības.

Līdzšinējos pētījumos Latvijā (piemēram Cimdiņš 2018) ir pierādīts, ka ir iespējams veikt cirsmu konstatēšanu, ja laikapstākļu ietekme uz SAR intensitātes izmaiņām ir neliela jeb laikapstākļi ir stabili, taču šajā pētījumā izstrādātais modelis pierāda, ka ir iespējams veikt cirsmu konstatēšanu neatkarīgi no laikapstākļiem, jo izmantojot izstrādāto modeli ir iespējams modelēt un prognozēt laikapstākļu ietekmi uz SAR $\Delta\sigma^0$ vērtībām un to izmaiņām.

Pētījuma metodiku un izstrādātos modeļus var izmantot automātiska mežsaimniecības monitoringa klasifikatora izstrādē. Bakalaura darba ietvaros ir doti deviņi priekšlikumi, kas varētu tikt izmantoti, lai veiktu precīzāka modeļa izstrādi turpmākā pētījumā.

PATEICĪBAS

Pirmkārt, vēlētos izteikt pateicību bakalaura darba vadītājam docentam Dr. geogr. Mārim Nartišam par palīdzību, ieteikumiem, atbalstu un ieguldīto laiku bakalaura izstrādes procesā. Vēlētos izteikt pateicību arī par iedrošinājumu izziņāt tālzpētes metodes, kas netika apgūtas studiju procesa laikā un motivāciju turpināt attīstīties nozarē.

Pateicos arī SIA "PATA Strenči" mežsaimniecības un mežizstrādes uzņēmumam, kā arī personīgi uzņēmuma valdes priekšsēdētājam Andrim Krastiņam un meža resursu daļas vadītājam Reinim Muižniekam, kas nodrošināja mežizstrādes datus.

Pateicos arī LU ĢZZF pasniedzējiem un personālam, par studiju laikā apgūtajām zināšanām, palīdzību studiju laikā un ievirzi nozarē.

Vēlos pateikties arī visiem, kuri šo bakalauru darbu lasīs un pievērsīs zinātniskajam pētījumam uzmanību, jo tādejādi tiks īstenots patiesais zinātnes un bakalaura izstrādes mērķis – zināšanu pārnese.

Tāpat, vēlos pateikties arī saviem līdzcilvēkiem, draugiem un studiju biedriem, kas atbalstīja, palīdzēja un motivēja visu šo studiju gadu laiku.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

Publicētie materiāli

- Antropov, O., Rauste, Y., Astola, H., Praks, J., Hame, T., Hallikainen, M.T. 2014. Land cover and soil type mapping from spaceborne PolSAR data at L-band with probabilistic neural network. *Geoscience and Remote Sensing*. 52(9), 5256–5270.
- Antropov, O., Rauste, Y., Seifert, F.M., Häme, T. 2015. Selective logging of tropical forests observed using L- and C-band SAR satellite data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Milan, Italy, 3870-3873.
- Antropov, O., Rauste, Y., Vaananen, A., Mutanen, T., Häme, T. 2016. Mapping forest disturbance using long time series of Sentinel-1 data: case studies over boreal and tropical forests. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Beijing, China, 3906-3909.
- Bae, S., Levick, S.R., Heidrich, L., Magdon, P., Leutner, F., Wöllauer, S., Serebryanyk, A., Nauss, T., Krzystek, P., Gossner, M.M., Schall, P., Heibl, C., Bäessler, C., Doerfler, I., Schulze, E.D., Krah, F.S., Culmsee, H., Jung, K., Heurich, M., Fischer, M., Seibold, S., Thorn, S., Gerlach, T., Hothorn, T., Weisser, W.W., Müller, J. 2019. Radar vision in the mapping of forest biodiversity from space. *Nature Communication*. 10(4757).
- Balzter, H. 2001. Forest mapping and monitoring with interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). *Progress in Physical Geography*. 25(2), 159-177.
- Balzter, H., Cole, B., Thiel, C., Schullius, C. 2015. Mapping CORINE Land Cover from Sentinel-1A SAR and SRTM Digital Elevation Model Data using Random Forests. *Remote Sensing*. 7(11), 14876-14898.
- Bispo, P., Pardini, M., Papathanassio, K., Kugler, F., Balzter, H., Rains, D., Santos, D., João, M., Rizaev, I., Tansey, K., Santos, M., Araujo, L. 2019. Mapping Forest Successional Stages in the Brazilian Amazon Using Forest Heights Derived from TanDEM-X SAR Interferometry. *Remote Sensing of Environment*. 232.
- Bush, T.F., Ulaby, F.T. 2014. Crop Inventories with Radar. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 4(2), 81-87.
- Cartus, O., Santoro, M., Wegmüller, R. 2019. Benchmarking the retrieval of biomass in boreal forests using P-band SAR backscatter with multi-temporal C- and L-band observations. *Remote Sensing*. 11(14), 1695.
- Chan, Y.K., Koo, V.C. 2008. An introduction to synthetic aperture radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*. 2, 27–60.
- Crockett, M.T., Long, D. 2013. An introduction to synthetic aperture radar: a high-resolution alternative to optical imaging. *Oceanography*. 26(2), 20-33.
- Cutler, M., Boyd, D., Foody, G.M., Anand, V. 2012. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: an assessment of predictions between regions. *Photogrammetry and Remote Sensing*. 70, 66-77.
- Delgado-Blasco, J.M., Fomelis, M., Stewart, C., Hooper, A. 2019. Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing*. 11(2), 129.
- Dobson, M., Pierce, L., McDonald, K.C., Sharik, T.L. 1991. Seasonal change in radar backscatter from mixed conifer and hardwood forests in northern Michigan. *Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management*. 3, 1121-1124.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E.S., Christensen, N. 1992. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *Geoscience and Remote Sensing*. 30(2), 412-415.
- Dostálová, A., Hollaus, M., Milenković, M., Wagner, W. 2016. Forest area derivation from Sentinel-1 data. *Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 7, 227-233.

- Dostálová, A., Wagner, W., Milenković, M., Hollaus, M. 2018. Annual seasonality in Sentinel-1 signal for forest mapping and forest type classification. *Remote Sensing*. 39(21), 7738-2260.
- Durieux, A., Calef, M., Arko, S., Chartrand, R., Kontgis, C., Keisler, R., Warren, M. 2019. Monitoring forest disturbance using change detection on synthetic aperture radar imagery. *Applications of machine learning*. 11139.
- Elachi, C., Van Zyl, J. 2006. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. 2nd edn. Hoboken, New Jersey. Wiley-Interscience,
- Englhart, S., Keuck, V., Siegert, F. 2011. Aboveground biomass retrieval in tropical forests – The potential of combined X- and L-band SAR data use. *Remote Sensing of Environment*. 115(5), 1260–1271.
- Foley, J.A., Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science*. 309(4), 570-574.
- Forkuor, G., Benewinde-Zoungrana, J.B., Dimobe, K., Ouattara, B., Prasad-Vadrevu, K., Ebagnerin-Tondoh, J. 2020. Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets – a case study. *Remote Sensing of Environment*. 236.
- Franklin, S.E. 2001. *Remote sensing for sustainable forest management*. Boca Raton, CRC Press.
- Frison, P.L., Fruneau, B., Kmiha, S., Soudani, K., Dufrière, E., Le Toan, T., Koleček, T., Ludovic V., Mougin, E., Rudant, J.P. 2018. Potential of Sentinel-1 Data for Monitoring Temperate Mixed Forest Phenology. *Remote Sensing*. 10, 2049.
- Gebert, N., Krieger, G., Moreira, A. 2009. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging. *Aerospace and Electronic Systems*. 45(2), 564-592.
- Ghosh, S., Behera, M. 2018. Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*. 96, 29-40.
- Gudex-Cross, D., Pontius, J., Adams, A. 2017. Enhanced forest cover mapping using spectral unmixing and object-based classification of multi-temporal Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 196, 193-204.
- Jansons, Ā., Donis, J., Šņepsts, G., Jansons, J., Zadiņa, M. 2015. Meža ugunsbīstamības prognozes. *Mežzinātne* 29. 62, 70-83.
- Joshi, N., Mitchard, E., Woo, N., Torres, J., Moll-Rocek, J., Ehammer, A., Collins, M., Jepsen, M., Fensholt, R. 2015. Mapping dynamics of deforestation and forest degradation in tropical forests using radar satellite data. *Environmental Research Letters*. 10(3).
- Keith, T. Z. 2015. *Multiple regression and beyond: An introduction to multiple regression and structural equation modeling*. 2nd ed. New York. Routledge/Taylor & Francis Group.
- Kellndorfer, J. 2019. SAR Training Workshop for Forest Applications. Part 1 - Getting to Know SAR Images and Forest Signatures. Flores-Anderson, A.I. et al. (eds.). *The SAR handbook. Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Huntsville, National Space Science and Technology center. 81-171
- Filipponi, F. 2019. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*. 18(11).
- Kellndorfer, J.M., McDonald, K. 2009. Active and passive microwave systems. Warner, T.A., Nellis, M.D. et al. (eds.). *The SAGE Handbook of remote sensing*. London (etc.), Sage Press, 179-198.
- Kellndorfer, J.M., Pierce, L.E., Dobson M.C., Ulaby, F.T. 1998. Toward consistent regional-to-global-scale vegetation characterization using orbital SAR systems. *Geoscience and Remote Sensing*. 36(5), 1396-1411.
- Kerle, N., Oppenheimer, C. 2002. Satellite Remote Sensing as a tool in Lahar disaster management. *Disasters*. 26(2), 140-60.

