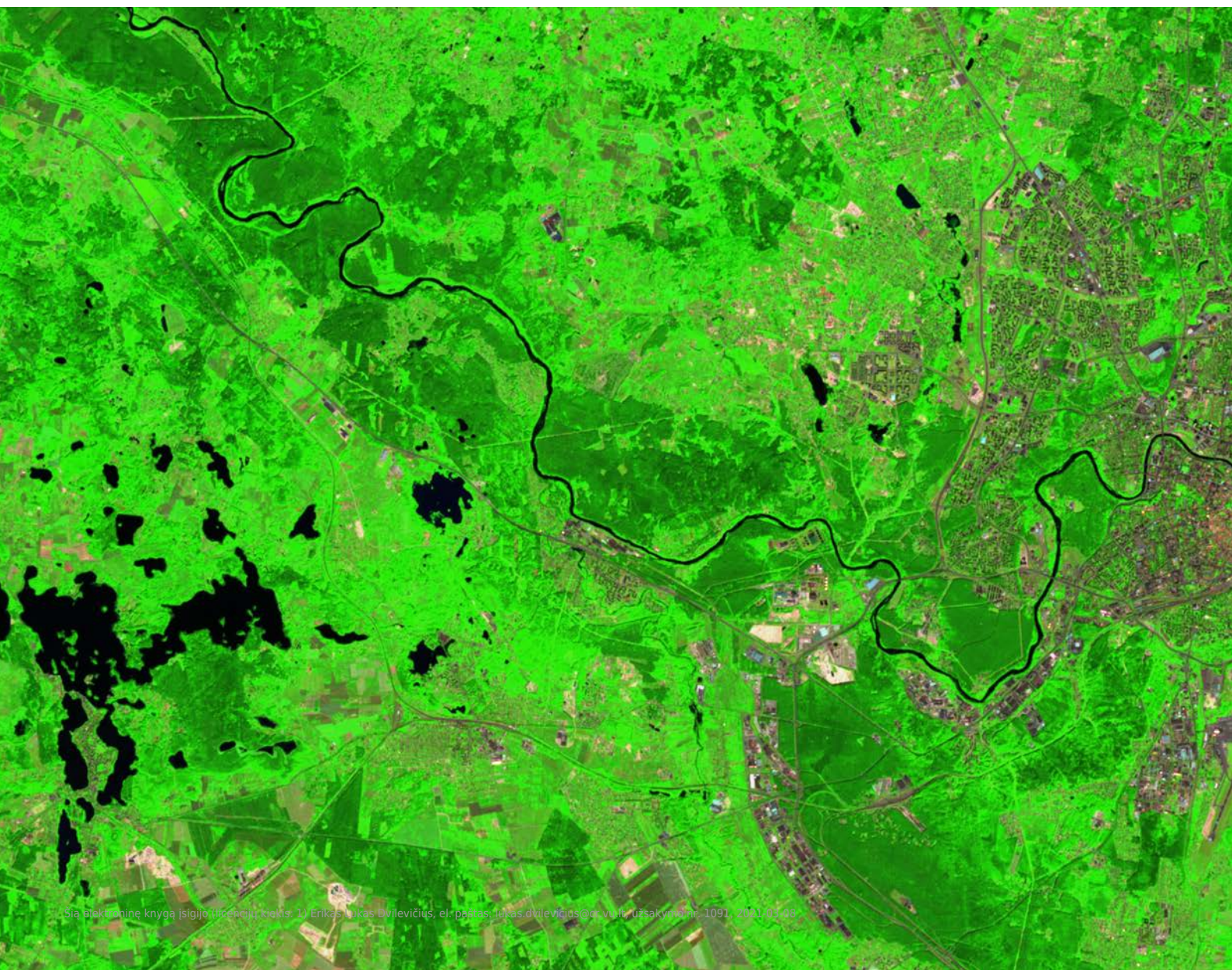




Justinas Kilpys • Laurynas Jukna • Edvinas Stonevičius
Rasa Šimanauskienė • Linas Bevainis

ŽEMĖS stebėjimas iš KOSMOS



VILNIAUS UNIVERSITETO CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS
GEOMOKSLŲ INSTITUTAS



Justinas Kilpys • Laurynas Jukna • Edvinas Stonevičius
Rasa Šimanauskienė • Linas Bevainis

ŽEMĖS⁺ stebėjimas iš KOSMOS

 VILNIAUS
UNIVERSITETO
LEIDYKLA

2021

Apsvarstė ir rekomendavo išleisti Chemijos ir geomokslų fakulteto taryba
(2020 m. gruodžio 8 d; nutarimo Nr. 610000-TP-15)

Autoriai, Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto darbuotojai:
Justinas Kilpys, Laurynas Jukna, Edvinas Stonevičius, Rasa Šimanauskienė, Linas Bevainis

Recenzavo:

doc. Gintautas Stankūnavičius (Vilniaus Universiteto Chemijos ir geomokslų fakultetas, Geomokslų institutas)
doc. Jūratė Sužiedelytė Visockienė (Vilnius Tech, Geodezijos ir kadastro katedros vedėja)
dr. Lina Papšienė (UAB Asseco Lietuva)



Leidinyi parengtas ir išleistas įgyvendinant Europos kosmoso agentūros (ESA) PECS projektą “University Course and Public Lectures on Earth Observations (UniEO)” (projekto Nr. 4000126335/18/NL/SC).

Už leidinio turinį ir naudojamą informaciją visą atsakomybę prisiima autoriai. Šio leidinio turinys nebūtinai sutampa su ESA pozicija ar nuomone.

Viršelyje: *Sentinel 2* palydovo SWIR vaizdas virš Vilniaus, 2020-08-07.
Sudarytas naudojantis Sentinel Hub EO Browser programą.

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB)

ISBN 978-609-07-0574-2 (skaitmeninis PDF)
<https://doi.org/10.15388/vup-book-0007>

© Justinas Kilpys, Laurynas Jukna, Edvinas Stonevičius, Rasa Šimanauskienė, Linas Bevainis, 2021
© Vilniaus universitetas, 2021

TURINYS

Pratarmė	7
Santrumpos.....	9
1 ĮVADAS.....	11
1.1. Nuotolinių Žemės tyrimų istorija	12
1.1.1. Ankstyvasis laikotarpis	12
1.1.2. Globalūs Žemės paviršiaus tyrimai.....	17
Klausimai ir užduotys.....	22
Naudota literatūra	22
1.2. Elektromagnetinė spinduliuotė.....	23
1.2.1. Elektromagnetinė spinduliuotė ir jos savybės	23
1.2.2. Elektromagnetinių bangų spektras	24
1.2.3. Elektromagnetinės spinduliuotės ir Žemės atmosferos sąveika	26
1.2.4. Elektromagnetinės spinduliuotės ir Žemės paviršiaus sąveika	28
Klausimai ir užduotys	31
Naudota literatūra	31
1.3. Palydovų tipai.....	32
1.3.1. Mokslinių tyrimų palydovai	33
1.3.2. Žemės tyrimų palydovai	33
1.3.3. Navigacijos ir ryšių palydovai	34
1.3.4. Palydovai <i>Landsat</i>	34
1.3.5. Programa „Copernicus“. Palydovai <i>Sentinel</i>	36
1.3.6. Palydovų orbitos ir klasifikacija	38
Klausimai ir užduotys	44
Naudota literatūra	44
2 PALYDOVINIAI JUTIKLIAI IR JŲ DUOMENYS	45
2.1. Žemės stebėjimo palydovinių duomenų savybės.....	46
2.1.1. Žemės stebėjimo palydovų jutiklių savybės ir įvairovė.....	47
2.1.2. Erdvinė skiriamoji geba	49
2.1.3. Spektrinė skiriamoji geba	52
2.1.4. Radiometrinė skiriamoji geba.....	54
2.1.5. Laikinė skiriamoji geba	54
Klausimai ir užduotys.....	57
Naudota literatūra	57
2.2. Optiniai jutikliai	58
2.2.1. Nuotolinių tyrimų platformos ir nuotolinių jutiklių tipai	58
2.2.2. Regimojo spektro jutikliai	61
2.2.3. Optinių nuotolinių tyrimų klasifikacija.....	67
Klausimai ir užduotys.....	79
Naudota literatūra	79

2.3. Infraraudonojo spektro prietaisai palydovuose	81
2.3.1. Aktyvieji infraraudonojo spektro jutikliai	81
2.3.2. Pasyvieji infraraudonojo spektro jutikliai	86
Klausimai ir užduotys	96
Naudota literatūra	96
2.4. Žemės stebėjimas naudojant pasyviuosius mikrobangų prietaisus	98
2.4.1. Mikrobangos ir jų savybės	98
2.4.2. Mikrobangų radiometrai	99
2.4.3. Ryškio temperatūra	102
2.4.4. Pasyviųjų mikrobangų jutiklių fiksuojamos ryškio temperatūros dedamosios	104
2.4.5. Poliarizacija	105
2.4.6. Pasyviųjų mikrobangų prietaisų privalumai	105
2.4.7. Pagrindinės pasyviųjų mikrobangų jutiklių panaudojimo sritys	107
Klausimai ir užduotys	109
Naudota literatūra	109
2.5. Žemės stebėjimas naudojant radarus	110
2.5.1. Iš šono žvalgantis radaras	110
2.5.2. Sintetinės apertūros radaras	112
2.5.3. SAR duomenų geometrija	114
2.5.4. SAR vaizdų grūdėtumas	115
2.5.5. SAR jutikliuose naudojami bangų ilgiai	117
2.5.6. SAR atgalinė sklaida ir jos priklausomybė nuo paviršiaus šiurkštumo ir dielektrinių savybių	118
2.5.7. Signalo poliarizacijos poveikis	121
2.5.8. SAR duomenų tipai ir jų taikymas	123
2.5.9. Geokodavimas ir radiometrinė topografinė korekcija	124
2.5.10. SAR interferometrija	125
2.5.11. Žemės paviršiaus pokyčių aptikimas naudojant SAR	128
2.5.12. Radaro panaudojimas altimetrijoje	129
Klausimai ir užduotys	132
Naudota literatūra	132
2.6. Optinių daugiaspektrių palydovinių duomenų pirminis apdorojimas ir paruošimas	134
2.6.1. Duomenų geometrinių klaidų pobūdis	134
2.6.2. Duomenų geometrinių klaidų korekcija	135
2.6.3. Radiometrinė palydovinių duomenų korekcija	137
Klausimai ir užduotys	147
Naudota literatūra	147
3 Palydovinių duomenų taikymas	149
3.1. Žemės dangos kaitos stebėsena	150
3.1.2. Vizualinis dešifravimas	155
3.1.3. Kontroluojamasis klasifikavimas	156
3.1.4. Nekontroluojamasis klasifikavimas	159
3.1.5. CORINE žemės dangos duomenys	161
Klausimai ir užduotys	165
Naudota literatūra	165

3

PALYDOVINIŲ DUOMENŲ TAIKYMAS

149

3.1. Žemės dangos kaitos stebėsena	150
3.1.2. Vizualinis dešifravimas	155
3.1.3. Kontroluojamasis klasifikavimas	156
3.1.4. Nekontroluojamasis klasifikavimas	159
3.1.5. CORINE žemės dangos duomenys	161
Klausimai ir užduotys	165
Naudota literatūra	165

3.2. Įvadas į palydovinių technologijų taikymą žemės ūkyje	166
3.2.1. Aktyviųjų jutiklių palydovinių duomenų taikymas žemės ūkyje	167
3.2.2. Pasyviųjų daugiaspektrių jutiklių duomenų taikymas žemės ūkyje.....	174
Klausimai ir užduotys	178
Naudota literatūra	178
3.3. Miškų stebėseną iš palydovų	180
3.3.1. Miškų charakteristikos, bendrieji principai.....	180
3.3.2. Miškų tyrimuose naudojami pasyvieji optiniai jutikliai	184
3.3.3. Miškų kirtimai ir jų kartografavimas	187
3.3.4. Rūšių identifikavimas ir miškų tipizavimas	188
Klausimai ir užduotys.....	193
Naudota literatūra	193
3.4. Ekstremaliųjų situacijų valdymas	195
3.4.1. Ekstremaliosios situacijos ir ekstremalieji įvykiai	195
3.4.2. Ekstremaliosioms situacijoms valdyti naudojami palydoviniai duomenys ir metodai.....	199
3.4.3. Potvyniai ir poplūdžiai	202
3.4.4. Gaisrai	206
3.4.5. Sausros.....	209
Klausimai ir užduotys.....	213
Naudota literatūra	213
3.5. Vandens telkinių stebėseną	215
3.5.1. Vandens telkinių savybės, nustatomos iš palydovų.....	216
3.5.2. Vandens paviršiaus temperatūra	217
3.5.3. Vandens lygis ir bangų režimas.....	222
3.5.4. Vandens telkinių būklė	228
Klausimai ir užduotys.....	239
Naudota literatūra	239
3.6. Sniego ir ledo dangos stebėjimas	241
3.6.1. Sniego dangos nustatymas regimajame ir infraraudonajame spektre.....	241
3.6.2. Pasyviųjų mikrobangų jutiklių ir jungtiniai sniego dangos duomenų rinkiniai.....	242
3.6.3. Sniego dangos savybių nustatymas naudojant lidarų ir matuojant gravitacinį lauką	245
3.6.4. Radaro duomenų panaudojimas sniego dangos tyrimams	248
3.6.5. Ledynų stebėsenos fizikinis pagrindas	249
3.6.6. Paviršiaus klasifikacija ir ledynų ribų nustatymas.....	251
3.6.7. Ledynų slinkimo ir jų masės pokyčių stebėseną	253
3.6.8. Jūros ledo plotų ir koncentracijos nustatymas.....	258
3.6.9. Jūros ledo storio nustatymas	261
Klausimai ir užduotys.....	263
Naudota literatūra	263
TERMINŲ ŽODYNAS	265

PRATARMĖ

Šis vadovėlis skirtas supažindinti su dirbtinių Žemės palydovų teikiamomis galimybėmis stebėti Žemės paviršių ir ten vykstančius procesus bei pokyčius. Vadovėlis pirmiausia skirtas geomokslų studijų studentams, tačiau kartu tai įžanginė knyga tinkanti visiems, kurie domisi nuotoliniais stebėjimais ir palydovinėmis technologijomis. Šio vadovėlio tikslas supažindinti su palydovinių stebėjimų fizikiniais pagrindais, esminiais duomenų apdorojimo būdais ir pateikti skirtingus palydovinių duomenų taikymo pavyzdžius skirtingose srityse.

Nors dirbtiniai palydovai Žemės stebėjimams naudojami jau nuo XX amžiaus 7-to dešimtmečio, iki šiol Lietuvoje nebuvo išleistas nė vienas vadovėlis skirtas Žemės paviršiaus stebėjimams iš kosmoso. Pasaulyje yra išleista labai daug vadovėlių, straipsnių ir kitos mokomosios medžiagos skirtos palydoviniams stebėjimams, dalis iš jų yra bendro pobūdžio, dalis skirti labai specifinei sričiai ar konkrečiam jutikliui. Taip pat labai daug duomenų ir aprašymų apie skirtingus palydovinius jutiklius, jų veikimo principus ir taikymą galima rasti internete. Šios informacijos tik daugės, tačiau aprėpti ir apdoroti šią nesusistemintą informaciją yra sudėtinga. Todėl atrinkta ir struktūrizuota informacija, pateikta šiame vadovėlyje, yra labai svarbi mokymosi priemonė ir puikus įvadas į temą. Mes skatiname šį vadovėlį naudoti kartu su internete prieinama tekstone ir vaizdine informacija, ir tikime, kad geriausias mokymasis vyksta per patirtį. Visus palydovinių duomenų apdorojimo žingsnius galima atlikti su atviros prieigos GIS programine įranga ar specializuotais, kiekvienam jutikliui pritaikytais, įrankiais. Naudojantis atviros prieigos programomis ir įrankiais kiekvienas gali susidaryti savo palydovinių duomenų žemėlapi ar atlikti Žemėje vykstančių pokyčių analizę. Šis vadovėlis suteikia teorinius palydovinių stebėjimų pagrindus, kurie gerokai palengvina praktinius taikymus.

Vadovėlis suskirstytas į tris pagrindines dalis: 1) įvadas – nuotolinių stebėjimų istorija, fizikiniai stebėjimų pagrindai, palydovų tipai ir orbitos; 2) palydoviniai jutikliai – optinių, infraraudonųjų, pasyvių ir aktyvių mikrobangų jutiklių veikimas, stebėjimo geometrija, pagrindiniai duomenų apdorojimo principai; 3) palydovinių duomenų taikymas – žemės dangos klasifikacijai, žemės ir miškų ūkyje, hidrologijoje, ledynų ir sniego stebėsenai, ekstremalių situacijų valdymui. Vadovėlyje didžiausias dėmesys skiriamas palydovinių duomenų taikymui ir pateikiama daugybė praktinių pavyzdžių, kurie padeda geriau suprasti tiek palydovinių jutiklių veikimo principus, tiek natūralius procesus vykstančius Žemėje. Vadovėlį galima skaityti tiek nuo pradžios iki galo, tiek pasirinkti tik jus dominančius skyrelius. Norintiems į temą pasigilinti daugiau prie kiekvieno skyrelio pateikiamas literatūros sąrašas. Palydovinės ir informacinės technologijos, o ypač didelių duomenų kompiuterijos ir mašininio mokymosi algoritmai, labai sparčiai vystosi ir tobulėja, todėl planuojama informaciją pateiktą šiame vadovėlyje nuolat atnaujinti. Pateikta informacija skirta supažindinti su pagrindiniais principais ir duomenų analizės būdais, tačiau tai tik durys į platų nuotolinių stebėjimų pasaulį.

Kadangi tai pirmasis toks lietuviškas universitetinis vadovėlis, tai kėlė ir tam tikrų iššūkių, pirmiausia dėl to, kad daugeliui specifinių nuotolinio stebėjimo terminų reikėjo rasti lietuviškus atitikmenis. Didžioji dalis šiame vadovėlyje naudojamų lietuviškų terminų paimti iš 2007 m. išleisto „Fizikos terminų žodyno“ (V. Palenskis, V. Valiukėnas, V. Žalkauskas, P. J. Žilinskas). Kai kuriais atvejais nuotoliniuose Žemės stebėjimuose naudojami terminai turi siauresnę prasmę nei fizikoje, tačiau tikimės, kad jie bus suprantami ir prigis tiek mokslininkų, tiek studentų, tiek specialistų tarpe.

Vadovėlį parengė Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto mokslininkai J. Kilpys (2.4, 2.5, 3.6 skyreliai bei žodynėlių), L. Jukna (2.1, 2.3, 2.6, 3.2 skyreliai), L. Bevainis (1.1, 1.3, 3.1 skyreliai), R. Šimanauskienė (1.2, 2.2, 3.3 skyreliai), E. Stonevičius (3.4, 3.5 skyreliai). Esame dėkingi recenzentams, doc. G. Stankūnavičiui, doc. J. Sužiedelytei Visockienei, dr. L. Papšienei už pastabas ir pasiūlymus, kurie padėjo patobulinti šią mokymo priemonę.

Vadovėlis parengtas Vilniaus universitete 2019–2020 m. įgyvendinant Europos kosmoso agentūros (ESA) bendradarbiaujančios valstybės plano (PECS) projektą “University Course and Public Lectures on Earth Observations – UniEO”.

SANTRUMPOS

SANTRUMPA	REIŠKĖ ANGLŲ KALBA	VERTIMAS / PAAIŠKINIMAS
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer</i>	Pažangus kosminis šiluminės ir atspindėtos spinduliuotės radiometras
AVHRR	<i>Advanced Very-High-Resolution Radiometer</i>	Pažangus labai aukštos skiriamosios gebos gebos radiometras
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>	Krūvio sąsajos įtaisas, naudojamas skaitmeninėse fotokamerose.
CIR	<i>Color-Infrared imagery</i>	Spalvota infraraudonoji fotografija
CMYK	<i>Cyan, Magenta, Yellow, Key (black)</i>	Standartinis 4 spalvų modelis, kurį sudaro: žydra, purpurinė, geltona ir juoda
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>	Skaitmeninis reljefo modelis (rastriniai duomenys)
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>	Skaitmeninis vietovės modelis (rastriniai ir linijiniai duomenys)
ESA	<i>European Space Agency</i>	Europos kosmoso agentūra
FOV	<i>Field of View</i>	Jutiklio matymo laukas
GLONASS	<i>GLOBAL NAVIGATION Satellite System</i>	Rusijos Federacijos globali navigacijos sistema, kuri yra alternatyva GPS sistemai.
GPS	<i>Global Positioning System</i>	Globali padėties nustatymo sistema, kurioje naudojami palydovai, priklausantys JAV palydovinės navigacijos sistemai NAVSTAR (angl. <i>Navigation Satellite Time and Ranging</i>)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>	Globalinė palydovinė navigacijos sistema (pvz.: GPS, GLONASS, Galileo)
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>	Gravitacijos lauko svyravimų ir klimato eksperimentas (palydovinė misija)
IASI	<i>Infrared Atmospheric Sounding Interferometer</i>	Infraraudonojo spektro atmosferos interferometras
IFOV	<i>Instant Field of View</i>	Jutiklio momentinio matymo laukas
IMU	<i>Inertial Measuring Unit</i>	Prietaiso orientacijos nustatymo sistema
IR	<i>Infrared</i>	Infraraudonoji spinduliuotė
FIR	<i>Far infrared</i>	Tolimoji infraraudonoji spinduliuotė
LAI	<i>Leaf area index</i>	Augalijos lapų ploto indeksas
LWIR	<i>Longwave infrared</i>	Ilgos bangų ilgio infraraudonoji spinduliuotė

SANTRUMPA	REIŠMĖ ANGLŲ KALBA	VERTIMAS / PAAIŠKINIMAS
MCARI	<i>Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index</i>	Modifikuotas chlorofilo sugėrimo santykio indeksas
MIR	<i>Middle Infrared</i>	Vidurinės infraraudonojo spektro dalies spinduliuotė
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>	Vidutinės skiriamosios gebos spektrometras
MSI	<i>Moisture Stress Index</i>	Drėgmės streso rodiklis
MWIR	<i>Midwave Infrared</i>	Vidutinio bangų ilgio infraraudonoji spinduliuotė
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i>	Daugiaspektrė skanavimo sistema (naudojama <i>Landsat</i> palydovuose)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>	JAV Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	Normalizuoto augalijos skirtumo indeksas
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>	Normalizuoto skirtumo vandens indeksas
NIR	<i>Near Infrared</i>	Artimoji infraraudonoji spinduliuotė
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>	JAV Nacionalinė vandenynų ir atmosferos administracija
RBV	<i>Return-Beam Vidicon</i>	Sugrįžtančio šviesos pluošto vidikoninė kamera
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>	Spalvų maišymo modelis kai naudojamos trys spalvos: raudona, žalia, mėlyna
OLI	<i>Operational Land Imager</i>	Operatyvi sausumos kamera
SAR	<i>Synthetic aperture radar</i>	Sintetinės apertūros radaras
SLAR	<i>Side-Looking Airborne Radar</i>	Į šoną nukreiptas radaras
SLC	<i>Single Look Complex</i>	Sudėtinis stebėjimo ruožas (SAR)
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>	Jūros/vandenyno paviršiaus temperatūra
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>	Trumpųjų infraraudonųjų bangų spinduliuotė
TIR	<i>Thermal Infrared</i>	Šiluminė infraraudonoji spinduliuotė
TROPOMI	<i>TROPOspheric Monitoring Instrument</i>	Troposferos stebėjimo jutiklis. Naudojamas <i>Sentinel 5P</i> misijoje.
UV	<i>Ultraviolet</i>	Ultravioletinė spinduliuotė



① ĮVADAS

1.1. NUOTOLINIŲ ŽEMĖS TYRIMŲ ISTORIJA

Nuotoliniais tyrimais pačia plačiausia prasme galima laikyti visus tyrimus, kuriais gaunami duomenys ar žinios apie objektą prie jo tiesiogiai neprisiliečiant. Tačiau tai labai platus ir nekonkretus apibrėžimas. Norint tiksliau apibūdinti nuotolinius Žemės tyrimus, juos galima apibrėžti kaip būdą gauti informaciją apie Žemės ir vandens paviršius analizuojant vaizdus iš viršaus, gautus naudojant vieną ar kelias elektromagnetinių bangų spektro spinduliuotės dalis, atsispindinčias nuo Žemės paviršiaus arba sklindančias iš jo (Campbell, Wynne, 2011).

Nuotolinių tyrimų istorija ir vystymasis glaudžiai siejasi su fotografijos, fizikos ir aviacijos, vėliau astronautikos pradžia ir vystymusi. Deja, pagrindinis nuotolinių tyrimų vystymosi katalizatorius buvo karas ir kariniai poreikiai. Be fotografijos, fizikų atradimų šviesos tyrimų srityje ir aviacijos vystymosi, nuotoliniai tyrimai kaip mokslo šaka nebūtų įmanomi. Jų taikymas karo tikslams užtikrino pakankamą finansavimą ir greitą vystymąsi. Po ilgo naudojimo karo tikslams buvo atrasta ir civilinė nuotolinių tyrimų nauda mokslo bendruomenei ir plačiajai visuomenei.

1.1.1. Ankstyvasis laikotarpis

Nuotolinių tyrimų istorijos pradžią kaip daugumos mokslų istoriją Vakarų pasaulyje galima pradėti pasakoti nuo antikos laikų. Aristotelis apie 336–323 m. prieš Kr. svarstė apie šviesos prigimtį ir kai kurių daiktų potencialą tapti peršviečiamais esant tam tikram apšvietimui.

Gerokai vėliau buvo atrasta camera obscura, pažodžiui – tamsus kambarys. Tai reiškiny, kai pro mažą skylutę įsiskverbianti šviesa ant visiškai tamsios patalpos sienos projektuoja apverstą vaizdą. 1038 m. Alhazenas iš Basros teoriškai paaiškino, kaip veikia camera obscura, 1267 m. Rogeris Baconas naudodamas camera obscura kūrė optines iliuzijas, o Leonardo da Vinci 1490 m. detalai aprašė camera obscura veikimo principus.

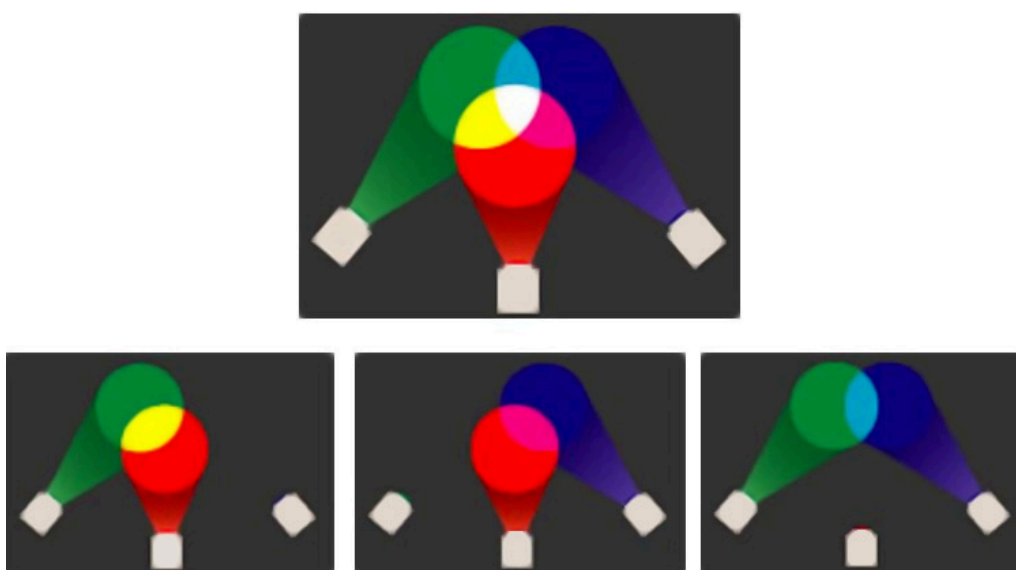
1614 m. Angelo Sala išsiaiškino, kad sidabro milteliai tamsėja veikiami Saulės šviesos, o praėjus pusantro šimto metų (1777 m.) Carlus Vilhelmas Scheelė atrado, kaip užfiksuoti sidabro milteliais gautą atvaizdą, tai fotojuostelių kūrimo kelio pradžia. Tačiau tik 1827 m. Josephas Nicéphore'as Niepce'as camera obscura išgavo pirmąjį atvaizdą naudodamas Judėjos bitumą, dervą ir levandų aliejų. Atvaizdui suformuoti prirėkė 8 valandų ryškios Saulės šviesos. Josephas Nicéphore'as Niepce'as atvaizdą pavadino heliografija (1.1.1. pav.).



1.1.1. pav. Josepho Nicéphore'o Niepce'o heliografija (Estes, Hemphill, 2005).

1607 m. Hansas Lippershey'is išrado teleskopą, šį 1609 m. patobulino Galileo Galilei'us ir atliko pirmuosius mokslinius dangaus kūnų stebėjimus teleskopu. Nuo šio reikšmingo išradimo toliau vystėsi kita nuotolinių tyrimų kryptis, skirta tirti kitus kosminius kūnus, o ne Žemę.

1666 m. Isaacas Newtonas atrado, kad su prizme šviesą galima išskaidyti į raudonos, oranžinės, geltonos, žalios, indigo ir violetinės šviesos spektrą, o antrąja prizme vėl galima viską sulieti į baltą šviesą. Šis atradimas labai svarbus, nes padėjo atrasti įvairaus ilgio šviesos bangas ir sukurti jutiklius. Šiluminę infraraudonąją spinduliuotę Williamas Herschelis atrado 1800 m. Thomas Youngas 1802 m. suformulavo, o vėliau Hermannas Helmholtzas ištobulino spalvų suvokimo teoriją. Ši teorija remiasi atradimu, kad žmogaus akies tinklainėje yra trys regos receptoriai, atsakingi už spalvos suvokimą. Vienas receptorių yra jautrus žaliai spalvai, kitas – mėlynai, o trečias – raudonai. Šių trijų spalvų deriniai sukuria visas spalvas, kurias galime suvokti (1.1.2. pav.).



1.1.2. pav. Youngo ir Helmholtzo spalvų suvokimo teorija.

1782 m. broliai Josephas Michelis ir Jacquesas Étienne'as Montgolfier Prancūzijoje sukūrė pirmąjį pilotuojamą oro balioną, kurį viešai pademonstravo 1783 m. Nuo šios datos prasidėjo oreivystės istorija ir atsirado galimybė žmonėms stebėti Žemę iš viršaus.

1839 m. Louisas Jacques Mandé Daguerre'as išrado fotografijos plokštelę, o Williamas Henry'is Foxas Talbotas – naują fotografijos metodą – negatyvinį pozityvinį nuotraukų dauginimo procesą.

1849 m. Aimé Laussedat pirmasis nuotraukas panaudojo topografiniam žemėlapiui sudaryti. Gal būtų nuo šios datos turėtume skaičiuoti nuotolinių tyrimų istoriją, nes pirmą kartą buvo gautos žinios apie objektą prie jo tiesiogiai neprisiliečiant.

Praėjus beveik šimtui metų po pirmojo pilotuojamo oro baliono skrydžio, 1858 m. Gasperas Felixas Tournachonas („Nadaras“) iš oro baliono nufotografavo Paryžių iš maždaug 350 m aukščio, deja, pirmosios nuotraukos iš oro iki šių dienų neišliko. Seniausia išlikusi fotografija iš oro baliono yra 1860 m. lapkričio 13 d. Jameso Wallace'o Blacko daryta Bostono nuotrauka, fotografuota taip pat iš 350 m aukščio (1.1.3. pav.).



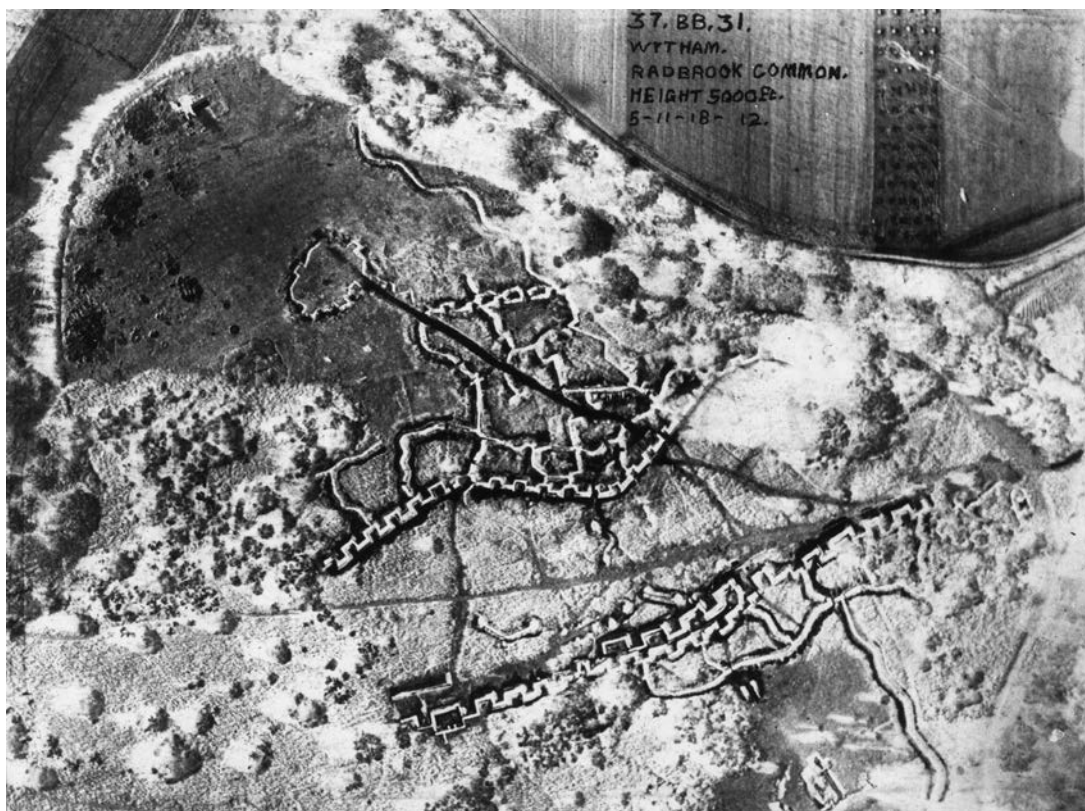
1.1.3. pav. 1860 m. lapkričio 13 d. Bostono nuotrauka iš oro baliono (Google Maps Blog, 2010).

Manoma, kad 1862 m. nuotraukos iš oro baliono buvo naudojamos Amerikos pilietiniame kare, tačiau tikslų duomenų apie tai nėra. Vėliau stebėjimai iš oro balionų Amerikoje buvo naudojami miškams kartografuoti, Vokietijos mokslininkai pradėjo eksperimentuoti su aerofotografinėmis nuotraukomis ir fotogrametriniais metodais matuodami miškų plotus. Prancūzijoje 1888 m. M. A. Battutas fotografavo kraštovaizdį fotoaparatai pritvirtinęs prie aitvaro, o 1903 m. Bavarijoje mažiųjų fotoaparatai buvo tvirtinami prie pašto karvelių. Pašto karvelius naudojo kariniams tikslams, todėl buvo nuspręsta juos naudoti ir žvalgybai. Prie karvelio pritvirtinta kamera darydavo nuotraukas kas 30 sekundžių.

1906 m. Alfredas Maulas fotokamerą pritvirtino prie raketos ir nufotografavo vaizdą iš beveik 800 m aukščio. Brolių Wilburio ir Orvilio Wrightų 1903 m. išrastas lėktuvas padarė tikrą perversmą aviacijoje ir nuotolinių tyrimų istorijoje. Pirmasis jų skrydis truko vos 59 sekundes, o jau po kelerių metų jie įsteigė lėktuvų gamybos bendrovę ir lakūnų mokyklą. Pirmoji nuotrauka iš lėktuvo buvo padaryta 1909 m. Wilburio Wrighto kartu su L. P. Bonvillainu.

Pirmojo pasaulinio karo metais aerofotografinės nuotraukas pradėta daryti nuolat. Oro balionus ir pašto karvelius pakeitė lėktuvai, kuriais buvo galima fotografuoti tikslinę vietovę. Ant lėktuvų tvirtinami fotoaparatai pradėti kurti specialiai aerofotografinėms nuotraukoms daryti, tačiau juos tvirtinti prie lėktuvų dar buvo nepatogu.

Pirmojo pasaulinio karo pabaigoje tiek britai, tiek vokiečiai fronto liniją fotografuodavo du kartus per dieną. Manoma, kad britai per Pirmąjį pasaulinį karą padarė apie pusę milijono aerofotografinių nuotraukų. Intensyvių karo veiksmų metu 1918 m. Prancūzija padarydavo ir išspausdindavo apie 10 tūkst. nuotraukų kasnakt (1.1.4. pav.).



1.1.4. pav. Pirmojo pasaulinio karo apkasų aerofotografinė nuotrauka, 1918 m. lapkritis (Georger, 2016).

Baigiantis Pirmajam pasauliniui karui Shermanas M. Fairchildas išrado fotoaparato objektyvo dangtelį, įmontuojamą pačiame lęšyje. Dėl šio išradimo aerofotografinėse nuotraukose gerokai sumažėjo netikslumų. 1922 m. Niuarke Naujajame Džersyje valdžia sudarė sutartį su M. Fairchildu dėl pakrantės srities kartografavimo. 1924 m. L. D. Mannesas ir L. Godowsky'is jaunesnysis užpatentavo daugiasluoksnę spalvotą fotojuostelę, o 1931 m. Stevensas išrado fotojuostelę, fiksuojančią infraraudonuosius spindulius.

Tarpukariu pastebėta ne tik karinė nuotolinių tyrimų nauda, bet ir imta juos taikyti visuomeniniame gyvenime. 3-iajame dešimtmetyje pasirodė pirmosios knygos apie aerofotografavimą. 1927 m. išleista Reeveso sudaryta „Aerofotografinių nuotraukų charakteristikos ir pritaikymas karo reikmėms“ (angl. *Aerial Photographs Characteristics and Military Applications*), 1928 m. T. P. Pendletono „Žemėlapių sudarymas naudojant aerofotografines nuotraukas“ (angl. *Map Complication from Aerial Photographs*), o 1929 m. Ashley'io C. Mcinley'io „Taikomasis aerofotografavimas“ (angl. *Applied Aerial Photography*). Aerofotografinės nuotraukos naudotos dirvožemio, miškų, geologiniam kartografavimui, žemės ūkio statistikai rinkti, tačiau naujas metodas sunkiai skynėsi kelią dėl tradicinius metodus palaikančių profesionalų.

Pirmąkart Lietuvos teritorijos aerofotonuotraukos minimos pirmajame lietuvių kalba Stasio Dirmanto 1923 m. parašytame vadovėlyje „Topografija“. Šioje knygoje apibendrinama aerofotonuotraukos esmė ir pateikiama Lietuvos teritorijos aerofotografinių nuotraukų pavyzdžių. Įvairių mastelių aerofotografinės nuotraukos su nedidelėmis aerovaizdų sanklodomis Lietuvos Respublikoje darė Karo aviacijos tarnyba (B. Ruzgienė, 2008).

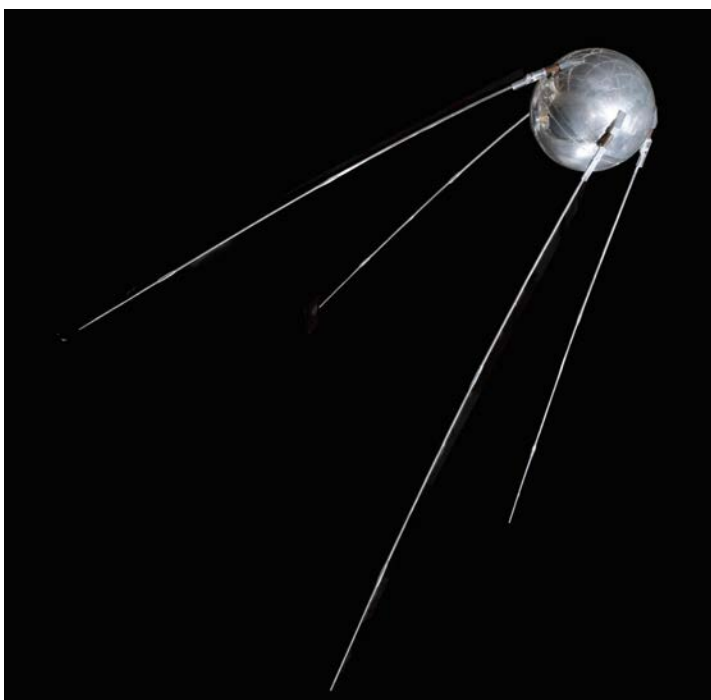
Antrojo pasaulinio karo metais nuotolinių tyrimų prietaisuose pradėtas naudoti ne tik regimasis spektras, bet ir infraraudonosios spinduliuotės bei mikrobangų spektrai. Mokslinis šių spektrų potencialas jau seniai buvo pastebėtas, tačiau vėl tik per karą buvo sutelkta pakan-

kamai resursų technologijoms vystyti. Be to, karo metu apmokyta daug lakūnų, fotoaparatu operatorių ir aerofotografinių nuotraukų dešifruotojų, kurie po karo galėjo pereiti dirbti į civilines nuotolinių tyrimų sritis. Antrojo pasaulinio karo metais labiau nei per Pirmąjį pasaulinį karą buvo išplėstas nuotolinių tyrimų objektas. Jei Pirmojo pasaulinio karo metu daugiausia buvo stebėti priešo įtvirtinimai ir karinė technika, tai per Antrąjį pasaulinį karą aerofotografinėse nuotraukose pradėta tyrinėti topografija, vietovės praeinamumas, augalija, taip pat buvo įgyta daugiau teorinių tokių nuotraukų dešifravimo žinių.

Po Antrojo pasaulinio karo prasidėjo JAV ir Sovietų Sąjungos ginklavimosi ir technologinės varžybos. Šiuo laikotarpiu tobulėjo nuotolinių tyrimų jutikliai, prasidėjo daugiaspektrė analizė, spalvota infraraudonoji fotografija (CIR) naudota nekariniams tikslams, prasidėjo palydovų era. 1954 m. JAV žvalgybos tikslams sukūrė lėktuvus U-2 su specialiomis kamerų sistemomis, taip siekė surinkti kuo daugiau informacijos apie Sovietų Sąjungą.

1957 m. Sovietų Sąjunga paleido pirmąjį pasaulyje dirbtinį Žemės palydovą *Sputnik 1* (1.1.5. pav.). *Sputnik 1* orbitoje skriejo tris savaites, kol baigėsi baterija, ir dar po poros mėnesių nukrito į atmosferą. *Sputnik 1* transliuojamą radijo signalą galėjo pagauti net radijo mėgėjai. 1959 m. JAV karinis laivynas povandeninių laivų vietai nustatyti pradėjo taikyti pirmąją palydovinę navigacijos sistemą TRANSIT, kurią sudarė 6 palydovai, vėliau jų padaugėjo iki 10. 1960 m. JAV pradėjo žvalgybinių dirbtinių Žemės palydovų programą CORONA, kuri ėmė nuolat rinkti duomenis iš kosmoso. 1960 m. į kosmosą buvo paleistas ir pirmasis meteorologinis palydovas TIROS-1. Šis palydovas buvo sukurtas klimato ir meteorologiniams stebėjimams, tačiau padėjo ir Žemės paviršiaus stebėjimo pagrindus. Šiuo laikotarpiu dalis JAV karinių technologijų buvo išslaptintos ir pradėtos naudoti civiliniams tikslams.

1963 m. D. Greggas sukūrė pirmąjį skaitmeninės fotografijos prototipą, kurį pavadino vaizdo disku. Šis prietaisas sugebėjo užfiksuoti ir kelioms minutėms išsaugoti skaitmeninį atvaizdą. Ilgainiui šis išradimas pakeitė visą fotografiją ir nuotolinius tyrimus. 7-ajame dešimtmetyje JAV įkurta Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija (NASA), kuri rūpinosi nuotolinių tyrimų vystymu ir taikymu JAV institucijose. 1964 m. pradėta meteorologinių palydovų *Nimbus* programa paleidžiant *Nimbus 1*. Dirbtiniai Žemės palydovai *Nimbus* buvo tiriamieji meteorologiniai palydovai, sukurti nuotoliniams atmosferos tyrimams. Svarbu paminėti, kad



1.1.5. pav. Pirmasis istorijoje dirbtinis Žemės palydovas *Sputnik 1* (Smithsonian National Air and Space Museum, 2016).

7-ajame dešimtmetyje po lazerio išradimo pradėtos vystyti lidarų (angl. Light Detection and Ranging, LIDAR) technologijos. 1971 m. *Apollo 15* misijos metu astronautai lazerinius altimetrus naudojo Mėnulio paviršiui kartografuoti.

Nuotoliniai žemės paviršiaus tyrimai, fotogrametrija Lietuvoje sparčiai vystėsi pokario metais. 1950 m. Kaune įkuriama valstybinė įmonė „Selchozaerosjomka“ („Žemės ūkio aerofotonuotraukos įmonė“) ir įpareigojama rengti žemės ūkiui reikalingus kontūrinius 1:10 000 mastelio fotoplanus. Ji atliko darbus ne tik Lietuvos teritorijoje, bet ir Latvijoje, Baltarusijoje bei Kaliningrado srityje. Technologinė tokių planų rengimo schema buvo tokia: aerofotografavimas, aerofotonuotraukų koordinavimas, kontūrų dešifravimas, fotoplanų gaminimas, kontūrinių planų sudarymas ir braižymas bei fotoplanų dauginimas (B. Ruzgienė, 2008).