- Khati, U., Kumar, V., Bandyopadhyay, D., Musthafa, M., Singh, G. 2018. Identification of forest cutting in managed forest of Haldwani, India using ALOS-2/PALSAR-2 SAR data. *Environmental Management*. 213, 503-512.
- Kobayashi, M.M., Stocklin, F., Pugh, M., Kuperman, I., Bell, D., El-Nimri, S., Johnson, B., Huynh, N., Kelly, S., Nessel, J., Svitak, A., Williams, T., Linton, N., Arciaga, M., Dissanayake, A. 2019. NASA's high-rate Ka-band downlink system for the NISAR mission. *Acta Astronautica*. 159, 358-361.
- Koyama, C., Watanabe, M., Hayashi, M., Shimada, M. 2019. Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis. *Remote Sensing of Environment*. 233.
- Krieger, G., Moreira, A. 2003. Potential of digital beamforming in bi- and multistatic SAR. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 521(1), 527-529.
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Marwan Y., Zink, M. 2007. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing*. 45(11), 3317-3341.
- Kumar, S., Khati, U.G., Chandola, S., Agrawal, S., Kushwaha, S.P.S. 2017. Polarimetric SAR Interferometry based modeling for tree height and aboveground biomass retrieval in a tropical deciduous forest. *Advances in Space Research*. 60(3), 571-586.
- Kumar, T., Patnaik, C. 2013. Discrimination of mangrove forests and characterization of adjoining land cover classes using temporal C- band synthetic aperture radar data: a case study of Sundarbans. *Applied Earth Observation and Geoinformation*. 23, 119-131.
- Lazdiņš, A., Lupiķis A. 2019. Siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķinu sistēma apsaimniekotajiem mitrājiem. Priede, A., Gancone A. (eds.) Kūdras ieguves ietekmētu teritoriju atbildīga apsaimniekošana un ilgtspējīga izmantošana. Rīga, Baltijas krasti, 49-52.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Guyon, D. 1992. Relating forest biomass to SAR data. *Geoscience and Remote Sensing*. 30(2), 403-411.
- Le Toan, T., Laur, H., Mougin, E., Lopes, A. 1989. Multitemporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-band SAR images. *Geoscience and Remote Sensing*. 27(6), 709-718.
- Lewis, A.J., Henderson, F.M. 1999. Radar fundamentals: the geoscience perspective. Henderson, F.M., Lewis, A.J. (eds.). *Principles and Applications of Imaging Radar*. 2nd edn. New York, John Wiley & Sons.
- Liu, Y., Gong, W., Xing, Y., Hu, X., Gong, J. 2019. Estimation of the forest stand mean height and aboveground biomass in Northeast China using SAR Sentinel-1B, multispectral Sentinel-2A, and DEM imagery. *Photogrammetry and Remote Sensing*. 151, 277-289.
- Lohberger, S., Keuck, V., Siegert, F. 2011. Aboveground biomass retrieval in tropical forests – the potential of combined X- and L-band SAR data use. *Remote Sensing of Environment*. 115(5), 1260-1271.
- Luckman, A., Baker, J., Mora- Kuplich, T., Da Costa Freita, C., Yanasse, A., Frery, C. 1997. A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. *Remote Sensing of Environment*. 60(1), 1-13.
- Madeiros, C.B., Pires, F., 1994. Databases for GIS. *ACM Sigmod Record*. 23(1). 107-115.
- Maghsoudi, Y., Collins, M.J., Leckie, D.G. 2013. Radarsat-2 polarimetric SAR data for boreal forest classification using SVM and a wrapper feature selector. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 6(3), 1531-1538.
- Martone, M., Rizzoli, P., Brautigam, B., Krieger, G. 2015. A method for generating forest/non-forest maps from TanDEM-X interferometric data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Milan, Italy, 2634-2637.
- Martone, M., Rizzoli, P., Wecklich, C., Gonzalez, C., Bueso, J., Valdo, P., Schulze, D., Zink, M., Krieger, G., Moreira, A. 2018. The global forest/non-forest map from TanDEM-X interferometric SAR data. *Remote Sensing of Environment*. 205, 352-373.

- Mavrakis, A., Agelakis, A., Theoharatos, G. 2013. Forest fire indices in Greece during the forest fire events of summer 2007. *11th international conference of meteorology, climatology and atmospheric physics (COMECAP 2012). Advances in meteorology, climatology and atmospheric physics*. Berlin, New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 223-229.
- McCandless, S.W., Jackson, C.R. 2004. Principles of Synthetic Aperture Radar. Jackson, C.R. et al. (eds.). *Synthetic aperture radar marine user's manual*. Washington, U.S. Department of Commerce, 1-22.
- Meyer, F. 2019. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: principles, data access, and basic processing techniques. Flores-Anderson, A.I. et al. (eds.). *The SAR handbook. Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Huntsville, National Space Science and Technology center, 21-43.
- Meža nozare skaitļos un faktos. 2019. (Buklets). *Latvijas Valsts Meži*. Biedrība "Zaļās mājas".
- Meža nozare skaitļos un faktos. 2020. (Buklets). *Latvijas Valsts Meži*. Biedrība "Zaļās mājas".
- Mitchell, A., Rosenqvist, A., Mora, B. 2017. Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. *Carbon Balance and Management*. 12.
- Mngadi, M., Odindi, J., Peerbhay, K., Mutanga, O. 2019. Examining the effectiveness of Sentinel-1 and 2 imagery for commercial forest species mapping. *Geocarto International*. 1-13.
- Moghaddam, M. 2009. Polarimetric SAR phenomenology and inversion techniques for vegetated terrain. Warner, T.A., Nellis, M.D., Giles, M.F. et al. (eds.). *The SAGE Handbook of remote sensing*. London (etc.), Sage Press, 79-90.
- Molinier, M., Rauste, Y., Häme, T. 2008. Clearcut Mapping for Sustainable Forest Management using TerraSAR-X Imagery. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Boston, United States, 647-650.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek I., Papathanassiou, K.P. 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. *Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 1(1), 6-43.
- Moreno, J., Johannessen, J.A., Levelt, P.F., Hanssen, R.F. 2012. ESA's sentinel missions in support of Earth system science. *Remote Sensing of Environment*. 120, 84-90.
- Obersteiner, M., Böttcher, H., Yamagata, Y. 2010. Terrestrial ecosystem management for climate change mitigation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2, 271-276.
- Ojea, E., Nunes, P.A.L.D., Loureiro, M.L. 2010. Mapping biodiversity indicators and assessing biodiversity values in global forests. *Environmental and Resource Economics*. 47(3), 329-347.
- Olesk, A., Voormansik, K., Pohjala, M., Noorma, M. 2015. Forest change detection from Sentinel-1 and ALOS-2 satellite images. *IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*. Singapore, 522-527.
- Padalia, H., Yadav, S. 2016. Evaluation of RISAT-1 SAR data for tropical forestry applications. *Advances in Space Research*. 59.
- Pham, V.M., Pham, T., Du, Q., Bui, Q.V.V.D., Bui, Q.T., Pham, H.M., Nguyen, T.N. 2019. Integrating Sentinel-1A SAR data and GIS to estimate aboveground biomass and carbon accumulation for tropical forest types in Thuan Chau district, Vietnam. *Society and Environment*. 14, 148-157.
- Quegan, S. 1995. Recent advances in understanding SAR imagery. Danson, F.M., Plummer, S.E. (eds.). *Advances in environmental remote sensing*. London, John Wiley & Sons, 89-104.
- Quegan, S., Le Toan, T., Chave, J., Dall, J., Exbrayat, J.F., Minh, D.H.T., Lomas, M., D'Alessandro, M.M., Paillou, P., Papathanassiou, K., Rocca, F., Saatchi, S., Scipal, K., Shugart, H., Smallman, T.L., Soja, M.J., Tebaldini, S., Ulander, L., Villard, L., Williams, M. 2019. The European Space Agency BIOMASS mission: measuring forest above-ground biomass from space. *Remote Sensing of Environment*. 227, 44-60.

- Ranson, K. J., Sun, G. 1994. Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data. *Geoscience and Remote Sensing*. 32(2), 388-396.
- Rauste, Y. 2005. Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping. *Remote Sensing of Environment*. 97(2), 263-275.
- Rauste, Y. 1990. Incidence-angle dependence in forested and non-forested areas in Seasat SAR data. *International Journal of Remote Sensing*. 11(7), 1267-1276.
- Reiche, J., Hamunyela, E., Verbesselt, J., Hoekman, D.H., Herold, M. 2018. Improving near-real time deforestation monitoring in tropical dry forests by combining dense Sentinel-1 time series with Landsat and ALOS-2 PALSAR-2. *Remote Sensing of Environment*. 204, 147-161.
- Reiche, J., Souza, C.M., Hoekman, D.H., Verbesselt, J., Persaud, H., Herold, M. 2013. Feature level fusion of multi-temporal ALOS PALSAR and Landsat data for mapping and monitoring of tropical deforestation and forest degradation. *Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 6(5), 2159-2173.
- Rignot, E.J.M., Williams, C.L., Way, J., Viereck, L.A. 1994. Mapping of forest types in Alaskan boreal forests using SAR imagery. *Geoscience and Remote Sensing*. 32(5), 1051-1059.
- Rindfuss, R.R., Walsh, S.J., Turner II, B.L., Fox, J., Mishra, V. 2004. Developing a science of land change: challenges and methodological issues. *Proceedings of the National Academy of Science*. 101(39), 13976–13981.
- Rüetschi, M., Schaepman, M., Small, D. 2017. Using multitemporal Sentinel-1 C-band backscatter to monitor phenology and classify deciduous and coniferous forests in Northern Switzerland. *Remote Sensing*. 10.
- Rüetschi, M., Schaepman, M.E., Small, D. 2018. Using Multitemporal Sentinel-1 C-band Backscatter to Monitor Phenology and Classify Deciduous and Coniferous Forests in Northern Switzerland. *Remote Sensing*. 10(1), 55.
- Santi, E., Paloscia, S., Pettinato, S., Fontanelli, G., Mura, M., Zolli, C., Maselli, F., Chiesi, M., Bottai, L., Chirici, G. 2017. The potential of multifrequency SAR images for estimating forest biomass in Mediterranean areas. *Remote Sensing of Environment*. 200, 63-73.
- Santoro, M., Cartus, O. 2018. Research Pathways of Forest above-ground biomass estimation based on SAR backscatter and interferometric SAR observations. *Remote Sensing*. 10(4), 608.
- Santoro, M., Wegmüller, U., Askne, J. 2018. Forest stem volume estimation using C-band interferometric SAR coherence data of the ERS-1 mission 3-days repeat interval phase. *Remote Sensing of Environment*. 216, 684-696.
- Schaich, H., Milad, M. 2013. Forest biodiversity in a changing climate: which logic for conservation strategies? *Biodiversity and Conservation*. 22(5), 1107–1114.
- Schlund, M., Von Poncet, F., Hoekman, D.H., Kuntz, S., Schullius, C. 2014. Importance of bistatic SAR features from TanDEM-X for forest mapping and monitoring. *Remote Sensing of Environment*. 151, 16-26.
- Shimabukuro, Y., Beuchle, R., Aragão, L., Cassol, H. 2019. Sentinel-1 time-series analysis for detection of forest degradation by selective logging. *XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Santos, Brazil, 1-4.
- Shimada, M., Itoh, T., Motohka, T., Watanabe, M., Shiraishi, T., Rajesh, T., Lucas, R. 2014. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*. 155, 13-31.
- Smith, G., Askne, J. 1997. Use of ERS SAR interferometry for monitoring clear-cutting of forests. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Singapore, 793 – 796.
- Smith, G., Ulander, L.M.H. 2000. A model relating VHF-band backscatter to stem volume of coniferous boreal forest. *Geoscience and Remote Sensing*. 38(2), 728- 740.

- Solberg, S., Astrup, R., Weydahl, D. 2013. Detection of Forest Clear-Cuts with Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and TanDEM-X InSAR Data. *Remote Sensing*. 5(11), 5449-5462.
- Solberg, S., Hansen, E., Gobakken, T., Næsset, E., Zahabu, E. 2017. Biomass and InSAR height relationship in a dense tropical forest. *Remote Sensing of Environment*. 192, 166-175.
- Stellingwerf, D., Yousif, A., Hussin, A., 1997. *Measurement and estimations of forest stand parameters using remote sensing*. Netherlands. CRC Press.
- Tanase, M., Aponte, C., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Heurich, M. 2018. Detection of windthrows and insect outbreaks by L-band SAR: A case study in the Bavarian Forest National Park. *Remote Sensing of Environment*. 209, 700-711.
- Tanase, M., Ludovicm, V., Pitar, D., Apostol, B., Petrila, M., Chivulescu, S., Leca, S., Borlaf, I., Pascu, I., Silviu, A.C., Dobre, P., Guiman, D., Lorent, G., Anghelus, A., Ciceu, C., Nedea, A., Stanculeanu, G., Flaviu, R., Aponte, P., Ovidiu, C. 2019. Synthetic aperture radar sensitivity to forest changes: A simulations-based study for the Romanian forests. *Science of The Total Environment*. 689, 1104-1114.
- Tanase, M.A., De La Riva, J., Santoro, M., Pérez-Cabello, F., Kasischke, E. 2011. Sensitivity of SAR data to post-fire forest regrowth in Mediterranean and boreal forests. *Remote Sensing of Environment*. 115(8), 2075–2085.
- Thapa, R., Masanobu, S., Manabu, W., Motohka, T., Shiraishi, T. 2013. The tropical forest in South East Asia: Monitoring and scenario modeling using Synthetic Aperture Radar data. *Applied Geography*. 41, 168-178.
- Thiel, C., Schmullius, C. 2016. The potential of ALOS PALSAR backscatter and InSAR coherence for forest growing stock volume estimation in Central Siberia. *Remote Sensing of Environment*. 172, 258–273.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Navas-Traver, I., Deghaves, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*. 120, 9–24.
- Ulaby, F.T., Whitt, M.W., Dobson, M.C. 1990. Measuring the propagation properties of a forest canopy using a polarimetric scatterometer. *Antennas and Propagation*. 38(2), 251–258.
- Waring, H.R., Running, S.W. 2007. *Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales*. 3rd edn. San Diego, USA, Academic Press.
- Widhalm, B., Bartsch, A., Leibman, M., Khomutov, A. 2017. Active Layer Thickness Estimation from X-Band SAR Backscatter Intensity. *The Cryosphere Discussions*. 11, 483–496.
- Wulder, M.A., White, J.C., Coops, N., Ortellepp, S. 2009. Remote sensing for studies of vegetation condition: theory and application. Warner, T.A., Nellis, M.D., Giles, M.F. et al. (eds.). *The SAGE Handbook of remote sensing*. London (etc.), Sage Press, 357-367.
- Xu, X., Xu, S., Jin, L., Song, E. 2011. Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications. *Pattern Recognition Letters*. 32(7), 956-961.
- Younis, M., Fischer, C., Wiesbeck, W. 2003. Digital beamforming in SAR systems. *Geoscience and Remote Sensing*. 41(7), 1735-1739.
- Yunjin K., Van Zyl, J. 2001. Comparison of forest parameter estimation techniques using SAR data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, 1395-1397.
- Zhuang, H., Tan, Z., Kazhong, D., Hongdong, F. 2019. It is a misunderstanding that log ratio outperforms ratio in change detection of SAR images. *European Journal of Remote Sensing*. 52(1), 484-492.

Nepublicētie materiāli

- Ang, W., Hobbs, S. 2014. *Weather Effects on Radar Backscatter from Crops*. European Space agency. Sk. 05.12.2019. Pieejams <https://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/ang/index-2.html>
- Attālā izpēte*. S.a. Latvijas valsts mežu ģeotelpiskās informācijas tehnoloģiju lietotne (LVM GEO). Sk. 02.01.2020. Pieejams <https://www.lvmgeo.lv/pakalpojumi/attala-izpete>
- Birzgaļe, S. 2018. *Hiperspektrālo datu izmantošana egļu Picea abies sakņu trupes identifikācijai*. Rīga, Ģeogrāfijas un zemes zinātņu fakultāte, Latvijas Universitāte.
- Cimdiņš, R. 2018. *Sentinel-Izmantošanas iespējas mežsaimnieciskās darbības kontrolē*. Bakalaura darbs. Rīga, Ģeogrāfijas un zemes zinātņu fakultāte, Latvijas Universitāte.
- Climate reanalysis*. S.a. Climate change service. Sk. 01.05.2020. Pieejams <https://climate.copernicus.eu/>
- Copernicus Climate Data Store 2019. *ERA5-Land hourly data from 1981 to present*. Sk. 04.04.2020. Pieejams <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>
- Copernicus Open Access Hub 2019. *Sentinel*. Sk. 04.04.2020. Pieejams <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- European Space Agency, 2019. *Sentinel-1 observation scenario*. Sk. 04.05.2020. Pieejams sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario
- Forest area (sq. km)*. S.a The World Bank. Sk. 03.03.2020. Pieejams data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS
- Forest*. S.a. European Space Agency (ESA). Sk. 20.03.2020. Pieejams https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Forests
- Grava, A. 2019. *Modernās tehnoloģijas meža ugunsapsardzībā*. Zemkopības ministrija. Sk. 02.01.2020. Pieejams <https://www.zm.gov.lv/valsts-meza-dienests/jaunumi/modernas-tehnologijas-meza-ugunsapsardziba?id=10257>
- Yang, X., Giusti, M. 2020. *ERA5-Land data documentation*. European centre for medium-range weather forecast. Sk. 01.05.2020. Pieejams <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5-Land%3A+data+documentation>
- Latvijas Valsts mežzinātnes institūts (LVMI) „Silava” 2017. *Metodikas izstrāde bioloģiskās daudzveidības novērtēšanai nacionāla meža monitoringa ietvaros*. LVMI “Silava”. Sk. 02.01.2020. Pieejams http://www.silava.lv/userfiles/file/Projektu%20parskati/2017_MAF_BD_monitorings.pdf
- Liepiņš, K. 2018. *Metodes koku augšanas apstākļu uzlabošanas pasākumu plānošanas un kvalitātes kontrolei*. Latvijas mežzinātnes institūts “Silava”. Sk. 05.01.2020. Pieejams <http://www.silava.lv/24/section.aspx/View/202>
- LR Centrālā statistikas pārvalde (LR CSP) 2019a. *Mežsaimniecība 2018. gadā*. Sk. 10.11.2019. Pieejams https://www.csb.gov.lv/sites/default/files/publication/2019-09/Nr_15_Mezsaimnieciba_2018_%2819_00%29_LV.pdf
- LR Centrālā statistikas pārvalde 2019b. *Latvijas meža zeme un koksnes krāja*. Sk. 20.11.2019. Pieejams https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/lauks/lauks__mezsaimn__plat_mez/MSG010.px
- LR Centrālā statistikas pārvalde 2019c. *Izcirstās platības un krājas*. Sk. 20.11.2019. Pieejams https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/lauks/lauks__mezsaimn__mezizstr__ikgad/M_EG020.px/
- Lu, Z. S.a. *InSAR Deformation Mapping and Modeling. Part I: Introduction to Synthetic Aperture Radar*. U.S. Geological Survey. Sk. 12.12.2019. Pieejams https://vhub.org/resources/315/download/Lu_INSAR1.pdf