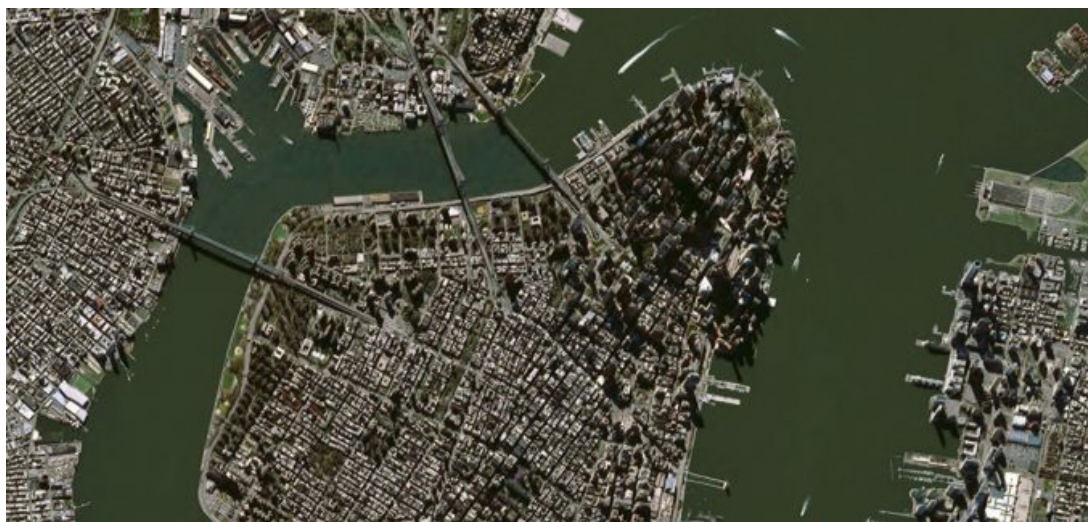
1970 m. įmonė „Selchozaerosjomka“ reorganizuota į Visasajunginio žemės ūkio aerofotogeodezinių tyrinėjimų instituto (VISCHAGI) filialą. Šis instituto filialas plačiai vykdė aerofotogeodezinius darbus, aprūpino žemėtvarkos ir kai kurias kitas žemės ūkio organizacijas fotoplanine, daugiausia 1:10 000 mastelio kartografinė medžiaga. 1996 m. VISCHAGI reorganizuotas į uždarytą akcinę bendrovę „Aerogeodezijos institutas“ (AGI). Viena iš daugelio AGI veiklos sričių yra žemėlapių sudarymas, taikant stereofotogrametrinę bei ortofotografinę technologijas (B. Ruzgienė, 2008).

1969 m. Vilniaus universiteto (tuomet „Valstybinio V. Kapsuko“ universiteto) Fizinės geografijos ir kartografijos katedros, ir ypač technikos mokslų kandidato Romualdo Vilūno, pastangomis buvo įsteigta Fotogrametrijos laboratorija (vedėjas Albinas Pilipaitis). 1972 m. Rimanto Žvirblio iniciatyva Paminklų restauravimo projekte Vilniuje buvo įkurta kita architektūrinės fotogrametrijos laboratorija. Ši laboratorija atliko didelių pastatų, ansamblių ir miestų kvartalų kompleksinius matavimus fotogrametriniais metodais (B. Ruzgienė, 2008).

1.1.2. Globalūs Žemės paviršiaus tyrimai

1972 m. paleistas ERST (angl. Earth Resources Technology Satellite) – pirmasis dirbtinis palydovas, skirtas Žemės tyrimams. Palydovas vėliau pervadintas į *Landsat 1*. *Landsat* programa buvo ilgalaikė ir sėkminga, paleistos 8 *Landsat* sistemos. Šiais palydovais surinkti daugiaspektriai duomenys padėjo geriau suprasti globalinius Žemėje vykstančius procesus, taip pat kintančias žemės dangos tendencijas, įvertinti miestų vystymosi procesus. Daugiaspektriai duomenys apie Žemę buvo renkami ir anksčiau, tačiau pagrindinė *Landsat* duomenų vertė buvo ta, kad šie duomenys apie dideles Žemės teritorijas buvo renkami nuolat ir plačiai prieinami mokslininkų bendruomenei, todėl duomenimis galėjo naudotis daug daugiau tyrėjų. Iki *Landsat* duomenų palydovinės nuotraukos buvo analizuojamos spausdintos ar kaip skaidruolės. *Landsat* duomenys buvo pateikiami ne tik spausdinti, bet ir skaitmeniniai, todėl atvėrė skaitmeninės palydovų surinktų duomenų analizės galimybę.

Toliau vystant palydovines technologijas 9-ajame dešimtmetyje vaizdų skiriamoji geba padidinta iki 30, 20 vėliau ir 10 metrų. Galiausiai XX a. pab. – XXI pr. skiriamoji geba padidinta iki kelių metrų ir net dešimčių centimetrų. 1975 m. pradėta programa GOES (angl. Geostationary Operational Environmental Satellite) tęsiasi iki šiol. Pateikiami duomenys apie atmosferos reiškinius, Saulės aktyvumą, duomenys naudojami gelbėti ir perspėti žmones apie stichines nelaimes. Jau yra paleista 17 GOES palydovų. 1986 m. paleistas SPOT 1. Palyginus su *Landsat* SPOT yra žymiai didesnės skiriamosios gebos, SPOT 1 panchromatinių vaizdų skiriamoji geba buvo 10 m, o daugiaspektrių – 20 m. 2002 m. paleistas SPOT 5 pasiekė 2,5–5 m panchromatinių vaizdų skiriamąją gebą ir 10 m daugiaspektrių vaizdų. SPOT 7 paleistas 2014 m. pasiekė 1,5 m panchromatinių vaizdų skiriamąją gebą ir 6 m daugiaspektrių vaizdų. SPOT duomenys ilgus metus buvo tiksliausi duomenys, prieinami mokslininkų bendruomenei (1.1.6 pav.).



1.1.6. pav. Palydovo SPOT 6 natūralių spalvų RGB Niujorko vaizdas, 2012 m. (Gis Geography, 2020).

1988 m. pradėta Indijos nuotolinių tyrimų palydovų IRS 1A serija. 1991 m. paleistas ERS 1 – pirmasis palydovas, galintis nustatyti paviršiaus aukščio skirtumus 5 cm tikslumu. 1999 m. paleisti palydovai IKONOS, kurių skiriamoji geba 1 m, taip pat paleisti Kinijos ir Brazilijos palydovai CBERS 1, *Terra*, Pietų Korėja paleido *Kompsat 1* ir kt. Dirbtinių Žemės palydovų daugėja kasmet.

1986 m. NASA pradėjo daugiaspektrių tyrimų programą AVIRIS, kurioje naudojami ne palydovai, bet aukštai skrendantys lėktuvai. Dabar vykdydamas misiją lėktuvas skrenda apie 730 km/h greičiu 20 km aukštyje virš jūros lygio, o unikali jutiklių sistema renka duomenis apie Žemės ir atmosferos skleidžiamo energinio skaisčio tankį 224 spektro juostose, kurių bangos ilgis siekia nuo 400 iki 2500 nm.

Vietos nustatymo palydovai iš pradžių buvo naudojami tik kariniams tikslams, pvz., JAV TRANSIT, tačiau ilgainiui pradėti naudoti ir civilių poreikiams. Rusijos navigacijos sistema GLONASS pradėta kurti 1976 m., pirmieji palydovai iškelti 1986 m., sistema pilnai pradėjo veikti 2000 m. JAV 1973 m. pradėjo kurti GPS sistemą, kurią sudaro 24 palydovai. GPS sistema pilnai pradėjo veikti 1995 m. Kinijos navigacijos sistema „BeiDou“ (angl. BeiDou Navigation Satellite System, BDS) pradėta vystyti 1994 m., pirmasis palydovas iškeltas 2000 m. 2016 m. pradėjo veikti pasaulinė navigacijos sistema „Galileo“, sukurta ES. Pirmasis bandomasis palydovas paleistas 2005 m., o pilnai „Galileo“ sistemoje veikiantys palydovai paleisti 2011 m. Visą sistemą sudarys 30 palydovų, iš kurių 24 bus veikiantys ir 6 atsarginiai. „Galileo“ nuo kitų sistemų ji skiriasi dar ir tuo, kad yra kuriama ir valdoma civilių, o ne kariškių.

Pirmieji Lietuvos palydovai *LituanicaSAT-1* ir *LitSat-1* į kosmosą pakilo 2014 m. sausio 9 d., o iš Tarptautinės kosminės stoties į savo orbitas buvo paleisti 2014 m. vasario 28 d. Tai buvo mažieji nanopalydovai, kurių misijų pagrindinis tikslas buvo išbandyti įvairias lietuvių sukurta kosmosui tinkamas technologijas: ištestuoti alternatyvius energijos šaltinius, išbandyti pjezo variklius, padėties nustatymo įrangą ir konstrukcines plokštes.

XXI a. pr. stiprėja interneto galia – nuotoliniai tyrimai vis labiau prieinami visiems, nuotolinių tyrimų duomenys pateikiami žemėlapiuose, kurie lengvai prieinami ir suprantami. 2001 m. pradėjo veikti „Google Earth“. Dabar net sunku įsivaizduoti mobilųjį telefoną, kuris negalėtų nustatyti buvimo vietos naudodamasi palydovinėmis sistemomis.

Nuotoliniai tyrimai yra tarpdisciplininė mokslo sritis, apimanti, integruojanti ir panaudojanti daugybės kitų mokslo sričių žinias. Tačiau reikia suprasti, kad nuotoliniai tyrimai yra tik

įrankis surinkti ir apdoroti informaciją, kuria toliau gali naudotis kiti mokslai. Todėl nuotolinių tyrimų negalime laikyti savitiksiais, jų rezultatai visada gali ir turi būti pritaikomi kitoms sritims.

1.1.1 lentelė. Išsami pagrindinių įvykių suvestinė.

METAI	ĮVYKIS
1038 m.	Alhazenas iš Basros teoriškai paaiškino, kaip veikia <i>camera obscura</i> .
1267 m.	Rogeris Baconas kūrė optines iliuzijas naudodamas <i>camera obscura</i> .
1490 m.	Leonardo da Vinci detaliai aprašė <i>camera obscura</i> veikimo principus.
1614 m.	Angelo Sala išsiaiškino, kad sidabro milteliai tamsėja veikiami Saulės šviesos.
1666 m.	Isaacas Newtonas išskaidė šviesos spindulius.
1676 m.	Johannas Christophas Sturmas padėjo šiuolaikinės vieno lęšio fotokameros atsiradimo pagrindus.
1777 m.	Carlas Wilhelm Scheele'ė atrado, kaip užfiksuoti sidabro milteliais gautą atvaizdą, tai fotojuostelių kūrimo kelio pradžia.
1782 m.	Broliai Josephas Michelis ir Jacquesas Étienne'as Montgolfier sukūrė pirmąjį pilotuojamą oro balioną.
1800 m.	Williamas Herschelis atrado šiluminę infraraudonąją spinduliuotę.
1802 m.	Thomas Youngas suformulavo, o Hermannas Helmholtzas išstobulino spalvų suvokimo teoriją.
1827 m.	Josephas Nicephore'as Niepce'as padarė pirmąją fotografiją – heliografiją.
1839 m.	Daguerre'as išrado fotografijos plokštelę.
1839 m.	Williamas Henry'is Foxas Talbotas išrado naują fotografijos metodą – neigatyvinę pozityvinę nuotraukų dauginimo procesą.
1838 m.	Charlesas Wheatstone'as išrado stereoskopą.
1849 m.	Aimé Laussedat pirmasis nuotraukas iš viršaus panaudojo topografiniam žemėlapiui sudaryti.
1855 m.	Jamesas Clerkas Maxwellas aprašė spalvoto vaizdo gavimo būdą, kuris vadinas papildomu spalvų sujungimu.
1858 m.	Gasperas Felixas Tournachonas („Nadaras“) nufotografavo Paryžių iš oro baliono.
1861 m.	Jamesas Clerkas Maxwellas kartu su Thomu Suttonu pagamino pirmąją spalvotą nuotrauką.
1887 m.	Vokietijos mokslininkai matuodami miškų plotus pradėjo eksperimentuoti su aerofotografinėmis nuotraukomis ir fotogrametriniais metodais.

METAI	ĮVYKIS
1903 m.	Bavarijoje mažytės kameros buvo tvirtinamos prie pašto karvelių.
1906 m.	Alfredas Maulas fotokamerą pritvirtino prie raketos ir nufotografavo vaizdą iš beveik 800 m aukščio.
1907 m.	Augustėas ir Louisas Lumiere'ai išrado paprastą spalvotos fotografijos metodą ir įtvirtino 35 mm juostelės pločio standartą.
1909 m.	Wilburis Wrightas kartu su L. P. Bonvillainu padarė pirmąją aerofotografinę nuotrauką iš lėktuvo.
Pirmasis pasaulinis karas	Lėktuvai pakeitė oro balionus ir karvelius. 1915 m. pulkininkas leitenantas J. T. C. Brabazonas sukonstravo pirmąją praktišką aerokamerą. Žmonės specialiai apmokomi dešifruoti aerofotografines nuotraukas. Labai pagerėjo nuotraukų kokybė. Karo pabaigoje britai ir vokiečiai fronto liniją fotografuodavo du kartus per dieną. Pradėti konstruoti bepiločiai orlaiviai.
1919 m.	Pradėta Kanados miškų kartografavimo programa.
1919 m.	Hoffmanas pirmasis iš lėktuvo užfiksavo infraraudonąją spinduliuotę.
1924 m.	Mannesas ir Godowsky'is jaunesnysis užpatentavo daugiasluksnę spalvotą juostelę.
1927–1929 m.	Išleistos pirmosios knygos apie aerofotografavimą.
1923 m.	Pirmąkart Lietuvos teritorijos aerofotonuotraukos minimos pirmajame lietuvių kalba Stasio Dirmanto parašytame vadovėlyje „Topografija“
1931 m.	Stevensas išrado IR spindulius fiksuojančią fotojuostelę.
Antrasis pasaulinis karas	Pradėti naudoti infraraudonoji spinduliuotė, mikrobangos. 1933 m. sukonstruotas bepilotis lėktuvas <i>Queen Bee</i> , kuris laikomas drono prototipu. 1946 m. padaryta pirmoji nuotrauka iš kosmoso panaudojus raketą V-2. Pritaikyti nauji aerofotografinių nuotraukų dešifravimo metodai.
1950 m.	Kaune įkuriama valstybinė įmonė „Selchozaerosjomka“ („Žemės ūkio aerofotonuotraukos įmonė“)
1954 m.	JAV pradėta vykdyti žvalgybinių lėktuvų ir specializuotų kamerų U-2 programa.
1957 m.	SSRS paleido <i>Sputnik 1</i> .
1959 m.	JAV pradėjo taikyti pirmąją palydovinę navigacijos sistemą TRANSIT.
1960 m.	Į kosmosą paleistas pirmasis meteorologinis palydovas TIROS 1.
~ 1960 m.	JAV pradėjo programą CORONA.
1963 m.	D. Greggas Stanfordo universitete sukūrė vaizdo diską.

METAI	ĮVYKIS
1964 m.	Pradėta meteorologinių palydovų <i>Nimbus</i> programa paleidus <i>Nimbus1</i> .
XX a. 7-asis deš.	Pradėtos vystyti lidaro technologijos
1969 m.	Vilniaus universiteto Fizinės geografijos ir kartografijos katedroje įkurta Fotogrametrijos laboratorija
1970 m.	Įmonė „Selchozaerosjomka“ reorganizuota į Visasajungino žemės ūkio aerofoto-geodezinių tyrinėjimų instituto (VISCHAGI) filialą.
1972 m.	Paleistas ERST, vėliau pervadintas į <i>Landsat 1</i> .
1972 m.	Paleista <i>Skylab</i> – pirmoji JAV kosminė stotis.
1975 m.	Pradėta programa GOES.
7-asis deš.	Rogeris Tomlinsonas sukūrė kompiuterizuotą sistemą, skirtą analizuoti ir saugoti duomenis apie Kanados žemės dangą (GIS pradžia).
1986 m.	NASA pradėjo programą AVIRIS.
1988 m.	Indija paleido palydovų seriją IRS 1A.
1991 m.	Paleistas palydovas ERS 1.
1995 m.	Pradėjo veikti GPS.
1996 m.	Lietuvoje VISCHAGI filialas reorganizuotas į uždarąją akcinę bendrovę „Aerogeodezijos institutas“
1999 m.	Praleisti palydovai IKONOS; Kinijos ir Brazilijos palydovai CBERS 1, <i>Terra</i> , Pietų Korėja paleido <i>Kompsat 1</i> .
2000 m.	Pradėjo veikti Rusijos navigacijos sistema GLONASS.
2000 m.	Pradėjo lokaliai veikti Kinijos navigacijos sistema „BeiDou“.
2001 m.	Visuomenei pristatyta platforma „Google Earth“.
2014 m.	Iš Tarptautinės kosminės stoties paleisti pirmieji lietuviški palydovai „Lituanica-SAT-1“ ir „LitSat-1“
2016 m.	Pradėjo veikti ES sukurta navigacijos sistema „Galileo“.
2018 m.	BDS tapo globali.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Koks yra nuotolinių tyrimų objektas?
- Kokios mokslo sritys padėjo pagrindus nuotoliniams stebėjimams vystyti?
- Išvardykite pagrindinius nuotolinių žemės stebėjimų technologijų vystymosi lūžius.
- Išvardykite keletą svarbiausių įvykių susijusių su nuotolinių žemės stebėjimų technologijų vystymu Lietuvoje.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Baumann, P. R. (2009). *History of remote sensing. Satellite imagery. Part II* [žiūrėta 2020-08-07]. Prieiga internete: <http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosatz/RS%20History%20II/RS-History-Part-2.html>
- Campbell, J. B., Wynne, R., H. (2011). *Introduction to Remote Sensing (5th ed.)*. New York: The Guilford Press.
- Estes, J. E., Hemphill, J. (2005). *Some Important Dates in the Chronological History of Aerial Photography and Remote Sensing* [žiūrėta 2020-03-04]. Prieiga internete: <http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/remotesensinghistory.html>
- Georger (2016). *Open elevation data & archeology: Part I* [žiūrėta 2020-03-04]. Prieiga internete: <https://geogear.co.uk/2016/03/01/open-elevation-data-archaeology-part-1/>
- Gis Geography (2020). *Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT)* [žiūrėta 2020-02-11]. Prieiga internete: <https://gisgeography.com/spot-satellite-pour-observation-terre/>
- Google Maps Blog (2010). *The world as the eagle and the wild goose see it.* [žiūrėta 2020-02-11]. Prieiga internete: <https://maps.googleblog.com/2010/10/world-as-eagle-and-wild-goose-see-it.html>
- Graham S. (1999). *Remote Sensing. Introduction and History*. NASA Earth Observatory [žiūrėta 2020-08-25]. Prieiga internete: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing/remote.php>
- Planetek (2010). *The history of remote sensing* [žiūrėta 2020-02-25]. Prieiga internete: https://www.planetek.it/eng/training_courses/online_manuals/on_line_course_of_remote_sensing/2_the_history_of_remote_sensing
- Ruzgienė, B. (2008). *Fotogrametrija*. Vilnius: Technika.
- Smithsonian National Air and Space Museum (2016). *Sputnik 1 (Replica)* [žiūrėta 2020-03-04]. Prieiga internete: <https://airandspace.si.edu/collection-objects/sputnik-1-replica>
- Žvirgždas, S. (2009). *Joseph Nicéphore Niépce*. Visuotinė lietuvių enciklopedija. [žiūrėta 2020-03-04]. Prieiga internete: <https://www.vle.lt/straipsnis/joseph-nicephore-niepce/>

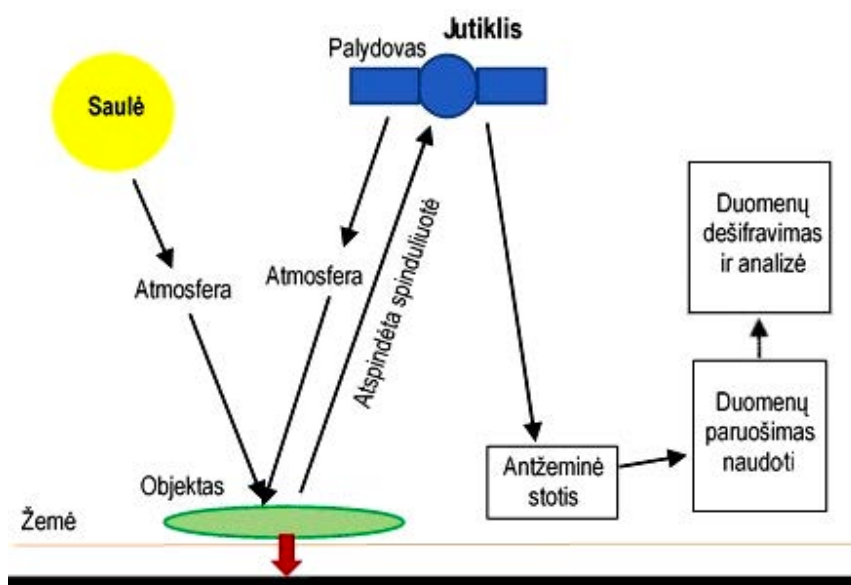
1.2. ELEKTROMAGNETINĖ SPINDULIUOTĖ

1.2.1. Elektromagnetinė spinduliuotė ir jos savybės

Nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai (angl. Remote Sensing) – terminas, vartojamas įvardijant metodą rinkti informaciją apie Žemės paviršių be sąlyčio su juo. Atliekant nuotolinius Žemės paviršiaus tyrimus atspindėta arba skleidžiama elektromagnetinė energija jutikliu yra registruojama nuotraukose.

Nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų procesą sudaro daug etapų. Pirmiausia šiems tyrimams reikalingas energijos šaltinis. Kai Saulės energija atkeliauja iki Žemės, ji sąveikauja su atmosfera ir objektais Žemėje. Atspindėdusią šios energijos dalį priima jutiklis, koduoja ją elektriniais signalais ir perduoda į antžeminę stotį (1.2.1 pav.). Kad taptų vertingi, šie duomenys apdorojami, dešifruojami ir analizuojami – tai leidžia gauti konkrečios informacijos apie nagrinėjamą teritoriją ir joje esančius objektus ar vykstančius reiškinius.

1.2.1. pav.
Nuotolinių tyrimų schema (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009)

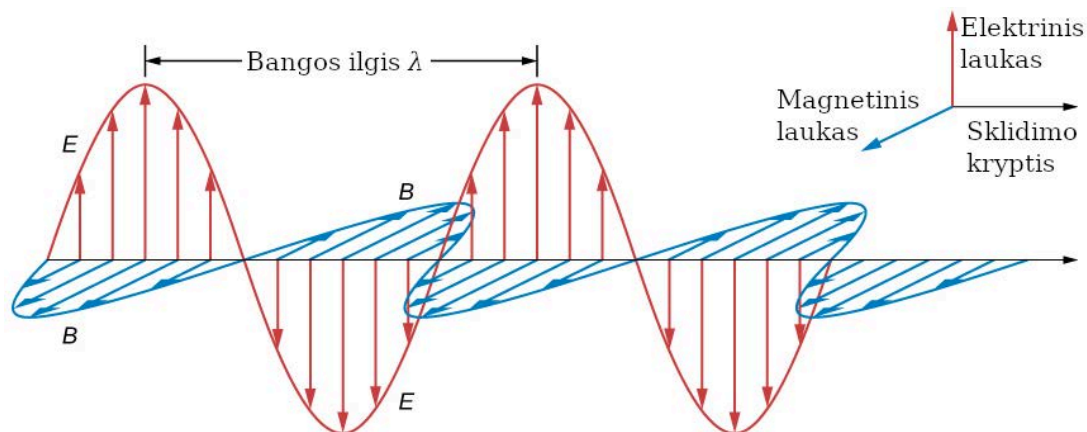


Taikant nuotolinius Žemės paviršiaus tyrimus pirmiausia reikalingas energijos šaltinis. Jis turi apšviesti tiriamą teritoriją (objektą). Kitas galimas atvejis – kai registruojamą energiją skleidžia pats objektas. Tokia energija yra vadinama elektromagnetine spinduliuote. Tipiškas elektromagnetinės spinduliuotės pavyzdys yra Saulės šviesa.

Elektromagnetinė spinduliuotė – tai mus supanti energijos forma, jungianti radijo bangas, mikrobangas, rentgeno spindulius ir gama spindulius. Saulės šviesa taip pat yra elektromagnetinė spinduliuotė, bet regimoji šviesa yra tik labai maža elektromagnetinių bangų spektro dalis.

Visa elektromagnetinė spinduliuotė pasižymi savybėmis, kurias apibrėžia bangų teorija. Elektromagnetinius spindulius sudaro elektrinis laukas E , kurio dydis kinta spinduliavimo sklidimui statmena kryptimi, ir magnetinis laukas B orientuotas elektriniam laukui stačiu kampui. Abu šie laukai sklinda šviesos greičiu (1.2.2. pav.).

Nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose svarbios dvi elektromagnetinės spinduliuotės savybės – bangos ilgis ir dažnis. Bangos ilgis yra vieno bangos ciklo ilgis, kuris gali būti matuojamas kaip atstumas tarp viena po kitos einančių bangų viršūnių (1.2.2. pav.). Žymimas graikiška raide λ (lambda). Bangos ilgis matuojamas metrais (m), centimetrais (cm, 10^{-2} metro), mikrometrais (μm , 10^{-6} metro), nanometrais (nm, 10^{-9} metro).



1.2.2. pav. Elektromagnetinių spindulių sandara ir bangos ilgis (pagal UC Davis, 2019).

Bangos dažnis parodo pro nejudamą tašką per sekundę praeinančių bangos ciklų skaičių. Žymimas raide f . Pagrindinis dažnio matas yra hercas (Hz), lygus vienam ciklui per sekundę. Dar yra kilohercas ($\text{kHz}, =10^3 \text{Hz}$), megahercas ($\text{MHz}, =10^6 \text{Hz}$), gigahercas ($\text{GHz}, =10^9 \text{Hz}$). Elektromagnetinės bangos ilgio ir dažnio bei šviesos greičio santykis yra išreiškiamas formule:

$$c = \lambda f \quad (1.2.1.)$$

kur λ – bangos ilgis (m); f – ciklų dažnis per sekundę (Hz); c – šviesos greitis ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Tai, gi, ilgesnės bangos yra nusakomos žemesniu jų dažniu bei pasižymi mažesne energija, o trumpesnės bangos, savo ruožtu, nusakomos aukštesniu dažniu ir didesne energija (1.2.3. pav.).

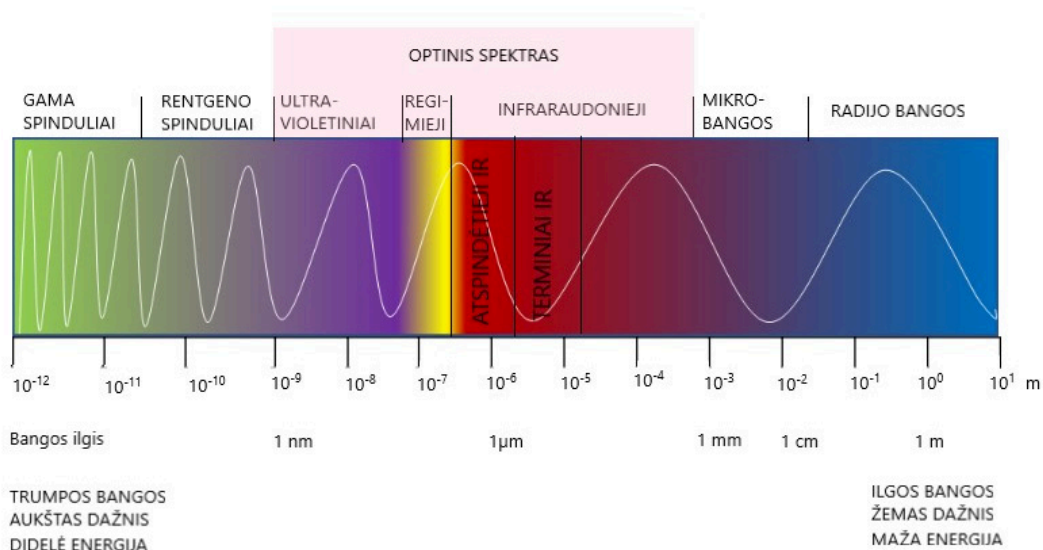
Norint teisingai interpretuoti iš palydovinių jutiklių gaunamą informaciją, svarbu suvokti elektromagnetinės spinduliuotės skirstymą pagal bangų ilgį bei dažnį ir bangų savybių priklausomybę nuo šių parametrų.

1.2.2. Elektromagnetinių bangų spektras

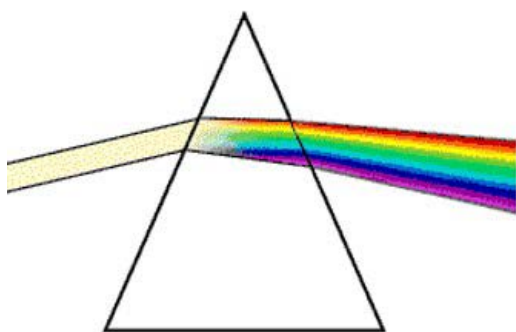
Elektromagnetinių bangų pasiskirstymas pagal kurį nors parametą (ilgį arba dažnį) vadinamas **elektromagnetinių bangų spektru**. Elektromagnetinių bangų spektras aprėpia visą intervalą nuo trumpųjų bangų (įskaitant gama ir rentgeno spindulius) iki ilgųjų bangų (įskaitant mikrobangas ir radijo bangas) (1.2.3. pav.). Spektras skirstomas į atskiras juostas pagal bangų ilgį. Nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų jutikliai šiuo metu gali funkcionuoti ultravioletinėje, regimojoje, infraraudonojoje ir mikrobangų elektromagnetinių bangų spektro srityse.

Ultravioletinė sritis. Ultravioletinės (UV) bangos yra trumpos bangos ($0,30\text{--}0,38 \mu\text{m}$) (1.2.3. pav.), jos lengvai išsklaidomos Žemės atmosferoje, todėl nėra plačiai pritaikomos nuotoliniuose tyrimuose. Šios spinduliuotės bangos yra trumpesnės už regimąsias bangas ir prasideda iš karto už violetinės spalvos, todėl taip vadinamos. Kai kurios Žemės paviršiaus medžiagos, pvz., uolienos ir mineralai, fluorescuoja (sugerdamos ultravioletinę spinduliuotę pradeda skleisti regimąją).

Mėlyna, žalia ir raudona yra pirminės spalvos, bet jos reiškia ir konkrečius regimojo spektro bangų ilgius. Pirminės spalvos negali būti išgaunamos sumaišius kitas dvi spalvas, tačiau visos kitos spalvos gali būti išgaunamos įvairiomis proporcijomis derinant mėlyną, žalią ir raudoną spalvas. Nors saulės šviesą matome kaip vienalytę spalvą, iš tikrųjų ji yra sudaryta iš įvairių spinduliuotės bangų ilgių, pirmiausia ultravioletinės spinduliuotės, regimosios šviesos ir infraraudonosios spinduliuotės. Regimosios šviesos dalis gali būti pavaizduota ją sudarančiomis spalvomis, kai saulės šviesa sklinda per prizmę, kurią perėjusi šviesa lūžta skirtingais kampais pagal bangų ilgius (1.2.4. pav.).



1.2.3. pav. Elektromagnetinių bangų spektro aprėptis bei elektromagnetinio spinduliavimo bangos ilgio ir dažnio ryšys: trumpos bangos – aukštas dažnis – didelė energija, ilgos bangos – žemas dažnis – maža energija (pagal Mozgeris ir kt., 2015).



Spalva	Bangos ilgis, μm
Violetinė	0,400 – 0,446
Mėlyna	0,446 – 0,500
Žalia	0,500 – 0,578
Geltona	0,578 – 0,592
Oranžinė	0,592 – 0,620
Raudona	0,620 – 0,700

1.2.4. pav. Spalvos ir jas atitinkantis regimosios spinduliuotės bangų ilgis (λ) (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

Infraraudonoji (IR) sritis. Aplink mus yra labai daug nematomo spinduliavimo, kuris gali būti fiksuojamas nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų prietaisais ir panaudotas žmonių poreikiams. Taigi, kita nuotoliniams Žemės paviršiaus tyrimams svarbi elektromagnetinių bangų spektro sritis yra infraraudonoji spinduliuotė (IR), kurios bangų ilgis nuo maždaug $0,7\ \mu\text{m}$ iki $100\ \mu\text{m}$ (1.2.3. pav.) – tai daugiau nei 100 kartų platesnė juosta, lyginant su regimąja spektro dalimi. Infraraudonoji spinduliuotė gali būti suskirstyta į dvi kategorijas priklausomai nuo jos prigimties: atspindėtoji IR spinduliuotė ir skleidžiamoji (arba šiluminė (TIR)) infraraudonoji spinduliuotė. Nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose atspindėtoji IR spinduliuotė naudojama taip pat kaip ir regimoji spinduliuotė. Atspindėtoji IR apima bangų ilgį nuo maždaug $0,7\ \mu\text{m}$ iki $3,0\ \mu\text{m}$. Šiluminė infraraudonoji spinduliuotė (TIR) suteikia kiek kitokią informaciją nei regimoji ir atspindėtoji IR spinduliuotė. TIR dažniausiai sudaro spinduliavimas, kurį skleidžia Žemės paviršius (t. y. išspinduliuota Žemės paviršiaus šiluma). TIR spinduliuotė apima bangų ilgį nuo maždaug $3,0\ \mu\text{m}$ iki $100\ \mu\text{m}$. Ši sritis yra skirstoma į vidutinio bangų ilgio IR (MWIR, $3\text{--}8\ \mu\text{m}$), ilgo bangų ilgio (LWIR, $8\text{--}15\ \mu\text{m}$) ir tolimuosius infraraudonuosius spindulius (FIR $15\ \mu\text{m}$ ir ilgesnės).

Mikrobangų sritis. Pastaraisiais metais vis didesnę susidomėjimą nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose turi mikrobangų ruože esanti spektro dalis, nuo maždaug 1 mm iki 1 m (1.2.3. pav.). Ji apima ilgiausias bangas, kurios yra naudojamos nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose. Trumpesnės bangos pasižymi savybėmis, panašiomis į šiluminės spinduliuotės (TIR), o kuo ilgesnės bangos, tuo jos panašesnės į radijo bangas. Mikrobangų ruože yra keletas dažnai naudojamų bangų ilgių, kuriems pavadinimai buvo suteikti Antrojo pasaulinio karo metu ir kurie naudojami iki šių dienų:

- 1) Ka, K ir Ku bangų ruožas: labai trumpos bangos. Pradėti naudoti pirmose radarų misijose, bet šiuo metu naudojamos retai;
- 2) X bangų ruožas: plačiai naudojamos bangos kariniams tikslams vykdomose misijose, kartografuojant teritorijas;
- 3) C bangų ruožas: dažnas daugelyje nuotolinių tyrimų sistemų. Lėktuvuose – Kanados nuotolinių tyrimų centro (angl. Canada Centre for Remote Sensing, CCRS) *Convair 580* ir NASA *AirSAR*, palydovuose – ERS 1 ir 2 bei RADARSAT ir kitur.
- 4) S bangų ruožas: naudojamas Rusijos palydovuose ALMAZ.
- 5) L bangų ruožas: naudojamas JAV SEASAT ir Japonų JERS 1 palydovuose ir NASA lėktuvų misijose.
- 6) P bangų ruožas: ilgiausios radarų bangos, naudojamos NASA eksperimentinėse lėktuvų misijose.

1.2.3. Elektromagnetinės spinduliuotės ir Žemės atmosferos sąveika

Elektromagnetiniai spinduliai nuo energijos šaltinio tam tikrą atstumą keliauja per Žemės atmosferą. Atmosferos dalelės ir dujos gali paveikti gaunamą šviesą ir spinduliuotę. Ši poveikį sukelia sklaidos ir sugėrimo mechanizmai.

Sklaida atsiranda tada, kai dalelės ar dujų molekulės, esančios atmosferoje, sąveikauja su šviesa ir spinduliuote ir elektromagnetinę spinduliuotę nukreipia nuo jos pirminės trajektorijos. Kiek vyks sklaida, priklauso nuo kelių veiksnių, įskaitant spinduliuotės bangų ilgį, dalelių ar dujų koncentraciją atmosferoje ir atstumą, kurį spinduliuotė turi nukeliauti per atmosferą iki Žemės. Skiriami 3 šviesos sklaidos tipai (Mozgeris, 2015):

1. Reilio (angl. Rayleigh) sklaida yra sukeliama spinduliuotei sąveikaujant su atmosferos molekulėmis ir kitomis smulkiomis dalelėmis, kurių skersmuo žymiai mažesnis už bangų ilgį (λ). Sklaidos efektas yra atvirkščiai proporcingas λ^4 . Trumpesnės bangos yra labiau išsklaidomos. Žydras dangus yra paaiškinamas remiantis būtent Reilio šviesos sklaidos dėsnium. Dėl šios priežasties Žemė iš kosmoso yra matoma su žydra aureole. Reilio sklaida sukelia atmosferos rūkaną, reiškinį, kuris apsunkina nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų taikymą.
2. Mi (angl. Mie) sklaidą sukelia atmosferos dalelės, kurių skersmuo apytikriai lygus su jomis sąveikaujančių elektromagnetinių bangų ilgiui. Vandens garai ir dulkės – pagrindinė Mi sklaidos priežastis, ji veikia ilgesnes bangas nei Reilio sklaida. Nors Reilio sklaida dominuoja daugeliu atmosferos sąlygų, Mi sklaida reikšminga, kai dangus apsiniaukęs.
3. Neselektyvioji sklaida (angl. Non-Selective Scatter) sukeliama spinduliuotės bangoms sąveikaujant su dalelėmis, kurių skersmuo žymiai didesnis už bangos ilgį. Šį reiškinį gali sukelti vandens lašeliai. Jų skersmuo 5–100 μm ir jie vienodai išsklaido regimąsias bei artimąsias ir vidutines IR bangas. Neselektyviąją sklaidą sukelia debesys.

Sugėrimas (absorbicija) yra kitas elektromagnetinės spinduliuotės ir atmosferos sąveikos mechanizmas. Priešingai nei dėl sklaidos, dėl sugėrimo prarandama atmosfera sklindanti elektromagnetinė energija, t. y. atmosferoje esančios molekulės sugeria įvairaus ilgio bangų energiją. Ozonas (viršutiniuose atmosferos sluoksniuose), anglies dioksidas (žemesniuose at-

mosferos sluoksniuose) ir vandens garai (troposferoje) sugeria tam tikrų spektro juostų elektromagnetinę energiją.

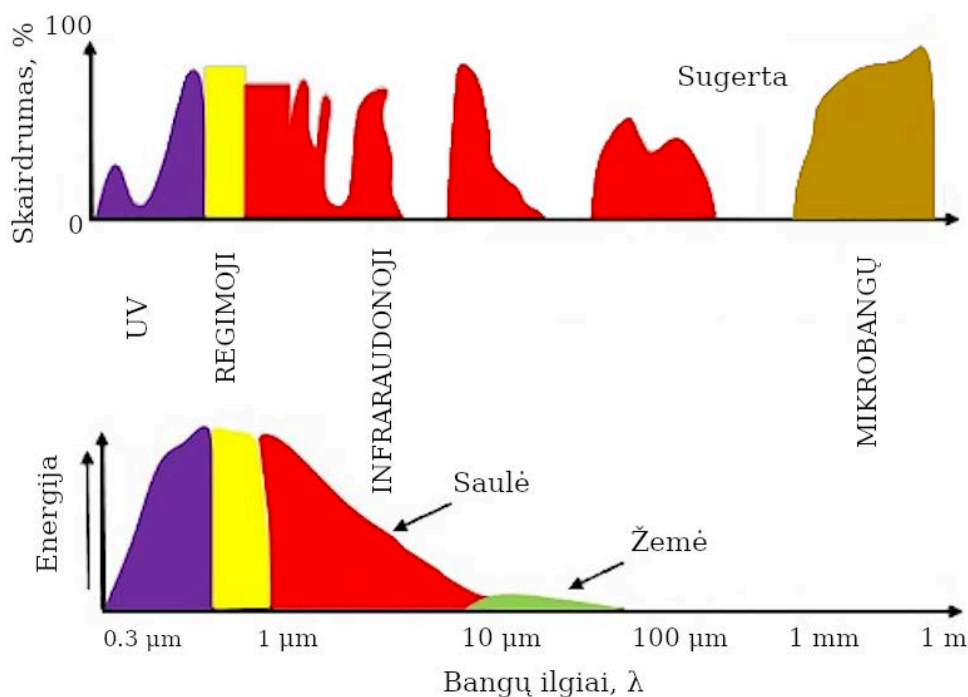
Ozonas sugeria didžiąjai daugumai gyvųjų organizmų pavojingą ultravioletinę spinduliuotę, sklindančią iš Saulės. Be apsauginio ozono sluoksnio Žemės atmosferoje mūsų oda sudegtų, jeigu ant jos patektų Saulės šviesa.

Anglies dioksidas dažnai minimas kaip šiltnamio efektą sukeliančios dujos. Taip yra, nes jis ypač gerai sugeria spinduliuotę tolimųjų IR spektro bangų diapazone (šiluminę energiją). Šiluminės spinduliuotės sugėrimas lemia temperatūros augimą atmosferoje.

Vandens garai atmosferoje sugeria nemažą dalį ilgųjų bangų IR (LWIR) ir trumpųjų mikrobangų spinduliuotės (tarp 22 μm ir 1 m). Vandens garų kiekis žemesniuose atmosferos sluoksniuose ypač priklauso nuo teritorijos ir metų laiko. Pvz., oro masėse, besiformuojančiose virš dykumos, yra labai mažai vandens garų, kurie galėtų sugerti iš Saulės sklindančią energiją, bet oro masėse, susidaranciose virš tropinių platumų, vandens garų koncentracija yra didelė.

Paprastai yra sugeriamos konkrečių ilgių bangos, todėl nuotoliniams jutikliams yra naudingos tos spektro dalys, kurių atmosferos sugėrimas stipriai nepaveikia. Tokios spektro dalys yra vadinamos **atmosferos langais** (1.2.5. pav.). Lygindami dviejų svarbiausių energijos spinduliavimo šaltinių (Saulės ir Žemės) charakteristikas su mums prieinamais atmosferos langais, galime nustatyti tuos bangų ilgius, kuriuos galėsime efektyviausiai panaudoti nuotoliniams Žemės paviršiaus tyrimams.

Regimosios spinduliuotės dalis, kuriai jautriausios žmonių akys, yra ties atmosferos langu ir atitinka Saulės energijos prietakos maksimumą. Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad Žemės spinduliuojama energija atitinka atmosferos skaidrumo langą ties 10 μm šiluminės IR spinduliuotės bangų ilgiu. Didelis langas taip pat yra ties 1 mm bangų ilgiu mikrobangų srityje. Šie atmosferos skaidrumo langai (bangų intervalai) plačiai naudojami nuotoliniuose Žemės paviršiaus stebėjimuose.



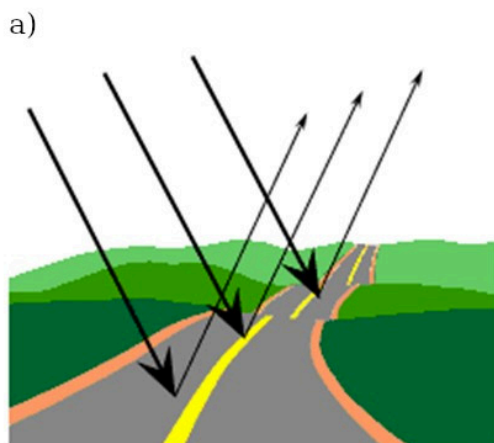
1.2.5. pav. Ozonas, anglies dioksidas ir vandens garai sugeria tam tikrų spektro juostų elektromagnetinę energiją. Nuotoliniams jutikliams naudingos spektro juostos, kurių atmosferos sugėrimas stipriai nepaveikia. Jos vadinamos atmosferos langais (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

1.2.4. Elektromagnetinės spinduliuotės ir Žemės paviršiaus sąveika

Spinduliuotė, kuri nėra nei sugerta, nei išsklaidyta, atmosferoje gali pasiekti Žemės paviršių ir sąveikauti su Žemėje esančiais objektais. Egzistuoja trys Žemės paviršių pasiekusios arba į jį krintančios energijos sąveikos formos: 1) sugėrimas (*A*); 2) perdavimas (*T*); 3) atspindys (*R*) (1.2.6. pav.). Visa krintančioji energija sąveikauja su Žemės paviršiumi vienu ar daugiau iš šių trijų būdų. Kiekvieno iš jų proporcija, t. y. praleistos, sugertos ar atspindėtos energijos santykis su įvairiais Žemės paviršiaus objektais, yra skirtinga ir priklauso nuo energijos bangos ilgio bei objekto medžiagos ir būsenos.

Egzistuoja du atspindžio tipai, parodantys du visiškai skirtingus energijos atspindėjimo nuo objekto tipus: veidrodinis ir sklaidusis atspindys. Kai paviršius yra lygus, gauname veidrodinį atspindį, kur visa (arba beveik visa) energija yra atspindima nuo paviršiaus viena kryptimi (1.2.7. pav. a). Sklaidųjį atspindį gauname, kai paviršius yra nelygus, gruoblėtas ir energija yra atspindima beveik vienodai visomis kryptimis (1.2.7. pav. b). Daugumos Žemės paviršiaus objektų atspindys yra tarpinis variantas tarp visiško veidrodinio atspindžio ir visiško sklaidžiojo atspindžio. Kaip buvo minėta, atspindys priklauso nuo objekto paviršiaus šiurkštumo bei ateinančios spinduliuotės bangos ilgio. Jeigu spinduliuotės bangų ilgis yra daug mažesnis už paviršiaus šiurkštumą arba paviršių sudarančių dalelių dydį, dominuoja sklaidusis atspindys. Pvz., smulkus smėlis, veikiamas mikrobangų, atrodo tolygus, bet veikiamas regimojo spektro bangų jis atrodo kaip gruoblėtas paviršius.