- LVMI „Silava” 2014. *Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vidēja termiņa (2014.–2020. gadi) darbības un attīstības stratēģija*. LVMI „Silava”. Sk. 02.01.2020. Pieejams http://www.silava.lv/userfiles/file/Aktualitates/2014_09_01_LVMI_Silava_strategija.pdf
- LVMI „Silava” 2017a. *Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vidēja termiņa (2014.–2020. gadi) darbības un attīstības stratēģija*. LVMI „Silava”. Sk. 02.01.2020. Pieejams http://www.silava.lv/userfiles/file/Aktualitates/2017_04_05_LVMI%20Silava%20strat%C4%93gija%202014-2020.pdf
- LVMI „Silava” 2018. *Pārskats par “Meža darbu mehanizācijas un meža biokurināmā pētījumu programmas” 2017. gada rezultātiem*. LVMI „Silava”. Sk. 02.01.2020. Pieejams <http://www.silava.lv/23/section.aspx/View/182>
- LVMI „Silava” 2019. *Pārskats par pētījuma programmas “Meža darbu mehanizācijas un meža biokurināmā pētījumu programmas” 2018. gada rezultātiem*. LVMI „Silava”. Sk. 02.01.2020. Pieejams http://www.silava.lv/userfiles/file/Projektu%20parskati/2018_Lazdins_LVM_mehan_biokur.pdf
- Mākslīgais intelekts arī mežā*. 2018. Latvijas valsts meži. Sk. 05.01.2019. Pieejams <https://www.lvm.lv/jaunumi/arhivs/2018/3858-maksligais-intelekts-ari-meza>
- Meža apsaimniekošana*. S.a. Valsts meža dienests. Sk. 01.01.2020. Pieejams <https://www.vmd.gov.lv/valsts-meza-dienests/statiskas-lapas/-meza-apsaimniekosana-?nid=1472#jump>
- Mūsu Latvijas meži aug un ražo*. 2019. Zemeunvalsts.lv. Sk. 05.01.2020. Pieejams <https://www.zemeunvalsts.lv/musu-latvijas-mezi-aug-un-razo->
- Nacionālā meža monitoringa noteikumi. Latvijas Republikas Ministru Kabineta noteikumi. Nr. 238. Pieņemti 03.04.2012.
- Pārtikas un lauksaimniecības organizācija (FAO) 2015. *Global Forest Resources Assessment*. Sk.12.20.2019. Pieejams <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/>
- Persson, H. 2014. *Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data. Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry*. Ph.D. dissertation. Umeå, Department of Forest Resource Management, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Podest, E. 2017. *Basics of Synthetic Aperture Radar (SAR)*. NASA. Sk. 01.11.2019. Pieejams https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2.pdf
- Podest, E., Mehta, A. 2018. *Overview and Applications of Synthetic Aperture Radar*. NASA. Sk. 12.12.2019. Pieejams <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/IndiaFlood18/D2P2-Overview-SAR-final.pdf>
- Portnoi, M. 2017. *Methods for sugarcane harvest detection using polarimetric SAR*. Agritrop. Sk. 20.03.2020. Pieejams <https://agritrop.cirad.fr/589968/7/ID589968.pdf>
- Radar Course 2*. S.a. European Space Agency (ESA). Sk.02.03.2020. Pieejams https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo/missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2-/asset_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-parameters-affecting-radar-backscatter
- Sentinel-1*. S.a. European Space Agency. Sk. 04.04.2020. Pieejams <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- SIA “Envirotech” 2013. *GIS Latvija 10.2*. Sk. 04.04.2020. Pieejams <http://old.envirotech.lv/lv/aktualitates/gis-latvija-10-2/>
- Šogad septiņos paraugos konstatēta ozolu akūtā kalšana*. 2019. Valsts augu aizsardzības dienests. Sk. 03.01.2020. Pieejams <http://www.vaad.gov.lv/21/section.aspx/8295>
- Ventspils augsto tehnoloģiju parks 2012. *Kosmosa tehnoloģiju un pakalpojumu nozares klastera stratēģija*. Sk. 05.01.2020. Pieejams <https://pdfslide.net/documents/kosmosa-tehnologiju-un-pakalpojumu-nozares-klastera-strategija.html>

Vides aizsardzības un reģionālas attīstības ministrija (VARAM) 2014. *Vides politikas pamatnostādnes 2014. - 2020. gadam - 3.pielikums*. Sk. 20.12.2019. Pieejams http://www.varam.gov.lv/in_site/tools/download.php?file=files/text/dokumenti/pol_doc/Vide//VARAMPAMP03_130314_3_p_MONITORINGS.pdf

Zālīte, K. S.a. *Mikroviļņu tālizpēte un pļaušana. SAR kā rīks apsaimniekošanas novērtēšanai*. Vides institūts. Sk. 05.12.2019. Pieejams <https://www.videsinstituts.lv/assets/upload/userfiles/files/Zalite-SAR-20170411.pdf>

Kartogrāfiskie materiāli

Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra (LĢIA) 2017. Latvijas 6. cikla ortofotokarte. LU ĢZZF WMS. Sk. 04.04.2020. Pieejams <https://www.geo.lu.lv/kartes/>

PIELIKUMI

PIELIKUMU SATURS

1. pielikums. Informācija par mežizstrādes veikšanu no SIA “PATA Strenči” mežsaimniecība un mežizstrādes uzņēmuma.....	79
2. pielikums. Izmantoto Sentinel-1 un Sentinel-2 datu saraksts.....	80
3. pielikums. Cirsma platību un meža veida informācija.....	81
4. pielikums. References teritoriju platību un meža veida informācija.....	82
5. pielikums. Robežpikseļu noņemšanas komandrinda (skripts).....	84
6. pielikums. ERA5-Land datu lejupielādēšanas komandrinda (skripts).....	86
7. pielikums. Nesterova indeksa aprēķināšanas komandrinda (skripts).....	87
8. pielikums. Komandrinda priekš Šapiro-Vilka normalitātes testa un Vilkoksona testa veikšanas.....	88
9. pielikums. VH polarizācijas (bez robežpikseļa vērtībām) modeļa izveides piemērs.....	89
10. pielikums. ERA-Land datu eksportēšana .tif formātā.....	91
11. pielikums. Sentinel-1 standarta pirmapstrādes komandu rinda (skripts).....	93
12. pielikums. Sentinel-1 datu apgriešana un sešu kanālu faila izveidošanas piemērs.....	98
13. pielikums. R_modelis.xlsx datubāze.....	102

Informācija par mežistrādes veikšanu no SIA "PATA Strenči" mežsaimniecības un mežizstrādes uzņēmuma

<i>Cirsmas Nr.</i>	<i>Kvartālu apgabals</i>	<i>Kvartāls</i>	<i>Nogabals</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Platība, ha</i>	<i>Zāģēšanas uzsākšanas datums</i>	<i>Zāģēšanas beigu datums</i>
1	102	207	15	616941	393775	5	26.02.2019	02.03.2019
2	102	207	17	617258	393695	5	22.02.2019	26.02.2019
3	102	323	34	615604	388025	3,7	16.09.2019	20.09.2019
4	102	385	23;24	596508	388032	3,3	07.03.2019	08.03.2019
5	102	310	3	616406	388607	3,2	22.09.2019	24.09.2019
6	102	515	18;19	610140	385981	2,4	05.10.2019	08.10.2019
7	103	463	14	623183	384843	2,4	20.09.2019	21.09.2019
8	102	370	19	600929	389888	1,9	26.03.2019	28.03.2019
9	103	449	8	625618	386483	1,9	10.10.2019	12.10.2019
10	102	478	6;14	603203	384451	1,9	05.03.2019	06.03.2019
11	103	448	16;17	625309	386369	1,6	07.10.2019	10.10.2019
12	102	208	1	617182	392999	1,9	13.10.2019	15.10.2019
13	103	448	9	624957	386348	1,7	05.10.2019	07.10.2019
14	102	521	10;11;14	613307	386134	2	29.09.2019	02.10.2019
15	102	429	3	597311	384410	1,6	01.11.2019	02.11.2019
16	103	379	26;29	621141	386787	1,8	17.03.2019	18.03.2019
17	102	459	27	603067	385947	1,5	01.03.2019	02.03.2019
18	102	384	3;4	599696	389345	1,3	09.03.2019	10.03.2019
19	102	472	17	601838	383570	1,4	28.10.2019	29.10.2019
20	102	493	11;43	604039	384032	0,8	15.04.2019	17.04.2019

Izmantoto Sentinel-1 un Sentinel-2 datu saraksts

Sentinel-1 un Sentinel-2 izmantoto produktu saraksts

S1A_IW_GRDH_1SDV_20190216T044230_20190216T044255_025950_02E3EF_6A2E.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190223T043416_20190223T043441_026052_02E79D_0784.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190228T044230_20190228T044255_026125_02EA2F_6EA4.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190307T043416_20190307T043441_026227_02EDDC_86E1.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190312T044230_20190312T044255_026300_02F08B_5B81.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190319T043416_20190319T043441_026402_02F456_4159.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190324T044230_20190324T044255_026475_02F702_661F.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190331T043416_20190331T043441_026577_02FAC4_A8D8.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190412T043416_20190412T043441_026752_03012D_0634.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190424T043417_20190424T043442_026927_030782_30F1.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190915T043425_20190915T043450_029027_034B0F_ADD7.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190920T044239_20190920T044304_029100_034D87_09B8.SAFE
S1B_IW_GRDH_1SDV_20190921T043343_20190921T043408_018131_02224D_7063.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190927T043425_20190927T043450_029202_035101_338D.SAFE
S1B_IW_GRDH_1SDV_20191003T043343_20191003T043408_018306_0227BC_195D.SAFE
S1B_IW_GRDH_1SDV_20191008T044158_20191008T044223_018379_0229F5_9B1B.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20191009T043425_20191009T043450_029377_03570C_8571.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20191014T044240_20191014T044305_029450_035997_4A78.SAFE
S1B_IW_GRDH_1SDV_20191020T044158_20191020T044223_018554_022F54_EA23.SAFE
S1B_IW_GRDH_1SDV_20191027T043344_20191027T043409_018656_023288_37E5.SAFE
S1B_IW_GRDH_1SDV_20191101T044158_20191101T044223_018729_0234D0_E35F.SAFE
S1A_IW_GRDH_1SDV_20191107T044240_20191107T044305_029800_0365C6_9DE5.SAFE
S2B_MSIL2A_20180823T094029_N0208_R036_T35VMD_20180823T122014.SAFE
S2B_MSIL2A_20200204T094109_N0214_R036_T35VME_20200204T122409.SAFE