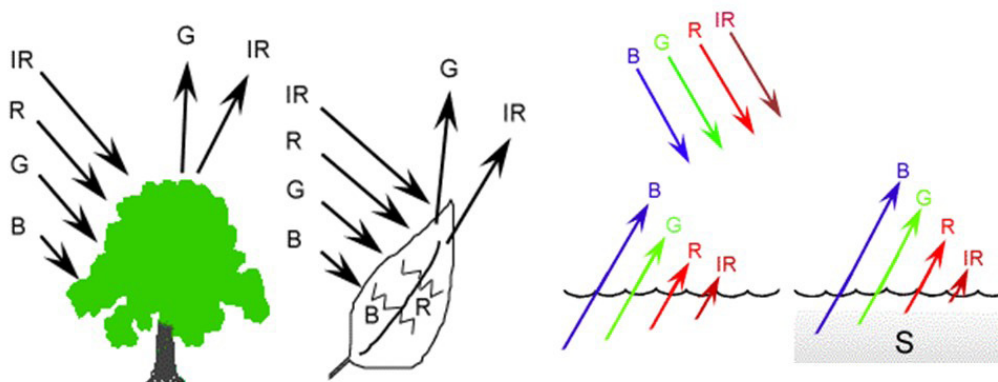
1.2.6. pav. Elektromagnetinės spinduliuotės ir Žemės paviršiaus sąveikos formos: *A* – sugėrimas; *T* – perdavimas, *R* – atspindys (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).



1.2.7. pav. Spinduliuotės atspindžio tipai nuo paviršiaus: a) veidrodinis atspindys, b) sklaidusis atspindys (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

1 pavyzdys. Elektromagnetinio spinduliavimo sąveika su lapais (1.2.8. pav.) kaip Žemės paviršiaus objektu. Chlorofilu vadinamas lapų cheminis junginys stipriai sugeria raudonų ir mėlynų bangų spinduliuotę, tačiau atspindi žalias bangas. Mums lapai „žaliausi“ atrodo vasarą, kai chlorofilo koncentracija didžiausia. Rudenį lapuose būna mažiau chlorofilo, tad mažiau sugerama ir daugiau atspindima raudonos spalvos bangų, dėl to lapai atrodo raudoni arba geltoni (geltona yra raudonos ir žalios spalvos derinys). Vidinė lapų struktūra veikia kaip puikus artimosios infraraudonosios spinduliuotės reflektorius.

Jei mūsų akys matytų artimuosius infraraudonuosius spindulius, mums medžiai šių ilgių bangomis atrodytų nepaprastai ryškūs. Faktiškai artimojo IR atspindžio matavimas ir stebėjimas yra vienas iš būdų, kuriuo mokslininkai gali nustatyti, kiek sveika ar pažeista yra augmenija.

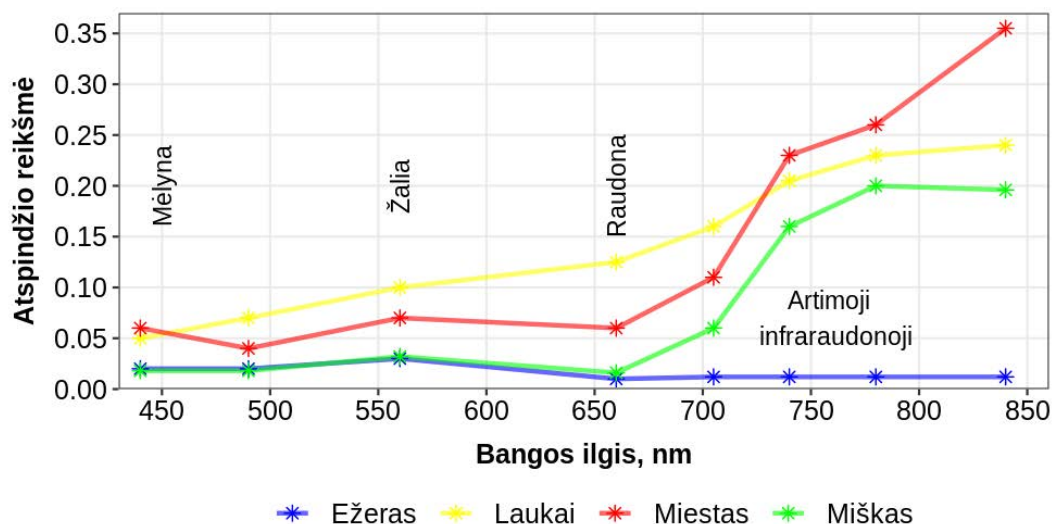


1.2.8. pav. Elektromagnetinio spinduliavimo sąveika su lapais bei vandens paviršiumi kaip Žemės paviršiaus objektais (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

2 pavyzdys. Elektromagnetinio spinduliavimo sąveika su vandeniu kaip Žemės paviršiaus objektu. Vanduo geriau sugeria ilgesnes regimojo spektro bangas ir artimojo IR spektro bangas nei trumpesnes (mėlynas ir žalias) regimojo spektro bangas (1.2.8. pav.). Kadangi vanduo geriau atspindi energiją šių, trumpesnių, bangų diapazone, jis atrodo mėlynas ar mėlynai žalias. Jei stebėjimai atliekami naudojant raudonos spalvos ar artimosios IR spinduliuotės bangų ruožus, vandens paviršius atrodo tamsesnis. Jeigu vandens paviršiuje arba jo viršutiniuose sluoksniuose yra nuosėdų, jos padidina atspindį nuo tokio vandens paviršiaus ir nuotraukoje gaunamas šviesesnis vandens vaizdas. Atsirandanti vandens spalva lemia nežymų pasislinkimą ilgesnių bangų link. Žinoma, pakibusios nuosėdos (S) (1.2.8. pav.) gali būti lengvai supainiotos su negilus (bet švaraus, be nuosėdų) vandens telkinio vandeniu, nes šie du atvejai lemia panašias atspindžio reikšmes. Dumbluose esantis chlorofilas sugeria daugiau mėlynos spalvos bangas ir atspindi žalią spalvą. Todėl vandens telkiniai su juose augančiais dumbliais yra žalesni. Tiek pat svarbūs ir vandens paviršiaus topografiniai ypatumai (drumstumas, plaukiojančios medžiagos ir kt.) – tai apsunkina vandens paviršiaus duomenų interpretaciją.

Veikiant sugėrimo, pralaidumo ir atspindžio mechanizmams, elektromagnetinė energija „elgiasi“ labai įvairiai. Elektromagnetinė sąveika su objektu priklauso nuo objekto fizinių savybių ir esamo spinduliavimo bangų ilgio. Iš esmės nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai grindžiami skirtingų Žemės paviršiaus objektų nevienodu atspindėjimu įvairiose spektro zonose, t. y. skirtingi objektai skirtingai atspindi įvairių spektro dalių elektromagnetinius spindulius.

Matuodami Žemės paviršiaus objektų atspindėtą (arba spinduliuojamą) įvairaus ilgio bangų energiją, galime sudaryti spektrinį to objekto apibūdinimą. Šių atspindžio savybių visuma skirtingose elektromagnetinių bangų spektro dalyse vadinama spektriniais požymiais. Lygindami skirtingų objektų spektrinius požymius galime juos atskirti. Tais atvejais, kai negalime to padaryti, galime lyginti juos tik pagal vieną bangos ilgį.



1.2.9. pav. Žemės paviršiaus objektų elektromagnetinių bangų atspindėjimo charakteristikos įvairiose elektromagnetinių bangų spektro zonose.

Pavyzdžiui, vandens ir augmenijos atspindys regimųjų bangų ilgio diapazone gali būti šiek tiek panašus, bet beveik visuomet juos galima atskirti naudojant IR spinduliuotę (1.2.9. pav.). Šis paveikslėlis iliustruoja elektromagnetinių bangų spektro dalies atspindį nuo žalios augmenijos (atkreipkite dėmesį, kad lapas atspindi daug infraraudonųjų spindulių).

Iš šių pavyzdžių galime matyti, kad priklausomai nuo sudėtingos stebimo objekto sandaros ir esamo spinduliavimo bangų ilgio, galime stebėti labai įvairius sugėrimo, perdavimo ir atspindžio mechanizmus. Norint teisingai suprasti elektromagnetinių bangų sąveiką su paviršiumi, labai svarbu žinoti, kokio ilgio bangos naudojamos stebėjimams, ir suprasti veiksnius, turinčius įtakos tiriamų objektų spektrinėms savybėms. Kiekvieno paviršiaus spektriniai požymiai unikalūs, juos galime laikyti savotiškais paviršiaus ar objekto „pirštų atspaudais“.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokie yra pagrindiniai nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų etapai?
- Ar įmanoma nuotoliniuose tyrimuose naudoti ne elektromagnetinę spinduliuotę?
- Infraraudonasis elektromagnetinis signalas turi dvi dalis: atspindėtą ir objekto skleidžiamą spinduliuotę. Ar įmanoma Žemės paviršių fotografuoti naudojant IR spinduliuotę?
- Dauguma nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų sistemų neregistruoja informacijos ultravioletiniame ir mėlyname (regimojo spektro) diapazonuose. Kodėl?
- Kokios būtų geriausios atmosferos sąlygos, norint nuotoliniais metodais registruoti informaciją regimojo spektro diapazone?
- Išvardykite pagrindinius spinduliuotės sklaidos ir sugėrimo mechanizmų principus.
- Kokių spektro dalių atmosferos sugėrimas stipriai neveikia? Kaip jos vadinamos?
- Kokie elektromagnetinės spinduliuotės bangų ilgio ruožai padeda įvertinti augalijos būklę?
- Kodėl augalų lapus mes matome žalios spalvos (paaiškinkite remdamiesi elektromagnetinės spinduliuotės ir lapų paviršiaus sąveikos ypatumais)?
- Kokie privalumai vaizdus iš kosmoso pateikti kaip skirtingų bangų duomenų kombinacijas, o ne kaip atskirus vieno bangos ilgio vaizdus?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Campbell, J. B., Wynne, R., H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). New York: The Guilford Press.
- Canada Centre for Remote Sensing (2009). *Fundamentals of Remote sensing* [žiūrėta 2019-08-06]. Prieiga internete: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- ESA (2007). *The Electromagnetic Spectrum* [žiūrėta 2019-09-11]. Prieiga internete: https://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Lessons_online/The_electromagnetic_spectrum
- Mozgeris, G., Dumbrasukas, A., Jonikavičius, D. (2015). *Geografinių informacinių sistemų pagrindai: studijų knyga*. Akademija: Aleksandro Stulginskio universiteto Leidybos centras.
- NASA GSFC (2013). *The Electromagnetic Spectrum* [žiūrėta 2019-09-11]. Prieiga internete: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- UC Davis (2019). *Harmonic Electromagnetic Waves*. [žiūrėta 2019-10-25]. Prieiga internete: https://phys.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/UCD%3A_Physics_7C_-_General_Physics/10%3A_Electromagnetism/10.4%3A_Electromagnetic_Waves%3A_Light/1._Harmonic_Electromagnetic_Wave

1.3. PALYDOVŲ TIPAI

Palydovais laikomi objektai, skriejantys aplink planetas, kuriuos skriejančius išlaiko planetų gravitacinės jėgos. Daugybė valstybių ir įmonių naudoja dirbtinius Žemės palydovus savo reikmėms. Palydovai konstruojami norint stebėti Žemės paviršių, siekiant surinkti specifinę informaciją apie žemės dangą ir jo pokyčius, vandenį, pasėlius, naudingąsias iškasenas ir kt. Palydoviniai vaizdai suteikia galimybę gauti didelių plotų tikslus, detales ir kas tam tikrą laiką pasikartojančius duomenis. Palydovų kasmet išleidžiama vis daugiau, todėl šiame skyriuje neaptarsime jų visų, tačiau apžvelgsime pagrindines savybes, pagal kurias galime skirstyti palydovus į skirtingus tipus.

Pats primityviausias, bet vis dėlto svarbus palydovų skirstymas yra į gamtinius ir dirbtinius. Žemė turi tik vieną gamtinį palydovą – Mėnulį, iš viso Saulės sistemoje mums žinomi 182 gamtiniai palydovai. O kiek tiksliai yra dirbtinių Žemės palydovų, sunku pasakyti, nes jų skaičius gali keistis kiekvieną dieną.

Pirmąjį dirbtinį Žemės palydovą *Sputnik 1* paleido Sovietų Sąjunga 1957 m. Šiuo metu kosmose yra apie 2 000 veikiančių dirbtinių Žemės palydovų ir apie 3 000 neveikiančių. Tačiau šis skaičius nuolat kinta – paleidžiami nauji, o kiti baigia savo gyvavimą sudegdami atmosferoje arba nukrisdami į vandenyną. Be dirbtinių Žemės palydovų ne mažiau svarbūs objektai yra ir kosmoso šiukšlės, kurios taip pat stebimos. NASA stebi visas didesnes nei 10 cm skersmens kosmoso šiukšles, nes susidūrimas su jomis gali padaryti didelių nuostolių palydovams, kosminėms stotims ar būti tiesiog mirtinas atvirame kosmose dirbantiems astronautams.

Visi objektai, kuriuos žmonės yra iškėlę į kosmosą, dėl Žemės traukos jėgos kada nors grįš į Žemę. Kosmoso šiukšlės grįždamos į Žemę sudega atmosferoje, tačiau nuolat daugėjant iškeliamų palydovų ilgainiui galime susidurti su vis didesnėmis kosmoso taršos problemomis. Žinoma, reikia atkreipti dėmesį, kad naujieji dirbtiniai Žemės palydovai yra kur kas mažesni ir lengvesni už pirmtakus.

2009 m. vasarį palydovas *Iridium* susidūrė su neveikiančiu Rusijos palydovu. Susidūrimo metu abu palydovai subyrėjo į bent 2 500 dalių. Kiekviena dalis buvo įtraukta į kosmoso šiukšlių duomenų bazę. Veikiančių palydovų orbitos yra keičiamos, kad išvengtų susidūrimo su kosmoso šiukšlėmis. Europos kosmoso agentūra (angl. European Space Agency, ESA) planuoja 2025 m. pradėti rinkti kosmoso šiukšles, nes kol kas mokslininkai nerado kito šios problemos sprendimo būdo.

Vis dėlto palydovas tik gabena tyrimų prietaisus. Neretai viename palydove įrengti keli prietaisai, tiriantys tą pačią teritoriją skirtingais aspektais. Pavyzdžiui, 1999 m. NASA į orbitą iškėlė palydovą *Terra*, kuriame sumontuoti penki jutikliai: ASTER – kosminės spinduliuotės ir atspindžio radiometras; CERES – debesų ir Žemės spindulinės energijos stebėjimo sistema; MISR – daugiakampis spektrometras; MODIS – vidutinės skiriamosios gebos spektrometras; MOPITT – taršos troposferoje matuoklis. *Terra* duomenis siunčia jau daugiau nei 20 metų ir manoma, kad palydovas veiks ir toliau, gerokai viršydamas pradinį lūkesčius, jog veiks penkerius metus. Daugiamečiai šio palydovo teikiami duomenys leidžia juos panaudoti klimato tyrimams.

Šiame skyriuje neaptarsime jutiklių, kurie montuojami palydovuose, nes tam yra atskiras skyrius, tačiau šiek tiek užsiminsime apie palaikomąsias sistemas, kurios paprastai yra sumontuojamos palydovuose. Palydovai dažniausiai turi padėties kontrolės sistemą, kuri orientuoja palydovą pagal Žemės paviršių ir išlaiko jame esančius prietaisus nukreiptus į tiriamuosius objektus. Orbitos palaikymo sistema išlaiko palydovą nustatytoje orbitoje po to, kai orbita pirmą kartą buvo pasiekta. Energijos sistema aprūpina palydovą elektros energija. Šią sistemą sudaro saulės elementai ir baterijos, kurios įkraunamos palydovui esant saulėje ir aprūpina palydovą elektros energija esant tamsiojoje pusėje. Taip pat įmontuojamos temperatūros palai-

kymo sistemos, kurios apsaugo nuo perkaitimo ar pernelyg didelio atšalimo. Komunikacijos ir duomenų tvarkymo sistemos atsakingos už ryšį su stotimis, esančiomis Žemėje, persiunčiant jutiklių duomenis ir informaciją apie palydovo buvimo vietą ir būklę, taip pat iš Žemės perduodamas komandas palydovui. Montuojamos ir palydovo monitoringo sistemos, kuriomis stebima paties palydovo būklė ir kaip veikia sistemos.

Dirbtinius Žemės palydovus galima skirstyti pagal jų funkcijas:

- 1) mokslinių tyrimų palydovus, skirtus rinkti pagrindinę informaciją apie visatą;
- 2) Žemės tyrimų palydovus, naudojamus Žemės ištekliams kartografuoti ir stebėti;
- 3) ryšių palydovus, sudarančius sąlygas visame pasaulyje kurti telefono, radijo ir televizijos ryšius;
- 4) navigacijos palydovus, skirtus itin tiksliai nustatyti lėktuvų, laivų, povandeninių laivų, atskirų žmonių buvimo vietą.

1.3.1. Mokslinių tyrimų palydovai

Šie palydovai skirti žinioms apie visatą rinkti. Jie nenaudojami Žemei tirti, jų paskirtis rinkti bendrąsias žinias apie visatą ir dangaus kūnus, siekiant geriau suprasti visatos formavimąsi, vystymąsi ir tai lemiančius procesus. Jais renkamos astronomijos, astrofizikos žinios, taip pat žinios apie Saulę ir kitas planetas, erdvę tarp jų. Prie jais vykdomų misijų galima priskirti ne tik Saulės stebėjimą ir jos tyrimus, bet ir Marso tyrinėjimus.

Nėra prasmės šiame skyriuje aptarti visus palydovus, nes tokių palydovų yra labai daug ir misijos yra įvairios, todėl pateiksime tik kelis pavyzdžius. Mokslinių tyrimų palydovų pavyzdžiu gali būti Hablo (Hubble) kosminis teleskopas arba palydovas *AstroSat*. Hablo observatorija paleista 1990 m. balandį. Jos paleidimas – antras didysis šuolis astronomijoje, pirmas – Galilėjaus sukonstruoto patobulinto teleskopo panaudojimas dangaus kūnams stebėti. Hablo teleskopas – pirmasis didelis optinis teleskopas, skriejantis kosmose virš atmosferos sukeltų iškraipymų. Hablo observatorija naudojama Saulės sistemos planetoms, tolimiausioms žvaigždėms ir galaktikoms stebėti.

AstroSat yra pirmoji Indijos astronominė misija, skirta vienu metu tirti kosminę spinduliuotę rentgeno, regimosios ir ultravioletinės spinduliuotės juostose. Tokiai misijai vykdyti palydovas yra gana lengvas, sveria 1515 kg, paleistas 2015 m. rugsėjį į 650 km aukščio orbitą. Prie misijos įgyvendinimo prisidėjo ir kitos šalys.

Įdomiausias ir labiausiai iš kitų išsiskiriantis mokslinių tyrimų palydovo pavyzdys yra Tarptautinė kosminė stotis, kuri skrieja maždaug 400 km aukštyje. Tarptautinė kosminė stotis yra bendras JAV, Rusijos Federacijos, Japonijos, Kanados ir Europos Sąjungos projektas. Tarptautinė kosminė stotis yra vienintelis nuolat gyvenamas dirbtinis Žemės palydovas. Šios stoties pagrindinės tiriamosios misijos apima mikrogravitacijos ir kosmoso aplinkos tyrimus, taip pat fizikos, meteorologijos, biologijos ir kitas mokslų sritis. Čia testuojamos ir kosminių laivų sistemos bei įranga, kuri bus reikalinga misijoms į Mėnulį ir Marsą.

1.3.2. Žemės tyrimų palydovai

Priešingai nei mokslinių tyrimų palydovais, Žemės tyrimų palydovais renkama informacija apie mūsų planetą. Šie palydovai skirti tik Žemei tirti, siekiant surinkti tiek fundamentalius mokslinius duomenis, tiek taikomajam mokslui reikalingą informaciją. Žemės tyrimų palydovai renka duomenis apie klimatą ir orus, Žemės reljefą, augaliją, biologinę įvairovę, žemės dangos pokyčius, stichines nelaimes, oro ir vandens taršą, žemės ūkį, naudingąsias iškasenas ir kt. Prie šių palydovų yra priskiriamas jau minėtas palydovas *Terra*, taip pat palydovai *Aqua* ir *Aura*.

Remiantis Žemės tyrimų palydovų surinktais duomenimis galima ne tik prognozuoti klimato kaitą ar numatyti, kokį poveikį ji turės konkrečioms regionams, pagal šiuos duomenis galima parinkti ir konkrečias pritaikymo prie klimato kaitos priemones, kurios padėtų išvengti dramatiškiausių klimato kaitos pasekmių.

1994 m. NASA nusprendė savo Žemės tyrimų duomenis padaryti atvirus ir viešai prieinamus. Nuo 2015 m. visa duomenų sistemų programinė įranga tapo viešai prieinama kaip atvirojo kodo programinė įranga (angl. Open Source Software, OSS). Tokių atvirų duomenų politikos taikymą lemia noras greičiau turėti mokslinių tyrimų rezultatus, atrasti naujų duomenų panaudojimo būdų, geriau informuoti visuomenę apie Žemę, aplinkos apsaugą bei skatinti verslo inovacijas. Atviroji prieiga prie NASA surinktų duomenų leidžia juos naudoti moksliniams tyrimams ir pritaikyti praktikoje, o tai naudinga mokslui, plačiajai visuomenei bei sprendimų priėmėjams.

1.3.3. Navigacijos ir ryšių palydovai

Globalinė palydovinė navigacijos sistema (angl. Global Navigation Satellite System, GNSS) susideda iš navigacijos palydovų, aprėpiančių visą pasaulį, Žemėje esančių stočių ir palydovinės signalų tikslinimo sistemos (angl. Satellite-based Augmentation Systems, SBAS), kurios pagerina matavimų tikslumą. Palydoviniai navigacijos imtuvai Žemėje panaudoja palydovų siunčiamą laiko ir atstumo informaciją ir trianguliacijos principu nustato koordinates. GNSS naudojama tiek civiliniams, tiek kariniams tikslams. Ši sistema leidžia nustatyti kiekvieno objekto Žemės paviršiuje ar ore vietą, atstumą, kryptį, greitį vietiniu laiku.

Šiuo metu veikiančios GNSS:

1. GPS – Jungtinių Amerikos valstijų sistema, visiškai veikianti nuo 1993 m. Šią sistemą sudaro 24–32 palydovai, kurie aprėpia visą Žemę.
2. GLONASS – Rusijos Federacijos vystoma navigacijos sistema, baigta kurti 1995 m., visiškai veikianti nuo 2011 m. GLONASS turi 24 palydovus.

Kuriamos GNSS:

1. „Galileo“ – Europos Sąjungos kuriama navigacijos sistema, kurią sudaro 30 palydovų. Visas funkcijas pradėjo vykdyti 2020 m. „Galileo“ yra kuriama siekiant sumažinti Europos Sąjungos priklausomybę nuo navigacijos sistemų GPS ir GLONASS.
2. „BeiDou“ (arba „Compass“) – Kinijos kuriama sistema, kuri globalias paslaugas pradėjo teikti 2018 m., tačiau visu pajėgumu pradėjo veikti 2020 m. Kinija tikisi, kad ši sistema bus tikslesnė už GPS, GLONASS ir „Galileo“.
3. Savo globalias navigacijos sistemas taip pat kuria Indija (angl. Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS) ir Japonija (angl. Quasi-Zenith Satellite System, QZSS).

Ryšių palydovų funkcija – perduoti ryšio signalus nepaisant Žemės kreivumo ir taip suteikti galimybę komunikuoti labai nutolusiems taškams. Naudojant ryšių palydovus transliuojama televizija, radijas, veikia internetas, telefonai. Šie palydovai naudoja plačius radijo ir mikrobangų diapazonus, siekiant išvengti ryšių trukdžių tarptautinės organizacijos nustato, kurio mis bangų juostomis gali naudotis konkretūs transliuotojai.

1.3.4. Palydovai *Landsat*

Tai ilgiausiai (nuo 1972 m. iki dabar) trunkanti Žemei stebėti skirtų palydovų kūrimo ir pritaikymo programa, vykdoma bendradarbiaujant NASA, JAV geologijos tarnybai (angl. United States Geological Survey, USGS) ir kitoms agentūroms. Palydovai *Landsat* yra vieni pagrindinių didelės skiriamosios gebos Žemės paviršiaus palydovinių nuotraukų šaltinių. Iš jų gauti duomenys naudojami įvairiuose moksliniuose tyrimuose, kartografijoje, meteorologijoje, matuojant gamtinius išteklius ir kitose srityse.

Iki dabar paleisti 8 palydovai *Landsat*, kurių pirmasis paleistas 1972 m., o paskutinis 2013 m. Jų erdvinė skiriamoji geba didesnė nei 30 metrų.

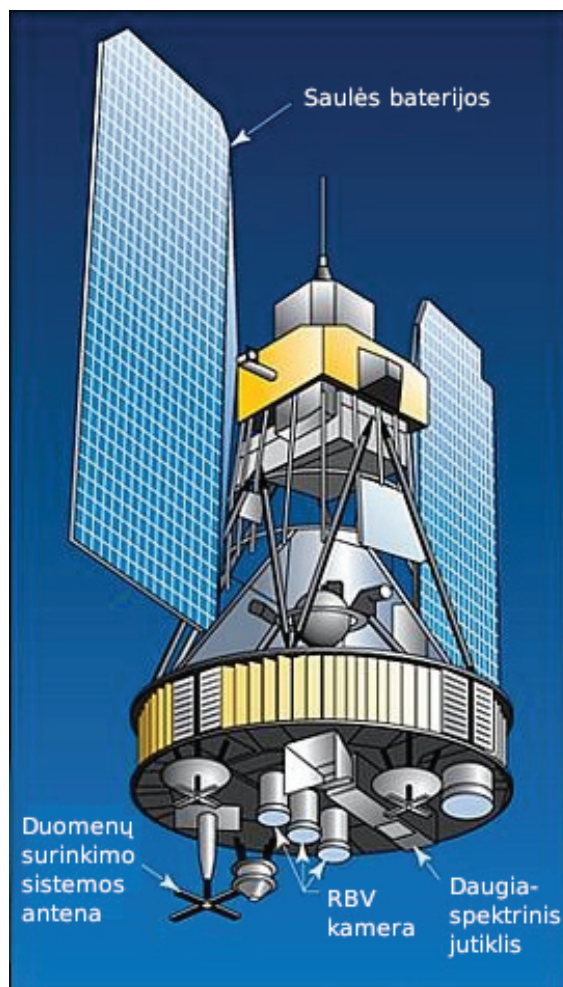
1-oji *Landsat* serija. *Landsat 1* (1972-07-23 – 1978-01-06), *Landsat 2* (1975-01-22 – 1982-02-05), *Landsat 3* (1978-03-05 – 1983-03-31). Pirmieji trys palydovai buvo identiški ir jų naudingosios apkrovos susidėjo iš dviejų optinių prietaisų ir vaizdo kamerų serijos. Palydovų duomenys:

- aukštis 907–915 km;
- polinkis 99,2°;
- orbita poliarinė, Saulės sinchroninė;
- orbitos periodas 103 min.;
- aprėpties plotas 170 km × 185 km.

Palydovai, skriejantys ypatinga poliarine orbita – vadinamąja Saulės sinchronine orbita – praskrieja virš to paties Žemės taško kasdien tuo pačiu laiku, todėl galima palyginti palydovų skirtingomis dienomis atsiųstus tos pačios vietos duomenis.

RBV (angl. Return-Beam Vidicon) jutikliai. Pirmųjų dviejų palydovų trys kameros fotografavo regimajame ir infraraudonųjų juostų spektre. Skiriamoji geba buvo 80 m, 185×185 km teritorijos vaizduose. *Landsat 3* gautų vaizdų skiriamoji geba buvo padidinta iki 40 m, bet gauti vaizdai buvo panchromatiniai (nespalvoti) (1.3.1. pav.).

MSS (angl. Multispectral Scanner System) jutikliai. Šie mechaniniai jutikliai surinkdavo informaciją keturiose spektro juostose 185 × 185 km plote. Kadangi ši priemonė buvo sukurta po trijų RBV fotoaparatus, šios juostos buvo sunumeruojamos nuo 4 iki 7. *Landsat 3* daugiaspektris skaitytuvas įtraukė papildomą stebėjimo juostą šiluminės infraraudonosios spinduliuotės diapazone (1.3.1. pav.).



1.3.1. pav. Dirbtiniame Žemės palydove *Landsat 1* įrengti pirmasis daugiaspektris jutiklis ir grįžtamojo spindulio fiksavimo vidikoninė kamera (pagal Kramer ir kt., 2012).

2-oji Landsat serija. Kituose dviejuose palydovuose (*Landsat 4* ir *5*) buvo įrengti du daugiaspektriai jutikliai (MSS) ir teminio kartografavimo jutiklis (angl. Thematic Mapper, TM).

- Palydovų duomenys:
- aukštis 705 km;
- polinkis 98,2°;
- orbita poliarinė, Saulės sinchroninė;
- orbitos periodas 98,9 min.,
- aprėpties plotas 170 km × 185 km,
- MSS jutikliai.

Šie jutikliai buvo tokie pat kaip ir pirmųjų dviejų palydovų *Landsat*. Vienintelis skirtumas tas, kad keturios spektro juostos buvo sunumeruotos nuo 1 iki 4, nes RBV buvo nebenaudojamos (1.4.2. lentelė).

1.4.2. lentelė. Landsat skenavimo juostos, jų charakteristikos ir panaudojimo sritys

JUOSTA	DIAPAZONAS, μm	SKIRIAMOJI GEBA, m	PANAUDOJIMAS
1	0,5–0,6	79 × 82	Pakrantės zonos, jūros dugno nuosėdos.
2	0,6–0,7	79 × 82	Keliai ir urbanizuotos teritorijos.
3	0,7–0,8	79 × 82	Augalų analizė, sausumos ir vandens ribų kartografavimas.
4	0,8–1,1	79 × 82	Augalų analizė, sausumos ir vandens ribų kartografavimas.

Paskutinės kartos palydovų *Landsat* bandymas prasidėjo nesėkme, nes *Landsat 6* buvo prarastas. *Landsat 7* paleido 1999 m. Jis buvo aprūpintas daugiaspektriu jutikliu ETM+ (angl. Enhanced Thematic Mapper). Palydovo *Landsat 7* duomenys:

- aukštis 705 km;
- polinkis 98,2°;
- orbita poliarinė, Saulės sinchroninė;
- orbitos periodas 98,9 min.;
- aprėpties plotas 170 km × 185 km.

Landsat 8 palydovo jutikliai remiasi ETM+ pagrindu ir leidžia surinkti daugiau duomenų ir pateikti didesnės erdvinės skiriamosios vaizdų nei bet kada anksčiau. OLI (angl. Operational Land Imager) yra sukurtas atlikti stebėjimus naudojant regimąją, artimųjų bangų infraraudonąją (NIR) ir trumpųjų bangų infraraudonąją (SWIR) spinduliuotę. Tuo tarpu šiluminės infraraudonosios spinduliuotės jutiklis (angl. Thermal Infrared Sensor, TIRS) stebi Žemės paviršiaus temperatūrą. *Landsat 8* skrenda 705 km aukštyje, beveik apvalia poliarine orbita ir duomenis surenka skenuodamas skersai kelio. *Landsat 9* planuojama paleisti 2023 m. Ši misija užtikrins *Landsat* duomenų tęstinumą.

1.3.5. Programa „Copernicus“. Palydovai Sentinel

„Copernicus“ yra didžiausia pasaulyje Žemės stebėjimo programa, kuriai vadovauja Europos Komisija kartu su Europos kosmoso agentūra (ESA). Šia programa siekiama sukurti visuotinę, nuolatinę, savarankišką, aukštos kokybės Žemės stebėjimo sistemą. ESA kuria ir įgyvendina

palydovų *Sentinel* misijas, skirtas „Copernicus“ programai. Kiekviena *Sentinel* misija grindžiama dviejų palydovų tandemu, kurių tikslas teikti patikimus duomenų rinkinius.

Šių misijų metu naudojamos technologijos, pavyzdžiui, radarai ir daugiaspektrės vaizdavimo priemonės Žemei, vandenynams ir atmosferai stebėti.

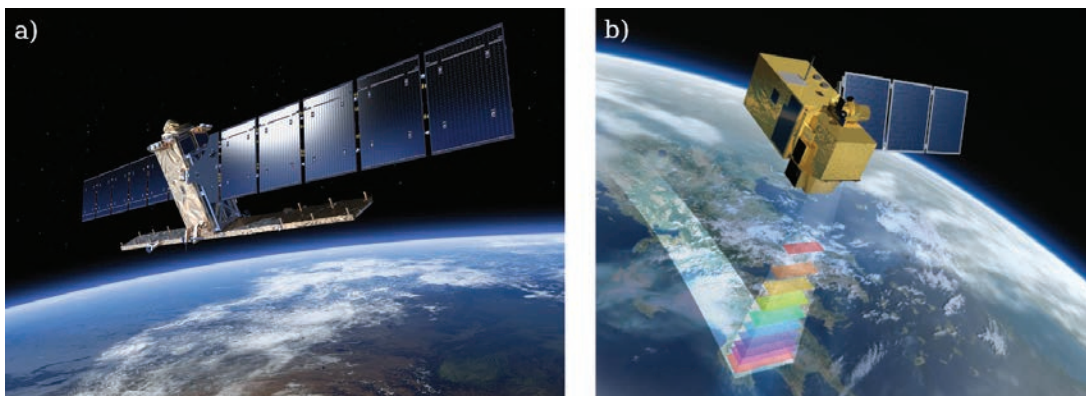
Sentinel 1 naudojamas stebėti aplinkos įvykius, pavyzdžiui, miškų gaisrus, nuošliaužas ir potvynius. Taip pat teikia informaciją per gelbėjimo ir pagalbos misijas, nelaimių atvejais, kur yra gyvybiškai svarbu turėti naujausią ir nuolat atnaujinamą informaciją. Pirmasis palydovas, *Sentinel 1A*, buvo sėkmingai paleistas 2014 m. balandžio mėn. (1.3.2. pav. a).

2016 m. į orbitą iškeltas antrasis palydovas *Sentinel 1B*. Aktyvusis radaro jutiklis teikia informaciją apie planetos paviršių nepriklausomai nuo oro sąlygų ir paros laiko. Pagrindinės savybės:

- Žemę stebėti gali beveik bet kokiomis sąlygomis (pro debesis, kritulius, naktį);
- duomenys perduodami operatyviai (greičiau nei per 1 val. nuo jų užfiksavimo);
- C juostos radaras leidžia stebėti ir lėtai kintančius procesus (pvz., tirpstančius ledynus).

Sentinel 2 pagrindinis jutiklis MSI (angl. MultiSpectral Instrument) veikia regimajame ir trumpųjų infraraudonųjų bangų spektre. *Sentinel 2A* paleistas 2015 m., *Sentinel 2B* – 2016 m. (1.3.2. pav. b). Kartu jie geba visą planetos paviršių nuskenuoti per 5 dienas. *Sentinel 2* Savybės:

- vidutinės skiriamosios gebos vaizdai;
- vaizdai turi per 13 spektrinių kanalų, jų skiriamoji geba 10, 20 arba 60 metrų, žvalgos juostos plotis 290 m;
- skirti planetos paviršiui, vegetacijai, upių baseinams stebėti.



1.3.2. pav. „Copernicus“ programos palydovų kompiuterinė vizualizacija: a) *Sentinel 1*, b) *Sentinel 2* (ESA).

Sentinel 3 yra skirtas okeanografijai ir augmenijos monitoringui. Jo jutikliai fiksuoja parametrus, tokius kaip jūrų ir vandenynų topografija, taip pat vandenynų ir jūrų paviršiaus temperatūros ir spalvos kaitą. Duomenys yra aukštos kokybės – tikslūs ir patikimi. Savybės:

- jūrų topografija – 300 m skiriamoji geba;
- jūrų ir sausumos paviršiaus temperatūra ir spalva – 1 km skiriamoji geba;
- matuoja vandens garų kiekį atmosferoje, vandens kiekį debesyje ir šiluminę spinduliuotę, kurią skleidžia Žemės paviršius.

Tyrimams *Sentinel 3* naudoja specialius jutiklius, tokius kaip:

1. Mikrobangų radiometras, skirtas nustatyti drėgmės kiekį.
2. Dvi „Cryo Cooler“ sistemos – vandens ir sausumos paviršiaus radiometrai (angl. The Sea and Land Surface Temperature Radiometer, SLSTR).

Sentinel 4 misija yra sutelkusi dėmesį į paslaugų, tokių kaip atmosferos cheminės sudėties analizę ir oro kokybės stebėseną. Pagrindinė užduotis yra įvertinti aerozolių koncentraciją,

sekti dujų sankaupas ir debesuotumą apatinėje troposferoje. Du spektrometrai leidžia nuolat stebėti atmosferos ir oro kokybę Europoje, Šiaurės Afrikoje ir Sáhelio regione. *Sentinel 4* misija paleista naudojant MTG-S (angl. Meteosat Third Generation) orų palydovus 2019 m., o veikimo laikotarpis 8 metai.

Sentinel 5P (angl. *Sentinel 5 Precursor*) yra pirmasis palydovas, skirtas stebėti atmosferos chemines savybes pagal programą „Copernicus“. Ji užtikrina tęstinumą tyrimų, susijusių su ozono skyde ir troposferos tarša. *Sentinel 5P* yra tarpinė grandis tarp dabartinių misijų, kurios eina į pabaigą, ir *Sentinel 5P* pradžios, kuri šiuo metu jau vyksta. Itin tikslus *Sentinel 5P* – gynybos ir kosmoso kompanijos „Airbus“ produktas. Prietaisas stebi Žemės atmosferos sudėtį visame pasaulyje. Kasdien atlikdamas matavimus, jis padeda stebėti dujų ir aerolių pėdsakus, turinčius įtakos klimato ir oro kokybei. *Sentinel 5* misiją sudarys atmosferos cheminės sudėties stebėsenos jutiklis, kuris bus įdiegtas į METOP antrosios kartos (METOP SG) palydovus (2021-2022 m.) ir skris poliarine orbita aplink Žemę maždaug 800 kilometrų.

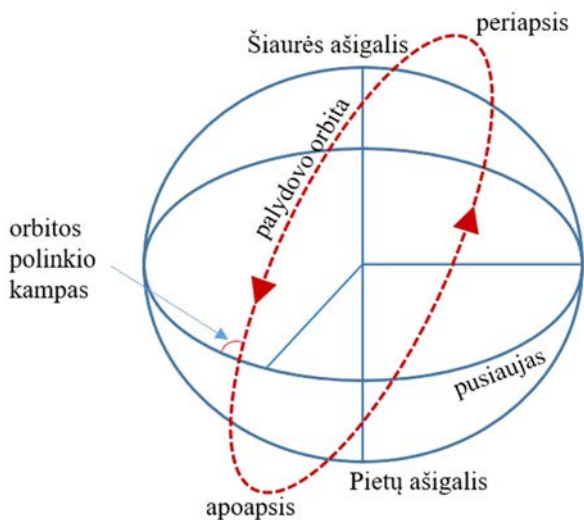
Sentinel 6 misijos tikslas atlikti itin tikslūs vandenynų reljefo matavimus. Palydovas matuoja vandenynų paviršiaus reljefą kelių centimetrų tikslumu, o matavimų ciklas pasikartoja kas dešimt dienų. Matavimai yra labai svarbūs modeliuojant vandenynų dinamiką ir prognozuojant vandens lygio svyravimus. Ši misija tęsia ankstesnių vandenyno stebėjimo misijų (nuo 1992 m.) tikslus. Šis palydovas paleistas 2020 m., o numatyta veikimo trukmė – 5,5 metai.

1.3.6. Palydovų orbitos ir klasifikacija

Dirbtinius Žemės palydovus galima skirstyti pagal orbitas, kuriomis jie skrieja. Orbita yra kelias, kuriuo palydovas viena kartą apskrieja aplink Žemę. Dirbtinių Žemės palydovų orbitos yra parenkamos priklausomai nuo jų atliekamų funkcijų ir jutiklių, sumontuotų palydove.

Palydovų orbitas paprastai apibrėžia orbitos aukštis, ekscentriškumas ir polinkio kampas. Ekscentriškumas parodo, kiek orbita yra elipsiška. Palydovas su mažu orbitos ekscentriškumu juda beveik apskritimo formos orbita, o kuo ekscentriškumas didesnis, tuo labiau iššętos elipsės formos yra orbita.

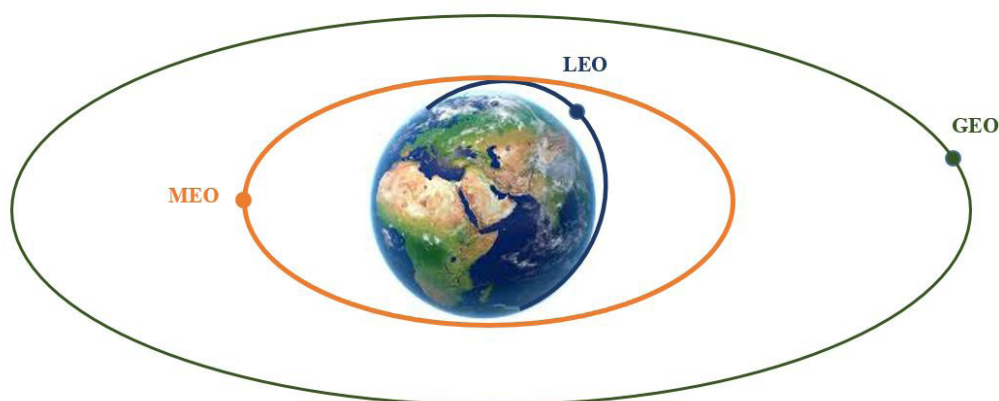
Normali palydovo orbitos forma yra elipsė, kurios vienas iš centrų yra Žemė, artimiausias Žemei orbitos taškas vadinamas periapsiu, o tolimiausias – apoapsiu (1.3.3. pav.). 1.3.3. paveikslėlyje orbitos polinkio kampas pavaizduotas kaip kampas tarp palydovo trajektorijos ir pusiaujo palydovui judant nuo Šiaurės ašigalio Pietų ašigalio link. Vis dėlto tiksliau jį būtų galima apibrėžti kaip kampą tarp Žemės ašies ties Šiaurės ašigaliu ir linijos, nubrėžtos statmenai palydovo orbitos



1.3.3. pav. Dirbtinių Žemės palydovų orbitos plokštumos ir orbitos polinkio kampas.

plokštumai palydovui judant prieš laikrodžio rodyklę. Palydovui skriejant tiesiai virš pusiaujo, jo orbitos polinkio kampas lygus 0° , palydovui judant tiesiai virš ašigalio, orbitos polinkio kampas yra 90° , o judant tiesiai virš pusiaujo, bet priešinga kryptimi nei sukasi Žemė, orbitos polinkio kampas būtų 180° .

Dirbtinių Žemės palydovų orbitos pagal aukštį skirstomos į žemą (arba poliarinę, LEO), vidutinę (MEO) ir aukštą (arba geostacionarią, GEO) (1.3.4. pav.). Kuo arčiau Žemės yra dirbtinis Žemės palydovas, tuo labiau jį veikia gravitacinė jėga ir tuo greičiau jis juda. NASA palydovas *Aqua*, skriejantis 705 km aukštyje, Žemę apskrenda per 99 minutes, o orų palydovai, skriejantys 36 tūkst. km aukštyje virš Žemės, orbitą apskrenda per 23 val. 56 min. ir 4 sek. Mėnulis vieną kartą aplink Žemę apskrieja per 28 dienas ir nuo Žemės centro yra nutolęs 384 403 km.



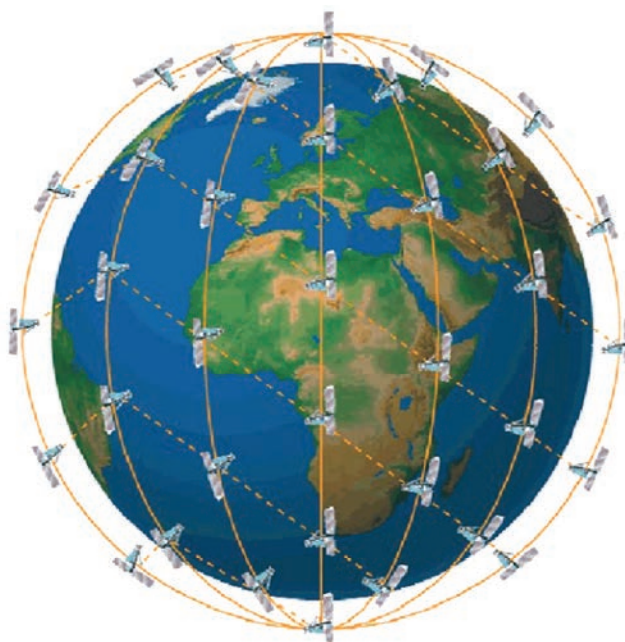
1.3.4. pav. Dirbtinių Žemės palydovų orbitos: geostacionari (GEO), poliarinė (LEO), vidutinio aukščio (MEO).

Dauguma mokslinių tyrimų ir žvalgybos palydovų skrieja žemomis orbitomis, vidutinėmis orbitomis skrieja navigacijos ir konkrečius regionus stebėti pritaikyti palydovai, o aukštomis orbitomis skrieja daugiausia orų stebėjimo ir ryšių palydovai.

Žema orbita skriejantys dirbtiniai Žemės palydovai nuo Žemės paviršiaus yra nutolę iki 1 500 km, kitų šaltinių teigimu – iki 2 000 km. Šie dirbtiniai Žemės palydovai orbitą apskrieja maždaug per 90 minučių. Iškelti palydovus į žemas orbitas yra paprasčiau ir pigiau nei į aukštesnes. Šių palydovų perduodamų duomenų atsilikimas nuo realaus jų surinkimo laiko yra nereikšmingas. Tačiau šie palydovai tarnauja trumpiau (nuo 5 iki 8 metų) ir aprėpia mažesnes teritorijas, todėl siekiant gauti duomenis iš viso pasaulio reikia daugiau palydovų.

Žema orbita skriejančių dirbtinių Žemės palydovų pavyzdys gali būti palydovai *Iridium*, naudojami mobiliam ryšiui užtikrinti. Vienas palydovas telefonu pasiekiamas apie 7 minutes, paskui ryšys automatiškai perduodamas kitam palydovui. Kadangi vienas palydovas aprėpia nedaug, siekiant padengti visą pasaulį reikia didelio palydovų tinklo. Palydovų *Iridium* tinklą sudaro 66 veikiančius palydovai ir atsarginiai, jeigu įvyktų gedimų. Palydovai skrieja apie 780 km aukštyje, kiekvienas palydovas Žemę apskrieja per 100 minučių (1.3.5. pav.).

Didžioji NASA palydovinių Žemės stebėjimo sistemų dalis yra poliariinių orbitų. Šiomis stipriai pasvirusiomis orbitomis palydovai juda nuo vieno ašigalio iki kito orbitą apskriedami per maždaug 99 minutes. Pusę orbitos virš Žemės palydovas skrieja dienos metu, o pasiekęs ašigalį pradeda skristi virš Žemės naktį. Palydovui skriejant savo orbita Žemė po juo taip pat sukasi, todėl skiedamas kitą ratą aplink Žemę palydovas jį daro kitoje Žemės vietoje. Beveik visą Žemės paviršių vienas palydovas, skrendantis žema orbita, per parą „apžvelgia“ du kartus. Vieną kartą dienos metu, o kitą kartą – naktį.



1.3.5. pav. Dirbtinių Žemės palydovų *Iridium* tinklas (De Jong ir kt., 2014).

Tokia orbita dar vadinama Saulės sinchronine, tai reiškia, kad ja skriejantys palydovai lieka tame pačiame Žemės laike. Kiekvieną kartą palydovas pusiaują kerta tuo pačiu vietiniu Saulės laiku. Pvz., palydovas *Terra* pusiaują kerta maždaug 10.30 val. Kai *Terra* pusiaują kerta Brazilijoje, ten vietos Saulės laikas yra 10.30 val., o kai skrenda kitą ratą savo orbita ir po 99 minučių vėl kerta pusiaują Ekvadore arba Kolumbijoje, ten vietos Saulės laikas dėl Žemės pasisukimo būna taip pat 10.30 val.

Būtų idealu, jei visi palydoviniai vaizdai būtų gaunami esant tokiam pačiam apšvietimui, t. y. Saulės šviesa ant Žemės paviršiaus kristų tuo pačiu kampu ir būtų vienodo šviesumo, tuomet visiškai tiksliai galėtume stebėti vykstančius Žemės pokyčius, o ne stebėjimo sąlygų pasikeitimus. Deja, to pasiekti negalime. Arčiausiai tokio rezultato yra Saulės sinchroninėmis orbitomis skriejančiais palydovais gaunami vaizdai.

Saulės sinchroninės orbitos yra būtinos moksliniams tyrimams, nes skriedamas Saulės sinchronine orbita palydovas renka duomenis išlaikydamas kiek įmanoma toki patį Saulės spinduliuotės kritimo kampą ir taip eliminuoja galimus duomenų iškraipymus dėl šešėlių. Žinoma, Saulės spinduliuotės kritimo kampas kinta priklausomai nuo sezono, tačiau lyginant kelerių metų to paties sezono duomenis reikšmingų duomenų iškraipymų dėl Žemės paviršiuje susidaranciu šešėlių neatsiranda.

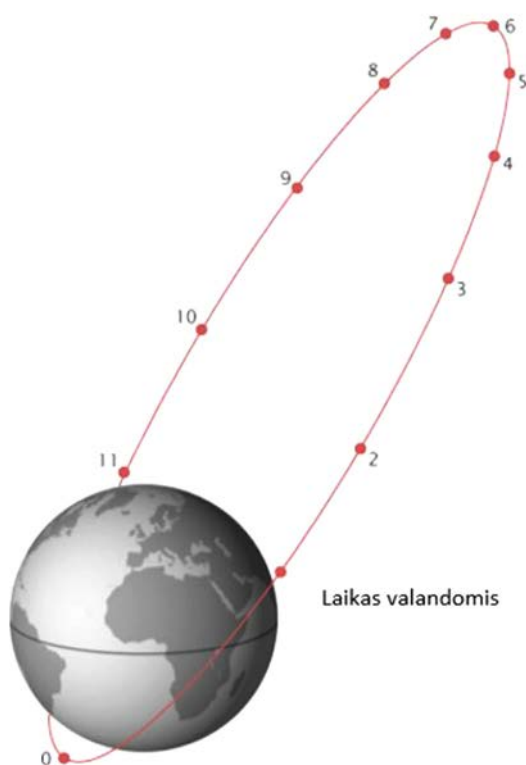
Žemomis orbitomis skriejančius palydovus veikia Žemės atmosfera, nors tokiam aukštyje ji labai reta, tačiau dėl netolygios Žemės gravitacijos jėgos, Mėnulio ir Saulės traukos jėgų ilgai palydovo orbita pasikeičia. Atsiradus nukrypimams nuo numatyto orbitos aukščio ar polinkio kampo palydovo surenkami duomenys taptų nebepalyginami tarpusavyje. Orbitos paklaida, siekianti vos 1° , priklausomai nuo palydovo aukščio gali lemti labai didelę duomenų paklaidą Žemės paviršiuje, pvz.: jei palydovas skrieja 800 km aukštyje, paklaida bus 14 km. Siekiant išlaikyti palydovus Saulės sinchroninėse orbitose reikalinga reguliariai juos grąžinti į pirminę orbitą.

Toliau nuo Žemės palydovai skrieja **vidutine orbita**. Tai palydovai, skriejantys iki 30 tūkst. km aukštyje virš Žemės. Vidutinėmis orbitomis skriejantys palydovai yra lėtesni už skriejančius žemomis.

Pusiau sinchroninė vidutinė orbita yra beveik apskritimo formos ir nutolusi maždaug 20 200 km nuo Žemės paviršiaus. Tokiam aukštyje skriejančiam palydovui reikia 12 valandų

orbitai apskrieti. Palydovui skriejant Žemė atitinkamai sukasi po juo, taigi vieną kartą per 24 valandas palydovas kerta du tuos pačius pusiaujo taškus. Tokia orbita yra pastovi ir lengvai nuspėjama. Šią orbitą naudoja GPS palydovai.

Kita dažna vidutinė orbita yra orbita „Molnija“ (1.3.6. pav.). Šią orbitą sugalvojo rusai siekdami patikimai stebėti aukštas platumas, nes poliariinės platumos negali būti stebimos naudojant geostacionariomis orbitomis skriejančius palydovus. Orbitai „Molnija“ būdingas didelis polinkio kampas ($63,4^\circ$) ir ekstremalios elipsės trajektorija, kai periapsis yra labai arti Žemės, o apoapsis labai nutolęs (1.3.6. pav.). Palydovui apskrieti orbitą trunka 12 valandų, tačiau kadangi orbitos kelias nuo Žemės nutolęs labai netolygiai, palydovo greitis nėra pastovus, kuo arčiau Žemės yra palydovas, tuo greičiau jis skrieja, o likusią orbitą įveikia kur kas lėčiau. Lėtoji palydovo orbitos dalis kiekvieną dieną ir naktį kartoja virš tos pačios aukštų platumų teritorijos. Rusijos ryšių palydovai naudoja šias orbitas.

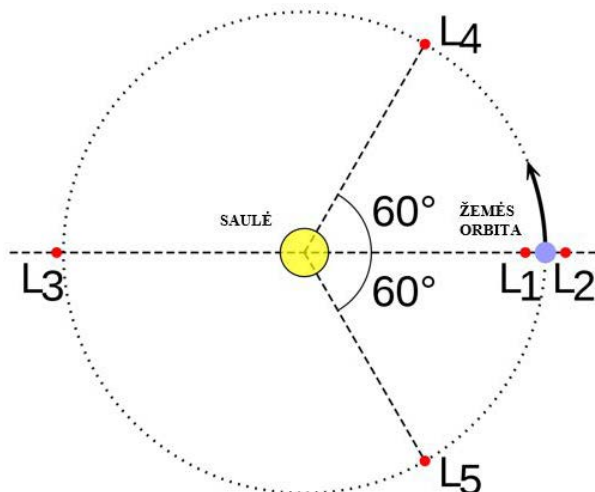


1.3.6. pav. Orbita „Molnija“ (pagal Riebeek ir Simmon, 2009).

Aukšta orbita. Kai palydovas skrieja 42 164 km aukštyje nuo Žemės centro, maždaug 36 tūkst. km nuo Žemės paviršiaus, yra pasiekiamas nuostabus efektas, kai palydovo orbita sutampa su Žemės sukimosi greičiu. Šiuo atveju palydovas visą laiką yra ties ta pačia Žemės geografinė ilguma, tačiau priklausomai nuo poreikių jis gali būti paslenkamas šiauriau ar piečiau. Tokia orbita vadinama geostacionaria. Palydovas, skriejantis ties pusiauju apskritimo pavidalo orbita, visada yra ties tuo pačiu Žemės tašku. Tokia palydovo pozicija yra ypač naudinga orams stebėti, nes palydovas pastoviai teikia informaciją apie tą pačią teritoriją.

Geostacionaria orbita skriejantys palydovai GOES kas kelias minutes siunčia duomenis apie vėjus, vandens garus, debesuotumą ir šis nenutrūkstamas duomenų srautas yra bazinė informacija, kuria naudojantis sudaromos orų prognozės ir vykdoma orų stebėseną. Palydovai GOES dar naudojami ir paieškos bei gelbėjimo darbams, padeda surasti lėktuvus ir laivus, kuriuos ištiko nelaimė. Jais stebimas ir Saulės aktyvumas, GOES turi sumontuotus jutiklius, kurie fiksuoja magnetinį ir Saulės spinduliuotės aktyvumą. Geostacionari orbita taip pat naudojama ir ryšių – telefono, televizijos, radijo – palydovams.

Kitas įdomus atstumas nuo Žemės yra Lagranžo (Lagrange) taškas. Šiame taške Žemės ir Saulės gravitacijos jėgų poveikis kompensuoja vienas kitą (1.3.7. pav.). Bet koks objektas, esantis tokiame taške, kartu su Žeme suksis aplink Saulę be jokių papildomų pastangų stabilizuoti jo padėtį ir šio mažos masės objekto padėtis Žemės ir Saulės atžvilgiu nesikeis. Lagranžo taškai egzistuoja ne tik tarp Saulės ir Žemės, bet ir tarp Žemės ir Mėnulio, Saulės ir kitų planetų. Kitaip sakant, tarp bet kurių dviejų didelės masės besisukančių objektų.



1.3.7. pav. Lagranžo taškai (L1, L2, L3, L4, L5) (pagal Riebeek ir Simmon, 2009).

Lagranžo taškus apie 1772 m. matematiškai apskaičiavo Josephas Louisas Lagrange'as. Iš viso yra penki Lagranžo taškai, iš kurių du yra stabilūs (L4 ir L5), kiti trys taškai nėra tokie stabilūs, juose esančius objektus reikia nuolat stebėti ir koreguoti, jeigu atsirastų nors nedidelių nukrypimų (1.3.7. pav.). Stabiliuose Lagranžo taškuose objektai net jei ir nukrypsta nuo esamos padėties, gravitacijos jėgų yra grąžinami į stabilią poziciją.

Pirmasis Lagranžo taškas yra tarp Žemės ir Saulės, jame palydovai gali nuolat stebėti Saulę. Šiame taške yra Saulės ir heliosferos observatorija SOHO–NASA ir ESA palydovas, skirtas Saulei stebėti. Pirmasis Lagranžo taškas nuo Žemės nutolęs maždaug 1,5 mln. km.

Antrasis Lagranžo taškas yra nutolęs nuo Žemės tokiu pačiu atstumu kaip ir pirmasis, tik yra priešingoje Žemės pusėje. 2021 m. planuojama paleisti Džeimso Vebo (James Webb) kosminį teleskopą, kuris atliks astronominius visatos tyrimus. Šis teleskopas pakeis Hablo teleskopą. Šiame Lagranžo taške veikia ir NASA Vilkinsono mikrobangų anizotropijos zondas (angl. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP). Zondas buvo paleistas 2001 m. birželį, o jo pagrindinis tikslas – fundamentiniai kosmologijos tyrimai.

Trečiasis Lagranžo taškas yra kitoje Saulės pusėje, tiesiai priešais Žemę, tokioje padėtyje palydovas negalėtų susisiekti su Žeme, todėl bent kol kas jo naudoti negalime.

Stabiliausi ketvirtasis ir penktasis Lagranžo taškai yra Žemės orbitos aplink Saulę kelyje 60 laipsnių prieš Žemę ir už jos (1.3.7. pav.). Šiuose taškuose skrieja 2006 m. paleisti NASA palydovai STEREO, kurių misija yra tirti Saulę, jos vainiką ir magnetines audras. Palydovai STEREO taip pat pirmą kartą leido pamatyti 3D Saulės vaizdą.

Dirbtinius Žemės palydovus galima skirstyti ir pagal jų svorį (1.3.1. lentelė). Vystantis technologijoms palydovai vis lengvėja. 100 kg sveriantis palydovas gali atlikti tas pačias funkcijas, kurias seniau galėjo atlikti sveriantis toną.

Mažųjų palydovų technologijos vystomos labai sparčiai ir jų reikšmė mokslui kuo toliau, tuo bus didesnė. Vis didėjančios santykinai nebrangaus paleidimo į kosmosą galimybės ir nuolat gerėjantys duomenų apdorojimo būdai, tikėtina, vis labiau skatins nuotolinius tyrimus.

Palydovų gamybos ir paleidimo į kosmosą kaštai labiausiai priklauso nuo jų dydžio ir šiek tiek mažiau nuo masės. Dėl gerokai mažesnių tiek pagaminimo, tiek iškėlimo kaštų mažieji palydovai gali būti ypač naudingi mažesnėms šalims, galinčioms skirti ribotą finansavimą palydoviniams moksliniams tyrimams. Mokslo bendruomenė, ypač astrofizikai ir heliofizikai, jau pripažino mažųjų palydovų reikšmę moksliniams tyrimams, Žemės mokslams. Nors mažųjų palydovų gamyba ir paleidimas reikalauja nemažai lėšų, tačiau didžiausi pasaulio universitetai jau gali sau leisti turėti savo kosmoso programas, tai vyksta Japonijoje, Vokietijoje, Jungtinėje Karalystėje, Pietų Korėjoje ir kitur.

1.3.1. lentelė. Palydovų klasifikacija pagal dydį ir svorį (Urbanavičienė ir Urbanavičius, 2018).

Didieji dirbtiniai Žemės palydovai (daugiau kaip 1000 kg)	<i>Terra</i> – 5190 kg
	<i>SPOT 5</i> – 3000 kg
	<i>Landsat 7</i> – 1973 kg
	<i>QuickBird</i> – 1018 kg
Vidutiniai dirbtiniai Žemės palydovai (1000–500 kg)	<i>Kompsat 2</i> – 800 kg
	<i>SPOT 6</i> – 800 kg
	<i>Ikonos</i> – 726 kg
	<i>CartoSat</i> – 650 kg
Mažieji dirbtiniai Žemės palydovai (mažiau nei 500 kg)	Mini 500–100 kg
	Mikro 100–10 kg
	Nano 10–1 kg
	Piko 1–0,1 kg

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokios pagrindinės dirbtinių Žemės palydovų orbitos?
- Kaip palydovai klasifikuojami pagal dydį ir svorį?
- Kuo mokslui ir operatyviniams stebėjimams svarbi geostacionari orbita?
- Kaip parenkama palydovo orbita?
- Kas yra kosmoso šiukšlės ir kokį pavojų jos kelia?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Blumenfeld, J. (2020). *Terra: Five Instruments – One Monumental Data Record* [žiūrėta 2020-04-04]. Prieiga internete: <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/terra-at-20>
- De Jong, K., Goode, M., Liu, X., Stone, M. (2014). *Precise GNSS Positioning in Arctic Regions*. Offshore Technology Conference. <https://doi.org/10.4043/24651-MS>
- Department of Space, Indian Space Research Organization (2016). *Space science and Exploration* [žiūrėta 2020-04-04]. Prieiga internete: <https://www.isro.gov.in/spacecraft/space-science-exploration>
- Durant, F. C., Dooling, D., Grey, J. et al. (2020). *Spaceflight*. *Encyclopædia Britannica* [žiūrėta 2020-04-04]. Prieiga internete: <https://www.britannica.com/science/spaceflight>
- ESA (2019). ESA commissions world's first space debris removal [žiūrėta 2020-07-26]. Prieiga internete: https://www.esa.int/Safety_Security/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal
- Govorov, M., Bevainis, L., Balčiūnas, A. (2016). *Remote Sensing and GIS for Cadastral Surveying*. Vilnius: Vilnius universitetas [žiūrėta 2019-12-06]. Prieiga internete: <http://kc.gf.vu.lt/wp-content/uploads/2016/11/REMOTE-SENSING-AND-GIS-FOR-CADASTRAL-SURVEYING.pdf>
- Kramer, H. J. et al. (2012). *Landsat-1 to Landsat-3* [žiūrėta 2020-01-21]. Prieiga internete: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-1-3#references>
- Millan, R.M., von Steiger, R., Ariel, M., et al. (2019). Small satellites for space science: A COSPAR scientific roadmap. *Advances in Space Research*, 64 (8), 1466–1517. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.035>.
- NASA (2020a). *Earth Science Data Systems Program Highlights 2019* [žiūrėta 2020-04-06]. Prieiga internete: <https://earthdata.nasa.gov/esds/nasa-earth-science-data-systems-program-highlights-2019>
- NASA (2020b). *About the Hubble Space Telescope* [žiūrėta 2020-07-26]. Prieiga internete: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/about
- National Geographic (2020). *Orbital objects* [žiūrėta 2020-07-26]. Prieiga internete: <https://www.national-geographic.com/science/space/solar-system/orbital-objects/>
- Riebeek H., Simmon, R. (2009). *Catalog of Earth Satellite Orbits*. NASA Earth Observatory [žiūrėta 2019-12-01]. Prieiga internete: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog>
- Urbanavičienė, I., Urbanavičius, V. (2018). *Kosminių vaizdų tyrimai*. Kaunas: Kauno kolegija.



② PALLYDOVINIAI JUTIKLIAI IR JŲ DUOMENYS

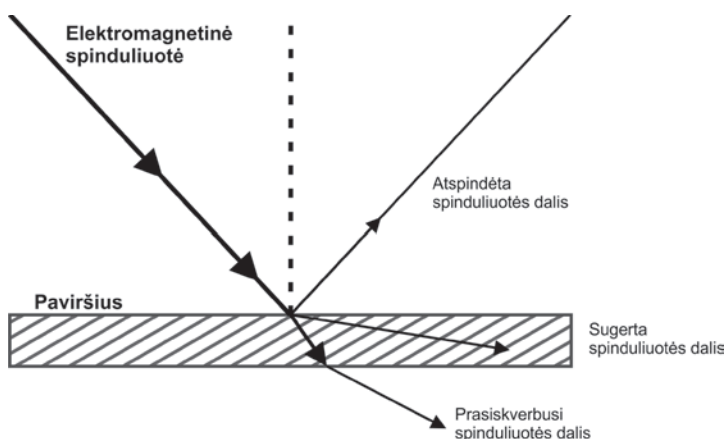
2.1. ŽEMĖS STEBĖJIMO PALYDOVINIŲ DUOMENŲ SAVYBĖS

Remiantis Jungtinių Tautų kosmoso reikalų biuro (angl. United Nations Office for Outer Space Affairs, UNOOSA) duomenimis, 2019 m. įvairiomis Žemės orbitomis skriejo 4987 palydovai, tačiau tik gana nedidelė jų dalis atlieka mokslinius tyrimus (25 palydovai) ir nuotolinį Žemės stebėjimą (710 palydovų). Dažnai šios grupės palydovai dėl jiems keliamų reikalavimų ir jų misijų tikslų gabena daugiafunkcinę įrangą, kurioje integruota keletas skirtingo veikimo principo jutiklių.

Žemės stebėjimo palydovų jutikliai – tai prietaisai, kuriais matuojama ar registruojama Žemės ir jos geosferų elementų atspindėta arba išsklaidyta elektromagnetinė spinduliuotė. Dažniausiai tai spinduliuotė regimajame, infraraudonajame ar mikrobangų diapazone. Ši spinduliuotė sklisdama iš jos sklaidos šaltinio (Saulės arba generuojančio prietaiso) skirtingai sąveikauja su pasiekiamais objektais. Ji gali prasiskverbti, būti išsklaidoma, atspindima arba sugerama (2.1.1. pav.).

2.1.1. pav.

Elektromagnetinės spinduliuotės sąveika su paviršiumi. Dalis spinduliuotės yra atspindima, dalis sugerama, o dalis perduodama į gilesnius sluoksnius.



Tokia šviesos ir medžiagos sąveika priklauso nuo spinduliuotės bangų ilgio ir dažnio, fizinių ir cheminių (molekulių lygmenyje) su ja sąveikaujančios medžiagos ar objekto savybių. Palydovinės technologijos ir jų jutikliai registruodami grįžtamąją spinduliuotę leidžia fiksuoti ir identifikuoti fizines ir chemines įvairių Žemės geosferų elementų charakteristikas, jų kaitą tiek erdvėje, tiek laike. Žemės stebėjimo palydovai gali analizuoti Žemės atmosferos, hidrosferos, litosferos, žmogaus sukurtų darinių ir objektų – technosferos ir biosferos – elementų savybes. Tačiau derėtų paminėti, kad konkrečioms uždaviniais realizuoti dažniausiai taikomi specifiniai prietaisai ar jų sistemos. Apskritai Žemės stebėjimo palydovuose naudojami pasyvieji (matuojama nuo Žemės sklindanti spinduliuotė) ir aktyvieji (registruojamas iš Žemės stebėjimo palydovų pasiūstas ir nuo Žemės atsispindėjęs signalas) jutikliai. Skiriasi šių jutiklių ir veikimo principas, ir techninės charakteristikos, taip pat taikymo sritys.

Palydovinių regimojo spektro bei daugiaspektrių vaizdo duomenų savybės įprastai nuskaitomos keturių skiriamųjų gebų kombinacijos rodikliais: erdvine, spektrine, radiometrine ir laikine. Skirtingo pobūdžio, tipo ir techninių charakteristikų, taip pat orbitos parametrų palydovams ir jų jutikliams būdinga įvairi šių rodiklių kombinacija.

2.1.1.1. Žemės stebėjimo palydovų jutiklių savybės ir įvairovė

Pagal veikimo principą palydoviniai prietaisai skirstomi į aktyvius ir pasyviuosius jutiklius: pasyviųjų jutiklių grupei priskiriamos regimojo spektro vaizdo kameros, daugiakanaliai

optiniai spektrometrai, radiometrai, atmosferos cheminių junginių (ozono, anglies oksido ir dioksido, azoto dioksido, metano), temperatūros ir drėgmės matuokliai, magnetometrai, akcelerometrai. Aktyvieji jutikliai yra įvairios paskirties mikrobangų radarai, lazeriniai jutikliai, aukščiamčiai – altimetrai ir kiti prietaisai, kuriems reikalingas aktyvus dirbtinis prietaiso generuojamas spinduliuotės šaltinis. Visi šie prietaisai registruoja arba spinduliuoja ir registruoja tam tikro ilgio ir dažnio šviesos spinduliuotę. Priklausomai nuo jų konstrukcijos, spinduliuotė gali būti registruojama plačiame diapazone arba siauruose jos ruožuose, spektro juostų skaičius, kaip ir jų plotis (išreiškiamas spektrine skiriamąja geba) gali skirtis. Dalies prietaisų grįžtamasis signalas fiksuojamas įvairaus tipo antenomis, kitų – optinių (teleskopinėse optinėse sistemose) ir ne optinių jutiklių masyvais. Dažnai skiriasi ir prietaisų generuojamų duomenų erdvinė skiriamoji geba bei generuojamų duomenų formatas (pavyzdžiui, vaizdiniai, taškiniai ir kitokie duomenys). Priklausomai nuo technologijos varijuoja jutiklių veikimo galimybės esant skirtingoms sąlygoms (pavyzdžiui, nevienodoms atmosferos sąlygoms, skirtingam paros laikui ir t. t.). Ne išimtis yra ir infraraudonojo spektro diapazone veikiantys palydoviniai jutikliai, kurių kiekvienas dažnai atlieka griežtai apibrėžtas užduotis ir yra skirtas analizuoti konkrečius reiškinius arba tam tikras būdingąsias savybes.

Aktyvieji palydovų jutikliai ir jų savybės. Dauguma aktyviųjų jutiklių palydovuose veikia mikrobangų ir infraraudonųjų spindulių diapazone bei, kaip jau minėta, turi aktyvų prietaiso generuojamos spinduliuotės šaltinį. Dėl generuojamos spinduliuotės savybių jutikliai efektyviai veikia ir renka duomenis esant įvairiausioms atmosferos sąlygomis (skirtingu paros metu, esant įvairiam debesuotumui, nevienodam atmosferos skaidrumui ir t. t.). Aktyvieji jutikliai:

Lazerinis altimetras – prietaisas, kuris naudoja lidaro technologija grįstą spindulių šaltinį ir yra skirtas matuoti palydovo platformos aukščiui virš paviršiaus. Išmatuotas palydovo aukštis virš Žemės paviršiaus yra naudojamas Žemės paviršiaus reljefui ir jo pokyčiams tirti.

Lidas – prietaisas, naudojantis lazerį, kuris generuoja ir spinduliuoja šviesos bangų impulsus (dažniausiai trumpųjų bangų infraraudonosios (SWIR) spinduliuotės diapazone) bei turintis itin jautrius jutiklius, kurie fiksuoja ir matuoja išsklaidytą ir nuo objektų ar įvairių paviršių atspindėtą spinduliuotę bei jos įveiktą atstumą. Atstumas iki objekto nustatomas per laiko vieneta, kurį nukeliauja iš prietaiso išspinduliuota ir iki jutiklio grįžtanti atspindėta bei išsklaidyta spinduliuotė. Tokios sistemos taikomos objektų ir paviršių 3D modeliavimui, paviršiaus reljefo, biomasės, tūrių, kai kuriais atvejais net batimetriniuose jūros priekrantės tyrimuose.

Sintetinės apertūros radaras (SAR) – aktyvusis jutiklis, turintis autonominių elektromagnetinės spinduliuotės šaltinį. Prietaisas skleidžia mikrobangų spinduliuotę (gali skirtis generuojamų bangų dažnis, bangų ilgis ir poliarizacijos laipsnis) kaip periodiškus impulsus. Kai spinduliuotė pasiekia taikinį, dalis jos yra atspindima ar išsklaidoma jutiklio link. Ši atspindėta mikrobangų spinduliuotė prietaiso jutiklių yra identifikuojama, išmatuojama bei nustatomas laikas, per kurį ji įveikė atstumą nuo atspindėto objekto. Registruojant bei fiksuojant atspindėtos spinduliuotės ir jos energijos savybes, galima suprojektuoti objekto paviršiaus struktūros vaizdą, identifikuoti skirtingas fizines ir kai kuriais atvejais bendrąsias chemines objekto savybes.

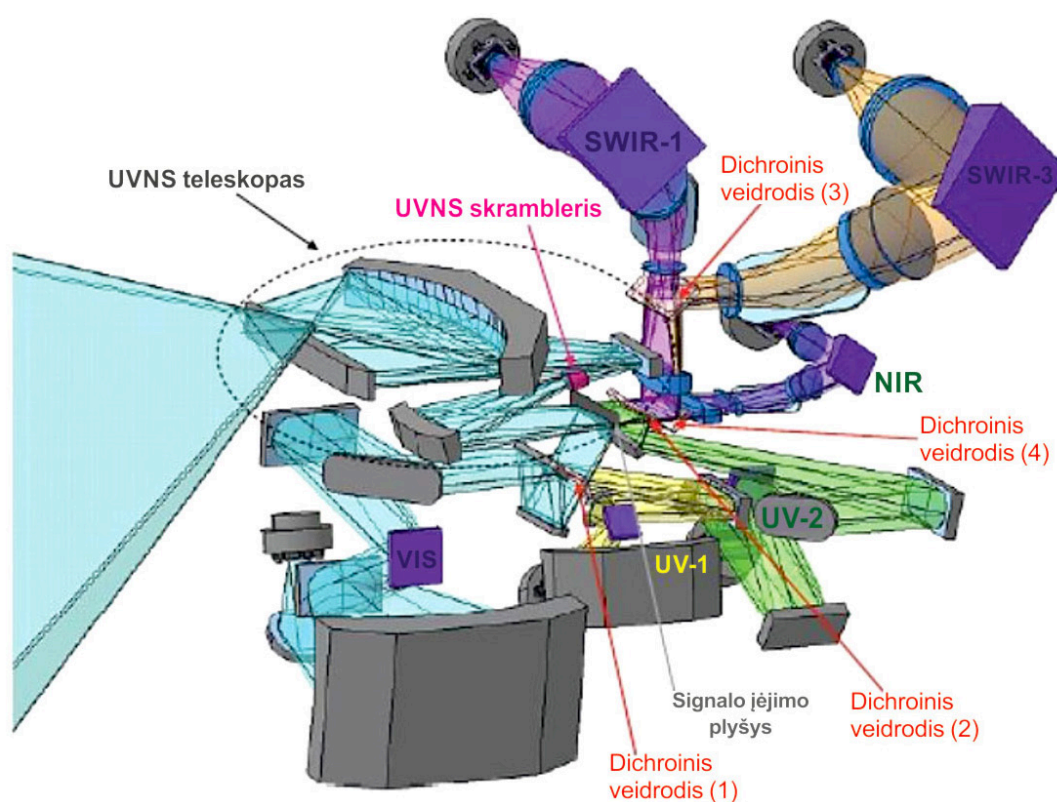
Skaterometras – aukšto dažnio mikrobangų prietaisas, skirtas matuoti atspindėtą grįžtančią spinduliuotę. Tokie jutikliai gali būti naudojami matuoti vėjo kryptį, greitį ir jų erdvinei analizei.

Vertikalaus zondavimo jutiklis – prietaisas, matuojantis vertikalų kritulių pasiskirstymą ir atmosferos savybes (temperatūrą, drėgmę, debesų struktūrą ir kt.).

Pasyvieji palydovų jutikliai ir jų savybės. Pasyvieji Žemės stebėjimo palydovų jutikliai – įvairūs radiometriniai ir spektrometriniai prietaisai, kurie registruoja atspindėtą objektų spinduliuojamą elektromagnetinę spinduliuotę. Dauguma tokių prietaisų veikia regimajame ir infraraudonajame spektruose.

Akcelerometras – prietaisas, matuojantis pagreitį. Palydovuose skiriami du akcelerometrų tipai: prietaisai, matuojantys tiesinių judesių pokyčius viename ar keliuose matmenyse, ir prietaisai, matuojantys kampinį pagreitį (sukimosi greičio pokytį per laiko vienetą).

Optinis radiometras – prietaisas, matuojantis elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumą apibrėžtame elektromagnetinės spinduliuotės intervale. Radiometrai veikia ultravioletiniame arba infraraudonajame spektre, tačiau priešingai nei spektrometrai, neregistruoja šviesos spinduliuotės intensyvumo atskiruose jos ruožuose (registruojamos spinduliuotės srautas jutiklių matricos ar filtrų neišskaidomas į siauras spektro juostas, matuojamas visas jutiklio veikimo diapazonui tenkantis energijos srauto intensyvumas). Išimtis – daugiaspektriai daugiakanaliai radiometrai. Šie prietaisai turi kelis ar keliolika spektrinių kanalų, kurie elektromagnetinių bangų spektre dažniausiai išdėstyti nenuosekliai. Žemės stebėjimo palydovuose kai kuriais atvejais montuojami keli ar daugiau radiometrų, kiekvienas iš kurių fiksuoja tik tam tikro ilgio elektromagnetinę spinduliuotę. Kitais atvejais spinduliuotė išskaidoma spinduliuotės daliklių, veidrodžiais (pavyzdžiui, dichroiniais) ar filtrais. Optinių radiometrų klasei priskiriami radiometriniai skeneriai ir radiometrinės kameros.



2.1.2. pav. Siūloma Sentinel 5 UVNS (angl. Ultra-violet, Visible and Near-infrared Sounder) prietaiso koncepcija. Numatoma, kad prietaisas naudos šešis spektrometrus (UV-1, UV-2, VIS, NIR, SWIR 1, SWIR 3) ir turės vieną bendrą teleskopą. Ši palydovinė misija bus skirta atmosferos cheminei sudėčiai stebėti ir tirti (pagal Kramer ir kt., 2011).

Optinis spektrometras kaip ir radiometras yra prietaisas, skirtas matuoti elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumą. Tačiau skirtingai nuo radiometro, šis jutiklis registruoja šviesą daugybėje siaurų spektro juostų, dažnai siekiančių keliasdešimt, kelių ar net dalies nanometro plotį. Spektrometro spektro juostos kai kuriais atvejais eina viena po kitos ir apima visą jo veikimo intervalą (radiometruose atskiri kanalai gali būti išdėstomi skirtinguose elektromagnetinės spinduliuotės diapazonuose ar spektro dalyse). Palydovuose montuojamų jutiklių veikimo principas pagrįstas registruojamo signalo (grįžtamosios atspindėtos šviesos) išskaidymu į atskiras elektromagnetinių bangų spektro juostas. Tai atlieka prietaise esantys detektorių masyvai (CCD (krūviu susietas įtaisas), CMOS (metalo oksido puslaidininkio jutiklis) matricos, įvairūs filtrai, dispersinės prizmės), kurie priklausomai nuo spektrinės skiriamosios gebos (1 nm, 5 nm, 15 nm ir pan.) išskaido registruojamą signalą (elektromagnetinės spinduliuotės jutiklių veikimo diapazone) į spektro juostas pagal bangų ilgį. Spektrometrams būtinas atributas – optinis signalo „priėmimo“ priedas – teleskopas, objektyvas ar optinis zondas ir pan. Generuojami duomenys gali būti skirtingo formato – daugiaspektriai, hiperspektriniai vaizdai, spektrogramos. Atskirai spektrometrių tyrimų grupei skiriama vaizdų spektrometrija, kuri apima atvaizdavimo, vaizdų formavimo galimybę turinčių spektrometrų naudojimą ir spektrinių vaizdų analizę.

Spektrometrai ir vaizdų spektrometrija plačiai taikomi Žemės stebint iš palydovų ir apima įvairių paviršių savybių analizę. Spektrometrija naudojama vandens, augmenijos, dirvožemio dangos, žmonių infrastruktūros ir technogeninių objektų, kai kurių atmosferos savybių tyrimams. Pavyzdžiui, *Sentinel 5* misija skirta plataus spektro atmosferos tyrimams ir šis palydovas fiksuoja duomenis apie ozono (O_3) kiekį stratosferoje ir troposferoje, NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , CH_2O ir aerozolius. Dėl plataus spektrinio diapazono, reikalingo visiems molekuliniais junginiais stebėti, prietaisas yra sudėtingas įvairių spektrometrų rinkinys (2.1.2. pav.).

Vertikalaus zondavimo jutiklis, arba prietaisas, matuojantis vertikalias atmosferos savybes (temperatūrą, drėgmę, debesų struktūrą ir t. t.) bei galintis įvertinti kritulių intensyvumą.

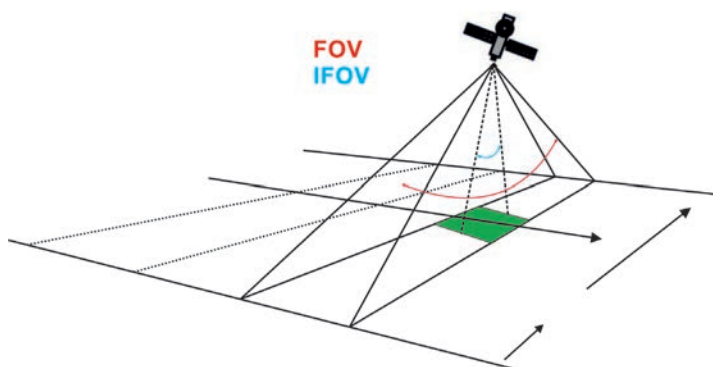
2.1.2. Erdvinė skiriamoji geba

Nuotoliniuose tyrimuose erdvinė skiriamoji geba – tai dydis, apibūdinantis vaizdo pikselio – gardelės aprėpimo Žemės paviršiaus ploto ir tuo pačiu mažiausio nedalomo atpažįstamo objekto gardelėje dydį. Dažniausiai erdvinė skiriamoji geba apibūdinama naudojant vaizdo pikselio kraštinės ilgį. Nuotoliniuose tyrimuose erdvinė skiriamoji geba apibūdinama kaip mažiausias neskaidomas Žemės paviršiaus plotas, fiksuojamas įvairaus tipo jutiklių ir jų prietaisų (Ose, 2016). Palydovinių prietaisų stebėjimo lauką galima apibrėžti kaip kūgį, kurio statmuo yra aukštis virš stebimo objekto paviršiaus, viršūnė – palydovinis jutiklis, o skersmuo priklauso nuo jutiklio savybių. Kūgio viršūnės taškas atitinka jutiklio stebėjimo, išdėstymo tašką. Pasyviųjų jutiklių erdvinė skiriamoji geba priklauso nuo jutiklio momentinio stebėjimo lauko (angl. Instantaneous Field of View, IFOV), t. y. nuo jutiklio aprėpimo Žemės ploto apibrėžtu laiko momentu ir nuo paties jutiklio aukščio (2.1.3. pav.). Kada sakoma, kad vaizdo erdvinė skiriamoji geba yra maža, tai reiškia, jog jis sudarytas iš pikselių, kurių plotas yra didesnis, lyginant su didesnę erdvinę skiriamosios gebos vaizdais. Erdvinė skiriamoji geba iš esmės apibūdina palydovinių vaizdų (kartu ir vaizdų bendrai) kokybę bei detalumą.

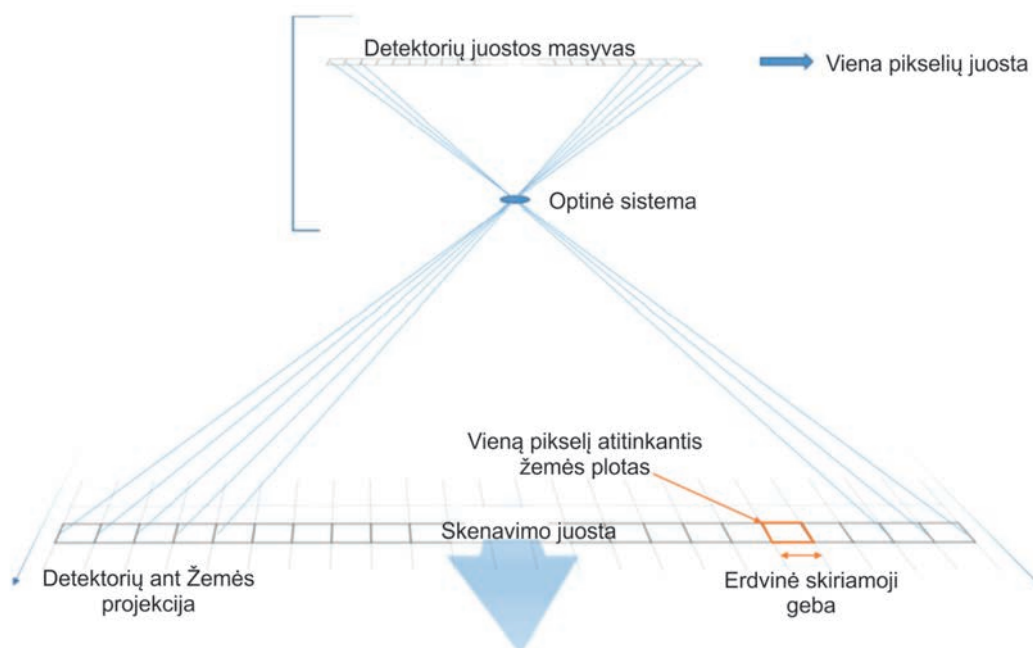
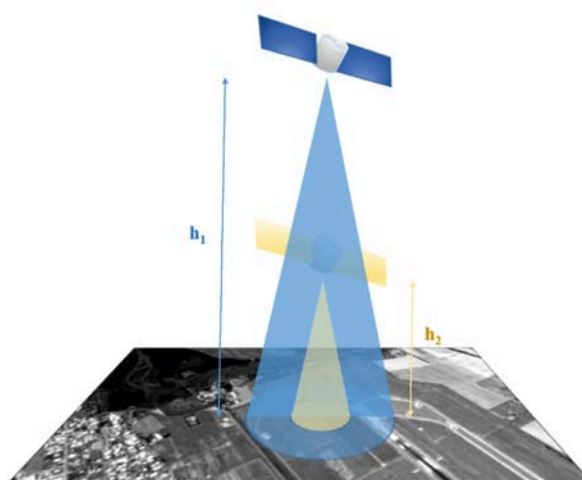
Svarbu paminėti, kad momentinio stebėjimo lauko parametras neturėtų būti painiojamas su FOV – stebėjimo lauku, kuris apibrėžia optinio jutiklio aprėptį (generuojamo vaizdo plotą ant Žemės paviršiaus).

Akivaizdu, kad erdvinė skiriamoji geba priklauso nuo stebimo objekto nuotolio iki jutiklio. Paveiksle iliustruojama skirtingomis orbitomis skriejančio palydovo su vienodomis techninėmis savybėmis jutiklių skiriamoji geba, kur matyti, kad h_1 palydovo skiriamoji geba (vaizdo pikselio dydis) yra mažesnė lyginant su žemesnėje orbitoje (h_2) skriejančio jutiklio vaizdo skiriamąja geba (2.1.4. pav.).

2.1.3. pav. Optinių jutiklių momentinis stebėjimo laukas (IFOV) ir stebėjimo laukas (FOV) (pagal Wolf ir Schaepman, 2015).



2.1.4. pav. Pasyviojo jutiklio stebėjimo laukas ir erdvinės skiriamosios gebos priklausomybė nuo jutiklio aukščio virš žemės paviršiaus (h_1 ir h_2) (pagal Ose, Corpetti ir kt., 2016).



2.1.5. pav. Pasyviųjų skenuojamųjų jutiklių (skenavimo išilgai kelio) vaizdų generavimo schema.

Moderniuose skenavimo išilgai Žemės stebėjimo palydovų jutikliuose, kur spektriniai vaizdai generuojami detektorių masyvo, išdėstyto statmenai palydovo judėjimo trajektorijos, duomenų generavimas ir atspindėtos elektromagnetinės spinduliuotės kiekis, tenkantis kiekvienam detektoriumi laiko momentu t , registruojamas spektriniam „stulpeliui“ (kiekviename spektriniame jutiklio ruože) per skenavimo juostą (2.1.5. pav.). Toks veikimo principas leidžia gauti spektrinius erdvinis duomenis kiekvienoje formuojamo vaizdo (pikselių) juostoje.

Pačiame jutiklyje duomenys kiekvienoje skenuojamoje juostoje dažnai fiksuojami per kelis išdėstytus detektorių masyvus, tas būtina norint gauti pakankamą erdvinę skiriamąją gebą skirtingų šviesos spektro juostų vaizduose ir jutiklio veikimo kanaluose. Skenavimo išilgai trajektorijos jutiklių masyvuose kiekvienas detektorius turi savo momentinio stebėjimo lauką (IFOV).

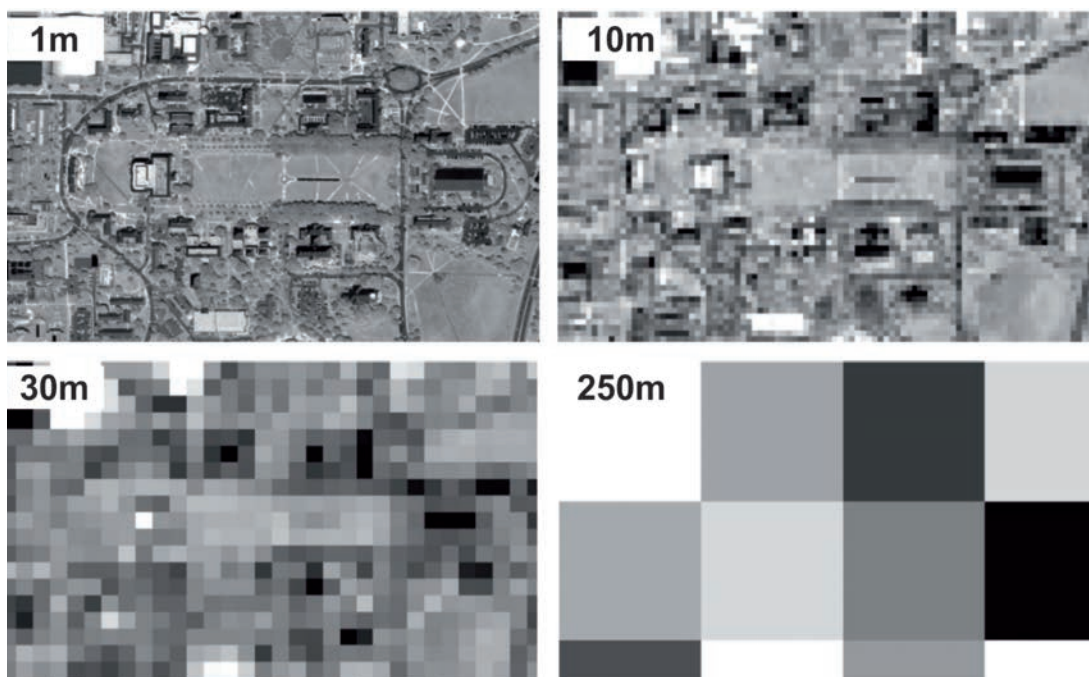
Ne visuose Žemės stebėjimo palydovuose naudojami pasyvieji skenuojamieji jutikliai, kai kurie aprūpinti skaitmeninėmis daugiakanalėmis spektrinėmis ir regimojo spektro kameromis, optiniais radiometrais, spektroradiometrais ir kitais prietaisais. Visų jų erdvinę skiriamoji geba dažnai skiriasi (2.1.1. lentelė). Antai palydovų *Landsat* duomenų erdvinę skiriamoji geba yra 30 m. Tai reiškia, kad kiekvienas palydovo *Landsat* vaizdo pikselis aprėpia 30x30 m Žemės paviršiaus plotą. Tokios skiriamosios gebos vaizdai priskiriami vidutinės raiškos vaizdų grupei (2.1.1. lentelė). Ši klasifikacija nėra absoliuti, todėl meteorologiniuose ar kitokios paskirties palydovuose gali būti naudojamos kitoks skirstymas į grupes pagal skiriamąją gebą.