Cirsmu platību un meža veida informācija

Cirsmas Nr.	X	Y	Platība, ha	Zāģēšanas uzsākšanas datums	Zāģēšanas beigu datums	Veids
20	604039	384032	0,8	15.04.2019	17.04.2019	skujkoku
18	599696	389345	1,3	09.03.2019	10.03.2019	skujkoku
2	617258	393695	5	22.02.2019	26.02.2019	skujkoku
17	603067	385947	1,5	01.03.2019	02.03.2019	skujkoku
10	603203	384451	1,9	05.03.2019	06.03.2019	skujkoku
1	616941	393775	5	26.02.2019	02.03.2019	jaukto koku
4	596508	388032	3,3	07.03.2019	08.03.2019	skujkoku
16	621141	386787	1,8	17.03.2019	18.03.2019	skujkoku
8	600929	389888	1,9	26.03.2019	28.03.2019	skujkoku
3	615604	388025	3,7	16.09.2019	20.09.2019	skujkoku
5	616406	388607	3,2	22.09.2019	24.09.2019	jaukto koku
7	623183	384843	2,4	20.09.2019	21.09.2019	skujkoku
14	613307	386134	2	29.09.2019	02.10.2019	jaukto koku
13	624957	386348	1,7	05.10.2019	07.10.2019	skujkoku
6	610140	385981	2,4	05.10.2019	08.10.2019	skujkoku
11	625309	386369	1,6	07.10.2019	10.10.2019	skujkoku
9	625618	386483	1,9	10.10.2019	12.10.2019	skujkoku
12	617182	392999	1,9	13.10.2019	15.10.2019	skujkoku
19	601838	383570	1,4	28.10.2019	29.10.2019	jaukto koku
15	597311	384410	1,6	01.11.2019	02.11.2019	skujkoku

References teritoriju platību un meža veida informācija

<i>References teritorijas Nr.</i>	<i>Platība, ha</i>	<i>SAR attēla datums pirms cirsmas veikšanas</i>	<i>SAR attēla datums pēc cirsmas</i>	<i>SI PĀRI</i>	<i>Veids</i>
1	0,66	03.10.2019	09.10.2019	16	skujkoku
2	0,76	03.10.2019	09.10.2019	16	skujkoku
3	0,87	23.02.2019	07.03.2019	10	skujkoku
4	1	23.02.2019	07.03.2019	10	skujkoku
5	1,19	03.10.2019	09.10.2019	16	skujkoku
6	1,19	27.09.2019	03.10.2019	17	skujkoku
7	1,21	15.09.2019	21.09.2019	8	skujkoku
8	1,27	12.04.2019	24.04.2019	1	skujkoku
9	1,29	12.04.2019	24.04.2019	1	skujkoku
10	1,3	15.09.2019	27.09.2019	14	skujkoku
11	1,35	27.09.2019	03.10.2019	17	skujkoku
12	1,36	27.09.2019	03.10.2019	17	skujkoku
13	1,37	27.10.2019	01.11.2019	18	skujkoku
14	1,37	12.04.2019	24.04.2019	1	skujkoku
15	1,44	27.09.2019	03.10.2019	17	skujkoku
16	1,49	27.10.2019	01.11.2019	18	skujkoku
17	1,49	28.02.2019	07.03.2019	3	skujkoku
18	1,55	28.02.2019	07.03.2019	3	skujkoku
19	1,59	15.09.2019	27.09.2019	14	skujkoku
20	1,63	09.10.2019	20.10.2019	20	skujkoku
21	1,64	12.04.2019	24.04.2019	1	jaukto koku
22	1,88	28.02.2019	07.03.2019	3	skujkoku
23	1,89	27.10.2019	07.11.2019	19	skujkoku
24	1,91	07.03.2019	12.03.2012	5	skujkoku
25	1,97	15.09.2019	27.09.2019	14	jaukto koku
26	1,98	28.02.2019	07.03.2019	2	skujkoku
27	2	03.10.2019	14.10.2019	12	skujkoku
28	2,01	23.02.2019	07.03.2019	10	skujkoku
29	2,04	03.10.2019	08.10.2019	11	skujkoku
30	2,07	03.10.2019	14.10.2019	12	skujkoku
31	2,1	16.02.2019	28.02.2019	9	skujkoku
32	2,1	15.09.2019	27.09.2019	14	skujkoku
33	2,11	07.03.2019	12.03.2012	5	skujkoku
34	2,11	03.10.2019	08.10.2019	11	skujkoku
35	2,12	16.02.2019	28.02.2019	9	skujkoku
36	2,12	09.10.2019	14.10.2019	13	skujkoku
37	2,13	28.02.2019	07.03.2019	3	skujkoku
38	2,21	20.09.2019	27.09.2019	7	skujkoku
39	2,23	12.03.2019	19.03.2019	15	skujkoku

<i>References teritorijas Nr.</i>	<i>Platība, ha</i>	<i>SAR attēla datums pirms cirsmas veikšanas</i>	<i>SAR attēla datums pēc cirsmas</i>	<i>SI PĀRI</i>	<i>Veids</i>
40	2,28	12.03.2019	19.03.2019	15	skujkoku
41	2,4	24.03.2019	31.03.2019	6	skujkoku
42	2,43	27.10.2019	07.11.2019	19	skujkoku
43	2,5	09.10.2019	14.10.2019	13	skujkoku
44	2,53	28.02.2019	07.03.2019	3	skujkoku
45	2,6	15.09.2019	21.09.2019	8	skujkoku
46	2,63	09.10.2019	20.10.2019	20	skujkoku
47	2,75	12.03.2019	19.03.2019	15	skujkoku
48	2,8	24.03.2019	31.03.2019	6	skujkoku
49	2,82	24.03.2019	31.03.2019	6	skujkoku
50	2,82	28.02.2019	07.03.2019	3	skujkoku
51	2,93	23.02.2019	07.03.2019	10	skujkoku
52	3	27.10.2019	01.11.2019	18	skujkoku
53	3,14	28.02.2019	07.03.2019	2	skujkoku
54	3,19	09.10.2019	14.10.2019	13	skujkoku
55	3,22	12.03.2019	19.03.2019	15	skujkoku
56	3,4	27.10.2019	07.11.2019	19	skujkoku
57	3,51	09.10.2019	20.10.2019	20	skujkoku
58	3,54	28.02.2019	07.03.2019	2	skujkoku
59	3,62	16.02.2019	28.02.2019	9	skujkoku
60	3,72	28.02.2019	07.03.2019	2	skujkoku
61	3,74	09.10.2019	20.10.2019	20	skujkoku
62	3,88	03.10.2019	08.10.2019	11	skujkoku
63	3,93	20.09.2019	27.09.2019	7	skujkoku
64	4,02	24.03.2019	31.03.2019	6	skujkoku
65	4,03	15.09.2019	21.09.2019	8	jaukto koku
66	4,08	15.09.2019	21.09.2019	8	skujkoku
67	4,11	20.09.2019	27.09.2019	7	skujkoku
68	4,28	27.10.2019	07.11.2019	19	skujkoku
69	4,39	28.02.2019	07.03.2019	2	skujkoku
70	4,51	28.02.2019	12.03.2019	4	skujkoku
71	4,65	03.10.2019	09.10.2019	16	skujkoku
72	4,95	20.09.2019	27.09.2019	7	skujkoku
73	5,02	09.10.2019	14.10.2019	13	skujkoku
74	5,43	27.10.2019	07.11.2019	19	skujkoku
75	5,5	20.09.2019	27.09.2019	7	skujkoku
76	6,24	27.10.2019	07.11.2019	19	skujkoku
77	6,31	15.09.2019	21.09.2019	8	skujkoku
78	6,55	28.02.2019	12.03.2019	4	skujkoku
79	6,65	07.03.2019	12.03.2012	5	skujkoku
80	7,42	28.02.2019	12.03.2019	4	skujkoku

Robežpikseļu noņemšanas komandringa (skripts)

```

#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-
import os

from grass.pygrass.modules.shortcuts import general as g
from grass.pygrass.modules.shortcuts import raster as r
from grass.pygrass.modules.shortcuts import vector as v

# Norāda datu mape
data_dir = "C:/Users/monta/OneDrive/Pulpit/baklaura
_dati/apgriezti_aprekinati_cirsmu"
def process_files(rast, vect, out):
    r.in_gdal(input=rast, output="S1", overwrite=True)
    v.in_ogr(input=vect, output="V1", overwrite=True)
    g.region(vector="V1", align="S1.1")
    v.to_rast(input="V1", output="maskai", use="val", overwrite=True)
    r.grow(input="maskai", output="MASK", radius=-1.01, overwrite=True)
    r.out_gdal(input="S1", output=out, format="GTiff",
createopt="COMPRESS=DEFLATE", overwrite=True)

    g.remove(type='raster', name=('MASK', 'maskai'), f=True)
    g.remove(type='vector', name=('V1', 'maskai'), f=True)
for root, dirs, files in os.walk(data_dir):

for fn in files:
    # Meklē failus ar paplašinājumu .shp
    if not fn[-4:] == '.shp':
        continue
    poligons = fn
    print("Shapefile: " + poligons)

# Meklē vektoru failam atbilstošo rastru
# Vektors ir 10_1
rastrs = False
prefix_vect = poligons.split('.')[0]
for fn2 in files:
    if not fn2[-4:] == '.tif':
        continue
    print("PV: " + prefix_vect + " fn2: " + fn2 + "\n\r")
    splits = fn2.split('_')
    if len(splits) < 2:
        continue
    if splits[0][-1].lower() == 'r':
        prefix_rast = splits[0]
    else:
        prefix_rast = splits[0] + '_' + splits[1]
    print("Equal? " + prefix_rast.lower() + "==" + prefix_vect.lower())

```

```
if prefix_rast.lower() == prefix_vect.lower():
    rastrs = fn2
    print("Rastrs: " + rastrs)
    break
# Ja ir atrasts poligonam atbilstošais rastrs, tiek veikta apstrādi
if rastrs:
    process_files(os.path.join(root, rastrs), os.path.join(root, poligons),
os.path.join(root, "ap" + rastrs))
else:
    print("--= Vektoru failam atbilstošs rastrs netika atrasts ==--")
```