2.1.1. lentelė. Žemės stebėjimo palydovinių vaizdų erdvinės raiškos kategorijos pagal vaizdų erdvinę skiriamąją gebą.

PALYDOVŲ VAIZDŲ ERDVINĖS RAIŠKOS TIPAI	PIKSELIO ERDVINĖ DIMENSIJA (m/PIKSELĮ)
Maža raiška	>60
Vidutinė raiška	10–30
Didelė ir labai didelė raiška	0,3–5

Žinoma, toks vaizdų raiškos grupių klasifikavimas yra sąlyginis, nes technologijoms vystantis duomenų erdvinę skiriamoji geba nuolat didėja. Vaizdai prieš kelis dešimtmečius laikyti didelės, šiuo metu apibūdinami kaip mažos raiškos duomenys. Akivaizdus to pavyzdys yra NASA palydovo *Landsat* spektrinių vaizdų duomenys, kurie XX a. 7-ajame dešimtmetyje siekdami 79 m skiriamąją gebą (palydovai *Landsat 1–5*), traktuoti kaip itin detalūs ir kokybiški. Šiandien tokie duomenys patenka į mažos erdvinės skiriamosios gebos vaizdų kategoriją. 2.1.6. pav. pateikti pavyzdys kaip ta pati teritorija atrodo skirtingos erdvinės skiriamosios gebos vaizduose.

Tradicškai regimojoje ir artimojo infraraudonojo spektro juostose veikiančių jutiklių generuojami vaizdai pasižymi didesne skiriamąja geba, lyginant su trumpabangės infraraudonosios spinduliuotės (SWIR), šiluminės infraraudonosios spinduliuotės (TIR) ir tolmojo UV diapazonų vaizdais. Pavyzdžiui, palydovo *Sentinel 2* duomenų erdvinę skiriamoji geba varijuoja tarp 10 ir 60 m. Didžiausios skiriamosios gebos vaizdai yra regimosios šviesos ir NIR juostose. Raudonojo poslinkio kampo (705–783 nm), taip pat SWIR, tolimosios UV spinduliuotės ruožuose skiriamoji geba yra 20–60 m. Palydovo *Landsat 8* vaizdai pasižymi kiek mažesne erdvine skiriamąja geba. Šiluminės infraraudonosios spinduliuotės spektro juostų vaizdams būdinga 100 m, kitiems – 30 m skiriamoji geba.

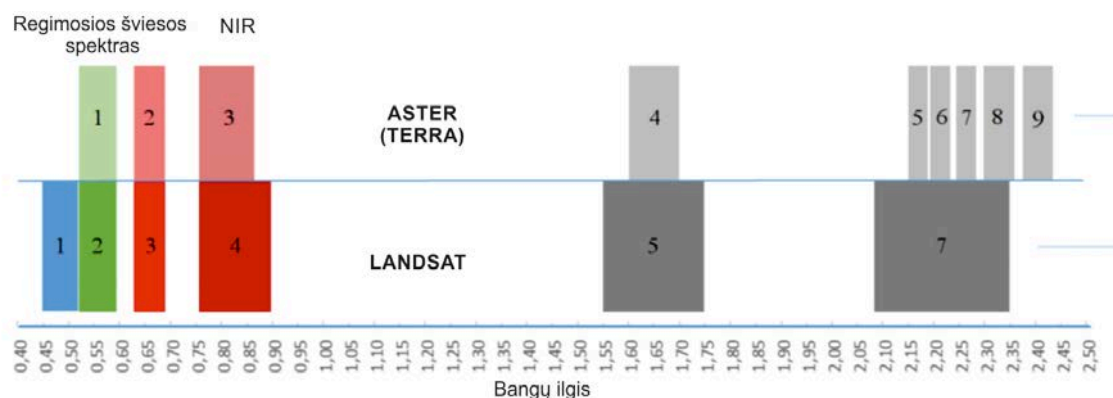


2.1.6. pav. Tos pačios teritorijos (Merylando universiteto (JAV) teritorijos pavyzdys) skirtingos erdvinės skiriamosios gebos vaizdai (Pagal Liang, Li ir Wang, 2012).

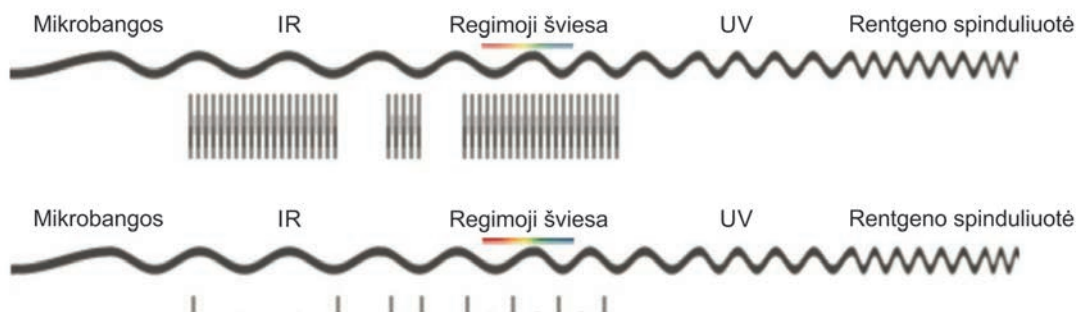
2.1.3. Spektrinė skiriamoji geba

Fizikiniai nuotolinių tyrimų principai yra paremti materijos – fizinės medžiagos (skirtingos jos fizinės būsenos – dujinės, skystos ar kietos) ir šviesos sąveika. Priklausomai nuo elektromagnetinės spinduliuotės savybių (bangos ilgio, dažnio) ir medžiagų molekulinė savybių, šviesa skirtingai sugerama, atspindima ir išsklaidoma. Šią sąveiką galima išmatuoti, o įvairiuose nuotolinių tyrimų metoduose naudojami jutikliai leidžia registruoti bei fiksuoti tokius duomenis (atspindimą ir išsklaidoma nuo skirtingų paviršių ir Žemės geosferų bei jų elementų elektromagnetinę spinduliuotę). Optiniai pasyvieji jutikliai, tokie kaip skaitmeninės regimojo spektro (RGB), spektroradiometrinės ir radiometrinės kameros, kt. jutikliai, leidžia sugeneruoti įvairaus pobūdžio regimojo ir neregimojo spektro vaizdus skirtingose šviesos spektro juostose. Priklausomai nuo jų savybių įvairūs prietaisai gali turėti nuo kelių iki keliolikos ar net keliasdešimties kanalų. Kiekvienas kanalas, savo ruožtu, apima tam tikro pločio (priklausomai nuo konkretaus palydovo ir jo jutiklių) elektromagnetinės spinduliuotės spektro juostą, kuri skiriasi bangų ilgiais ir intervalo pločiu. Kai kalbama apie palydovinius vaizdus, spektrinė skiriamoji geba suprantama kaip dydis, nusakantis spektro juostų, kurias naudoja jutiklis, plotį. Žmogaus akis elektromagnetinę spinduliuotę geba matyti tik regimajame spektre, tačiau palydovai dėl juose esančių jutiklių šviesą geba išskaidyti į dešimtis ar net šimtus itin siaurų spektro juostų ne tik regimojo, tačiau ir infraraudonojo spektro diapazone. Šiose spektro juostose jutikliai generuoja vaizdinius duomenis. Tad kuo siauresnė spektro juosta, tuo didesnė spektrinė skiriamoji geba. Dažniausiai apibūdinant palydovinių vaizdų charakteristikas, naudojamas centrinis bangų intervalo ilgis. Šis dydis nurodo bangų, išsidėsčiusių ties spektro juostos viduriu, ilgį.

2.1.7. paveiksle pavaizduotos dviejų palydovų ASTER (*Terra*) ir *Landsat* TM generuojamų duomenų spektro juostos bei jų išdėstymas elektromagnetinių bangų spektro dalyje. Matyti, kad spektrinis abiejų palydovų diapazonas skiriasi, kartu skiriasi ir spektrinė skiriamoji geba, ASTER (*Terra*) duomenų ji didesnė.



2.1.7. pav. Landsat TM ir Terra ASTER palydovų jutiklių spektrinės skiriamosios gebos ir spektro juostų palyginimas.

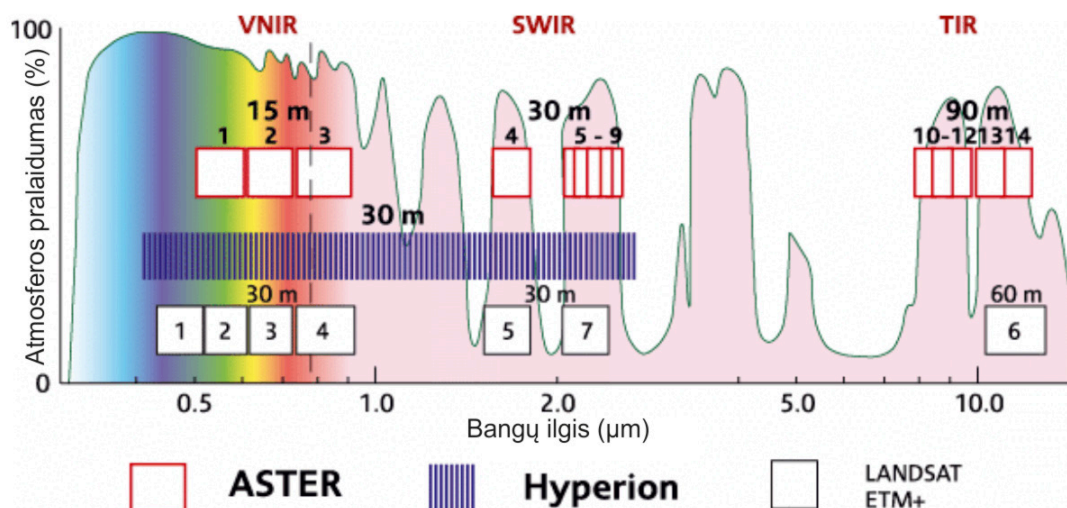


2.1.8. pav. Hiperspektrinių ir daugiaspektrių jutiklių spektrinė skiriamoji geba, spektrinis diapazonas ir juostų skaičius.

Pagal jutiklių kanalų ir juostų skaičių skiriami daugiaspektriaai ir hiperspektriniai optiniai prietaisai, o pagal jų plotį palydovų jutiklių kanalai skirstomi į plačiajuosčius ir siaurajuosčius. Hiperspektriniai jutikliai generuoja siaurajuosčius spektrinius duomenis, tačiau palydovai su daugiaspektriais jutikliais (turinčiais nuo kelių iki keliolikos spektrinių kanalų) dažnai fiksuoja vaizdus ir siaurose, ir plačiose spektro juostose. Daugiaspektriaai palydoviniai duomenys taip pat turi mažiau spektro juostų, dažnai jų skaičius varijuoja tarp 3 ir keliolikos ar keliasdešimtys. Pavyzdžiui, *Sentinel 2* daugiaspektris optinis jutiklis yra su dvylika kanalų, o spektrinė skiriamoji geba varijuoja tarp 15 ir 180 nm.

Hiperspektrinių palydovinių jutiklių vaizdams būdingas gerokai didesnis spektro juostų skaičius, o jų plotis (aprepiamas elektromagnetinės spinduliuotės bangų ruožas) yra siauresnis (2.1.8. pav.).

Puikus hiperspektrinių jutiklių, o kartu ir hiperspektrinių palydovinių duomenų pavyzdys yra palydovas EO-1 (misija tęsėsi 2000–2007 m.) ir jo jutiklis *Hyperion*. Šio jutiklio spektrinis diapazonas apėmė 0,4–2,5 μm, jutiklis Žemės paviršių fiksavo 242 spektro juostose, o jo spektrinė skiriamoji geba – 10 nm (2.1.9. pav.).



2.1.9. pav. Hiperspektrinio jutiklio *Hyperion* spektro juostų palyginimas su *ASTER* ir *Landsat ETM+* palydovų spektro juostomis (pagal Waldhof ir kt., 2008).

2.1.4. Radiometrinė skiriamoji geba

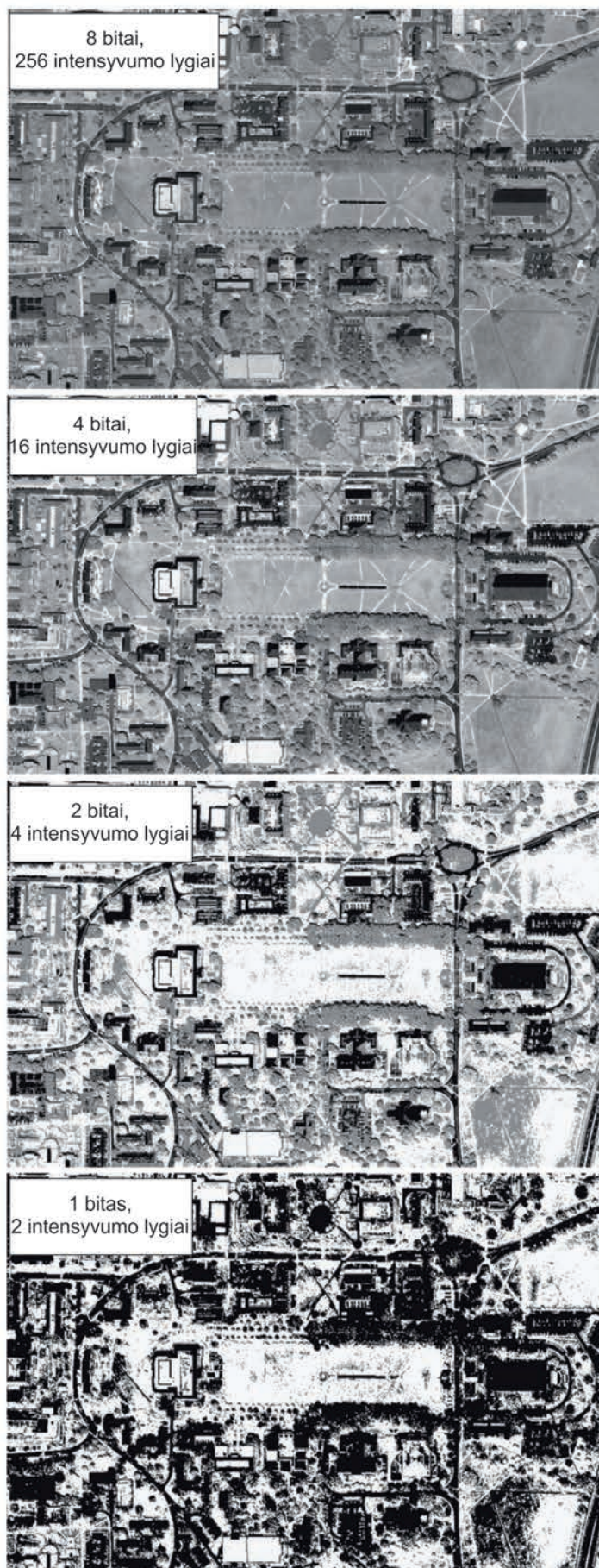
Radiometrinė skiriamoji geba, kalbant apie palydovinius duomenis, suvokiama kaip dydis, apibrėžiantis, kaip tiksliai palydovo jutiklis dalija ir išskaido gaunamą spinduliuotę kiekviename spektro juostoje. Kitaip tariant, radiometrinė skiriamoji geba apibūdina jutiklio jautrumą elektromagnetinei spinduliuotei. Optiniai palydovų jutikliai geba išskirti labai nežymius gaunamos spinduliuotės intensyvumo skirtumus, tad kuo didesnė radiometrinė skiriamoji geba, tuo didesnį spinduliuotės intensyvumo diapazoną jutiklis gali atskirti ir užregistruoti.

Tipiškai šis dydis išreiškiamas failo bitų skaičiumi. Senos kartos palydoviniuose duomenyse dažniausiai naudota 8 bitų failų kodavimo sistema. Naujesnės kartos palydovų duomenys (pavyzdžiui, palydovo *Landsat 8*) yra 16 bitų. Jei palydovo jutiklio duomenų failų formatas yra 8 bitų, duomenyse galimos $2^8 = 256$ pikselių intensyvumo reikšmės, o 16 bitų duomenys turės $2^{16} = 5\,536$ pikselių intensyvumo diapazoną. Žemiau pateiktame paveiksle pateikiamas 8, 4, 2 ir 1 bito vaizdų pavyzdys (2.1.10. pav.).

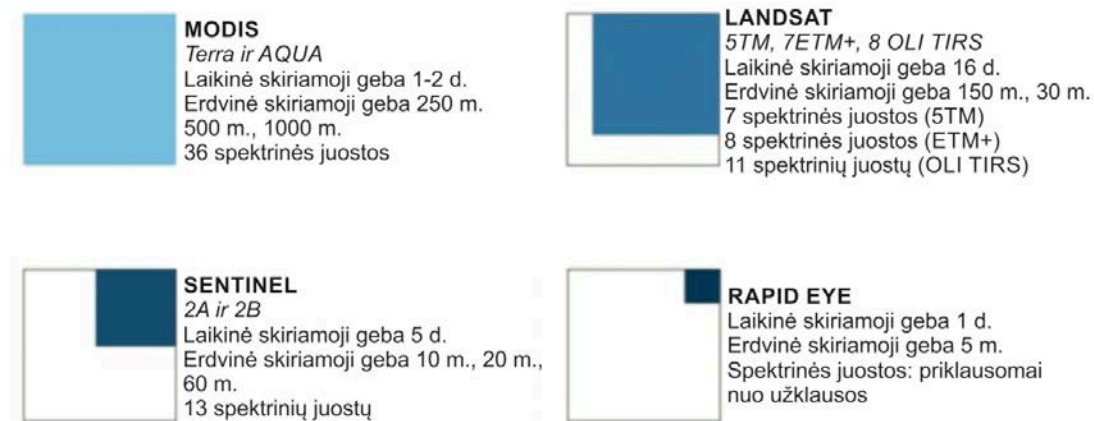
Akivaizdžiai matoma, kad didesnės radiometrinės skiriamosios gebos jutiklių duomenyse stebima didesnė pikselių ryškio įvairovė, gaunama ir detalesnė informacija apie jutiklį pasiekiančios nuo Žemės atspindėtos elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumą, jos skirtumus. Taip pat duomenys yra detalesni (2.1.10. pav.).

2.1.5. Laikinė skiriamoji geba

Laiko tarpas – tai periodas, reikalingas palydovui grįžti virš to paties orbitos taško, kitaip tariant, tai palydovo periodiškumo registruoti arba fiksuoti tą patį Žemės paviršiaus tašką, rodiklis. Palydovinių duomenų laikinė skiriamoji geba priklauso nuo palydovo skriejimo orbitos, jutiklio Žemės paviršiaus žvalgos juostos aprėpties, sąlygų fokusuoti jutiklį į paviršių. Pavyzdžiui, palydovams *Landsat* būdingas 16 dienų periodiškumas, jutiklių *MODIS* šis rodiklis artėja prie 1 paros, o *Sentinel 2* dviejų palydovų sistema tą patį Žemės paviršiaus tašką užfiksuoja maždaug kas 5 dienas (2.1.11. pav.).



2.1.10. pav. Skirtingos radiometrinės skiriamosios gebos vaizdų detalumo palyginimas (Merylando universiteto (JAV) teritorijos pavyzdys, pagal Piang, Li ir Wang, 2012).



2.1.11. pav. Skirtingų palydovų (MODIS, Landsat, Sentinel 2, Rapid Eye) duomenų laikinė ir erdvinė skiriamosios geba, spektro juostų skaičius (pagal Ciampitti ir kt., 2013).

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokie keturi skiriamosios gebos tipai apibūdina palydovinių vaizdų duomenų savybes?
- Kokios yra Žemės stebėjimo palydovinių vaizdų erdvinės raiškos kategorijos pagal vaizdų erdvinę skiriamąją gebą?
- Ką apibūdina radiometrinė skiriamoji geba?
- Kodėl palydovinių duomenų taikymui svarbi jų laikinė skiriamoji geba?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Baghdadi, N., Zribi, M. (eds) (2016). *Optical remote sensing of land surfaces*. Oxford: Elsevier.
- Campbell, J. B., Wynne, R., H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). New York: The Guilford Press.
- EOS (2019). *Satellite data: what spatial resolution is enough for you?* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: <https://eos.com/blog/satellite-data-what-spatial-resolution-is-enough-for-you>
- Liang, Sh., Li, X., Wang, J. (2012). *Advanced Remote Sensing. Terrestrial Information Extraction and Applications*. Academic Press.
- USGS (2020). *Landsat Missions. Landsat 7* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7>
- Waldhoff, G., Bubenzer, O., Bolten, A., Koppe, W., Bareth, G. (2008). Spectral analysis of aster, hyperion, and quickbird data for geomorphological and geological research in egypt (dakhla oasis, western desert). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, B8, 1201-1206.
- Wulf, H., Schaepman, M. (2015). *Grundlagen Fernerkundung - 8 Earth Resource Satellites*. University of Zurich [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: http://www.geo.uzh.ch/microsite/rsl-documents/teaching/BSc/geo123/2015/GEO123.1_Lecture_08_FS2015_EarthResourceSatellites_dp1220.pdf
- Ciampitti, I. A. *Using satellite data to help guide agronomic decisions* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: https://webapp.agron.ksu.edu/agr_social/m_eu_article.throck?article_id=1596&eu_id=249

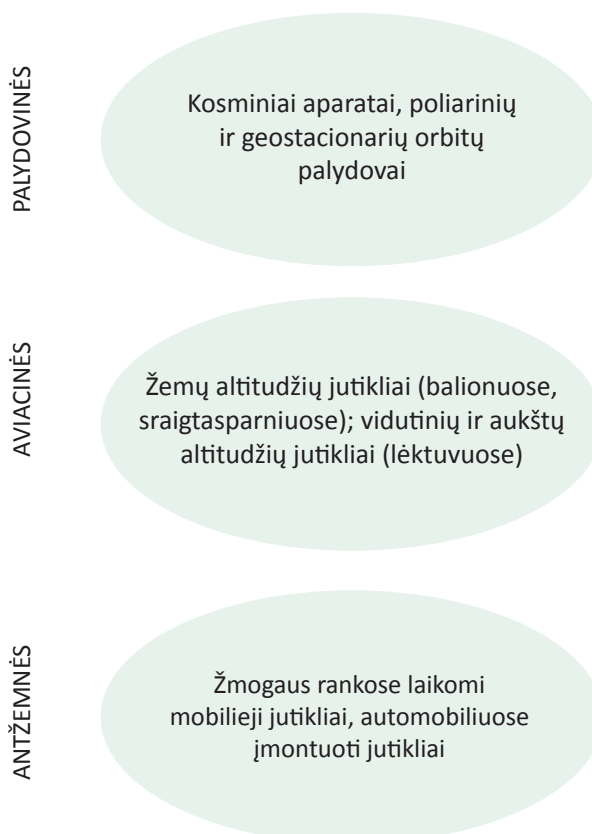
2.2. OPTINIAI JUTIKLIAI

2.2.1. Nuotolinių tyrimų platformos ir nuotolinių jutiklių tipai

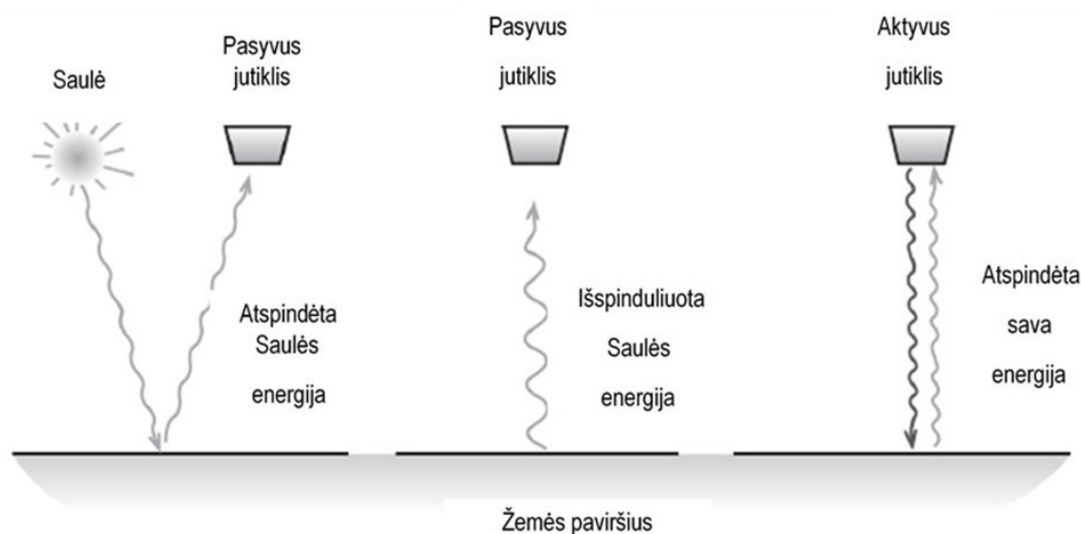
Nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai plačiąja prasme – tai informacijos gavimas ir registravimas prietaise (jutiklyje), nutolusiame nuo tiriamojo objekto ar reiškinių. Klimato pokyčiai, dykumėjimo procesai, miškų gaisrai, ledynų tirpimas, vandens tarša ir, be abejo, žemės dangos bei augalijos būklė – visa tai gali būti stebima dėl nuotolinių jutiklių, kurie aprėpia didžiulius Žemės plotus skirtinguose elektromagnetinės spinduliuotės ruožuose ir skirtingais laiko tarpniais. Visa tai leidžia nuotoliniams Žemės paviršiaus tyrimams būti viena iš labiausiai tinkamų kraštovaizdžio ir mus supančios aplinkos stebėsenos technologijų bei natūralių pavojų (pvz., nuošliaužų, miškų gaisrų, vulkanų išsiveržimų, žemės drebėjimų ir t. t.) prevencijos priemonių.

Priklausomai nuo aukščio virš Žemės, nuotolinių tyrimų platformos (2.2.1. pav.), kuriose yra įmontuoti jutikliai, gali būti: 1) antžeminės: nuotoliniai jutikliai įmontuoti automobiliuose; 2) aviacinės: žemų altitudžių jutikliai; aukštų altitudžių jutikliai; 3) palydovinės: kosminiai aparatai, poliarinių orbitų palydovai, geostacionarių orbitų palydovai. Kiekvienoje platformoje gali būti įmontuoti tiek pasyvieji, tiek aktyvieji nuotoliniai jutikliai.

Nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose Saulė veikia kaip natūralus elektromagnetinės spinduliuotės šaltinis. Pagal bendruosius elektromagnetinės spinduliuotės ir terpių dėsnius Saulės energija regimajame spektre gali būti atspindėta, sugerta ir pakartotinai išspinduliuota kaip šiluminė infraraudonoji spinduliuotė. Priklausomai nuo energijos šaltinio, kuris yra naudojamas nuotolinių tyrimų sistemose, skiriami du nuotolinių jutiklių tipai: 1) pasyvieji jutikliai, kurie matuoja natūraliai gaunamą energiją; 2) aktyvieji jutikliai, patys siunčiantys ir matuojantys grįžtantį signalą. Pastarieji jutikliai išspinduliuoja energiją, nukreiptą į Žemėje esantį tyrimo objektą. Spinduliuotė, atspindėta nuo objekto, yra užfiksuojama ir išmatuojama tuo jutikliu (2.2.2. pav.).



2.2.1. pav. Nuotolinių tyrimų platformos.



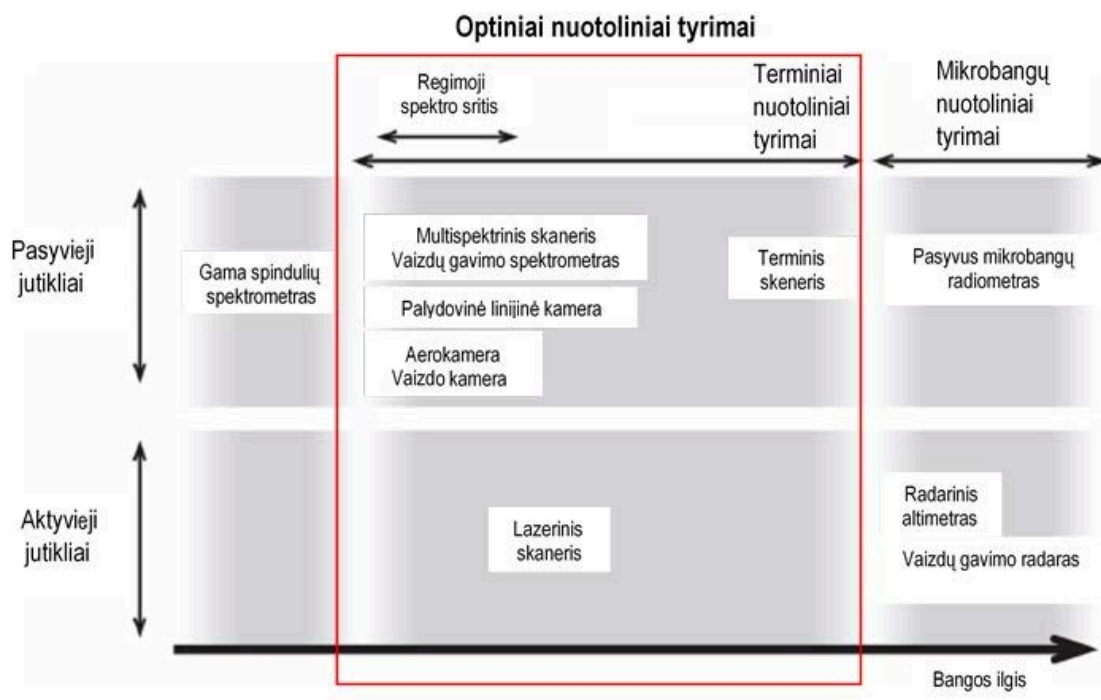
2.2.2. pav. Nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų jutiklių tipai ir jų matuojama elektromagnetinė spinduliuotė (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009)

Pasyvieji jutikliai gali būti naudojami tik natūraliai sklindančiai energijai fiksuoti. Visa atspindėta energija gali būti naudojama tik tuo metu, kai Saulė apšviečia Žemę. Naktį atspindėtos Saulės energijos nėra. Tokie jutikliai yra fotoaparatai, vaizdo kameros, daugiakanaliai optinių vaizdų formuotuvai, daugiakanaliai radiometrai, atmosferos cheminių junginių (ozono, anglies oksido ir dioksido, azoto dioksido, metano), temperatūros ir drėgmės matuokliai, magnetometrai, akcelerometrai ir kt.

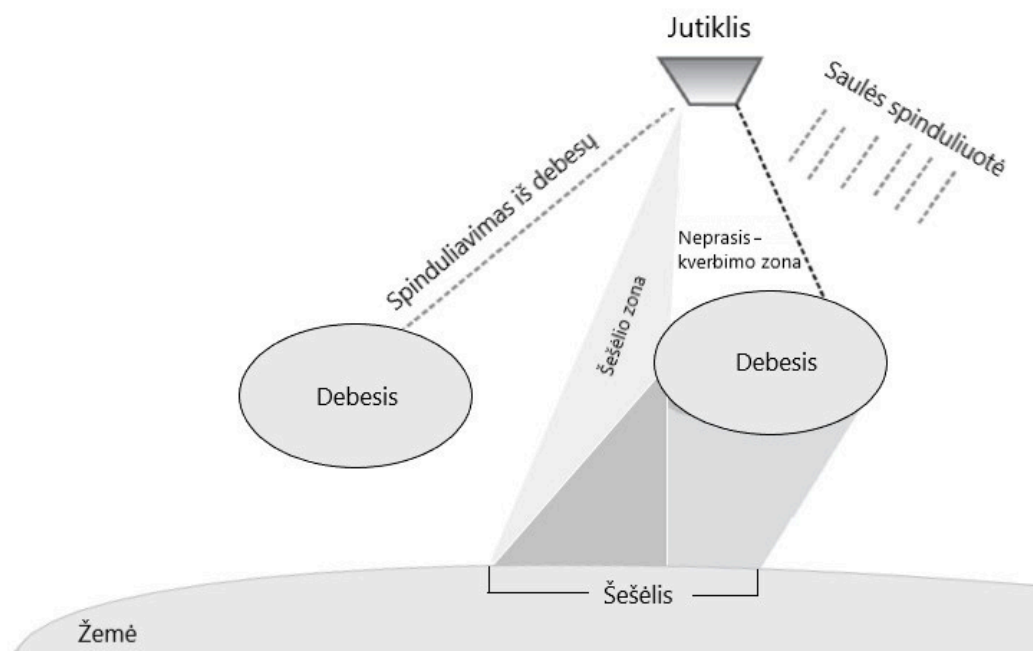
Natūraliai sklindžiama energija (pavyzdžiui, šiluminė infraraudonoji spinduliuotė, mikrobangos) gali būti fiksuojama dieną ar naktį, jei tik energijos kiekis pakankamai didelis, kad galėtų būti registruojamas. Šiluminę infraraudonąją spinduliuotę fiksuoja specialūs jutikliai (dažnai jie yra daugiaspektrių jutiklių variantas).

Aktyvieji jutikliai apšvietimui turi savo energijos šaltinį. Jutiklis skleidžia spindulius, nukreiptus į tyrinjamą objektą. Nuo objekto atsispindėjusį spinduliavimą jutiklis fiksuoja ir matuoja. Vienas iš aktyviųjų jutiklių pranašumų yra galimybė atlikti matavimus bet kuriuo metu, nepriklausomai nuo paros ar metų laiko. Aktyvieji jutikliai gali būti naudojami tirti tokio ilgio bangas, kurių Saulė tiekia nepakankamai, pavyzdžiui, mikrobangas. Kad tinkamai apšviestų objektus, aktyviosios sistemos turi generuoti pakankamai energijos. Aktyvieji jutikliai yra įvairios paskirties mikrobangų radarai, lidarai, altimetrai ir kt. Aktyviųjų jutiklių pavyzdžiai yra LIDAR (lazerinės sistemos) ir SAR (sintetinės apertūros radarų sistemos).

Bangų ilgis (spektrinė sritis), kurį jutiklis gali registruoti, priklauso nuo jutiklio tipo. Šiuolaikiniuose nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose naudojami įvairiausios konstrukcijos jutikliai, kurių veikimo principas, surenkamų duomenų kokybė ir pritaikymo galimybės skiriasi. Optiniuose nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose (2.2.3. pav.) daugiausia yra naudojami pasyvieji optiniai jutikliai. Jie yra aviaciniai arba palydoviniai bei atspindėtą nuo tiriamo objekto Saulės spinduliuotę fiksuoja regimosios šviesos bei artimosios infraraudonosios (angl. Near-infrared, NIR) ir trumpųjų bangų infraraudonosios spinduliuotės (angl. Short-wave infrared, SWIR) diapazonuose. Analizuodami atspindžio stiprumą galime įvertinti Žemės paviršiaus sąlygas, augalų, miškų, dirbamų laukų pasiskirstymą, upes, ežerus, užstatytas teritorijas. Optinių nuotolinių tyrimų trūkumai: 1) Žemę stebėti šiais jutikliais galima tik dieną; 2) debesys blokuoja atspindėtą Saulės šviesą, todėl signalas iš Žemės nepasiekia jutiklio ir nuotraukoje matome tik debesį (2.2.4. pav.).



2.2.3. pav. Nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų jutiklių tipai pagal spektrines sritis (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).



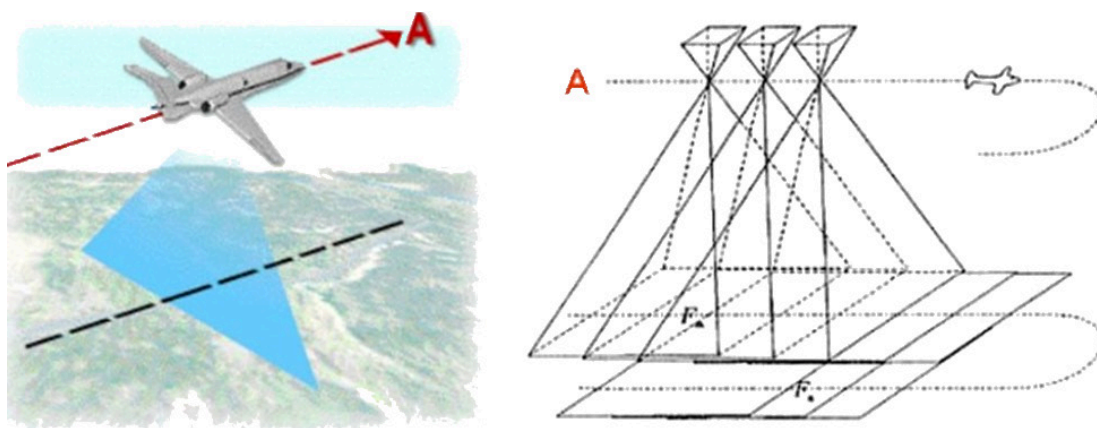
2.2.4. pav. Tiesioginis ir netiesioginis debesų poveikis optiniams nuotoliniams Žemės paviršiaus tyrimams (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009)

2.2.2. Regimojo spektro jutikliai

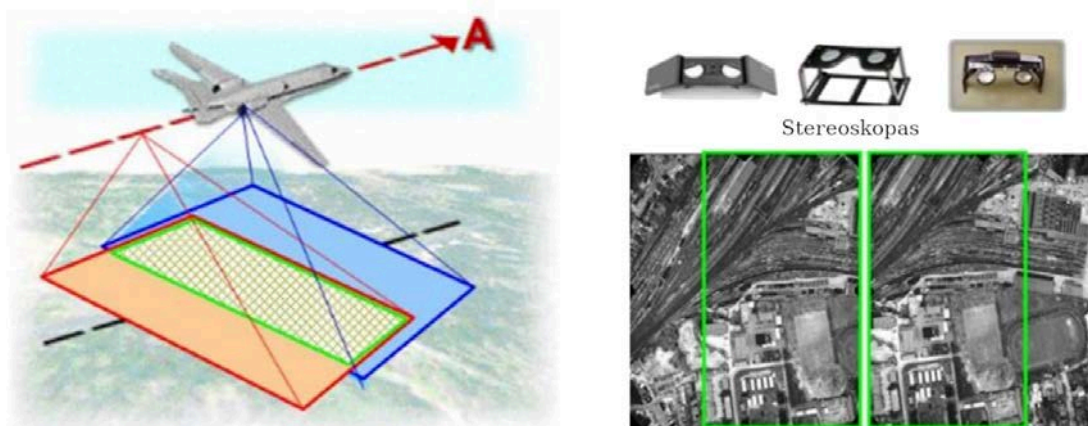
Aerofotokameros nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose naudojamos jau daugelį metų. Juostinės fotokameros (kadrinės, pagal vaizdo fiksavimo mechaniką) – tai kadrinės sistemos, fiksuojančios Žemės paviršiaus srities „momentines nuotraukas“. Kadangi nuotoliniuose Žemės paviršiaus tyrimuose naudojamų fotokamerų konstrukcija, paskirtis ir naudojimo sąlygos skiriasi nuo įprastinių fotoaparatus, jos vadinamos „aerofotoaparatais“. Tai seniausiai naudojamų jutiklių tipas, kuriais gaunamos aerofotografinės nuotraukos. Šių fotokamerų veikimo principas yra analogiškas žmogaus regėjimo mechanizmui. Kamerų sistemos naudoja objektyvą arba objektyvų sistemą (bendrai vadinamus „optika“) vaizdui formuoti židinio plokštumoje – plokštumoje, kurioje įdėta juosta ir registruojamas vaizdas. Šviesos filtrais yra reguliuojamas ant fokusavimo plokštumos patenkančios šviesos spektras. Šviesos filtras sugeria arba praleidžia tam tikro bangų ilgio diapazono elektromagnetinę spinduliuotę.

Yra du pagrindiniai aerofotografinių nuotraukų tipai: vertikalioji ir įstrižoji. Vertikaliosios yra tiksliausios žemėlapiams sudaryti, o įstrižosios labai patogios vaizdams dešifruoti. Darydamas vertikaliąją aerofotografinę nuotrauką lėktuvas paprastai skrenda lygiagrečiomis linijomis – maršrutais (2.2.5. pav.). Paprastai fotografuojama taip, kad nuotraukos iš dalies uždengtų viena kitą. Dvi iš eilės darytos aerofotografinės nuotraukos sudaro stereoporą, kuri leidžia toje dalyje, kur nuotraukos uždengia viena kitą, stebėti stereomodelį (2.2.6. pav.) Pavieniai vaizdai leidžia išmatuoti objekto (x , y) koordinates, o aerofotografinių nuotraukų stereoporos leidžia matyti trimačius modelius ir nustatyti bet kokio objekto, esančio toje dalyje, kur nuotraukos uždengia viena kitą, (x , y , z) koordinates. Nuotraukoms dešifruoti yra naudojamas specialus prietaisas – stereoskopas. Tai optinis prietaisas, per kurį stebint vieną atvaizdą kaire, kitą dešinė akimi abiejų atvaizdų bendri taškai sutampa stebėtojo akių ašių sankirtoje, todėl matomas vienas erdvinis daikto atvaizdas.

Tipinė aerofotografinė nuotrauka yra **panchromatinis** (arba vėliau – spalvotas) kvadratinis $9'' \times 9''$ (23×23 cm) vaizdas. Jos daugiausia yra naudojamos topografiniam kartografavimui, sudarant kadastrinius planus, urbanistiniam planavimui taikant ortofotografinius žemėlapius ir t. t. (2.2.7. pav.).



2.2.5. pav. Darydamas vertikaliąją aerofotografinę nuotrauką lėktuvas skrenda lygiagrečiomis linijomis (pvz.: maršrutas A) ir fotografuoja Žemės paviršius taip, kad nuotraukos iš dalies uždengtų viena kitą. Dvi iš eilės darytos, persidengiančios aerofotografinės nuotraukos sudaro stereoporą, kuri leidžia sudaryti stereomodelį (Mozgeris ir kt., 2015).



2.2.6. pav. Aerofotografinių nuotraukų stereoporos. Kad būtų matomas geriausias stereoskopinis vaizdas, nuotraukos paprastai (paveikslėlyje – oranžinė ir mėlyna spalva) išilgai viena kitą uždengia 60 % vaizdo ploto skrydžio kryptimi (pvz., maršrutas A); skersai (šoninis) – dažniausiai 20–40 %. Dešinėje – stereoskopas ir per jį matoma vienas kitą uždengiančių vaizdų pora, kuri sudaro stereomodelį (Mozgeris ir kt., 2015).



1998 m. ortofonotrauka, Lietuva



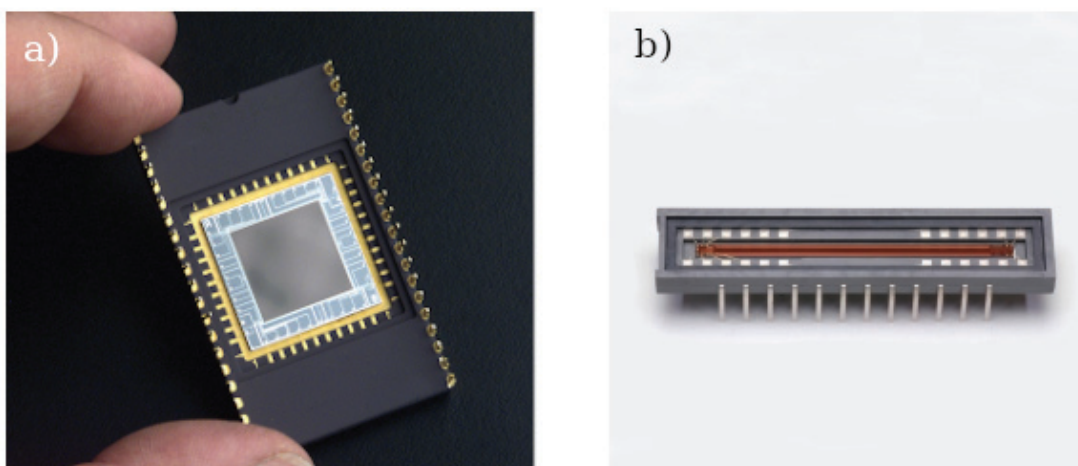
2013 m. ortofonotrauka, Lietuva

2.2.7. pav. Aerofotografinių nuotraukų panaudojimas miškų kaitos tyrimams (nuotraukos iš geoportal.lt)

Skaitmeninės aerokameros – tai skaitmeninėmis kameromis grindžiamos jutiklių sistemos. Vaizdo nuskaitymas vietoje filmo juostos čia yra grindžiamas elektroniniu detektoriumi – vadinamuoju krūvio sąsajos įtaisu (angl. Charge-Coupled Device, CCD). Šis įtaisas gali būti arba linijinis, arba kvadratinis (2.2.8. pav.). Atitinkamai galime kalbėti apie linijines kameras ir kadrines kameras. Mažo formato skaitmeninė kadrinė kamera turi vieną keturkampį lustą ir yra labai panaši į vaizdo kamerą. Lustas (2.2.8. pav. a) turi 3 kanalus – po vieną kiekvienai pirminei spalvai (raudonai, žaliai, mėlynai). Jis yra sudarytas iš 3 CCD prietaisų. Kiekvienas jų turi savo spalvotą filtrą, kuris praleidžia tik vieną norimą bangos ilgį. Linijinis lustas (2.2.8. pav. b) taip pat turi 3 kanalus. Šios skaitmeninės aerokameros neužkariavo rinkos taip sėkmingai kaip skaitmeninės kameros.

Skaitmeninės vaizdo kameros taip pat yra naudojamos Žemei stebėti, kai norima gauti mažai kainuojančius (taip pat ir mažos skiriamosios gebos) vaizdus. Jie gali būti panaudojami suteikti bendrą informaciją apie vietovę, kurioje atlikti matavimai naudojant lidarą. Vaizdo kameros yra naudingos renkant operatyvius ir nebrangius duomenis, tačiau jų erdvinė skiriamoji geba mažesnė už tradicinės fotografinės ar skaitmeninės nuotraukos. Jos taikomos

stichinėms nelaimėms (gaisrams, potvyniams) kontroliuoti, derliui ir ligoms vertinti, pavojui aplinkai kontroliuoti, jas naudoja policija stebėjimams vykdyti ir kt. Vaizdo įrašymui naudojamos kameros fiksuoja spinduliuotę regimojoje, artimoje infraraudonojoje (NIR) ir kartais viduriniojoje infraraudonojoje (MIR) elektromagnetinių bangų spektro dalyse. Naudojant aviacines platformas renkami vaizdo duomenys rašomi į kasetę ir gali būti iškart peržiūrėti. Skaitmeninės vaizdo technologijos taip pat sparčiai tobulėja ir atveria dideles topografijos ir stebėjimo galimybes.

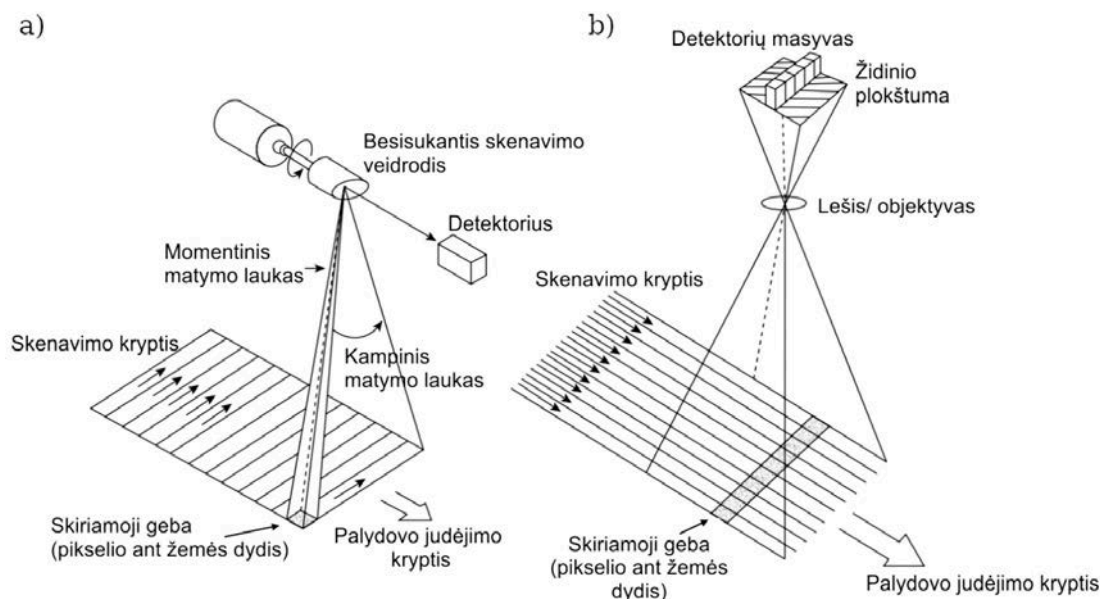


2.2.8. pav. Du CCD (krūvio sąsajos įtaisai): a) RGB detektorius (3 kanalai – po vieną kiekvienai pirminei spalvai (raudonai, žaliai, mėlynai); b) linijinis detektorius (Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

Palydovinės linijinės kameros pasižymi labai panašiomis savybėmis. Jos registruoja visoje juostoje esantį elektromagnetinį intensyvumą vienu akimirksniu visu detektorių masyvu. Skaitmeniniai fotoaparatai vaizdą gali fiksuoti veikdami kadriniu principu, tačiau sudėtingesnės skaitmeninės nuotolinių tyrimų sistemos vaizdą skenuoja. Tokiose skenavimo sistemose įrengiamas jutiklis, slenkantis virš vietovės ir formuojantis dvimatį paviršiaus vaizdą. Naudojami du skenavimo režimai (metodai): skenavimas išilgai kelio ir skenavimas skersai kelio.

Skenuojantys išilgai kelio jutikliai registruoja iš eilės einančias paviršiaus juostas ir suformuoja dvimatį vaizdą, statmeną palydovo skriejimo kryptį. Čia vietoje skenavimo veidrodžio naudojamas linijinis detektorių masyvas, esantis objektyvų sistemos formuojamo vaizdo židinio plokštumoje, kuri „stumiamą“ skrydžio kelio kryptimi (t. y. išilgai kelio). Kiekvienas atskiras detektorius matuoja paviršiaus atspindėtą ar išspinduliuotą elektromagnetinę spinduliuotę. Pirmasis palydovas, panaudojęs linijines kameras, buvo 1986 m. paleistas SPOT 1. Linijinė kamera suformuoja skaitmeninį teritorijos vaizdą linija po linijos (2.2.9. pav. b).

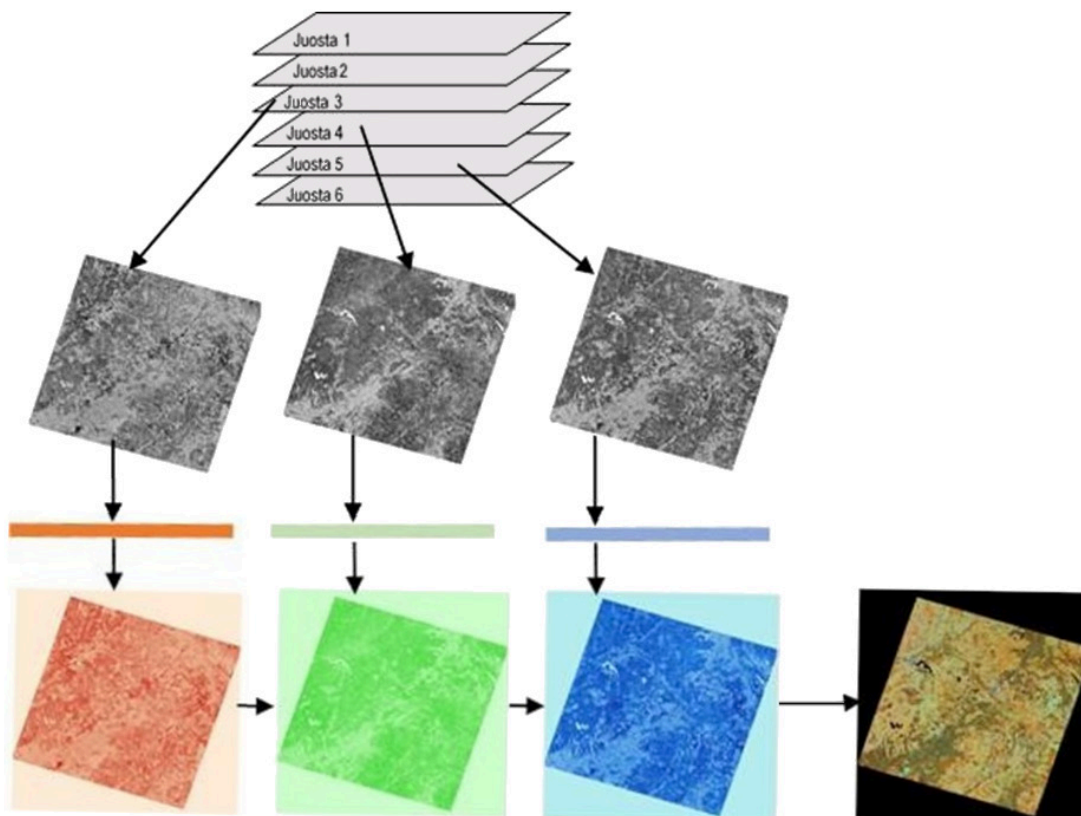
Skenuojantys skersai kelio jutikliai registruoja iš eilės einančias Žemės paviršiaus juostas, kurios nukreiptos skersai jutiklio platformos judėjimo krypties (2.2.9. pav. a). Kiekviena eilutė skenuojama nuo vienos jutiklio pusės iki kitos, naudojant sukamąjį skenavimo veidrodį. Platformai judant pirmyn virš Žemės, iš eilės einančios skleistinės eilutės suformuoja dvimatį Žemės paviršiaus vaizdą. Ši sistema naudojama daugiaspektriuose skeneriuose (pvz., *Land-sat MSS 1-5*), kurie yra labiausiai paplitę palydovuose ir kituose erdvėlaiviuose. Pagrindinis jų skirtumas nuo palydovinių linijinių kamerų yra optinė sistema: jie naudoja judantį veidrodį „nuskenuoti“ liniją (t. y. siaurą Žemės juostelę) bei vieną detektorių užuot registravę visoje juostoje esantį elektromagnetinį intensyvumą vienu akimirksniu visu detektorių masyvu.



2.2.9. pav. Palydovų jutiklių paviršiaus skenavimo būdai: a) skersai ir b) išilgai palydovų skriejimo trajektorijos (pagal Kang, Pan ir kt., 2017).

Daugiaspektriai skeneriai registruoja atspindėtą elektromagnetinę spinduliuotę daugiau kaip vienoje elektromagnetinių bangų ilgio juostoje. Tam gali būti naudojamos keletu objektyvų sistemos su skirtingais juostų ir filtrų deriniais, optinės prizmės, išsklaidančios elektromagnetinę spinduliuotę pagal skirtingus bangų ilgius, kuriuos fiksuoja atskiri detektorių masyvai ir pan. Taigi, daugiaspektrių nuotolinių tyrimų pagrindinis bruožas ir šio tipo kamerų privalumas yra jų galimybė registruoti atspindėtą energiją atskirais diskrečiais bangų ilgių ruožais (taip geriau išskiriami ir identifikuojami įvairūs objektai). Tačiau tokią daugybę nuotraukų analizuoti vienu metu gali būti problemiška. Todėl daugiaspektrių vaizdų naudojimas ir analizė remiasi spalvų sudėties ir skaidymo savybėmis. Žmogaus regimos spalvos yra trijų pagrindinių spalvų – raudonos, žalios ir mėlynos – derinys. Visos kitos spalvos sudaromos įvairiu santykiu derinant pagrindines. Spalvoti vaizdai gali būti išskaidyti į tris atskirus monochromatinius vaizdus, kuriuose fotografinio atspalvio tankis atitinka energijos kiekį užregistruotą ties regimosios spinduliuotės raudonos, žalios ir mėlynos spalvos bangų ilgiais. Iš kitos pusės, užregistravus raudonos, žalios ir mėlynos spalvos elektromagnetinę energiją kaip tris atskirus vaizdus ir juos sujungus naudojant atitinkamus spalvų filtrus, šios trys pagrindinės spalvos sudarys pilną spalvotą vaizdą (2.2.10. pav.).

Mes matome spalvas, nes mūsų akys fiksuoja visą regimąją spinduliuotę, o mūsų smegenys apdoroja informaciją kaip skirtingas spalvas. O kaip atrodytų pasaulis, jei galėtume matyti tik labai siaurus bangų ilgių arba spalvų intervalus? Būtent taip veikia dauguma jutiklių. Jutiklio sistemos surenkama ir saugoma siauro bangų ilgio intervalo informacija yra vadinama spektro juosta arba kanalu. Skirtingose juostose esančią informaciją apie spinduliuotės intensyvumą (t. y. Žemėje esančių objektų charakteristikas) mes galime derinti ir rodyti skaitmeniniu būdu, panaudodami tris pirmines spalvas (raudoną, žalią ir mėlyną). Tokiu būdu kiekviename kanale esanti informacija yra pateikiama kaip viena iš pirminių spalvų ir pagal kiekviename atitinkamo kanalo vaizdo elemente esantį santykinį šviesumą (t. y. skaitmeninę reikšmę) įvairiomis proporcijomis derinant pirmines spalvas atvaizduojamos skirtingos spalvos. Šiuolaikiniai nuotoliniai jutikliai gali fiksuoti elektromagnetinį spinduliuotimą nuo vos vieno iki šimtų diapazonų, tačiau sudarydami spalvų kombinacijas mes galime naudoti tik tris pagrindines spalvas. Kuo daugiau jutiklyje kanalų, tuo didesnis spalvų kombinacijų skaičius. Jei kanalui pritaikyta spalva atitinka jo spektrinę zoną, tokia kombinacija sukuria „tikrų spalvų“ vaizdą. Maišant tris pagrindines spalvas ir kanalus generuojami įvairūs pseudospalviniai, arba netikrų spalvų, deriniai (2.2.11. pav.).



2.2.10. pav. Užregistravus raudonosios, žaliosios ir mėlynosios sričių elektromagnetinę energiją kaip tris atskirus vaizdus ir juos sujungus naudojant atitinkamus spalvų filtrus, šios trys pagrindinės spalvos sudarys visą spalvotą vaizdą (*Landsat 7* palydovas, 1999 m. liepos 10 d.).



2.2.11. pav. Panchromatinių (A), natūralių (B) ir netikrų (C) spalvų deriniai naudojant palydovo *Sentinel 2* vaizdą, gautą 2019 m. liepos 20 d.

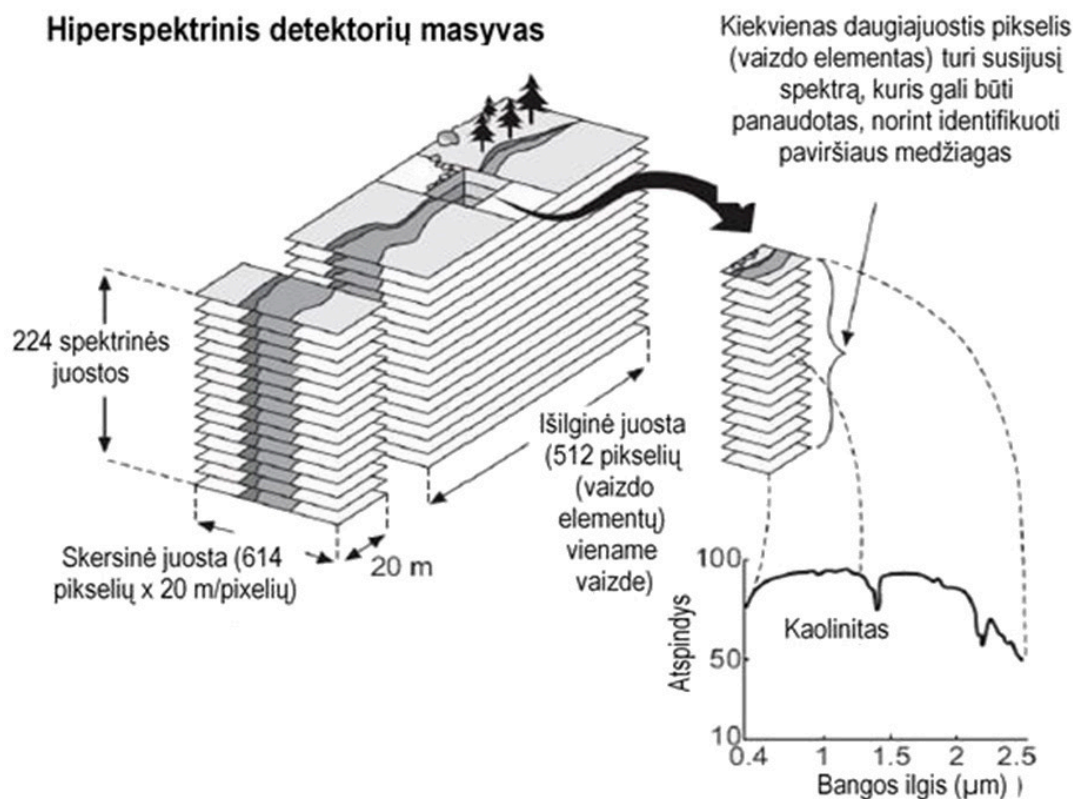
2.2.1. lentelė. Kai kurios šiuo metu dirbančios palydovinės vaizdo gavimo spektrometru sistemos (Fundamentals of Remote Sensing, 2009).

JUTIKLIS	GAMINTOJAS	SPEKTRO JUOSTA (nm)	JUOSTŲ SKAIČIUS	JUOSTOS PLOTIS (nm)
Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)	NASA (US)	400–2500	224 juostos	10
The Airborne Imaging Spectrometer (AISA)	SPECIM (Suomija)	430–900	288 juostos	1,63–9,8
Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)	ITRES (Kanada)	400–870	288 juostos	1,9
Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS)	Geophysical Environmental Research Corporation (JAV)	500–12300	79 juostos	15–2000
Hyperspectral Mapper (HyMAP)	Integrated Spectronics (Australija)	400–2500	126 juostos	10–20
Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer (MIVIS)	SenSyTech, Inc. (JAV)	430–12700	102 juostos	8–500
Reflectance Optics System Imaging Spectrometer (ROSIS)	Dornier Satellite Systems (Vokietija)	430–850	84 juostos	5

Hiperspektriniai skeneriai su skenuojančiu veidrodžiu (2.2.1. lentelė). Hiperspektrinio skenavimo technologija grindžiama vienu elektromagnetinių bangų jutikliu, kuris suderintas su šviesos prizme, difrakcine gardele ir specialiu lęšiu išskaido šviesą į labai platų elektromagnetinių bangų diapazoną ir fiksuoja kelis šimtus labai siaurų elektromagnetinių bangų spektro juostų (0,01 μm ir dar siauresnes) (2.2.12. pav.). Tokie skeneriai registruoja informaciją pradedant ultravioletine spektro dalimi (bangų ilgis nuo 0,2 μm) ir baigiant ilgabange infra-raudonąja spektro dalimi (bangų ilgis iki 15 μm). **Šiluminiai jutikliai** 2.2.3. pav. schemeje yra pridėti prie optinių jutiklių patogumo dėlei, bet iš tiesų jie yra atskiri prietaisai bei gali būti daugiaspektrių radiometrų komponentai.

Lazeriniai skeneriai (arba lidarai) yra aktyvieji optiniai jutikliai – tai skenuojantis lazerinių toliamačių ir lazerinių altimetrų variantas. Jie matuoja atstumą nuo lazerinio jutiklio iki daugelio tiriamojo paviršiaus taškų (pvz., 150 000 taškų / s). Lidaras skleidžia lazerio šviesos impulsus ir fiksuoja nuo objekto atsispindėjusią energiją. Laikas, kurio energijai reikia objektui pasiekti ir grįžti iki jutiklio, apibrėžia atstumą tarp jų dviejų. Lidarai efektyviai panaudojami matuojant elementų, pavyzdžiui, pastatų arba miško lajos aukštį nuo Žemės paviršiaus ir vandens gylį nuo vandens paviršiaus (lazeriniu profilometru). Dažnai aviacinis lazerinis skenavimas taikomas norint sudaryti didelės skiriamosios gebos skaitmeninius reljefo modelius (angl. Digital Elevation Model, DEM) ir skaitmeninius vietovės modelius (angl. Digital Terrain Model, DTM). Žinoma, skaitmeninius reljefo modelius taip pat galima sudaryti iš nuotraukų ir panašių panchromatinių

vaizdų. Tačiau dėl lazerinio spinduliavimo savybių aviacinis lazerinis skenavimas gerokai pranašesnis tankia augalija apaugusiose vietovėse, smėlio dykumose ir pajūrio teritorijose. Nuotolinių stebėjimų duomenimis sudaryti skaitmeniniai paviršiaus modeliai naudojami skaičiuojant miškų biomasę, registruojant potvynius, sudarant urbanizuotų teritorijų 3D modelius ir t. t.



2.2.12. pav. Detektorių konfigūracija hiperspektrinių vaizdų gavimo sistemose.

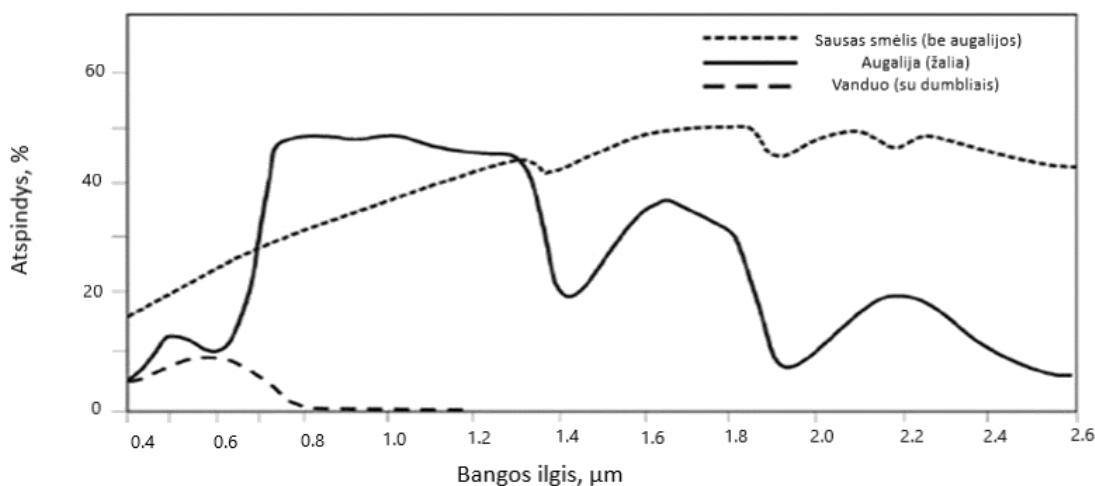
Hiperspektrinio skenavimo technologija grindžiama vienu elektromagnetinių bangų jutikliu, kuris suderintas su šviesos prizme difrakcine gardele ir specialiu lęšiu išskaido šviesą į labai platų elektromagnetinių bangų diapazoną ir fiksuoja kelis šimtus labai siaurų elektromagnetinių bangų spektro juostų (0,01 mikrometras ir dar siauresnes). Tokie skeneriai registruoja informaciją pradedant ultravioletine spektro dalimi (bangų ilgis nuo 0,2 mikrometrų) ir baigiant ilgabange infraraudonąja spektro dalimi (bangų ilgis iki 15 mikrometrų) (pagal Jensen, 2007).

2.2.3. Optinių nuotolinių tyrimų klasifikacija

Tiriamą paviršiumi spinduliuotė yra matuojama naudojant „spektrų juostas“ (ne vieną konkretų bangos ilgį). Spektrų juosta (arba bangų ilgių juosta) yra elektromagnetinių bangų spektro intervalas, kuriam jutiklio detektorius yra jautrus. Tokie jutikliai kaip panchromatinė kamera, radaras ar lazerinis skeneris matuoja tiksliai vienoje specifinėje juostoje. O daugiaspektrinis skeneris ar skaitmeninė kamera matuoja keliose spektrinėse juostose tuo pačiu metu. Daugiaspektriniai jutikliai turi kelis „kanalus“ (tai jutiklio komponentas, skirtas tam tikrai spektro juostai). 2.2.13. pav. yra parodytos spektrinio atspindžio kreivės kartu su kai kurių jutiklių, esančių palydovuose, spektro juostomis. Elektromagnetinės spinduliuotės fiksavimas tuo pačiu metu keliose spektro juostose leidžia susieti skirtingus tiriamo paviršiaus ypatumus, kurie gerai išryškėja specifinėse spektro juostose. Pvz., atspindžio charakteristikos spektro juostoje nuo 2

iki 2,4 μm (kaip fiksuoja *Landsat-5 TM* 7 kanalas) suteikia mums informaciją apie mineralinę dirvožemio sudėtį. Sujungtos charakteristikos raudonojoje ir NIR juostose (iš *Landsat 5 TM* 3 ir 4 kanalų) suteikia informaciją apie biomasę ir augalijos būklę.

Taigi, optiniai nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai yra klasifikuojami pagal spektro juostų, kurios yra naudojamos norint gauti paviršiaus vaizdą, kiekį: 1) panchromatinė vaizdo gavimo sistema (1 juosta); 2) daugiaspektrė vaizdo gavimo sistema (3–10 juostų); 3) superspektrinė vaizdo gavimo sistema (10–50 juostų); 4) hiperspektrinė vaizdo gavimo sistema (50–300 juostų).



Terra Aster	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Landsat-5 TM	1	2	3	4	5	7			
Landsat MSS	1	2	3	4					
SPOT XS	1	2	3	4					
SPOT PAN	P								

2.2.13. pav. Spektrinio atspindžio kreivės ir kai kurių daugiaspektrių jutiklių spektro juostos: *Terra Aster* (juostos: 1 – žalia, 2 – raudona, 3 – NIR; 4-9 – SWIR); *Landsat 5 TM* (juostos: 1 – mėlyna, 2 – žalia, 3 – raudona, 4 – NIR, 5 – SWIR (1), 7 – SWIR (2)); *Landsat MSS* (juostos: 1 – žalia, 2 – raudona, 3 – NIR, 4 – NIR); *SPOT XS* (juostos: 1 – žalia, 2 – raudona, 3 – NIR, 4 – IR); *SPOT PAN* (juostos: P – panchromatinė) (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009)

1. Panchromatinė vaizdų gavimo sistema. Jutiklis yra vieno kanalo detektorius, jautrus spinduliavimui plačiame bangų diapazone. Jeigu bangų ilgis sutampa su regimuoju spektru, gaunamas vaizdas yra panašus į nespaltvotą fotografiją. Kiekybiškai yra išmatuojama tiriamųjų paviršių šviesa. Spektrinė informacija, arba „spalva“, yra prarandama. Tokie jutikliai (kamos su panchromatinio filmu arba palydovai su elektroniniu jutikliu, turinčiu panchromatinę kanalą (*SPOT PAN* arba *WorldView 1*) registruoja plačios spektro juostos (apimančios visą regimąją elektromagnetinių bangų spektro aprėptį) spinduliavimo intensyvumą (plotis – keli šimtai nanometrų). Tokios juostos priimamų signalų diapazonas labai platus, t. y. ji gali fiksuoti visas regimojo elektromagnetinių bangų spektro spalvas. Kitaip tariant, spektro juosta yra suformuojama panaudojant visą regimosios spinduliuotės energiją (užuot ją skaidžius į skirtingus ruožus). Galutiniame vaizde (nuotraukoje) kiekvienam pikseliui yra suteikiama intensyvumo reikšmė, kuri išreiškiama nespaltvotoje skalėje. Kiekviename panchromatinio

vaizdo pikselyje esanti informacija yra tiesiogiai susijusi su bendru saulės spinduliavimo intensyvumu, atspindėtu nuo tiriamųjų objektų bei užfiksuotu palydovo jutiklyje. Dėl didelio saulės spinduliuotės kiekio, tenkančio kiekvienam pikseliui, panchromatiniai jutikliai / detektoriai gali užfiksuoti labai smulkius erdvinius pokyčius (piksely dydis) lyginant su daugiaspektriais detektoriais.

Pavyzdys (2.2.14. pav.). SPOT (pranc. System pour l'observation de la Terre) – tai Prancūzijos, Švedijos ir Belgijos vyriausybės konsorciui priklausantys palydovai. SPOT 1 buvo paleistas 1986 m. SPOT 1 buvo topografinio kartografavimo revoliucija, nes jame veikianti pirma CCD linijinė kamera iš kosmoso pateikė didelės erdvinės skiriamosios gebos skaitmeninius žemėlapius, kuriuos buvo galima derinti su „skenuoju skersai kelio“, norint gauti stereovaizdus. Tuomet 10 m panchromatinė erdvinė skiriamoji geba tapo pirmą kartą prieinama civiliniuose nuotoliniuose tyrimuose. 1998 m. buvo paleistas žymiai patobulintas SPOT 4. Jo HRVIR jutiklis turėjo 4 (vietoje 3) spektro juostas ir jutiklį VEGETATION. Jis buvo sukurtas dažnai (tą pačią teritoriją aplanko kas 1–2 dienas) ir tiksliai stebėti žemės dangą globaliu mastu (skiriamoji geba – 1 km). Kai kurie VEGETATION duomenys yra laisvai prieinami per ESA ir jos partnerių duomenų platformas. SPOT 5 buvo paleistas 2002 m. gegužės mėn. Jo erdvinė skiriamoji geba yra didesnė: du HRV jutikliai (SPOT 5) turi penkis kanalus, kurie aprėpia spektro juostas nuo 0,48 iki 1,75 μm . SPOT juda Saulės sinchronine orbita kaip ir palydovai *Landsat* bei *Terra*. Skirtingai nuo *Landsat 7* ETM+, SPOT gali pateikti stereovaizdus. Skirtingai nuo palydovo *Terra* ASTER, palydovo SPOT stereovaizdai yra žymiai didesnės erdvinės skiriamosios gebos, t. y. 2,5 m (panchromatinis vaizdas). SPOT kaip ir *Landsat* ir ASTER duomenys yra naudojami, pvz., jūrų stebėsenai, kai reikia didelės erdvinės skiriamosios gebos vaizdų. Pirminis panaudojimas yra vidutinio mastelio topografiniam kartografavimui. Palydovo SPOT 5 ypatumas tas, kad jame yra trečia kamera, panchromatinis HRS prietaisas, kuris tuo pačiu metu daro stereovaizdus. Neapdoroti duomenys nėra prieinami, jie išimtinai naudojami itin tiksliais skaitmeniniams vietovės modeliams sudaryti (DTM).

Pavyzdys (2.2.15. pav.). *Ikonos* buvo pirmas visiškai komercinis „labai didelės skiriamosios gebos palydovas“, sukurtas pagal SPOT koncepciją. *Ikonos* (iš gr. *eikōn* – „atvaizdas“) taip pat buvo pirmasis palydovas, pateikiantis skirtingais lygmenimis geometriškai apdorotus nuotolinius duomenis, norint praplėsti nuotolinių duomenų naudotojų ratą (pritaikyti verslui ir turizmui). 2000 m. panchromatiniai vaizdai su 1 m skiriamąja geba buvo visiška naujiena. Skirtingai nuo SPOT, *Ikonos* ir jo koncepcijos tęsėjas *QuickBird* turi galimybę rinkti informaciją bet kuria kryptimi – skenuoja ir išilgai, ir skersai kelio. Viena iš pirmųjų *Ikonos* užduočių buvo surinkti informaciją apie visus didžiausius JAV miestus. *Ikonos* duomenys gali būti naudojami topografinio kartografavimo tikslams (iki 1:10 000) ir topografinių duomenų bazėms atnaujinti.

2. Daugiaspektrė vaizdų gavimo sistema. Prietaisas yra jutiklis su daug kanalų ir su keliomis spektro juostomis (2.2.16. pav.). Kiekvienas kanalas yra jautrus elektromagnetiniai spinduliuotei siaurame bangų ilgio intervale. Rezultatas – daugiasluoksnis vaizdas, kuris teikia tiek šviesumo, tiek spektrinę (spalvos) informaciją apie tyrinėjamus paviršius. Daugiaspektriai duomenys yra gaunami panaudojant siauras juostas (daugiausia – 40–100 nm pločio, nors dažniausiai pločio specifikacijos priklauso nuo konkretaus jutiklio). Dažniausiai yra 3–10 juostų. Tiek didelės skiriamosios gebos jutikliai, turintys tik 4 juostas (mėlyną, žalią, raudoną ir artimąją infraraudonąją (NIR)), tiek jutikliai, tokie kaip *Landsat 7* ETM ar *Landsat 8* OLI yra daugiaspektriai. Dauguma komercinių Žemės stebėjimo palydovų, tokie kaip *Landsat*, SPOT, *RapidEye* ir *Worldview 2* ir 3, suformuoja daugiaspektrius vaizdus iš regimojo ir infraraudonojo elektromagnetinių bangų spektro diapazonų.

SPOT HRV JUTIKLIO CHARAKTERISTIKOS

	Daugiaspektris režimas (XS)	Panchromatinis režimas (P)
Apžvalgos kampas	4,13°	4,13°
Nadyro vaizdas	20 m × 20 m	10 m × 10 m
Pikseliai linijoje	3000	6000
Žemės skenavimo juosta	60 km	60 km

HRV SPEKTRO JUOSTOS

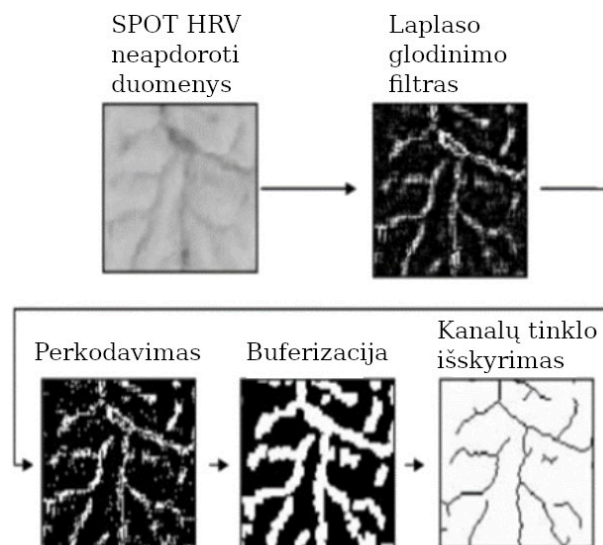
Režimas	Spekto juosta	Bangos ilgis (µm)	Skiriamoji geba (m)
Daugiaspektris	XS1	0,50–0,59 (žalia)	20
Daugiaspektris	XS2	0,61–0,68 (raudona)	20
Daugiaspektris	XS3	0,79–0,89 (artimoji infraraudonoji)	20
Panchromatinis	P	0,51–0,73 (regimoji)	10

SPOT HRV IR JUTIKLIO SPEKTRO JUOSTOS

Daugiaspektris	XI1	0,50–0,59 (žalia)	20
Daugiaspektris	XI2	0,61–0,68 (raudona)	20
Daugiaspektris	XI3	0,79–0,89 (artimoji infraraudonoji)	20
Daugiaspektris	XI4	1,53–1,75 (trumpų bangų infraraudonoji)	20
Daugiaspektris	M	0,61–0,68 (raudona)	10

VEGETATION JUTIKLIO SPEKTRINĖS JUOSTOS

	0,43–0,47 (mėlyna)
	0,61–0,68 (raudona)
	0,78–0,89 (artimoji infraraudonoji)
	1,58–1,75 (trumpų bangų infraraudonoji)



2.2.14. pav. Jutiklių SPOT HRV, HRVIR ir VEGETATION charakteristikos ir kanalų tinklo išskyrimo procedūros iš SPOT HRV panchromatinių duomenų (pagal Svoray, 2004).

IKONOS ORBITA

Tipas	Saulės sinchroninė orbita
Altitudė	681 km
Polinkis	98,1°
Besileidžiančios orbitos mazgo kirtimo laikas	10.30 val. vietos laiku
Periodas	98 min.
Greta nadyro esančio taško aplankymo laikas	1,5–2,9 dienos, 40° platuma

JUTIKLIO CHARAKTERISTIKOS

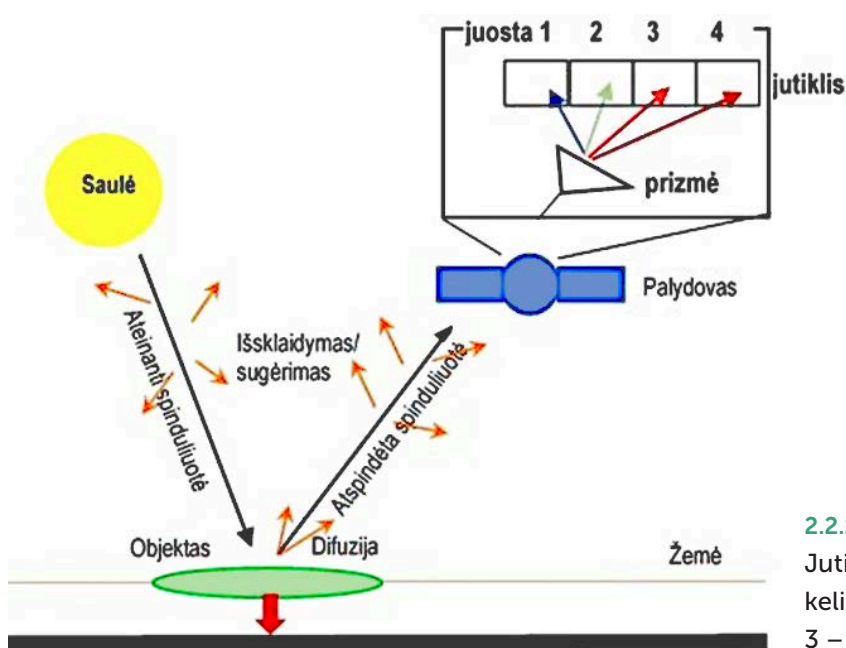
Apžvalgos kampas	Judrus erdvėlaivis, išilgai ir skersai skenavimo juostos
Skenavimo juostos plotis	11 km nadyre
Vaizdo gavimo režimas	Vienas vaizdas: 13×13 km Juostos: 11×100 km iki 11×1000 km
Tikslumas (metrais)	12 m horizontalus, 10 m vertikalus be GCP
Radiometrinis skaitmeninimas	11 bitų

SPEKTRO JUOSTOS

Spektro juostos	Bangos ilgis (µm)	Skiriamoji geba
1 (mėlyna)	0,40–0,52	4 m
2 (žalia)	0,52–0,60	4 m
3 (raudona)	0,63–0,69	4 m
4 (NIR)	0,76–0,90	4 m
Panchromatinė	0,45–0,90	1 m



2.2.15. pav. Jutiklio *Ikonos* charakteristikos ir 1 m skiriamosios gebos panchromatinis *Ikonos* vaizdas virš Bogotos (Kolumbija) (pagal Liew 2001; LAND INFO, 2018).



2.2.16 pav. Daugiaspektrė vaizdų gavimo sistema. Jutiklį sudaro daug kanalų turintis detektorius su keliomis spektro juostomis (1 – mėlyna, 2 – žalia, 3 – raudona, 4 – NIR) (pagal Liew 2001).

Paprastai kuo daugiau spektro juostų, tuo daugiau informacijos jutiklis surenka. Tačiau dėl santykinai mažo energijos, tenkančios kiekvienai daugiaspektrei juostai, kiekio jutikliai turi imti informaciją iš didesnės teritorijos (pikslio dydis), norint, kad surinktų reikiamą minimalų šviesos energijos kiekį, kurio reikia šviesos skirtumams tiriamojoje teritorijoje nustatyti. Todėl daugiaspektrių vaizdų pikseliai, kurie reprezentuoja tiriamą teritoriją, yra didesni už panchromatinių vaizdų. Pvz., palydovo *Landsat* panchromatinė juosta yra 15 m erdvinės skiriamosios gebos (t. y. pikslio dydis yra 15 m), o daugiaspektrių juostų pikslio dydis – 30 m.

Todėl norint gauti maksimalią informaciją iš daugiaspektrių vaizdų (t. y. didelės spektrinės skiriamosios gebos) ir panchromatinių vaizdų (t. y. didelės erdvinės skiriamosios gebos) dažnai abu vaizdai yra sujungiami. Ši procedūra vadinama panchromatiniu paryškiniu ir jungia tris daugiaspektrių vaizdų juostas bei vieną panchromatinę juostą. Gaunamas vaizdas, turintis abiejų pirminių vaizdų spektrines ir erdvines charakteristikas. Ši procedūra labai naudinga objektų vaizdų analizei, kai reikalingi labai didelės skiriamosios gebos vaizdai, norint preciziškai išskirti tyrinėjamų objektų ribas (pvz., žemės ūkyje reikia išskirti atskirų ūkių ribas).

Pavyzdys (2.2.2. lentelė, 2.2.17 pav.). *Landsat* – tai seniausia ne kariniams tikslams skirta Žemės stebėjimo programa. Pirmiausiai (nuo 1972) mes turėjome *Landsat 1* MSS (daugiaspektrių jutiklį). Jis 1982 m. buvo pakeistas į *Landsat 5* TM (angl. Thematic Mapper). Tiek MSS, tiek TM yra skeneriai. 2005 m. *Landsat 5* TM operacijos buvo sustabdytos, bet jie veikia iki šių dienų. Naujesnis *Landsat 7* ETM+ (paleistas 1999) nuo 2003 m. nebeveikia pilnu pajėgumu. Palydovai *Landsat* juda Saulės sinchronine orbita. Jutiklis ETM+ registruoja informaciją 8 juostose, apimančiose spektrinį diapazoną nuo 0,45 iki 12,5 μm . Duomenys naudojami daugelyje sričių: žemės dangai stebėti, kartografijoje, dirvožemių ir geologiniam kartografavimui, stebint jūros paviršiaus temperatūrą, miško dangos pokyčių procesus, dykumėjimą, urbanizaciją ir pan. *Landsat* duomenys identifikuojant žemės dangos pokyčius yra pranašesni ir dažniau naudojami nei SPOT daugiaspektriai duomenys, nes juose yra vidurinėsios infraraudonosios spinduliuotės (MIR) juosta. *Landsat* turi ir šiluminės infraraudonosios spinduliuotės (TIR) kanalą. Šiluminės spinduliuotės duomenys reikalingi Žemės paviršiaus energijos procesų tyrimams, pvz., drėkinamų pasėlių laukų temperatūros įvairovei, kuri priklauso nuo dirvožemio drėgmės.

Pavyzdys (2.2.18. pav.). SPOT HRV-XS daugiaspektris vaizdas gaunamas panaudojant trijų skirtingų spektro juostų duomenis (SPOT 1,2 HRV). Naudojamos XS 1 juosta, apimanti 0,50–0,59 μm diapazoną (žalia), XS 2 juosta (0,61–0,68 μm) (raudona) ir XS 3 (0,79–0,89 μm) (NIR). SPOT 4 HRVIR yra 4-oji juosta (1,53–1,75 μm) – SWIR. Sujungiant šių kanalų duomenis yra suformuojami kombinuoti spalvoti vaizdai (skiriamoji geba – 20 m).

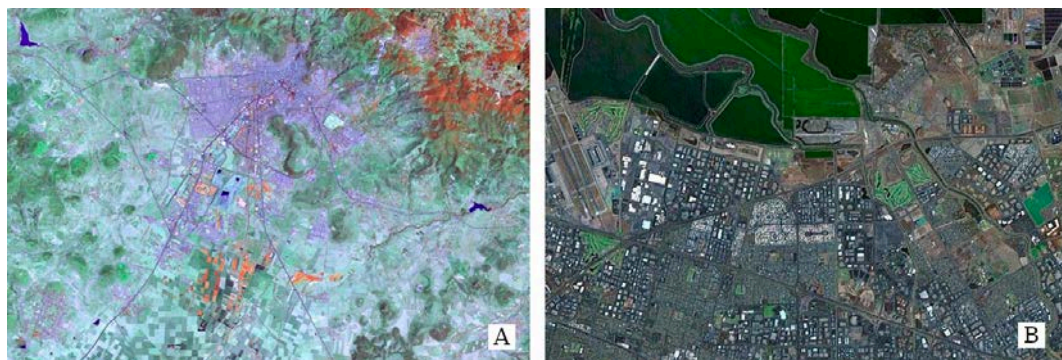
Palydovas SPOT 4 taip pat turi mažos skiriamosios gebos, tačiau plačios aprėpties jutiklį VEGETATION sausumos biosferos ir pasėlių monitoringui. Šis prietaisas beveik kiekvieną dieną gali pateikti informaciją pasauliniu mastu (jo skiriamoji geba 1 km, ruožo plotis – 2250 km) ir tai padeda stebėti trumpalaikius ir ilgalaikius aplinkos pokyčius.

Pavyzdys (2.2.19. pav.). Daugiaspektriai *Ikonos* vaizdai yra naudojami ūkių riboms patikslinti – žemės ūkio naudmenų informacija gaunama naudojant daugiaspektres skenavimo juostas (4 m skiriamoji geba), įskaitant ir artimosios infraraudonosios spinduliuotės (NIR) juostą. Reguliarus informacijos apie dirbamus laukus atnaujinimas gali padėti ūkininkams optimaliai naudoti trąšas ir herbicidus.

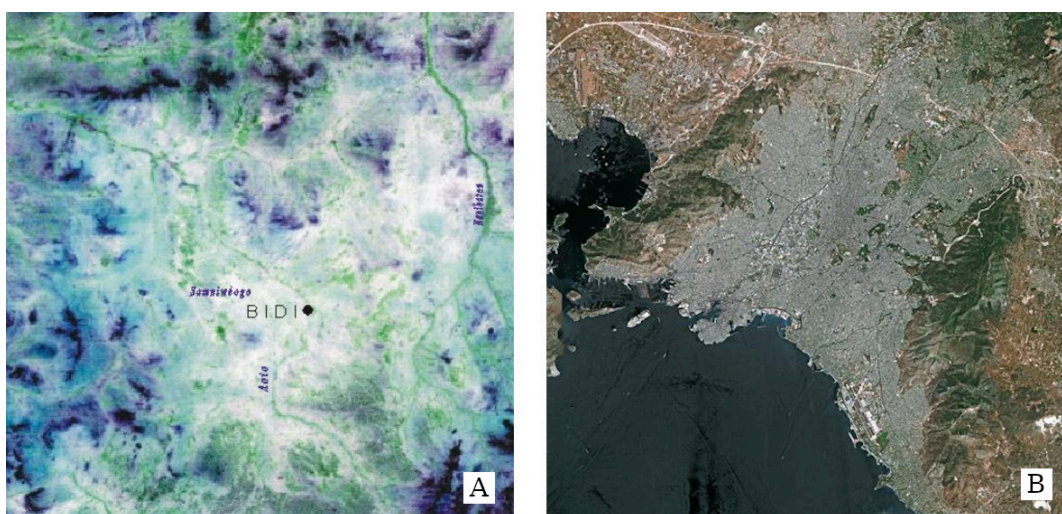
2.2.2. lentelė. Landsat orbitos duomenys ir skirtingų Landsat jutiklių (MSS, TM, ETM+) charakteristikos (pagal Liew 2001), Landsat 7 ETM+ panaudojimas (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

LANDSAT ORBITA				
Tipas	Saulės sinchroninė orbita			
Altitudė	705 km			
Polinkis	98,2°			
Periodas	99 min.			
Pasikartojantis ciklas	16 d.			
LANDSAT 4, 5 MSS JUTIKLIŲ CHARAKTERISTIKOS				
Spektro juosta		Bangos ilgis (μm)	Skiriamoji geba, m	Panaudojimo pavyzdžiai
Žalia	1	0,5–0,6	82	–
Raudona	2	0,6–0,7	82	–
Artimoji infraraudonoji (NIR)	3	0,7–0,8	82	–
Artimoji infraraudonoji (NIR)	4	0,8–1,1	82	–
LANDSAT TM, ETM+ JUTIKLIŲ CHARAKTERISTIKOS				
Mėlyna	1	0,45–0,52	30	Pakrančių vandens kartografavimas: batimetrija ir kokybė. Vandenyno fitoplanktono ir nuosėdų kartografavimas. Atmosferos taršos įvertinimas.
Žalia	2	0,52–0,60	30	Chlorofilo atspindžiai, augalijos būklė, augalų rūšių kartografavimas.
Raudona	3	0,63–0,69	30	Chlorofilo absorbcija, augalų rūšių išskyrimas, biomasės skaičiavimas.
Artimoji infraraudonoji (NIR)	4	0,76–0,90	30	Augalų rūšių ir būklės kartografavimas, biomasės skaičiavimas, dirvožemio drėgmė.
Trumpų bangų infraraudonoji (SWIR)	5	1,55–1,75	30	Augalijos ir dirvožemio ryšių išskyrimas, urbanizuotų teritorijų kartografavimas, sniego ir debesų išskyrimas.
Šiluminė infraraudonoji (TIR)	6	10,40–12,50	120 (TM) 60 (ETM+)	Augalijos būklės analizė, dirvožemio drėgmės ir evapotranspiracijos kartografavimas. Paviršiaus temperatūros nustatymas.
Trumpų bangų infraraudonoji (SWIR)	7	2,08–2,35	30	Geologija: mineralų ir uolienu tipų kartografavimas, vandens telkinių išskyrimas, augaluose esančios drėgmės nustatymas.
Panchromatinė		0,5–0,9	15	Vidutinio mastelio topografinis kartografavimas, vaizdų raiškos tikslinimas, sniego dangos klasifikavimas.