ERA5-Land datu lejupielādēšanas komandrinda (skripts)

```

# -*- coding: utf-8 -*-
import cdsapi

c = cdsapi.Client()
c.retrieve("reanalysis-era5-land", {
    "product_type": "reanalysis",
    "format": "netcdf",
    "area": [58.00, 25.00, 57.00, 27.00], # North, West, South, East. Default: global
    "variable": ["2m_temperature", "2m_dewpoint_temperature"],
    "year": "2019",
    "month": ["01", "02", "03", "04", "05", "06", "07", "08", "09", "10", "11", "12"],
    "day": ["01", "02", "03", "04", "05", "06", "07", "08", "09", "10", "11",
            "12", "13", "14", "15", "16", "17", "18", "19", "20", "21", "22",
            "23", "24", "25", "26", "27", "28", "29", "30", "31"],
    "time": "10" # 12.00 local time
}, "ERA5LAND_2m_temperatures_2019.nc")

c.retrieve("reanalysis-era5-land", {
    "product_type": "reanalysis",
    "format": "netcdf",
    "area": [58.00, 25.00, 57.00, 27.00], # North, West, South, East. Default: global
    "variable": ["total_precipitation"],
    "year": "2019",
    "month": [
        "01", "02", "03", "04", "05", "06",
        "07", "08", "09", "10", "11", "12"
    ],
    "day": [
        "01", "02", "03", "04", "05",
        "06", "07", "08", "09", "10",
        "11", "12", "13", "14", "15",
        "16", "17", "18", "19", "20",
        "21", "22", "23", "24", "25",
        "26", "27", "28", "29", "30", "31"
    ],
    "time": [
        "00:00", "01:00", "02:00",
        "03:00", "04:00", "05:00",
        "06:00", "07:00", "08:00",
        "09:00", "10:00", "11:00",
        "12:00", "13:00", "14:00",
        "15:00", "16:00", "17:00",
        "18:00", "19:00", "20:00",
        "21:00", "22:00", "23:00"
    ]
}, "ERA5LAND_total_precipitation_2019.nc")

```

Nesterova indeksa aprēķināšanas komandrinda (skripts)

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
import xarray as xr
DSt = xr.open_dataset('ERA5LAND_2m_temperatures_2019.nc')

DSp = xr.open_dataset('ERA5LAND_total_precipitation_2019.nc')
tp = DSp['tp']

# Rezultāts mm/dienā
tp_daily = tp.resample(time='D', closed='right').sum('time') * 1000

t2m = DSt['t2m'] - 273.15
d2m = DSt['d2m'] - 273.15

ni = xr.DataArray(
    np.zeros(np.shape(t2m.values)),
    coords=t2m.coords,
    dims=t2m.dims)

for day in range(len(t2m)):
    print(day, tp_daily[day + 1].time.values)
    for lat in range(len(tp_daily.latitude)):
        for lon in range(len(tp_daily.longitude)):
            # Pārbaudām, vai šajā dienā ir bijis lietus > 3 mm/dienā
            # tp_daily sākas vienu dienu pirms pārējiem datiem
            if tp_daily[day + 1][lat][lon].values > 3:
                ni[day][lat][lon] = 0
            else:
                ni[day][lat][lon] = ni[day][lat][lon].values + (t2m[day][lat][lon].values *
(t2m[day][lat][lon].values - d2m[day][lat][lon].values))

ni.name = "Nesterov index"
ni.to_netcdf('Nesterov_index_2019.nc')

```

Komandrinda priekš Šapiro-Vilka normalitātes testa un Vilkoksona testa veikšanas

```
library(tidyverse)
library(xlsx)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(devtools)
library(caret)
library("dplyr")
library("ggpubr")

#datu atlase
setwd("C:\\Users\\monta\\OneDrive\\Pulpit\\tabulas")
df = read.xlsx("R_modelis.xlsx", 1)

shapiro.test(df$RP.VH.VH)
shapiro.test(df$RP.VV.VV)
shapiro.test(df$vh.vh_cirsmas)
shapiro.test(df$vv.vv_cirsmas.)
res.ftest <- var.test(RP.VH.VH ~ VEIDS, data = df)
res.ftest
res.ftest <- var.test(RP.VV.VV ~ VEIDS, data = df)
res.ftest
res.ftest <- var.test(vh.vh ~ VEIDS, data = df)
res.ftest
res.ftest <- var.test(vv.vv ~ VEIDS, data = df)
res.ftest
```

VH polarizācijas (bez robežpiķeļa vērtībām) modeļa izveides piemērs

```

#nepieciešamie palašinājumi
library(tidyverse)
library(xlsx)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(devtools)
library(caret)

#datu atlase
setwd("C:\\Users\\monta\\OneDrive\\Pulpit\\R_modelis")
df = read.xlsx("R_modelim_raditaji.xlsx", 1)
names(df)

#modeļa vienādojums
model <- lm(VV.VV ~ D + T + P, data = df)
#modeļa kopsavilkums
summary(model)
#koeficientu tabula- kas parāda regresijas beta koeficientus, t un p vērtību
summary(model)$coefficient
#ticamības intervāla aprēķināšana
confint(model)
#paraugkopas regresijas standrtklūda
sigma(model)/mean(df$VV.VV)

#datu inspekcija
sample_n(df, 3)
#datu pārbaude, datu sadalīšana pārbaudei
set.seed(123)
training.samples <- df$VV.VV %>%
  createDataPartition(p = 0.8, list = FALSE)
train.data <- df[training.samples, ]
test.data <- df[-training.samples, ]

#adiatīvā modeļa izveide
modell <- lm(VV.VV ~ D + T + P, data = train.data)
#modeļa kopsavilkums
summary(modell)
#prognozes
predictions <- modell %>% predict(test.data)
#modeļa lietderības novērtēšana
RMSE(predictions, test.data$VV.VV)
#R-kvadrāta statistika
R2(predictions, test.data$VV.VV)

```

```
#modeļa izveide priekš kolinearitātes novērtēšanas
model2 <- lm(VV.VV ~ D*T*P, data = train.data)
#modeļa kopsavilkums
summary(model2)
#modeļa prognoze
predictions <- model2 %>% predict(test.data)
#modeļa lietderība, prognozes kļūda, RMSE
RMSE(predictions, test.data$VV.VV)
#R-kvadrātā vērtības uzzināšana
R2(predictions, test.data$VV.VV)
```

```
#MODELIS_3
model3 <- lm(VV.VV ~ D+P+D:T:P, data = df)
#modeļa kopsavilkums
summary(model3)
#modeļa prognoze
predictions <- model3 %>% predict(test.data)
#modeļa lietderība, prognozes kļūda, RMSE
RMSE(predictions, test.data$VV.VV)
#R-kvadrātā vērtības uzzināšana
R2(predictions, test.data$VV.VV)
```

```
summary(model2)
summary(model3)
```

ERA-Land datu eksportēšana .tif formātā

```

# -*- coding: utf-8 -*-
from osgeo import gdal
from osgeo import gdal_array
from osgeo import osr, ogr
from datetime import date, timedelta
import numpy as np
import xarray as xr

# Jānomaina šis burts uz N nokrišņiem, T temperatūrai un R rasas punktam
t = 'N'

# Nokrišņi:
if t == 'N':
    target_prefix = 'ERA5_p'
    DSn = xr.open_dataset('ERA5_total_precipitation_2019.nc')
    tp = DSn['tp']
    tp_val = tp.resample(time='D', closed='right').sum('time') * 1000
    # print(tp_val)
# Temperatūra:
elif t == 'T':
    target_prefix = 'ERA5_2m_t'
    DSn = xr.open_dataset('ERA5LAND_2m_dew_temperatures_2019.nc')
    tp = DSn['t2m']
    tp_val = tp - 273.15
    # print(tp_val)
# Rasas punkts:
else:
    target_prefix = 'ERA5_2m_rp'
    DSn = xr.open_dataset('ERA5LAND_total_precipitation_2019.nc')
    tp = DSn['d2m']
    tp_val = tp - 273.15

one_day = timedelta(days=1)
days = ('2019-02-16', '2019-02-23', '2019-02-28', '2019-03-07', '2019-03-12', '2019-03-19',
'2019-03-24', '2019-03-31', '2019-04-12', '2019-04-24', '2019-09-15', '2019-09-20', '2019-09-21',
'2019-09-27', '2019-10-03', '2019-10-08', '2019-10-09', '2019-10-14', '2019-10-20',
'2019-10-27', '2019-11-01', '2019-11-07')
epsg = 4326

for day in days:
    #pday = date.fromisoformat(day) - one_day
    sday = day.split('-')
    print(int(sday[0]), int(sday[1]), int(sday[2]))
    pday = date(int(sday[0]), int(sday[1]), int(sday[2])) - one_day
    target = '%s_%s.tif' % (target_prefix, day)
    ni = tp_val.sel(time=pday.isoformat())
    if len(ni.values.shape) == 3:
        val = ni[0].values

```

```

else:
    val = ni.values

    xmin, ymin, xmax, ymax = [ni.longitude.values.min(), ni.latitude.values.min(),
ni.longitude.values.max(), ni.latitude.values.max()]
    nrows, ncols = np.shape(val)

    # (0.0,0.0) at the top left corner of the top left pixel
    # https://gdal.org/user/raster_data_model.html
    # think of coordinates as referencing the centroids of the tiles
    #
https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+What+is+the+spatial+reference#ERA
5:Whatisthespatialreference-Visualisationofregularlat/londata
    xres = (xmax - xmin) / (ncols - 1)
    yres = (ymax - ymin) / (nrows - 1)
    geotransform = [0., 0., 0., 0., 0., 0.]
    geotransform[0] = xmin - xres / 2
    geotransform[1] = xres
    geotransform[2] = 0
    geotransform[3] = ymax + yres / 2
    geotransform[4] = 0
    geotransform[5] = -yres

    output_raster = gdal.GetDriverByName('GTiff').Create(target, ncols, nrows, 1 ,
gdal.GDT_Float32) # Open the file

    output_raster.SetGeoTransform(geotransform) # Specify its coordinates
    srs = osr.SpatialReference() # Establish its coordinate encoding
    srs.ImportFromEPSG(epsg) # This one specifies WGS84 lat long.

    output_raster.SetProjection( srs.ExportToWkt() ) # Exports the coordinate system
    output_raster.GetRasterBand(1).WriteArray(val) # Writes my array to the raster
    output_raster.FlushCache()

```

Sentinel-1 standarta pirmapstrādes komandu rinda (skripts)