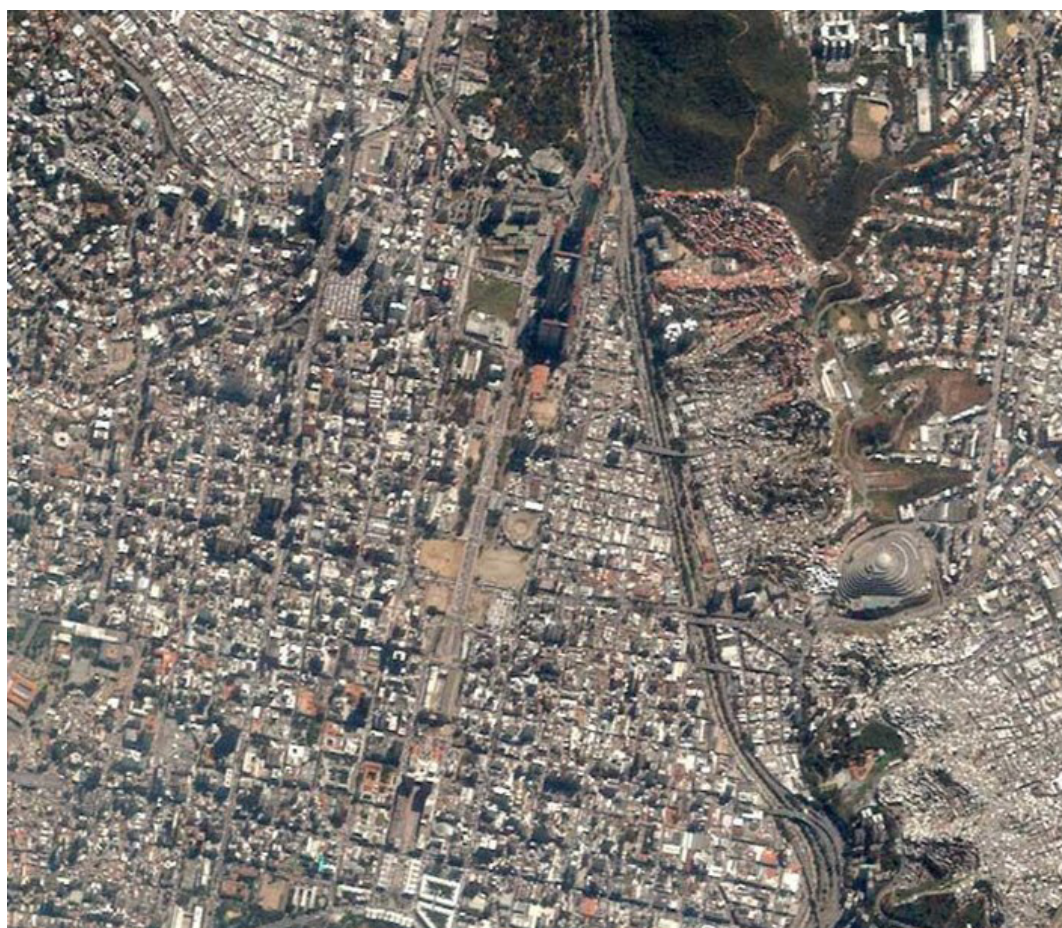
2.2.17 pav. (A) 30 m skiriamosios gebos *Landsat 7* RGB (4-5-3 kanalų) vaizdas (Pachuca, Meksika) 1:75,000 (LAND INFO, 2018); (B) 15 m skiriamosios gebos *Landsat 7* panchromatinės juostos vaizdas (LAND INFO, 2018).



2.2.18. pav. (A) Bidi teritorijos (Burkina Fosas) SPOT HRV (XS) vaizdas. RGB-132 kompozicija (Koussoube ir kt., 2003); (B) Atėnai iš SPOT 5 palydovo (2002) .



2.2.19. pav. 4 m skiriamosios gebos spalvotas *Ikonos* vaizdas – Karakasas, Venesuela (LAND INFO, 2018).



3. Superspektrinė vaizdų gavimo sistema. Superspektrinis vaizdų gavimo jutiklis turi daugiau spektrinių kanalų (paprastai >10) už daugiaspektrį. Spektrinės juostos siauresnės, o tai leidžia jutikliui užfiksuoti tikslesnes tiriamųjų objektų spektrines charakteristikas.

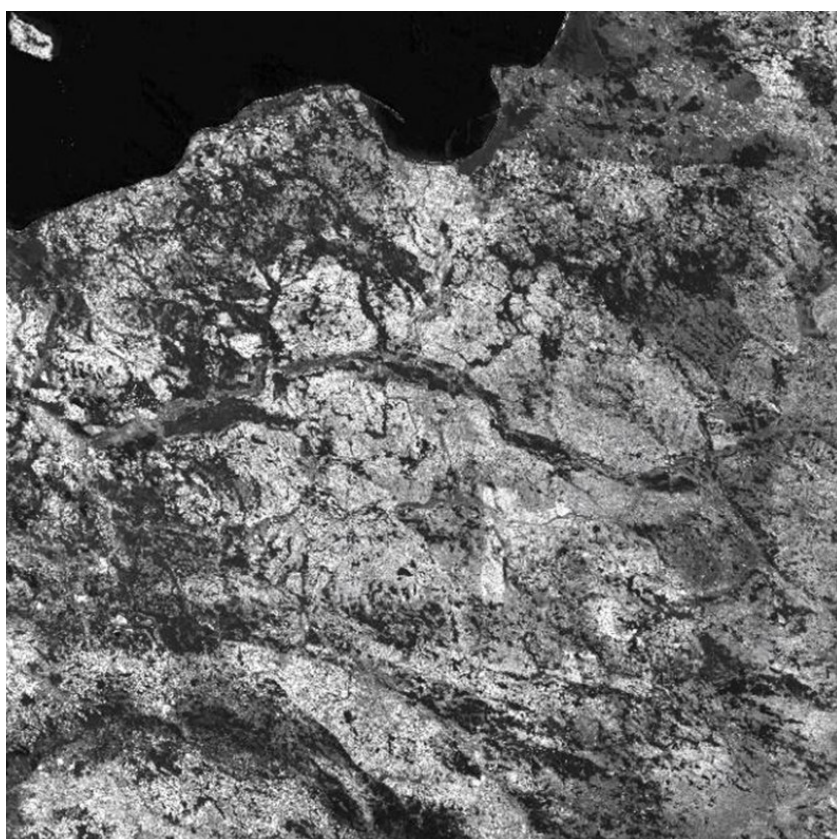
Pavyzdys (2.2.3. lentelė., 2.2.20. pav.). Vidutinės skiriamosios gebos spektrometras MODIS (angl. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) yra pagrindinis prietaisas, veikiantis NASA palydovuose *Terra* ir *Aqua*. Palydovas *Terra* buvo paleistas 1999 m., o *Aqua* – 2002 m. Abu jie yra NASA Žemės stebėjimo sistemos (angl. Earth Observing System – EOS) pasididžiavimas. Palydove *Terra* yra penki nuotolinio tyrimo jutikliai, tarp jų ir MODIS bei šiluminės ir atspindėtos spinduliuotės radiometras ASTER (angl. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer). ASTER jutiklis turi tris skenavimo juostas regimajame ir artimajame infraraudonajame spektriniame diapazone (skiriamoji geba – 15 m), šešias juostas artimųjų bangų infraraudonajame diapazone (skiriamoji geba – 30 m) ir 5 juostas šiluminės infraraudonosios spinduliuotės diapazone (skiriamoji geba – 90 m).

2.2.3. lentelė. Palydovo *Terra* jutiklio MODIS charakteristikos ir panaudojimas (Liew, 2001).

ORBITA	750 km, 10:30 besileidžiančios orbitos mazgas (<i>Terra</i>) arba 13:30 kylančios orbitos mazgas (<i>Aqua</i>), Saulės sinchroninė orbita, arti polių, aplink Žemę.		
NUSKAITYMO DAŽNIS	20,3 rpm, skersai juostos		
SKENAVIMO JUOSTOS PLOTIS	2330 km (skersai juostos), 10 km (išilgai juostos nadyre)		
DYDIS	1,0 × 1,6 × 1,0 m		
SVORIS	228,7 kg		
PAJĖGUMAI	162,5 W (vienos orbitos vidurkis)		
ERDVINĖ SKIRIAMOJI GEBA	250 m (1–2 juostos); 500 m (3–7 juostos); 1000 m (8–36 juostos)		
SPEKTRO JUOSTA	BANGOS ILGIS (nm)	PANAUDOJIMAS	
1	620–670	Žemės / Debesų / Aerosolių ribos	
2	841–876		
3	459–479	Žemės / Debesų / Aerosolių ypatumai	
4	545–565		
5	1230–1250		
6	1628–1652		
7	2105–2155		
8	405–420		Vandenyno spalva / Fitoplanktonas / Biogeochemija chlorofilui α
9	438–448		
10	483–493		
11	526–536		
12	546–556		
13	662–672		
14	673–683		
15	743–753		
16	862–877		

SPEKTRO JUOSTA	BANGOS ILGIS (nm)	PANAUDOJIMAS
17	890–920	Atmosferoje esantys vandens garai
18	931–941	
19	915–965	
20	3,660–3,840	Paviršiaus / Debesų temperatūra
21	3,929–3,989	
22	3,929–3,989	
23	4,020–4,080	
24	4,433–4,498	Atmosferos temperatūra
25	4,482–4,549	
26	1,360–1,390	Plunksniniai debesys, vandens garai
27	6,535–6,895	
28	7,175–7,475	
29	8,400–8,700	Debesų parametrai
30	9,580–9,880	Ozono sluoksnis
31	10,780–11,280	Paviršiaus / Debesų temperatūra
32	11,770–12,270	
33	13,185–13,485	Debesų viršutinė altitudė
34	13,485–13,785	
35	13,785–14,085	
36	14,085–14,385	

2.2.20. pav. Terra MODIS produktas (MOD09Q1) 1 spektrinės juostos vaizdas (233 dienų mozaika, 2009, Lenkija) (Institute of Geodesy and Cartography, 2012).

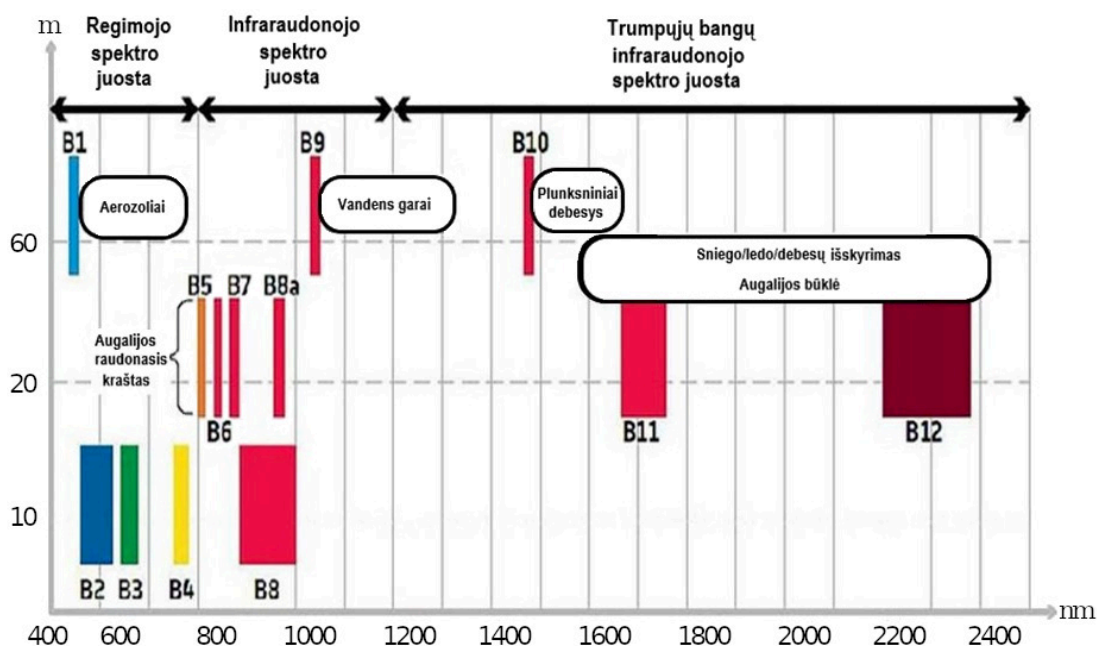


NASA yra paleidusi dar du didelius palydovus – *Aqua* ir *Aura*. Palydovas *Terra* daugiausia specializuojasi tirti žemės dangą, *Aqua* – vandenį, *Aura* – atmosferos dujų pėdsakus (ypač ozoną). *Aqua* buvo paleistas 2002 m. gegužės mėn. *Aura* – 2004 m. liepą.

Penki nuotolinių tyrimų prietaisai palydove *Terra* puikiai papildo vienas kitą, o jų duomenys padeda sprendžiant įvairias aplinkosaugos, meteorologijos ir kitų sričių problemas. NASA palydovų *Terra* ir *Aqua* duomenis padarė laisvai prieinamus: juos labai lengva peržiūrėti ir atsisiųsti internetu.

Terra MODIS radiometras stebėjimus vykdo skersai palydovo skrydžio trajektorijos ir visą Žemės paviršių aprėpia kas 1–2 dienas. Jis pasižymi plačia žvalgos juosta (daugiau kaip 2300 km) ir suformuoja vaizdus iš atspindėtos Saulės energijos ir šiluminės spinduliuotės tiek dienos, tiek nakties metu. Erdvinė skiriamoji geba kinta nuo 250 m regimojoje spektro juostoje iki 1000 m šiluminėje infraraudonojoje juostoje. MODIS turi 36 siauras spektro juostas, kurių duomenys naudojami sudaryti standartinius palydovinių duomenų produktus. Apdoroti MODIS duomenys suteikia informacijos apie atmosferos aerozolių koncentraciją, sausumos ir jūros paviršiaus temperatūrą, augalijos indeksus, šiluminės anomalijas, sniego ir ledo dangą, chlorofilo ir organinių medžiagų koncentraciją vandenyne.

Pavyzdys (2.2.21. pav., 2.2.22. pav.). ESA pagal programą „Copernicus“ vykdo *Sentinel 2* misiją. Tai didelės skiriamosios gebos optinė misija, skirta Žemės paviršiui stebėti. Ją sudaro du poliarinės orbitos palydovai (2A ir 2B), kurių tikslas – stebėti Žemės paviršiaus sąlygų kitimą, nustatyti augalijos pokyčius per augimo sezoną ir t. t.



2.2.21. pav. *Sentinel 2* MSI (daugiaspektrio vaizdo gavimo instrumento) spektriniai kanalai (kanalų paaiškinimai – 2.2.22. pav.) (pagal Kramer ir kt., 2020).

Palydovas *Sentinel 2A* teikia didelės skiriamosios gebos nuotraukas, skirtas sausumos teminei sričiai tirti. Šis palydovas iškeltas į kosmosą 2015 m. birželio 22 d. *Sentinel 2B*, kuris atlieka tokias pat funkcijas kaip palydovas *Sentinel 2A*, paleistas į kosmosą 2017 m. kovo 7 d. Jie tą pačią teritoriją fiksuoja kas 10 dienų ties pusiauju, kai skrenda vienas palydovas, ir kas 5 dienas, kai skrenda du palydovai. Taigi, veikiant abiem palydovams vaizdai atnaujinami per 5 dienas. Aprėptis – tarp 56' pietų ir 84' šiaurės platumos.

Palydove *Sentinel 2* įmontuotas optoelektroninis daugiaspektris jutiklis, kurio formuojami vaizdai siekia nuo 10 m (4 spektro juostos), 20 m (6 spektro juostos) iki 60 m (3 spektro juostos) skiriamąją gebą regimosios, artimosios infraraudonosios (NIR) ir trumpųjų bangų infraraudonosios (SWIR) spinduliuotės ruožuose, žvalgos juostos plotis 290 km (2.2.4. lentelė). Iš viso yra 13 kanalų, kurie užtikrina Žemės paviršiaus būklės, įskaitant ir pokyčius per tam tikrą laiką, stebėjimą.

4. Hiperspektriniai jutikliai. Šie prietaisai dar yra vadinamos „vaizdų gavimo spektrometrais“. Jie formuoja vaizdus iš šimto ar daugiau greta esančių spektro juostų. Preciziška spektrinė informacija, kurią turi hiperspektriniai vaizdai, leidžia geriau identifikuoti bei apibūdinti tiriamus objektus. Hiperspektriniai vaizdai gali būti naudojami ūkininkavimo reikmėms, pvz., stebėti pasėlių tipus, būklę, drėgnumą ir brandos fazes, pakrančių tvarkymui, pvz., fitoplanktono monitoringui, batimetrijai ir taršos pokyčiams matuoti.

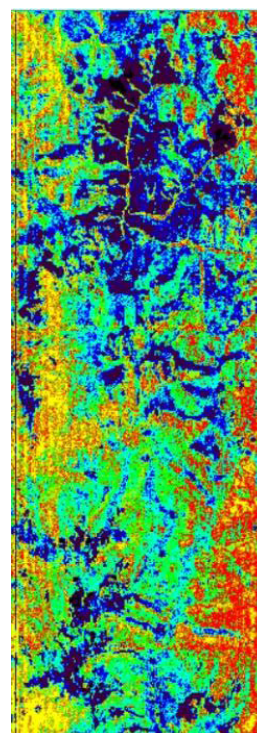
Pavyzdys (2.2.22 pav.). EO-1 (angl. Earth Observing-1) yra pirmasis NASA Naujojo tūkstantmečio programos Žemės stebėjimo serijos palydovas. Jis buvo paleistas 2000 m. lapkričio mėn. ir veikė iki 2017 m. kovo mėn. Unikalus EO-1 misijos akcentas – didelės skiriamosios gebos eksperimentinis hiperspektrinis jutiklis *Hyperion*. Šis prietaisas Žemės paviršiaus registravimui naudojo didelės radiometrinės skiriamosios gebos 220 spektro juostų (0,357–2,576 μm intervale), jo erdvinė skiriamoji geba – 30 m. Tai jutiklis, skenuojantis paviršių išilgai palydovo judėjimo trajektorijos. Jis turėjo vieną teleskopą ir du spektrometrus: vieną regimosios / artimosios infraraudonosios spinduliuotės spektrometrą (su CCD jutiklių juosta) ir vieną – trumpųjų bangų infraraudonosios spinduliuotės spektrometrą (su HgCdTe (gyvsidabrio kadmio telurido) detektorių juosta).

EO-1 ORBITA

Tipas	Saulės sinchroninė orbita
Altitudė	705 km
Polinkis	98,2 °
Besileidžiančios orbitos mazgo kirtimo laikas	10.01 val. vietos laiku
Periodas	99 min
Pasikartojantis ciklas	16 dienų

JUTIKLIO HYPERION CHARAKTERISTIKOS

Erdvinė skiriamoji geba	30 m
Žvalgos juostos plotis	7,75 km
Spektro juostos	220 unikalių juostų, VNIR (70 juostų, 356 nm – 1058 nm), SWIR (172 juostos, 852 nm – 2577 nm)



2.2.22. pav. EO-1 (Earth Observing-1) palydovo *Hyperion* jutiklio charakteristikos bei rytinės Aidaho valstijos (JAV) miškų būklės vaizdas (1 (tamsiai mėlyna) – pažeisti miškai; 9 (raudona) – sveiki miškai) (L3 Harris Geospatial, 2013).

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Pirmasis nuotoliniams tyrimams keliamas reikalavimas – tai energijos šaltinis, kuris gali apšviesti tiriamąjį objektą. Koks yra pagrindinis elektromagnetinės energijos šaltinis? Kokį „nuotolinį prietaisą“ galite Jūs kiekvienas panaudoti norėdamas pajusti tą energiją?
- Kokie yra palydovuose įmontuotų jutiklių privalumai, lyginant juos su lėktuvuose esančiais jutikliais? Ar yra kokių nors trūkumų?
- Išvardykite optiniuose nuotoliniuose tyrimuose naudojamus jutiklius.
- Paaiškinkite skenavimo išilgai kelio ir skersai kelio ypatumus.
- Išvardykite pagrindinius pasyviųjų ir aktyviųjų optinių jutiklių skirtumus.
- Paaiškinkite, kodėl *Landsat TM* jutiklio duomenys gali būti naudingesni už *Landsat MSS* jutiklio. Kokia jų erdvinė, spektrinė, radiometrinė skiriamoji geba?
- Pažiūrėkite į šiuos du paveikslus. Kurio iš jų mastelis smulkesnis? Kodėl? Kokia vaizdų gavimo platforma buvo padarytas smulkesnio mastelio vaizdas: palydovu ar lėktuvu?



- Paaiškinkite, kodėl žemės dangos pokyčiams identifikuoti palydovo *Landsat* duomenys yra pranašesni už palydovo *SPOT* duomenis.
- Pagalvokite, kurį jutiklį pasirinktumėte detaliems urbanizuotų teritorijų optimalaus apželdinimo įvertinimo tyrimams – *MODIS* ar *Sentinel 2 MSI*? Atsakymą pagrįskite.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Canada Centre for Remote Sensing (2009). *Fundamentals of Remote sensing* [žiūrėta 2019-08-06]. Prieiga internete: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- Heege, T. (2019). *Optical remote sensing* [žiūrėta 2019-09-21]. Prieiga internete: http://www.coastalwiki.org/wiki/Optical_remote_sensing
- Institute of Geodesy and Cartography (2012). *Terra. MODIS* [žiūrėta 2020-02-03]. Prieiga internete: <http://www.igik.edu.pl/en/terra-modis>
- Kang, Y., Pan, L., Sun, M., Liu, X. (2017). Destriping high-resolution satellite imagery by improved moment matching. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 22, 6346-6365.
- Kramer, H. J. et al. (2012). *SPOT-6 and SPOT-7* [žiūrėta 2020-01-21]. Prieiga internete: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-6-7>

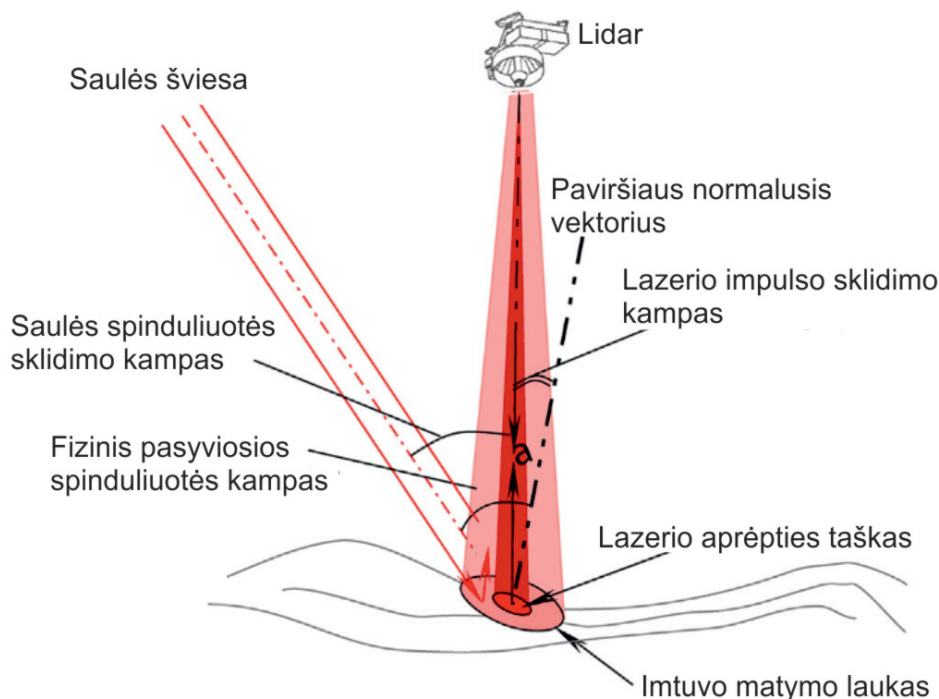
- Kramer, H. J. et al. (2020). *Copernicus: Sentinel-2*. [žiūrėta 2020-01-21]. Prieiga internete: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-6-7>
- Koussoubé, Y., Nindaoua, A., Nakolendoussé, S. (2003). Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone Sahélo-Soudanaise du Burkina Faso (bassin versant de Bidi, province du Yatenga). *Télé-détection*, 3, 5, 419–427.
- L3 Harris Geospatial (2013). *EO-1 Hyperion Vegetation Analysis Tutorial* [žiūrėta 2020-02-18]. Prieiga internete: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/HyperionVegetationAnalysisTutorial.html>
- LAND INFO (2018). *Gallery: High and Medium Resolution Satellite Imagery* [žiūrėta 2019-10-04]. Prieiga internete: <http://www.landinfo.com/GalSatL730m453Pachuca75k.htm>
- Liew S. C. (2001). *Principles of remote sensing* [žiūrėta 2020-01-19]. Prieiga internete: <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/rsmain.htm>
- Mozgeris, G., Dumbrasas, A., Jonikavičius, D. (2015). *Geografinių informacinių sistemų pagrindai: studijų knyga*. Akademija: Aleksandro Stulginskio universiteto Leidybos centras.
- STARS (2019). *Multispectral and panchromatic images* [žiūrėta 2020-01-21]. Prieiga internete: <https://www.stars-project.org/en/knowledgeportal/magazine/remote-sensing-technology/introduction/multispectral-and-panchromatic-images/>
- Svoray T. (2004). Integrating automatically processed SPOT HRV Pan imagery in a DEM-based procedure for channel network extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 17, 3541–3547.
- Sūdžius J. (2014). Žemės stebėjimo palydovas. *Visuotinė lietuvių enciklopedija* [žiūrėta 2019-09-20]. Prieiga internete: <https://www.vle.lt/Straipsnis/Zemes-stebėjimo-palydovas-110851>
- Tempfli, K., et. al. (2009). *Principles of remote sensing: an introductory textbook*. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.

2.3. INFRARAUDONOJO SPEKTRO PRIETAISAI PALYDOVUOSE

2.3.1. Aktyvieji infraraudonojo spektro jutikliai

Aktyvūs infraraudonojo spektro (IR) jutikliai dažniausiai yra IR impulsus generuojantys lazeriniai altimetrai, skirti analizuoti aukštį, reljefą, kitus reiškinius ir objektus. Altimetrai palydovinėse sistemose skirstomi į dvi grupes: mikrobangų diapazone veikiančios ir bangas generuojantys radarai bei lidarų paviršiaus skenavimo technologiją taikantys altimetrai, skleidžiantys ir registruojantys infraraudonuosius spindulius.

Lazeriniai altimetrai pagal savo veikimo principą panašūs į radarus, pagrindinis jų skirtumas – bangų, kurias naudoja jutikliai, ilgis. Dėl trumpesnių bangų (dažniausiai naudojama trumpabangės infraraudonosios šviesos diapazono bangos), lazeriai geba greičiau moduluoti siunčiamus impulsus, o spinduliuotė koncentruojama į gerokai smulkesnį Žemės plotą, tai, savo ruožtu, leidžia pasiekti, kad erdvinė skiriamoji geba būtų didesnė, ir sumažinti prietaiso fizinius matmenis (2.3.1. pav.). Vis dėlto lidarų impulsai dėl naudojamų bangų ir atmosferos savybių neprasiskverbia per tankių debesų dangą. Iš dalies šią problemą sprendžia bangų ilgio optimizavimas ar jų parinkimas atsižvelgiant į atmosferos optines ir spektrometrines savybes. Paviršiaus reljefo tyrimams tradiciškai naudojami lidarai, moduluojantys 1064 nm bangų ilgio impulsus. Dalis jutiklių taip pat pritaikyti debesų ir atmosferos aerozolių tyrimams, juose taikomi regimojo spektro – 532 nm ir trumpabangės infraraudonosios spinduliuotės – 1064 nm kanalai. ICESat 2003 m. paleisto mokslinio palydovo pagrindinio jutiklio GLAS, veikusio 1064 nm SWIR ruože, duomenų tikslumas siekė 2–3 cm fiksuojant paviršiaus reljefo duomenis (pastaba: ICESat misija baigėsi 2009 m.).



2.3.1. pav. Palydovinių lidarų Žemės paviršiaus skenavimo schema, signalo sklaidimo savybės ir jį veikiantys veiksniai bei rodikliai. Lidarai generuoja, spinduliuoja ir registruoja atmosferoje ir nuo paviršių atspindėtą spinduliuotę jų generuojamų elektromagnetinių bangų diapazone, taikinio savybės identifikuojamos per grįžtamojo ir spinduliuojamo signalo pokytį (pagal Sun, 2018).

Dėl Žemės stebėjimo palydovų skriejimo virš Žemės paviršiaus greičio, taip pat lazerio impulsų generavimo spartos, tiksliai kartografuoti tiriamus objektus įmanoma tik periodiškai matuojant tą pačią teritoriją. Polinių arba joms artimų orbitų palydovų skriejimo virš Žemės paviršiaus greitis dažniausiai siekia apie 7 km/s, o lazerio impulso aprėpties dydis, priklausomai nuo jo impulsų dažnio, dešimtys metrų. Tai lemia, kad gaunamas ne ištisinis Žemės paviršius vaizdas, bet atskiri lazerio matavimų duomenys tam tikruose taškuose. Didinant duomenų tikslumą, tokiu atveju vykdomi skrydžiai ir matavimai ta pačia orbita.

Iš techninės pusės palydoviniai lazeriniai altimetrai gali būti traktuojami kaip sistema iš kelių tarpusavyje susijusių posistemių. Šie komponentai apima lazerį, imtuvą, laiko sekimo ir sinchronizavimo posistemę bei inertinę ir navigacinę pozicionavimo posistemę. Įvardyti komponentai kaupia ir perduoda informaciją apie jutiklio padėtį ir laiką, kai išspinduliuojamas lazerio spindulys, bei koordinates ir laiką, kada signalas sugrįžta atsispindėjęs nuo paviršiaus ar atskirų objektų.

Lazeriniuose altimetruose yra lazerio spindulio siuntimo ir priėmimo sistemos, paviršiaus kryptimi nustatytu kampu generuojančios šviesos bangų impulsus, kurie atsispindėję nuo jų kelyje esančių objektų grįžta į imtuvą. Signalo imtuvas – registratorius, savo ruožtu, tiksliai fiksuoja šviesos impulso sklidimo laiką nuo jo išsiuntimo iki grįžimo. Kadangi impulsai keliauja šviesos greičiu, imtuvas siunčia kitą impulsą priėmęs grįžusįjį. Impulso generavimo dažnis priklauso ir nuo pozicionavimo sistemos veikimo, šie komponentai turi būti sinchronizuoti tarpusavyje iš anksto nustatytu periodiškumu. Žinant šviesos greitį, impulso kelionės laikas gali būti perskaičiuojamas į atstumą. Pagal atstumą, lazerinio impulso spinduliavimo kampą, lazerinio skenerio (kartu ir palydovo) padėtį ir orientaciją nustatomos kiekvieno išspinduliuoto lazerio impulsui geografinės x ir y koordinatės, taip pat paviršiaus ar objekto aukščio z reikšmės (2.3.1. pav.).



2.3.2. pav. ICESat palydovo lazerinis infraraudonojo spektro altimetras GLAS. Nuotraukoje vaizduojama GLAS prietaiso mechaninis integravimas į ICESat palydovą 2002 m. birželio 18 d. (pagal Zwally ir Santana, 2016).

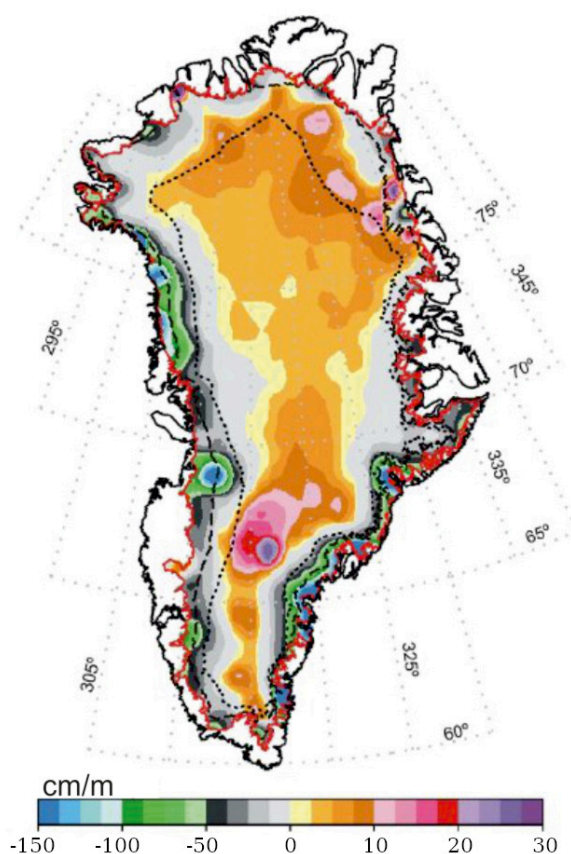
Lazerinių palydovinių altimetrų naudojimo patirtis Žemės stebėjimo istorinėje perspektyvoje nėra didelė ir daugiausia sietina su pastaraisiais dešimtmečiais vykdytomis bei dabar vykdomomis misijomis. Tarp jų paminėtinos ICESat, GEDI ir CALIPSO.

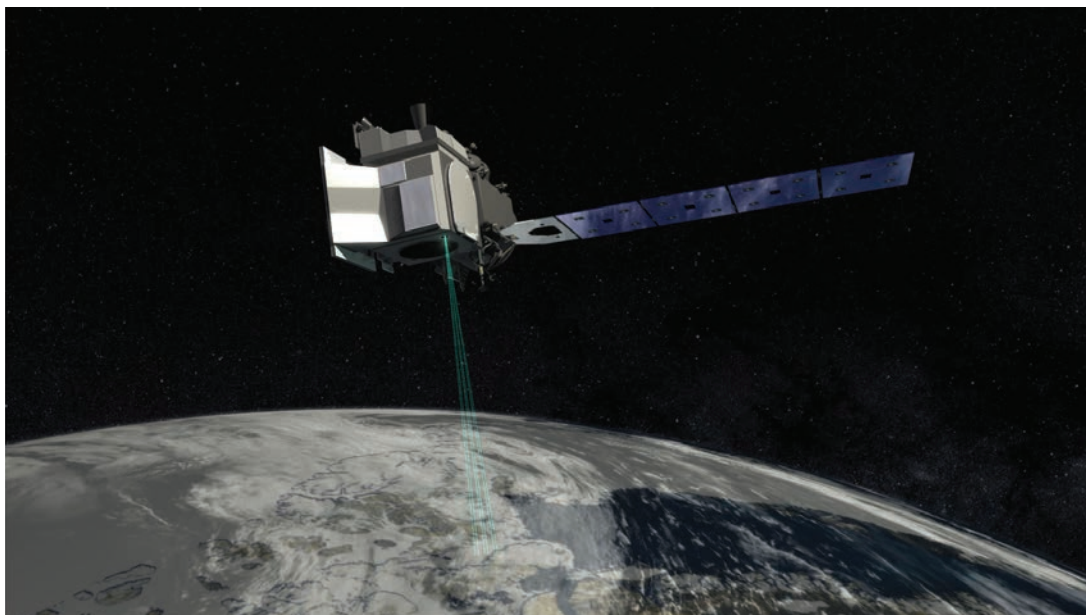
Pirmasis – ICESat palydovas ir jame integruotas GLAS – „Geomokslų lazerinės altimetrinės sistemos“ jutiklis į Žemės orbitą paleistas 2003 m. (2.3.2. pav.). Jutiklio GLAS taškų impulso tan_kis Žemės paviršiuje siekė 70 m su 150 m juostos išilgai palydovo judėjimo trajektorijos tarpais. Palydovo pirminė paskirtis – matuoti ledyninių skydų aukščius ir paviršių, vykdyti ledo dangos kaitos juose, debesų ir atmosferos aerolių monitoringą, kartografuoti Žemės paviršiaus reljefą, tirti daugiametį jūros ledo storį. Ypač naudingas jutiklis GLAS pasirodė tiriant ledyninių Grenlandijos ir Antarktidos skydų paviršiaus kaitą (2.3.3. pav.). Palydovo misija baigėsi 2009 m. dėl pagrindinio prietaiso gedimų, tačiau iki to lazerinis altimetras be jau įvardytų atvejų naudotas ir kitiems objektams bei reiškiniams stebėti, pavyzdžiui, miškų tyrimams.

ICESat misijos bei lazerinių altimetrų taikymo Žemės stebėjimui sėkmė paskatino NASA imtis antrosios panašaus pobūdžio misijos planavimo. Tad 2018 m. į orbitą išsiųstas ICESat 2 palydovas (2.3.4. pav.). Vis dėlto šio palydovo lidaras (ATLAS) moduliudamas per 10 000 lazerio impulsų per sekundę, veikia tik vienoje regimojo spektro juostoje – 532 nm. Kaip ir jo pirmtako, šio paskirtis – tirti kriosferą (ledyninių Antarktidos ir Grenlandijos skydų paviršiaus aukščius, ledynus, daugiametį jūros ledą), palydovas taip pat registruoja Žemės paviršiaus reljefo aukščio taškus vidutinėse ir tropinėse platumose, žemės vegetacinės dangos, konkrečiai – miškų, išteklius.

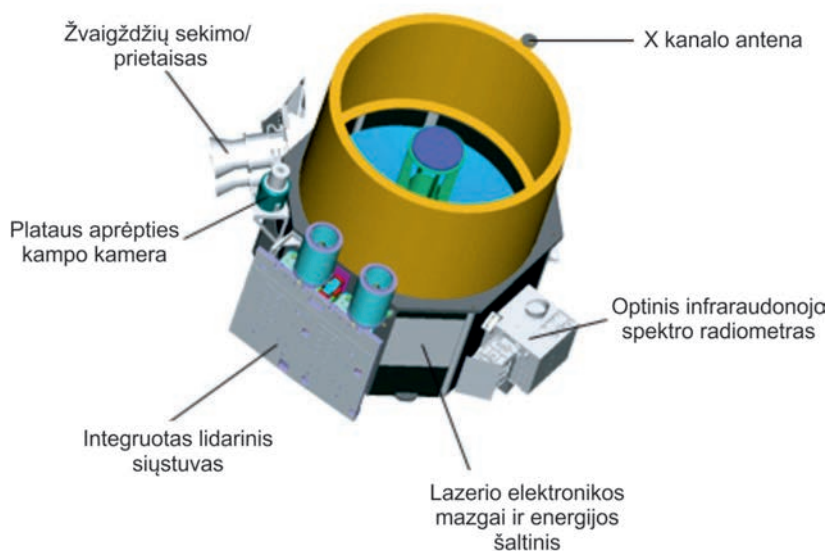
Tiesiogiai debesų dangos ir atmosferos aerolių tyrimams atlikti NASA kartu su Prancūzijos kosmoso agentūra 2006 m. paleido kitą – CALIPSO palydovą. CALIPSO tiesioginė paskirtis – didelės skiriamosios gebos debesų ir atmosferos aerolių vertikalus zondavimas. Palydovas skraidina stačiakampės poliarizacijos lidarą CALIOP, kurio lazeriai naudoja 532 ir 1064 nm bangų ilgius. Vertikali jutiklio skiriamoji geba – 30–60 m, o horizontali – 333 m. Be lidaro palydove CALIPSO taip pat įrengtas infraraudonųjų spindulių radiometras ir plataus aprėpties kampo kamera (2.3.5. pav.).

2.3.3. pav. Grenlandijos ledyninio skydo storumės pokytis 2003–2007 m. remiantis ICESat palydovo duomenimis. Pokytis išreikštas centimetrais per metus (pagal Abdalati ir kt., 2010)





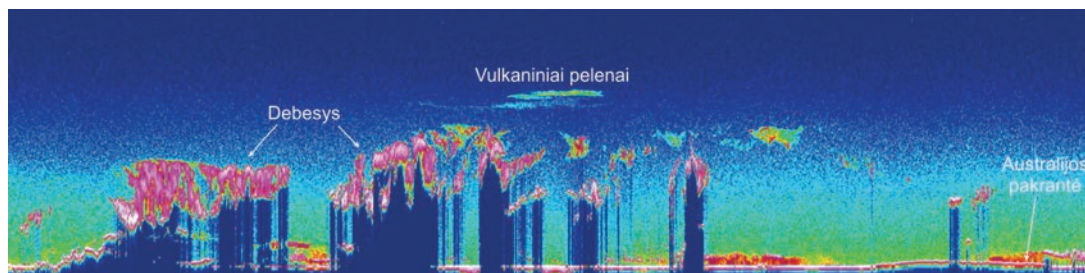
2.3.4. pav. ICESat 2 palydovo kompiuterinės grafikos iliustracija (Garner, Dunbar, 2019).



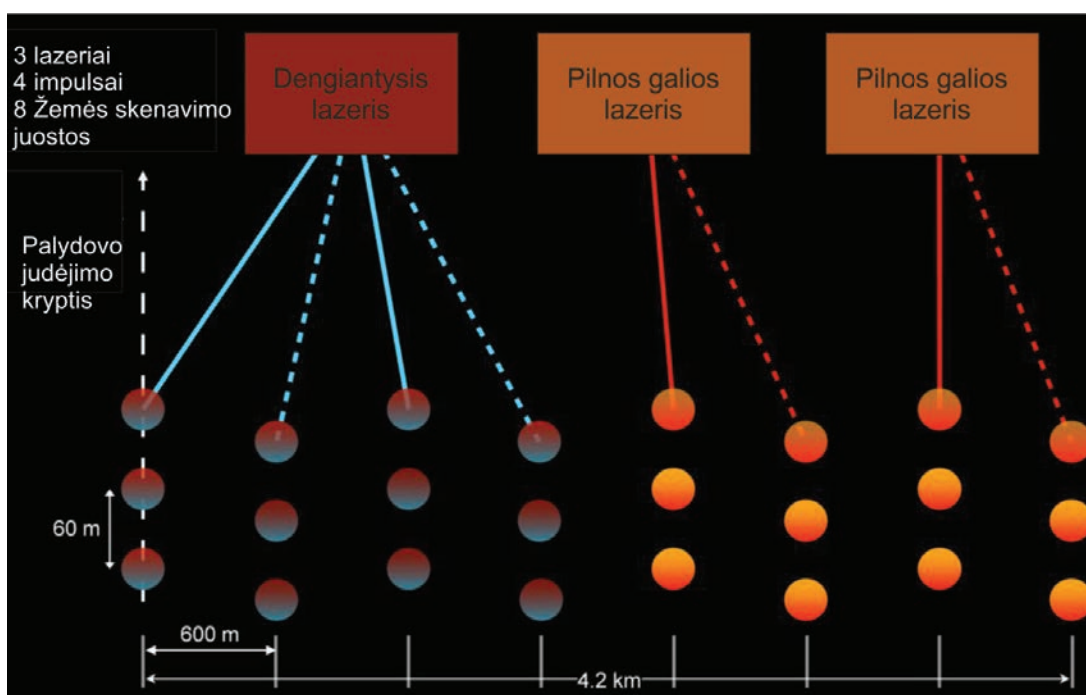
2.3.5. pav. NASA palydovo CALIPSO jutikliai ir jų išdėstymo schema (pagal Trepte, 2020).

Šio jutiklio duomenys ir gauti rezultatai mokslininkams padeda suprasti ir analizuoti globalius atmosferoje vykstančius procesus. Naudojant jutiklio CALIOP duomenis galima nustatyti ledynų ir kitų paviršių aukštį, nesudėtinga identifikuoti debesis, aerozolius ar vulkaninius pelenus atmosferoje (2.3.6. pav.).

Kiek kitokios – biosferos ir ekosistemų tyrimų – pakraipos yra 2018 m. gruodį išskeltas GEDI („Globalios ekosistemų dinamikos tyrimų“) prietaisas. Ši lidaro sistema sudaryta iš trijų lazerių, kurie 8 lygiagrečiomis juostomis skenuoja Žemės paviršių. Kiekvienas lazeris generuoja 242 impulsus per sekundę ir aprėpia 25 m plotą, lazeriai naudoja 1064 nm ilgio bangas. Matavimo taškai išsidėstę 60 m atstumu palydovo judėjimo trajektorijos kryptimi. Atstumas tarp 8 skenavimo juostų siekia apie 600 m (skersai palydovo skridimo trajektorijos) (2.3.7. pav.).