```

<graph id="Graph">
  <version>1.0</version>
  <node id="Read">
    <operator>Read</operator>
    <sources/>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <file>/home/stud_monta/Desktop/viss/dati_zip/1_1_S1A_IW_GRDH_1SDV_2019041
2T043416_20190412T043441_026752_03012D_0634.SAFE/manifest.safe</file>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Subset">
    <operator>Subset</operator>
    <sources>
      <sourceProduct refid="Read"/>
    </sources>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <sourceBands/>
      <region>0,0,0,0</region>
      <referenceBand/>
      <geoRegion>POLYGON
((25.357295989990234
57.77377700805664,
26.324092864990234 57.77377700805664, 26.324092864990234 57.57550811767578,
25.357295989990234 57.57550811767578, 25.357295989990234 57.77377700805664,
25.357295989990234 57.77377700805664))</geoRegion>
      <subSamplingX>1</subSamplingX>
      <subSamplingY>1</subSamplingY>
      <fullSwath>>false</fullSwath>
      <tiePointGridNames/>
      <copyMetadata>>true</copyMetadata>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Apply-Orbit-File">
    <operator>Apply-Orbit-File</operator>
    <sources>
      <sourceProduct refid="Subset"/>
    </sources>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <orbitType>Sentinel Precise (Auto Download)</orbitType>
      <polyDegree>3</polyDegree>
      <continueOnFail>>false</continueOnFail>
    </parameters>
  </node>
  <node id="ThermalNoiseRemoval">
    <operator>ThermalNoiseRemoval</operator>
    <sources>

```

```

    <sourceProduct refid="Apply-Orbit-File"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <selectedPolarisations/>
    <removeThermalNoise>true</removeThermalNoise>
    <reIntroduceThermalNoise>>false</reIntroduceThermalNoise>
  </parameters>
</node>
<node id="Calibration">
  <operator>Calibration</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="ThermalNoiseRemoval"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <sourceBands/>
    <auxFile>Product Auxiliary File</auxFile>
    <externalAuxFile/>
    <outputImageInComplex>>false</outputImageInComplex>
    <outputImageScaleInDb>>false</outputImageScaleInDb>
    <createGammaBand>>false</createGammaBand>
    <createBetaBand>>false</createBetaBand>
    <selectedPolarisations>VH,VV</selectedPolarisations>
    <outputSigmaBand>true</outputSigmaBand>
    <outputGammaBand>>false</outputGammaBand>
    <outputBetaBand>>false</outputBetaBand>
  </parameters>
</node>
<node id="Speckle-Filter">
  <operator>Speckle-Filter</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="Calibration"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <sourceBands>Sigma0_VH,Sigma0_VV</sourceBands>
    <filter>Lee Sigma</filter>
    <filterSizeX>3</filterSizeX>
    <filterSizeY>3</filterSizeY>
    <dampingFactor>2</dampingFactor>
    <estimateENL>true</estimateENL>
    <enl>1.0</enl>
    <numLooksStr>1</numLooksStr>
    <windowSize>5x5</windowSize>
    <targetWindowSizeStr>3x3</targetWindowSizeStr>
    <sigmaStr>0.9</sigmaStr>
    <anSize>50</anSize>
  </parameters>
</node>
<node id="Terrain-Correction">
  <operator>Terrain-Correction</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="Speckle-Filter"/>
  </sources>

```

```

<parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
  <sourceBands>Sigma0_VH,Sigma0_VV</sourceBands>
  <demName>SRTM 3Sec</demName>
  <externalDEMFile/>
  <externalDEMNoDataValue>0.0</externalDEMNoDataValue>
  <externalDEMApplyEGM>true</externalDEMApplyEGM>

<demResamplingMethod>BILINEAR_INTERPOLATION</demResamplingMethod>

<imgResamplingMethod>BILINEAR_INTERPOLATION</imgResamplingMethod>
  <pixelSpacingInMeter>10.0</pixelSpacingInMeter>
  <pixelSpacingInDegree>8.983152841195215E-5</pixelSpacingInDegree>
  <mapProjection>PROJCS[&quot;LKS92 / Latvia TM&quot;,
    GEOGCS[&quot;LKS92&quot;,
      DATUM[&quot;Latvia 1992&quot;,
        SPHEROID[&quot;GRS 1980&quot;, 6378137.0, 298.257222101,
AUTHORITY[&quot;EPSG&quot;,&quot;7019&quot;]],
        TOWGS84[0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0],
        AUTHORITY[&quot;EPSG&quot;,&quot;6661&quot;]],
        PRIMEM[&quot;Greenwich&quot;, 0.0,
AUTHORITY[&quot;EPSG&quot;,&quot;8901&quot;]],
        UNIT[&quot;degree&quot;, 0.017453292519943295],
        AXIS[&quot;Geodetic longitude&quot;, EAST],
        AXIS[&quot;Geodetic latitude&quot;, NORTH],
        AUTHORITY[&quot;EPSG&quot;,&quot;4661&quot;]],
    PROJECTION[&quot;Transverse_Mercator&quot;],
    PARAMETER[&quot;central_meridian&quot;, 24.0],
    PARAMETER[&quot;latitude_of_origin&quot;, 0.0],
    PARAMETER[&quot;scale_factor&quot;, 0.9996],
    PARAMETER[&quot>false_easting&quot;, 500000.0],
    PARAMETER[&quot>false_northing&quot;, -600000.0],
    UNIT[&quot;m&quot;, 1.0],
    AXIS[&quot;Easting&quot;, EAST],
    AXIS[&quot;Northing&quot;, NORTH],
    AUTHORITY[&quot;EPSG&quot;,&quot;3059&quot;]]</mapProjection>
  <alignToStandardGrid>>false</alignToStandardGrid>
  <standardGridOriginX>0.0</standardGridOriginX>
  <standardGridOriginY>0.0</standardGridOriginY>
  <nodataValueAtSea>true</nodataValueAtSea>
  <saveDEM>>false</saveDEM>
  <saveLatLon>>false</saveLatLon>
  <saveIncidenceAngleFromEllipsoid>>false</saveIncidenceAngleFromEllipsoid>
  <saveLocalIncidenceAngle>>false</saveLocalIncidenceAngle>
  <saveProjectedLocalIncidenceAngle>>false</saveProjectedLocalIncidenceAngle>
  <saveSelectedSourceBand>true</saveSelectedSourceBand>
  <outputComplex>>false</outputComplex>
  <applyRadiometricNormalization>>false</applyRadiometricNormalization>
  <saveSigmaNought>>false</saveSigmaNought>
  <saveGammaNought>>false</saveGammaNought>
  <saveBetaNought>>false</saveBetaNought>
  <incidenceAngleForSigma0>Use projected local incidence angle from
DEM</incidenceAngleForSigma0>

```

```

    <incidenceAngleForGamma0>Use projected local incidence angle from
DEM</incidenceAngleForGamma0>
    <auxFile>Latest Auxiliary File</auxFile>
    <externalAuxFile/>
  </parameters>
</node>
<node id="LinearToFromdB">
  <operator>LinearToFromdB</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="Terrain-Correction"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <sourceBands>Sigma0_VH,Sigma0_VV</sourceBands>
  </parameters>
</node>
<node id="Write">
  <operator>Write</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="LinearToFromdB"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
<file>/home/stud_monta/Desktop/viss/pre_processing/Subset_1_1_S1A_IW_GRDH_1SDV_
20190412T043416_20190412T043441_026752_03012D_0634_Orb_NR_Cal_Spk_TC_dB.d
im</file>
    <formatName>BEAM-DIMAP</formatName>
  </parameters>
</node>
<applicationData id="Presentation">
  <Description/>
  <node id="Read">
    <displayPosition x="58.0" y="35.0"/>
  </node>
  <node id="Subset">
    <displayPosition x="58.0" y="80.0"/>
  </node>
  <node id="Apply-Orbit-File">
    <displayPosition x="33.0" y="126.0"/>
  </node>
  <node id="ThermalNoiseRemoval">
    <displayPosition x="12.0" y="167.0"/>
  </node>
  <node id="Calibration">
    <displayPosition x="48.0" y="210.0"/>
  </node>
  <node id="Speckle-Filter">
    <displayPosition x="40.0" y="253.0"/>
  </node>
  <node id="Terrain-Correction">
    <displayPosition x="25.0" y="296.0"/>
  </node>
  <node id="LinearToFromdB">

```

```
<displayPosition x="31.0" y="340.0"/>
</node>
<node id="Write">
  <displayPosition x="59.0" y="381.0"/>
</node>
</applicationData>
</graph>
```

Sentinel-1 datu apgriešana un sešu kanālu faila izveidošanas piemērs

```

<graph id="Graph">
  <version>1.0</version>
  <node id="Read">
    <operator>Read</operator>
    <sources/>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <file>C:\Users\monta\OneDrive\Pulpit\tabulas\baklaura
_dati\apgrieztie_aprekinatie_cirsmu\
2_1_S1A_IW_GRDH_1SDV_20190228T044230_20190228T044255_026125_02EA2F_6E
A4_Orb_NR_Cal_Spk_TC_dB_Stack_gatavs.tif</file>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Read(2)">
    <operator>Read</operator>
    <sources/>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <file>C:\Users\monta\OneDrive\Pulpit\tabulas\baklaura
_dati\apgrieztie_aprekinatie_cirsmu\
2_2_S1A_IW_GRDH_1SDV_20190228T044230_20190228T044255_026125_02EA2F_6E
A4_Orb_NR_Cal_Spk_TC_dB_Stack_gatavs.tif</file>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Import-Vector">
    <operator>Import-Vector</operator>
    <sources>
      <sourceProduct refid="Read"/>
    </sources>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <vectorFile>C:\Users\monta\OneDrive\Pulpit\tabulas\baklaura
_dati\shapefile_cirsmas\17.shp</vectorFile>
      <separateShapes>>false</separateShapes>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Import-Vector(2)">
    <operator>Import-Vector</operator>
    <sources>
      <sourceProduct refid="Read(2)"/>
    </sources>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <vectorFile>C:\Users\monta\OneDrive\Pulpit\tabulas\baklaura
_dati\shapefile_cirsmas\17.shp</vectorFile>

```

```

    <separateShapes>true</separateShapes>
  </parameters>
</node>
<node id="Land-Sea-Mask">
  <operator>Land-Sea-Mask</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="Import-Vector"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <sourceBands/>
    <landMask>>false</landMask>
    <useSRTM>true</useSRTM>
    <geometry>11_1</geometry>
    <invertGeometry>>false</invertGeometry>
    <shorelineExtension>0</shorelineExtension>
  </parameters>
</node>
<node id="Land-Sea-Mask(2)">
  <operator>Land-Sea-Mask</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="Import-Vector(2)"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <sourceBands/>
    <landMask>>false</landMask>
    <useSRTM>>false</useSRTM>
    <geometry>11_1</geometry>
    <invertGeometry>>false</invertGeometry>
    <shorelineExtension>0</shorelineExtension>
  </parameters>
</node>
<node id="BandMaths">
  <operator>BandMaths</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="CreateStack"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <targetBands>
      <targetBand>
        <name>newBand</name>
        <type>float32</type>
        <expression/>
        <description/>
        <unit/>
        <noDataValue>0.0</noDataValue>
      </targetBand>
    </targetBands>
    <variables/>
  </parameters>
</node>

```

```

</parameters>
</node>
<node id="CreateStack">
  <operator>CreateStack</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="Land-Sea-Mask(2)"/>
    <sourceProduct.1 refid="Land-Sea-Mask"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <masterBands/>
    <sourceBands/>
    <resamplingType>NONE</resamplingType>
    <extent>Master</extent>
    <initialOffsetMethod>Orbit</initialOffsetMethod>
  </parameters>
</node>
<node id="Write">
  <operator>Write</operator>
  <sources>
    <sourceProduct refid="BandMaths"/>
  </sources>
  <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
    <file>C:\home\stud_monta\Desktop\vis\pre_processing\2_2.dim</file>
    <formatName>BEAM-DIMAP</formatName>
  </parameters>
</node>
<applicationData id="Presentation">
  <Description/>
  <node id="Read">
    <displayPosition x="14.0" y="67.0"/>
  </node>
  <node id="Read(2)">
    <displayPosition x="12.0" y="154.0"/>
  </node>
  <node id="Import-Vector">
    <displayPosition x="96.0" y="68.0"/>
  </node>
  <node id="Import-Vector(2)">
    <displayPosition x="91.0" y="152.0"/>
  </node>
  <node id="Land-Sea-Mask">
    <displayPosition x="205.0" y="69.0"/>
  </node>
  <node id="Land-Sea-Mask(2)">
    <displayPosition x="208.0" y="153.0"/>
  </node>
  <node id="BandMaths">
    <displayPosition x="429.0" y="112.0"/>

```

```
</node>
<node id="CreateStack">
  <displayPosition x="330.0" y="110.0"/>
</node>
<node id="Write">
  <displayPosition x="526.0" y="113.0"/>
</node>
</applicationData>
</graph>
```

R_modelis.xlsx datubāze

<i>References teritorijas Nr.</i>	<i>SI PĀRI</i>	<i>VH-VH</i>	<i>VV-VV</i>	<i>RP VH- VH</i>	<i>RP VV- VV</i>	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
1	16	0,16	-0,04	-0,25	-0,46	-2,54	-6,17	3,54
2	16	-0,46	0,41	-0,84	-0,07	-2,54	-6,17	3,54
3	10	0,02	0,81	-1,37	0,38	-0,62	0,51	0,04
4	10	-0,17	-1,35	0,92	-0,91	-0,62	0,51	0,04
5	16	-0,47	-0,99	-0,34	-1,09	-2,58	-6,18	3,18
6	17	0,22	-0,32	0,40	-0,07	1,52	1,53	7,06
7	8	0,24	-0,11	0,43	0,03	-9,95	-4,52	-41,04
8	1	3,20	1,84	2,35	1,04	6,22	16,92	-1,07
9	1	3,00	2,02	1,87	1,27	6,20	16,91	-1,07
10	14	-3,75	-3,04	-2,28	-2,22	-7,79	-3,16	-48,85
11	17	3,18	1,00	3,56	1,12	1,52	1,53	7,06
12	17	2,66	0,22	3,17	0,33	1,52	1,53	7,06
13	18	-0,84	-0,38	-1,95	-0,99	-8,43	-8,27	-33,42
14	1	3,10	1,57	1,70	0,45	6,20	16,91	-1,07
15	17	0,89	1,20	1,12	1,58	1,52	1,53	7,06
16	18	-1,18	-0,99	0,11	-0,22	-8,43	-8,27	-33,42
17	3	-2,55	-0,95	-3,62	-1,66	-14,13	-6,50	0,05
18	3	-4,10	-2,50	-2,91	-1,76	-14,13	-6,50	0,05
19	14	-3,66	-1,54	-3,91	-1,67	-7,77	-3,17	-49,47
20	20	2,20	1,30	1,26	0,57	8,81	7,82	-3,99
21	1	2,44	2,14	1,35	1,53	6,20	16,91	-1,07
22	3	-5,64	-1,59	-4,63	-0,79	-14,13	-6,50	0,05
23	19	0,92	0,24	0,54	-0,14	-7,99	-9,44	-26,59
24	5	0,37	-0,02	0,82	0,27	8,86	4,00	15,40
25	14	-2,32	-1,59	-3,01	-1,93	-7,77	-3,17	-49,47
26	2	-1,87	-2,10	-2,63	-2,55	-14,13	-6,50	0,05
27	12	2,07	1,91	1,47	1,53	4,49	-0,51	24,00
28	10	-0,46	0,96	0,18	1,29	-0,62	0,51	0,04
29	11	1,40	1,44	-0,08	0,77	-4,81	-8,92	-6,96
30	12	1,34	1,78	0,89	1,76	4,49	-0,51	24,00
31	9	0,01	0,33	-0,63	-0,21	-1,28	0,30	-0,40
32	14	-3,11	-2,27	-3,91	-2,74	-7,77	-3,17	-49,47
33	5	1,46	1,49	1,01	1,51	8,86	4,00	15,40
34	11	0,70	1,47	-0,29	1,10	-4,81	-8,92	-6,96
35	9	0,44	1,07	-0,16	0,67	-1,28	0,30	-0,40
36	13	3,27	1,83	3,09	1,63	7,34	5,81	22,82
37	3	-2,03	-0,57	-3,27	-1,30	-14,13	-6,50	0,05
38	7	-2,10	-1,88	-3,21	-2,64	0,90	0,87	-3,29
39	15	-0,05	-0,28	0,78	0,12	6,74	5,00	54,25
40	15	2,30	1,09	3,80	2,00	6,74	5,00	54,25
41	6	0,69	0,35	-0,04	-0,09	10,41	2,12	-7,38

<i>References teritorijas Nr.</i>	<i>SI PĀRI</i>	<i>VH-VH</i>	<i>VV-VV</i>	<i>RP VH- VH</i>	<i>RP VV- VV</i>	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
42	19	0,27	0,78	-0,12	0,68	-7,99	-9,44	-26,59
43	13	1,67	0,56	1,02	-0,04	7,34	5,81	22,82
44	3	-3,43	-1,04	-4,09	-1,37	-14,62	-6,03	0,07
45	8	-0,17	-0,25	0,03	0,01	-9,95	-4,52	-41,04
46	20	1,71	1,83	0,64	1,13	8,81	7,82	-3,99
47	15	2,48	0,09	3,80	0,71	6,74	5,00	54,25
48	6	0,79	0,94	-0,16	0,19	10,41	2,01	-7,65
49	6	0,57	0,36	-0,05	0,00	10,41	2,01	-7,65
50	3	-3,17	-2,17	-2,65	-1,88	-14,13	-6,50	0,05
51	10	-0,53	-0,32	-0,20	-0,07	-0,62	0,51	0,04
52	18	-0,78	-0,84	-0,10	-0,47	-8,43	-8,27	-33,42
53	2	-1,93	-1,37	-2,39	-1,72	-14,13	-6,50	0,05
54	13	2,67	1,79	2,31	1,54	7,34	5,81	22,82
55	15	1,00	0,42	2,23	1,12	6,74	5,00	54,25
56	19	0,11	-0,03	-0,24	-0,15	-7,99	-9,44	-26,59
57	20	0,79	0,71	1,41	1,02	8,81	7,82	-3,99
58	2	-1,98	-1,66	-2,84	-2,38	-14,13	-6,50	0,05
59	9	0,21	0,35	-0,20	0,17	-1,28	0,30	-0,40
60	2	-1,66	-1,40	-2,41	-2,00	-14,13	-6,50	0,05
61	20	0,50	-0,20	1,33	0,53	8,81	7,82	-3,99
62	11	0,72	0,81	-0,03	0,38	-4,81	-8,92	-6,96
63	7	-2,42	-1,62	-3,00	-1,98	0,91	0,82	-3,21
64	6	0,48	-0,12	-0,40	-0,70	10,41	2,01	-7,65
65	8	0,16	-0,28	0,43	-0,19	-9,95	-4,52	-41,04
66	8	0,13	-0,41	0,31	-0,30	-9,97	-4,62	-43,79
67	7	-2,61	-1,96	-3,22	-2,32	0,90	0,85	-3,26
68	19	0,78	0,24	0,66	0,08	-7,99	-9,44	-26,59
69	2	-2,68	-1,87	-3,69	-2,43	-14,53	-6,27	0,07
70	4	-1,17	-0,38	-1,88	-0,75	-5,49	-2,27	15,36
71	16	0,92	0,34	0,76	0,15	-2,67	-6,21	2,37
72	7	-2,11	-1,77	-2,63	-2,11	0,90	0,87	-3,29
73	13	1,98	1,90	1,58	1,69	7,34	5,81	22,82
74	19	0,20	0,26	0,03	0,14	-7,86	-9,50	-24,24
75	7	-2,73	-1,73	-2,97	-1,82	0,90	0,86	-3,27
76	19	0,26	0,21	0,11	0,08	-7,86	-9,50	-24,24
77	8	0,54	0,16	0,19	0,00	-9,95	-4,52	-41,04
78	4	-1,58	-0,43	-2,02	-0,66	-5,49	-2,27	15,36
79	5	1,09	0,58	1,29	0,64	8,86	4,00	15,40
80	4	0,08	-0,61	-3,08	-0,89	-5,49	-2,27	15,36