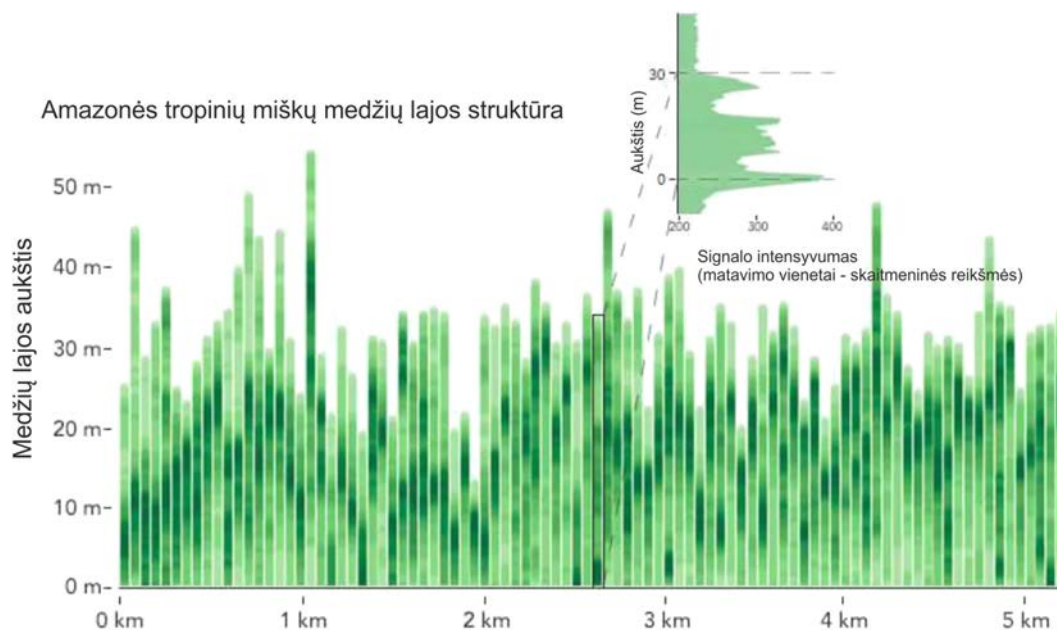


2.3.6. pav. Palydovo CALIPSO lidaro CALIOP užfiksuotas skersinis atmosferos pjūvis virš Pietryčių Azijos, Indonezijos ir Australijos teritorijų 2006 m. birželio 7 d. Žalsvi, gelsvi ir melsvi atspalviai paveiksle rodo jutiklio lazerio signalo atspindžio nuo debesų, aerozolių ir oro molekulių intensyvumą. Debesys pavaizduoti šviesiais rožinės ir baltos spalvos atspalviais, po debesimis matomos tamsios zonos, kur signalas neprasisiskverbia iki Žemės paviršiaus (pagal Lorentz, 2011).



2.3.7 pav. GEDI misijos lidaro erdvinės Žemės paviršiaus aprėpties ir lazerių impulsų schema (Dubayah ir kt. 2018).

Prietaisai sumontuoti Tarptautinėje kosminėje stotyje. GEDI misijos tikslas plačiąja prasme – prisidėti prie globalių anglies ir vandens ciklų ir juose vykstančių procesų kompleksiško supratimo, jų identifikavimo, taip pat prisidėti ir vykdyti bioįvairovės ir buveinių tyrimus. Ja siekiama surinkti ir 3D formatu pavaizduoti duomenis apie miškų lajos aukštį, vertikalios jos struktūrą ir sandarą, taip pat paviršiaus reljefo duomenis (2.3.8. pav.).



2.3.8. pav. GEDI palydovo lidaro vertikalus pjūvis miškingoje teritorijoje Amazonėje. Lidaro grįžtamojo signalo intensyvumo reikšmės koreliuoja su augalijos tankumu ir medžių lajų aukščiu. Kuo tankesnė augalija konkrečiame vertikalaus profilio taške, tuo didesnis signalo intensyvumas (pagal Merzdorf, 2020).

2.3.2. Pasyvieji infraraudonojo spektro jutikliai

Infraraudonojo spektro pasyviuosius jutiklius pagal jų veikimo principą galima suskirstyti į kelias dideles grupes, tai įvairūs optiniai radiometriniai – spektrometriniai jutikliai, daugiaspektriai vaizdų formuotuvai ir infraraudonojo spektro vertikalaus zondavimo jutikliai.

Pirmoji jutiklių grupė plačiai taikoma nuotoliniuose Žemės tyrimuose ir apima tokias sritis kaip atmosferos sandaros, cheminių savybių, kietųjų dalelių (aerzolių) koncentracija, šiltnamio dujų emisijų ir erdvinės sklaidos, paviršiaus temperatūros, jūrų ir vandenynų bei ledo ir sniego dangos, Žemės paviršiaus savybių, augalinės dangos savybių, dirvos drėgmės ir savybių, gaisrų ir sausrų, potvynių ir kitų gamtinių ekstremalių reiškinių, vėjo, vandenynų ir jūrų vandens savybių stebėseną ir tyrimai. Antroji grupė – vertikalaus zondavimo jutikliai, dažniausiai naudojami atmosferos dujinės ir cheminės sudėties, debesų, vėjo lauko tyrimams.

Pasyviesiems palydovų jutikliams pagal jų konstrukcinius ir technologinius ypatumus yra būdingos savybės, nuo kurių priklauso tiek jų tikslumas, tiek taikymo galimybės ir sritys. Šiuos jutiklius apibūdina:

- 1) paviršiaus skenavimo ir duomenų fiksavimo pobūdis, erdvinė aprėptis, orbitos cikliškumas;
- 2) spektrinis diapazonas ir spektrinė skiriamoji geba;
- 3) erdvinė skiriamoji geba;
- 4) radiometrinė skiriamoji geba.

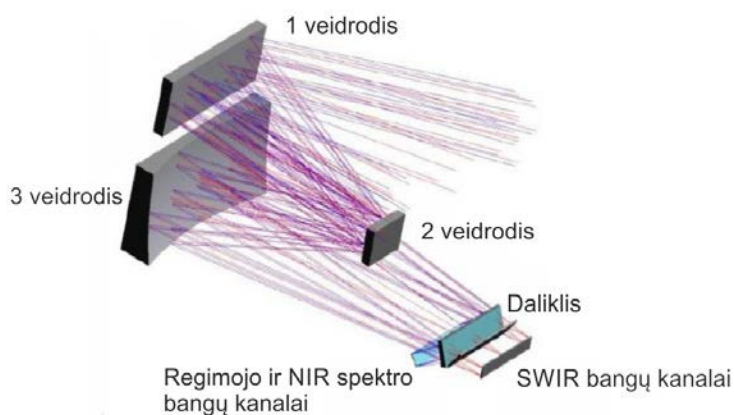
Didžioji dalis spektrometrinių ir radiometrinių, taip pat ir kitų prietaisų, skirtų spektriniams vaizdams generuoti (pavyzdžiui, daugiaspektriai vaizdų formuotuvai), apima integruotas teleskopines sistemas, kurios leidžia duomenis fiksuoti ne tik taškinio skenavimo būdu (kaip, pavyzdžiui, lazeriniais altimetrais), bet ir gauti erdvinę informaciją apie reiškinį ar tiriamus objektus. Šie prietaisai kartu su vertikalaus atmosferos zonavimo jutikliais dažnai apima skirtingo pločio ultravioletinės, regimosios šviesos, NIR, SWIR ir MIR arba TIR elektromag-

netinės spinduliuotės ruožus, tačiau priklausomai nuo jų konstrukcijos pasižymi skirtingu spektro juostų skaičiumi, spektrine ir radiometrine skiriamąja geba. Bangų ilgis ir prietaisų spektro juostos bei jutiklių kanalai parenkami priklausomai nuo tyrimų objekto ir atmosferos arba Žemės paviršiaus, tiriamų geosferų optinių spektrometrinių savybių. Žemės paviršiaus, dirvožemio drėgmės ir savybių tyrimams dažnai naudojami spektriniai kanalai, esantys NIR ir SWIR šviesos diapazone, o augalijos tyrimams tinkami regimosios šviesos, NIR diapazonai. Žemės paviršiaus, atmosferos, vandenynų temperatūros kaita ir savybės stebimos TIR ir MIR, ledo ir sniego danga – NIR, SWIR spektre.

Skirtingų spektro ruožų juostų taikymo galimybes įvairių Žemės geosferų ir jų elementų tyrimams gana gerai iliustruoja „Copernicus“ programos palydovų *Sentinel 2* palydovų pavyzdys. Pagrindinis palydovų jutiklis priskiriamas daugiaspektrių radiometrinių skenuojamojo skenuojamųjų tipo vaizdų formuotuvų grupei. Tai išilginio skenavimo tipo jutiklis, kuris skenuoja išilgai palydovo trajektorijos ir detektorių masyvu fiksuoja vaizdą iš karto visuose jutiklio veikimo kanaluose ir spektro juostose (žr. 2.2. skyrelį 2.2.9. pav.).

Sentinel 2 (*Sentinel 2A* ir *2B*) daugiaspektriai palydoviniai prietaisai veikia pasyviai, fiksuodami, elektromagnetinę spinduliuotę, atspindėtą nuo Žemės paviršiaus, atmosferos, debesų ir pan. Signalas priimamas trijų veidrodžių sistemos teleskopu su anastigmatiniu objektyvu. Prietaiso fiksuojama spinduliuotė spektriniais dalikliais išskaidoma ir nukreipiama į du atskirus prietaiso židinio plokštumos mazgus, sudarytus iš detektorių (MCT, MOC ir CMOS) matricių ir elektroninių nuskaitymo prietaisų. Prietaiso fiksuojamas/gaunamas šviesos pluoštas (spinduliuotė) išskaidomas spektrinių daliklių pagalba (dichroinio gaunamo elektromagnetinio signalo daliklio) ir nukreipiamas į du atskirus prietaiso židinio plokštumos mazgus (sudarytus iš detektorių (MCT, MOC ir CMOS) matricių ir nuskaitymo elektronikos prietaisų). Pirmasis – skirtas matomojo regimojo ir NIR spindulių, antrasis – SWIR spinduliuotės bangoms (2.3.9. pav.).

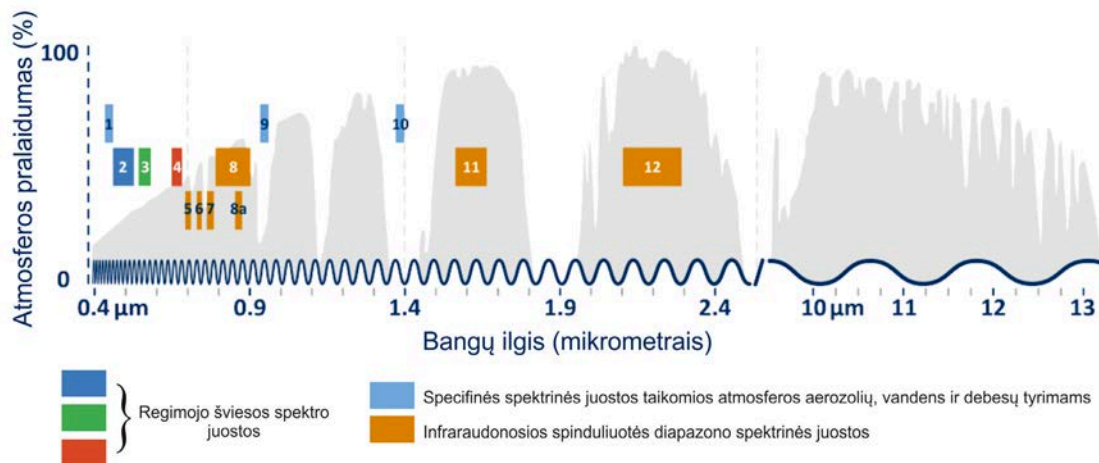
2.3.9. pav. Palydovo *Sentinel 2* daugiaspektrio jutiklio šviesos registravimo, sklidimo ir išskaidymo į spektrinius spektro ruožus juostas schema (pagal ESA, 2015).



Palydovų *Sentinel 2* jutiklis turi 13 spektro kanalų (palyginimui – palydovas *Landsat 8* turi 11). Erdvinė palydovo vaizdų skiriamoji geba varijuoja tarp 10, 20 ir 60 m skirtinguose kanaluose. Spektrinė skiriamoji geba taip pat skiriasi, 18 nm ji siekia 740,2 nm bangų ilgio ruože ir net 238 nm – 2204,4 nm ruožo kanale. Palydovo erdvinė paviršiaus aprėptis – 290 km (detalus aprašymas pateiktas 2.2.3. lentelėje, žr. 2.2.2. skyrelį).

Spektro juostų ir kanalų išdėstymas elektromagnetinės spinduliuotės spektro atžvilgiu didžiąja dalimi nulemtas atmosferos sugerties bei jos optinių savybių (2.3.10. pav.), taip pat konkrečių kanalų taikymo sričių, pavyzdžiui: 8 palydovo kanalas (842 nm) taikomas chlorofilo ir augalų biomasei vertinti; 5 (705 nm) – augalinei dangai klasifikuoti, išskirti; 6 (740 nm) – augalinei dangai klasifikuoti, išskirti; 7 (786 nm) – augalinei dangai klasifikuoti, išskirti; 8a

(865 nm) – augalinei dangai klasifikuoti, išskirti; 11 (1610 nm) – miškams klasifikuoti; 12 (2190 nm) – biomasei išskirti ir analizuoti, išskiriant dirvožemio dangą, identifikuojant ne-gyvą biomasę; 9 (945 nm) – vandens garų kiekiui atmosferoje nustatyti; 10 (1375 nm) – debesims tirti.



2.3.10. pav. Palydovo Sentinel 2 palydovo kanalų ir jų spektrinių spektro ruožų juostų išsidėstymas elektromagnetinės spinduliuotės spektre.

Sentinel 2 pagal aprašytas palydovo jutiklių savybes nėra unikalus. Gausybė Žemės stebėjimo palydovų pasižymi panašiomis, o kai kuriais atvejais ir gerokai sudėtingesnėmis, įvairesnėmis savybėmis (pavyzdžiui, aukštesne spektrine ir erdvine, radiometrine skiriamąja geba, dalis apima šiluminių bangų diapazoną, jutikliai veikia keliasdešimtyje ar net keliuose šimtuose spektro juostų). Be optinių spektrinių vaizdų formuotuvų Žemei stebėti plačiai naudojami ir kiti radiometriniai bei spektrometriniai jutikliai. Pagrindinės jų savybės ir taikymo sritys aprašytos 2.3.1.–2.3.5. lentelėse.

2.3.1. lentelė. Regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro didelės skiriamosios gebos radiometro AVHRR/3 techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAI	NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-19, Metop-A, Metop-B, Metop-C
TAIKYMO SRITYS	Daugiafunkcinės misijos, naudojant regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro vaizdų spektrometriją debesų, aerozolių kiekio, vandenynų ir jūrų vandens temperatūros, daugiamėčio jūros ledo, Žemės paviršiaus spindulinių savybių, NDVI, gaisrų, sniego dangos ir kt. stebėsenai.
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	6 kanalai: regimojo spektro, NIR, SWIR, MWIR, TIR.
SKENAIVIMO POBŪDIS	Skersai judėjimo krypties: 2048 pikseliai 800 metrų palydovo nadyre su erdvine aprėptimi 2900 km. Išilgai judėjimo krypties: šešios 1,1 km juostos kas sekundę.
ORBITOS CIKLAS	Globali aprėptis 2 kartus per dieną ilgabangės spinduliuotės kanaluose ir 1 kartą per dieną trumpabangės spinduliuotės kanaluose.
SKIRIAMOJI GEBA	1,1 km

CENTRINĖS BANGOS ILGIS (μm)	SPEKTRINIS INTERVALAS (μm)	RADIOMETRINĖ SKIRIAMOJI GĖBA ARBA SIGNALO-TRIUKŠMO SANTYKIS ESANT NURODYTOS ĮVESTIES SPEKTRINIAM SPINDULIAVIMUI
0,630	0,58–0,68	9 esant 0,5 % albedui
0,862	0,725–1,00	9 esant 0,5 % albedui
1,61	1,58–1,64	20 esant 0,5 % albedui
3,74	3,55–3,93	0,12 K esant 300 K
10,80	10,3–11,3	0,12 K esant 300 K
12,00	11,5–12,5	0,12 K esant 300 K

2.3.2. lentelė. Regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro vidutinės skiriamosios gėbos spektroradiometro MODIS techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAI	EOS Terra ir EOS Aqua			
TAIKYMO SRITYS	Daugiafunkcinės misijos, naudojant regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro vaizdų spektrometriją debesų, aerosolių kiekio, vandenynų ir jūrų, sausumos paviršiaus temperatūros, daugiamečio jūros ledo, vandenyno spalvų savybių, Žemės paviršiaus spindulinių savybių, augalijos spektrinių rodiklių, gaisrų, sniego dangos, ozono, poliarinių regionų ir kt. stebėsenai.			
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	36 kanalai: regimojo spektro, NIR, SWIR, MWIR, TIR spinduliuotės fiksavimo galimybė			
SKENAVIMO POBŪDIS	Skenavimas skersai kelio: 19,7 km pločio juosta išilgai palydovo judėjimo trajektorijos. Skersinis skenavimas kas 2,956 s. Skenavimo juosta apima 16 lygiagrečių linijų, apimančių 2048 pikselius 1000 m palydovo nadyre arba 32 lygiagrečias linijas, apimančias 4096 pikselius 500 m palydovo nadyre, arba 64 lygiagrečias linijas, apimančias 8192 pikselius 250 m palydovo nadyre. Skenavimo ploto aprėptis – 2330 km.			
ORBITOS CIKLAS	Globali aprėptis apytiksliai 2 kartus per dieną ilgabangės spinduliuotės kanaluose ir 1 kartą per dieną trumpabangės spinduliuotės kanaluose.			
SKIRIAMOJI GĖBA	Du kanalai – 250 m, 500 m (5 kanalai), 1000 m (29 kanalai)			
CENTRINĖS BANGOS ILGIS (μm)	SPEKTRINIS INTERVALAS (μm)	RADIOMETRINĖ SKIRIAMOJI GĖBA ARBA SIGNALO-TRIUKŠMO SANTYKIS ESANT NURODYTOS ĮVESTIES SPEKTRINIAM SPINDULIAVIMUI	MOMENTINIS APRĖPTIES LAUKAS PRIE PALYDOVO NADYRE (M)	TIESIOGINĖ PASKIRTIS
0,645	0,62–0,67	128 esant 21,8 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	250	Žemės paviršius, debesys, aerosoliai
0,858	0,841–0,876	201 esant 24,7 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	250	
0,469	0,459–0,479	243 esant 35,3 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	500	Žemės paviršius, debesys, aerosolių savybės
0,555	0,545–0,565	228 esant 29,0 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	500	
1,240	1,230–1250	74 esant 5,4 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	500	
1,640	1,628–1,652	275 esant 7,3 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	500	
2,130	2,105–2,155	110 esant 1,0 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	500	

CENTRINĖS BANGOS ILGIS (μm)	SPEKTRINIS INTERVALAS (μm)	RADIOMETRINĖ ARBA SIGNALO-TRIUKŠMO ESANT NURODYTOS ĮVESTIES SPINDULIAVIMUI	MOMENTINIS AP- RĖPTIES LAUKAS PRIE PALYDOVO NADYRE (m)	TIESIOGINĖ PASKIRTIS
0,418	0,405–0,420	880 esant $44,9 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Vandenynų spalva, fitoplanktonas, biogeochemija
0,433	0,438–0,448	838 esant $41,9 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,488	0,483–0,493	802 esant $32,1 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,531	0,526–0,536	754 esant $27,9 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,551	0,546–0,556	750 esant $21,0 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,667	0,662–0,672	910 esant $9,5 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,678	0,673–0,683	1087 esant $8,7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,748	0,743–0,753	586 esant $10,2 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,870	0,862–0,877	516 esant $6,2 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,905	0,890–0,920	167 esant $10,0 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Atmosferos vandens garai
0,936	0,931–0,941	57 esant $3,6 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
0,940	0,915–0,956	250 esant $15,0 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
3,75	3,660–3,840	0,05 K esant $0,45 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Žemės paviršiaus ir debesų temperatūra
3,96	3,929–3,989	2,00 K esant $2,38 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
3,96	3,929–3,989	0,07 K esant $0,67 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
4,06	4,020–4,080	0,07 K esant $0,79 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
4,47	4,433–4,498	0,25 K esant $0,17 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
4,55	4,482–4,549	0,25 K esant $0,59 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Atmosferos temperatūra
1,375	1,360–1,390	150 esant $6,0 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Plunksniniai debesys, vandens garai
6,77	6,535–6,895	0,25 K esant $1,16 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
7,33	7,175–7,475	0,25 K esant $2,18 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
8,55	8,400–8,700	0,25 K esant $9,58 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Debesų sąvybės
9,73	9,580–9,880	0,25 K esant $3,69 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Ozonas
11,01	10,780–11,280	0,05 K esant $9,55 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Žemės paviršiaus / debesų temperatūra
12,03	11,770–12,270	0,05 K esant $8,94 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
13,34	13,185–13,485	0,25 K esant $4,52 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	Viršutinė debesų sluoksnio temperatūra
13,64	13,485–13,785	0,25 K esant $3,76 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
13,94	13,785–14,085	0,25 K esant $3,11 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	
14,24	14,085–14,385	0,25 K esant $2,08 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	1000	

2.3.3. lentelė. Regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro kameros SEVIRI techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAI	<i>Meteosat 8, Meteosat 9, Meteosat 10, Meteosat 11</i>	
TAIKYMO SRITYS	Daugiafunkcinės misijos, naudojant regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro vaizdus debesų, aerozolių sklaidos, vandenynų ir jūrų temperatūros, Žemės paviršiaus spindulinių savybių, NDVI, gaisrų, vėjo iš debesų judėjimo dinamikos stebėsenai.	
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	12 kanalų: regimojo spektro, NIR, SWIR, MWIR, TIR.	
SKENAIVIMO POBŪDIS	Mechaninis, besisukantis palydovas Rytų ir vakarų kryptimi tęstinis, pietų ir šiaurės kryptimi pažingsnis	
ORBITOS CIKLAS	Geostacionari orbita. Stebėjimai atliekami kas 15 min. Fragmentiški plotai gali būti stebimi trumpesniais laiko intervalais.	
SKIRIAMOJI GEBA	Momentinis aprėpties laukas – 4,8 km. 3 km registravimo plotas vienuolikai siaurų ruožų kanalų. Momentinis aprėpties laukas – 1,6 km. 1 km registravimo plotas vienam regimojo spektro kanalui.	
CENTRINĖS BANGOS ILGIS(μm)	SPEKTRINIS INTERVALAS (μm)	RADIOMETRINĖ SKIRIAMOJI GEBA ARBA SIGNALO-TRIUKŠMO SANTYKIS ESANT NURODYTOS ĮVESTIES SPEKTRINIAM SPINDULIAIVIMUI
Neveikiantis plačiajuostis kanalas	0,6–0,9	4,3 esant 1 % albedo
0,635	0,56–0,71	10,1 esant 1 % albedo
0,81	0,74–0,88	7,28 esant 1 % albedo
1,64	1,5–1,78	3 esant 1 % albedo
3,92	3,48–4,36	0,35 K esant 300 K
6,25	5,35–7,15	0,75 K esant 250 K
7,35	6,85–7,85	0,75 K esant 250 K
8,70	8,30–9,10	0,28 K esant 300 K
9,66	9,38–9,94	1,50 K esant 255 K
10,8	9,80–11,8	0,25 K esant 300 K
12,0	11,0–13,0	0,37 K esant 300 K
13,4	12,4–14,4	0,80 K esant 270 K

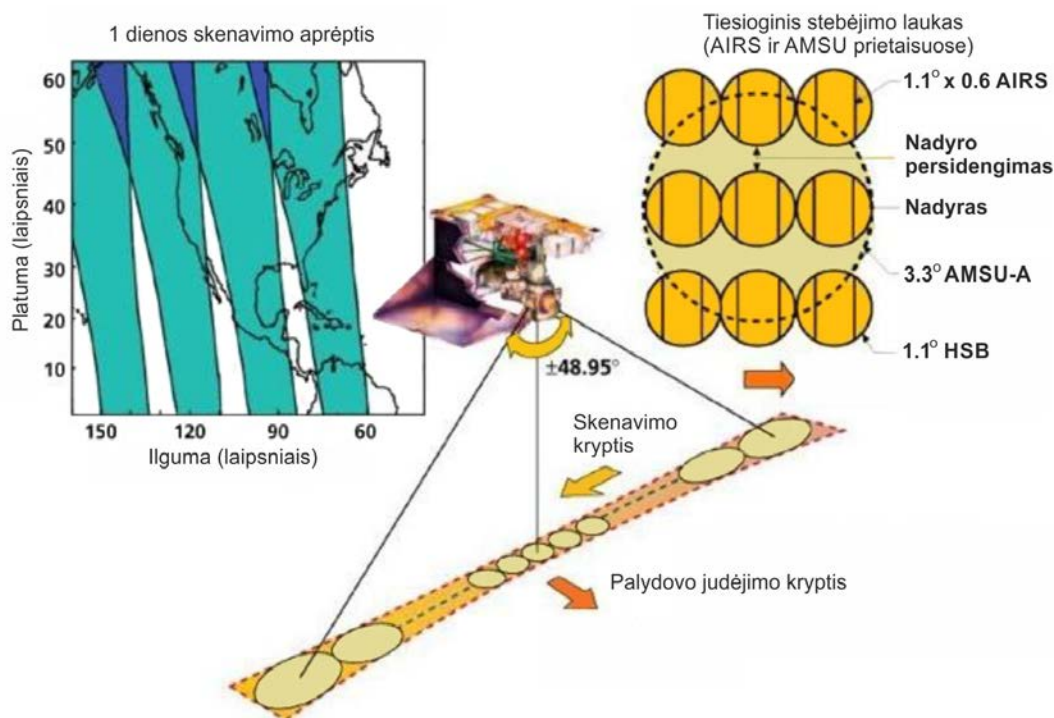
2.3.4. lentelė. Didelės skiriamosios gebos optinio hiperspektrinio spektrometro *Hyperion* techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAS	NMP EO-1
TAIKYMO SRITYS	Žemės paviršiaus stebėseną, ypač orientuojantis į augalijos tyrimus, anglies ciklą ir pan.
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	220 kanalai: regimojo spektro, NIR, SWIR spektrometras. Bangų diapazonai tarp 0,4–1 μm ir 0,9–2,5 μm. Spektrinė skiriamoji geba – 10 nm.
SKENAIVIMO POBŪDIS	Skenavimas išilgai judėjimo krypties.
ORBITOS CIKLAS	Globalus ciklas – 1 metai.
SKIRIAMOJI GEBA	30 m, paviršiaus aprėptis – 7,5 km, 250 pikselių kiekvienoje skenavimo juostoje.

2.3.5. lentelė. Didelės skiriamosios gebos optinio daugiaspektrio radiometro ETM+ techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAS	<i>Landsat 7</i>		
TAIKYMO SRITYS	Žemės dangos ir žemės naudojimo stebėseną, paviršiaus vandens telkinių, augmenijos klasifikavimo, gamtinių stichijų poveikio stebėseną.		
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	8 kanalai: 1 panchromatinis, 6 regimojo spektro, NIR, SWIR, 1 TIR.		
SKENAIVIMO POBŪDIS	Skenavimas skersai kelio: 6000 pikselių vienoje eilutėje; 12 000 pikselių (panchromatiniame kanale); 3000 pikselių (TIR kanale). Palydovo aprėptis – 185 km.		
ORBITOS CIKLAS	16 dienų		
SKIRIAMOJI GEBA	30 m (6 siaurabangiai kanalai), 15 m (panchromatinis kanalas), 60 m (TIR).		
CENTRINĖS BANGOS ILGIS (μm)	SPEKTRINIS INTERVALAS (μm)	RADIOMETRINĖ SKIRIAMOJI GEBA ARBA SIGNALO-TRIUKŠMO SANTYKIS ESANT NURODYTOS ĮVESTIES SPEKTRINIAM SPINDULIAVIMUI	
		SILPNAS SIGNALAS	STIPRUS SIGNALAS
Panchromatinis	0,50–0,90	14 esant 22,9 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	80 esant 15,3 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
0,48	0,45–0,52	36 esant 40 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	130 esant 190 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
0,56	0,53–0,61	37 esant 30 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	167 esant 193,7 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
0,66	0,63–0,69	24 esant 21,7 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	27 esant 149,6 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
0,83	0,78–0,90	33 esant 13,6 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	226 esant 149,6 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
1,65	1,55–1,75	34 esant 4,0 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	176 esant 31,5 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
2,20	2,09–2,35	27 esant 1,7 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	130 esant 11,1 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
11,45	10,4–12,5	0,2 K esant 300 K	0,20 K esant 320 K

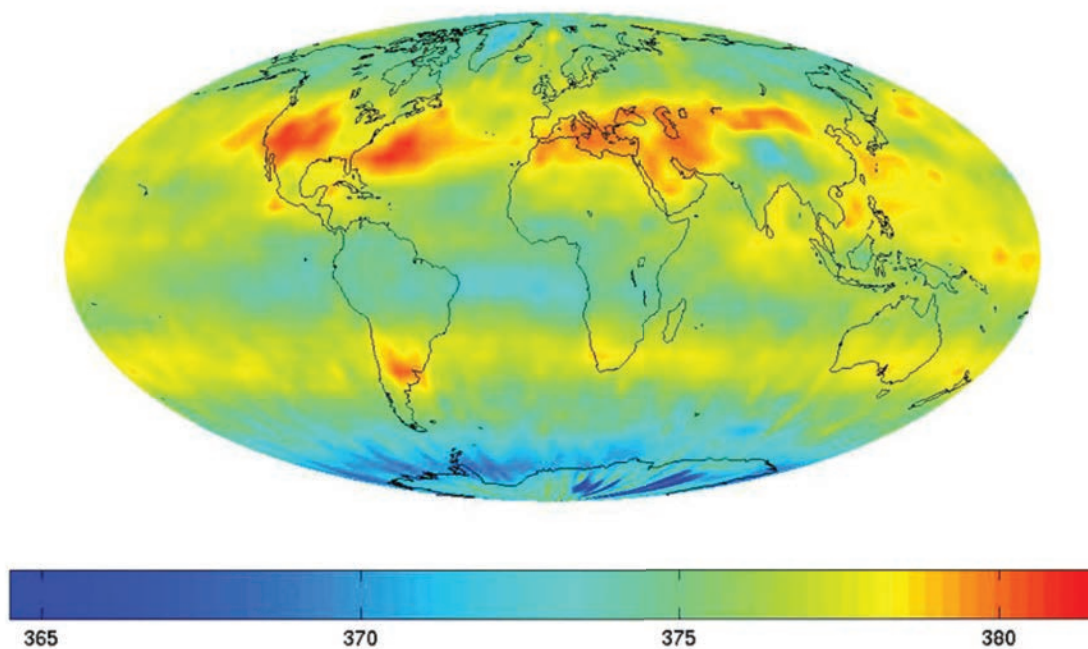
Kitokiu principu veikia infraraudonojo spektro vertikalaus zondavimo jutikliai. Šie jutikliai matuoja infraraudonąją spinduliuotę, atspindėtą skirtinguose atmosferos sluoksniuose. Dėl sukamųjų (rotacinių) veidrodžių (veidrodžiai sukasi apie savo ašį), judančių išilgai arba skersai palydovo judėjimo krypties (2.3.11. pav.), infraraudonoji spinduliuotė nukreipiama į prietaisą, kuriame integruotas didelės spektrinės skiriamosios gebos spektrometras.



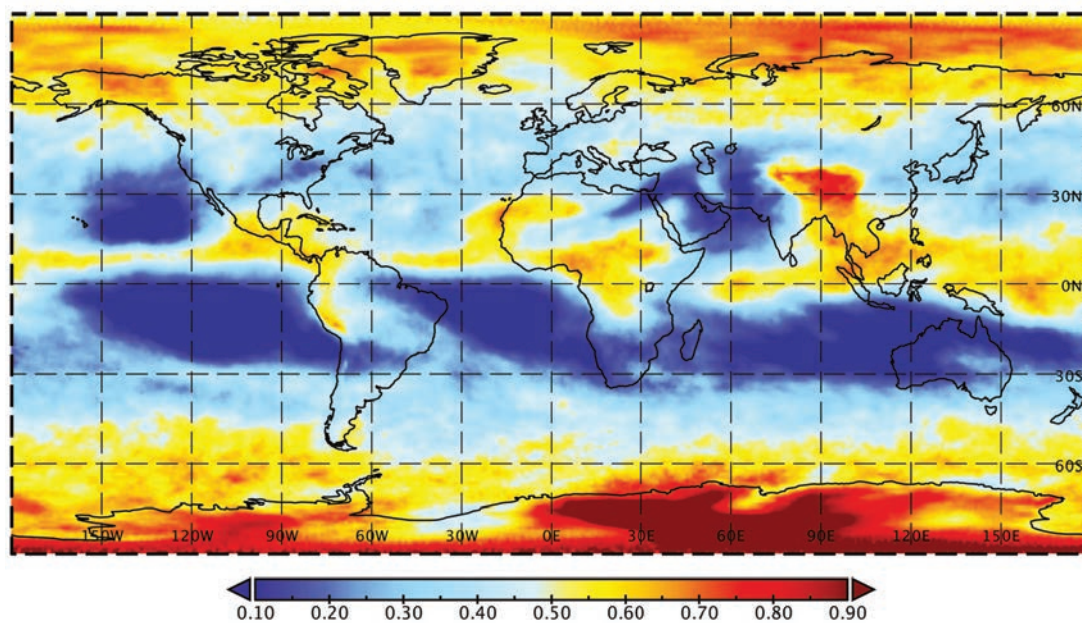
2.3.11. pav. Infraraudonojo spektro vertikalaus zondavimo jutiklio skersai nadyro taško skenavimo principas ir paviršiaus erdvinė aprėptis skenavimo metu (AIRS jutiklio pavyzdžiu) (pagal Nacionalinę vandenynų ir atmosferos administraciją, palydovų taikymo ir tyrimų centrą (NOAA STAR), 2016).

Spektrometras gaunamą signalą išsklaido į atskiras infraraudonojo spektro juostas pagal bangų ilgį. Tuo tarpu palydovui judant savo trajektorija sukamieji veidrodžiai palaipsniui padengia Žemės plotą iki 800 km pločio juosta (abipus palydovo Žemės judėjimo trajektorijos). Įvairiems palydovams būdinga erdvinė Žemės aprėptis kaip ir spektrinė skiriamoji geba, infraraudonojo spektro juostų skaičius varijuoja ir skiriasi. Svarbus vertikalaus zondavimo jutiklių pranašumas lyginant su kitomis technologijomis yra atmosferos cheminės sudėties analizės ir atskirų atmosferos dujų (O_3 , SO_2 , HCHO, NO_2 , CO, CH_4 ir kt.) pasiskirstymo vertikalėje ir skenavimo procese – erdvinėje plotmėje, galimybė (2.3.12. pav.). Kiekviena spektrometrinių prietaisų išskirta spektro juosta ir jos atsakas į grįžtantį signalą iš esmės gali nurodyti specifinių atmosferos sluoksnių temperatūrą, vandens garų (2.3.13. pav.) ir kitų atmosferos dujų kiekį jos stovymės horizontuose. Šio tipo jutikliai suteikia galimybę atlikti matavimus nuo pažemio sluoksnio iki pat stratosferos.

Plačiau kai kurių vertikalaus atmosferos zondavimo jutiklių ir jų misijų apžvalgos pateikiamos 2.3.6. ir 2.3.7. lentelėse.



2.3.12. pav. CO₂ koncentracija (ppm) vidurinėje troposferoje (8 km aukštyje) remiantis 2003 m. NASA AIRS prietaiso duomenimis (pagal NASA/JPL, 2009).



2.3.13. pav. Santykinis drėgnumas 2002 m. spalio mėn. (500 hPa lygyje) remiantis NASA AIRS Obs4MIPs infraraudonojo spektro atmosferos vertikalaus zondavimo jutiklio duomenimis (pagal Tian ir kt., 2019).

2.3.6. lentelė. Infraraudonojo spektro vertikalaus zondavimo jutiklio TOPOMI (angl. TROPOspheric Monitoring Instrument) techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAS	<i>Sentinel 5P (Precursor)</i>			
TAIKYMO SRITYS	Atmosferos cheminės sudėties stebėseną (O_3 , SO_2 , HCHO, NO_2 , CO, CH_4), debesų slėgio, optinio gylio, aerozolių indekso ir sluoksnio storio tyrimai.			
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	Spektrinis diapazonas: ultravioletinis, regimojo spektro, NIR, SWIR.			
SKENAVIMO POBŪDIS	Skenavimas išilgai judėjimo krypties.			
ORBITOS CIKLAS	Globali aprėptis kasdien, jei atliekami stebėjimai skersai palydovo trajektorijos.			
SKIRIAMOJI GEBA	Paviršiaus skenavimo aprėptis – 2600 km, viena juosta per sekundę.			
CENTRINĖS BANGOS ILGIS (μm)	SPEKTRINĖ SKIRIAMOJI GEBA (μm)	SPEKTRINĖ ATRANKA	REIKALAUJAMAS SIGNALO-TRIUKŠMO SANTYKIS	RADIOMETRINIS TIKSLUMAS (%)
270–300	0,48	0,071	100–800	1,9
300–320	0,49	0,073	90–700	1,6
320–405	0,54	0,22	800–1000	1,6
405–495	0,54	0,22	800–1000	1,6
675–725	0,38	0,14	100–500	1,6
725–775	0,38	0,14	100–500	1,6
2305–2345	0,25	0,10	100–120	1,5
2345–2385	0,25	0,10	100–120	1,5

2.3.7. lentelė. Infraraudonojo spektro atmosferos interferometro IASI (angl. Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) techninė informacija ir taikymo sritys.

PALYDOVAI	<i>Metop A, Metop B, Metop C</i>		
TAIKYMO SRITYS	Didelės vertikalios skiriamosios gebos temperatūros ir drėgmės profiliavimas, grubus ozono sluoksnio profiliavimas, bendrinis vertikalus CH_4 , CO, CO_2 , HNO_3 , NO_2 , SO_2 ir aerozolių profiliavimas.		
PAGRINDINĖS SAVYBĖS	MWIR ir TIR spektrinis diapazonas.		
SKENAVIMO POBŪDIS	Skersai palydovo skriejimo trajektorijos, 48 km juosta kas 8 sekundes, vidutinis skenavimo atstumas – 24 km.		
ORBITOS CIKLAS	Beveik globali aprėptis du kartus per dieną.		
SKIRIAMOJI GEBA	Paviršiaus skenavimo aprėptis – 2130 km.		
CENTRINĖS BANGOS ILGIS (μm)	SPEKTRO DIAPAZONAS	SPEKTRINĖ SKIRIAMOJI GEBA (μm)	RADIOMETRINĖ SKIRIAMOJI GEBA ESANT APIBRĖŽTAI TEMPERATŪRAI
8,26–15,50	645–1210	0,25	0,2–0,3 K esant 280 K
5,00–8,26	1210–2000	0,25	0,2–0,5 K esant 280 K
3,62–5,00	2000–2760	0,25	0,5–0,2 K esant 280 K
10,3–12,5	netaikoma	netaikoma	0,8 K esant 280 K

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Išvardykite po du aktyviusius ir pasyviuosius palydovų jutiklius.
- Kokie yra pagrindiniai spektrometrinių ir radiometrinių jutiklių skirtumai?
- Apibūdinkite, kaip veikia lidarai.
- Kam naudojami vertikalaus zondavimo jutikliai?

NAUDOTA LITERATŪRA

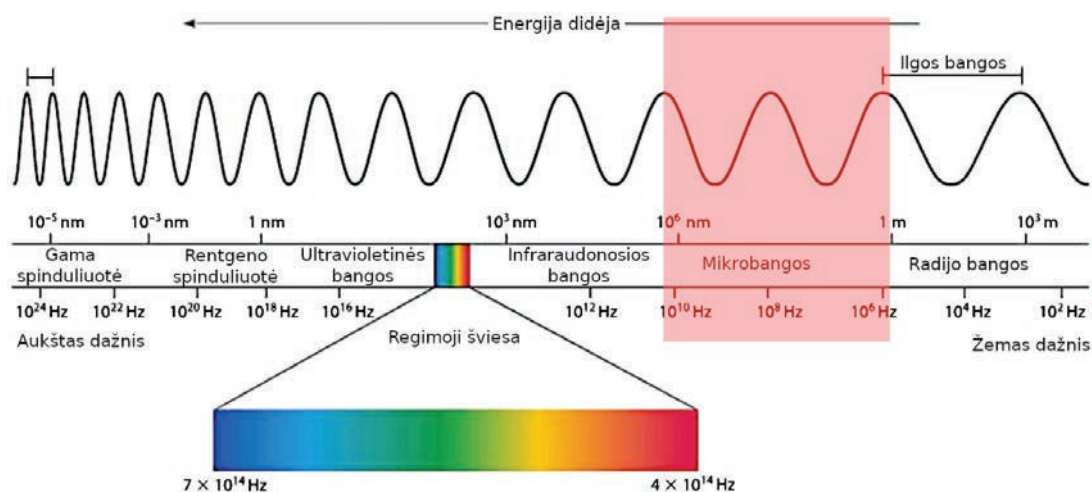
- Abdalati, W., Zwally, H. J., Binshanler, R. (2010). The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98 (5), 735-750.
- Ahokas, E., Yu, X., Oksanen, J., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Hyyppä, H. (2005). Optimization of the scanning angle for countrywide laser scanning. *Workshop Laser scanning 2005*. Netherlands: Enschede.
- ASWG (2008). *Advanced Infrared Sounders* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/aswg/ir-sounders/>
- Cole J. (2002). *CALIPSO: A Global Perspective of Clouds and Aerosols From Space* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CALIPSO/CALIPSO3.php>
- Dubayah, R., Blair J. B., Goetz S. et al (2018). *GEDI instrument specifications* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://gedi.umd.edu/instrument/specifications/>
- ESA (2015). *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>
- Garner R., Dunbar B. (2019). *ICESat-2* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://www.nasa.gov/content/goddard/about-icesat-2>
- Juodkienė, V. (2018). *Hiperspektrinio skenavimo galimybės medžių charakteristikoms įvertinti*. Daktaro disertacija. Akademija: Aleksandro Stulginskio universitetas Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras.
- Kalantaitė, A. (2015). *LIDAR matavimų ir taikymų technologijų tobulinimas fiziniam žemės paviršiui modeliuoti*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.
- Kang, Y., Pan, L., Sun, M., Liu, X. (2017). Destriping high-resolution satellite imagery by improved moment matching. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 22,6346-6365.
- Kramer, H. J. et al. (2011). *Copernicus: Sentinel-5 (Atmospheric Monitoring Mission) in LEO* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-5>
- Kukko, A., Hyyppä J. (2009). Small-footprint laser scanning simulation for system validation, error assessment and algorithm development. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 75, 9, 1177-1189.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., Chandra, S. (2007). The effect of LiDAR data density on DEM accuracy. *International Congress on Modelling and Simulation*, Christchurch, New Zealand, 1363-1369.
- Lorentz K. (2011). *CALIPSO's First Images Offer New Dimension to Air Quality and Climate Research* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: https://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/news/First_Light.html
- Merzdorf J. (2020). *NASA forest structure mission releases first data* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://phys.org/news/2020-01-nasa-forest-mission.html>
- NASA Earthdata (2020). *Remote Sensors* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors>
- NASA ICESat (2016). *ICESat: Spacecraft* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/spacecraft.php>

- NASA/JPL (2009). *Global Carbon Dioxide Transport from AIRS Data, July 2009* [žiūrėta 2020-02-01].
Prieiga internete: <https://www.nasa.gov/topics/earth/features/pia12339.html>
- NOAA STAR (2016). *AIRS Overview* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/spb/LANDEM/instr_AIRS.php
- Ose, K., Corpetti, T., Demagistri, L. (2016). *Optical Remote Sensing of Land Surface*. ISTE Press: Elsevier.
- Sun, X. (2018). Lidar Sensors From Space. In Liang S. (Eds.), *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier.
- Tian, B., Fetzer, E. J., Manning, E. M. (2019). The Atmospheric Infrared Sounder Obs4MIPsVersion 2 Data Set. *Earth and Space Science*, 6, 324–333.
- Trepte C. R. (2020). *Calipso payload* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://www-calipso.larc.nasa.gov/about/payload.php#CALIOP>
- Zwally H. J., Santana J. (2016). *ICESat: GLAS Instrument* [žiūrėta 2020-02-01]. Prieiga internete: <https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/glas.php>

2.4. ŽEMĖS STEBĖJIMAS NAUDOJANT PASYVIUOSIUS MIKROBANGŲ PRIETAISUS

2.4.1. Mikrobangos ir jų savybės

Daugelis pasyviųjų mikrobangų prietaisų veikia fiksuodami elektromagnetines bangas, kurių ilgis nuo 1 mm iki 1 m (2.4.1. pav.). Mikrobangų prietaisus ir skenavimo juostas įprasta apibūdinti naudojant dažnį f , o ne bangos ilgį λ . Tarp šių rodiklių yra labai paprastas ryšys $f = c / \lambda$, kur c yra šviesos greitis (3×10^8 m/s). Pavertus į dažnius mikrobangų spektru laikomos bangos maždaug nuo 300 GHz iki 0,3 GHz. Dauguma mikrobangų radiometrų veikia 0,4–35 GHz (0,8–75 cm) intervale. Ties žemais dažniais mikrobangos ribojasi su radijo ir televizijos transliavimo dažniais, todėl šie dažniai netinkami Žemei stebėti dėl didelio triukšmo. Ties aukštais dažniais mikrobangos ribojasi su tolimuoju infraraudonoju spektru, kuris naudojamas kituose prietaisuose. Bangų dažnio priklausomybė nuo atmosferos skaidrio ir kitų elektromagnetinių bangų dažnių naudotojų trukdžiai apriboja Žemei stebėti naudojamą mikrobangų intervalą iki maždaug 1–90 GHz.

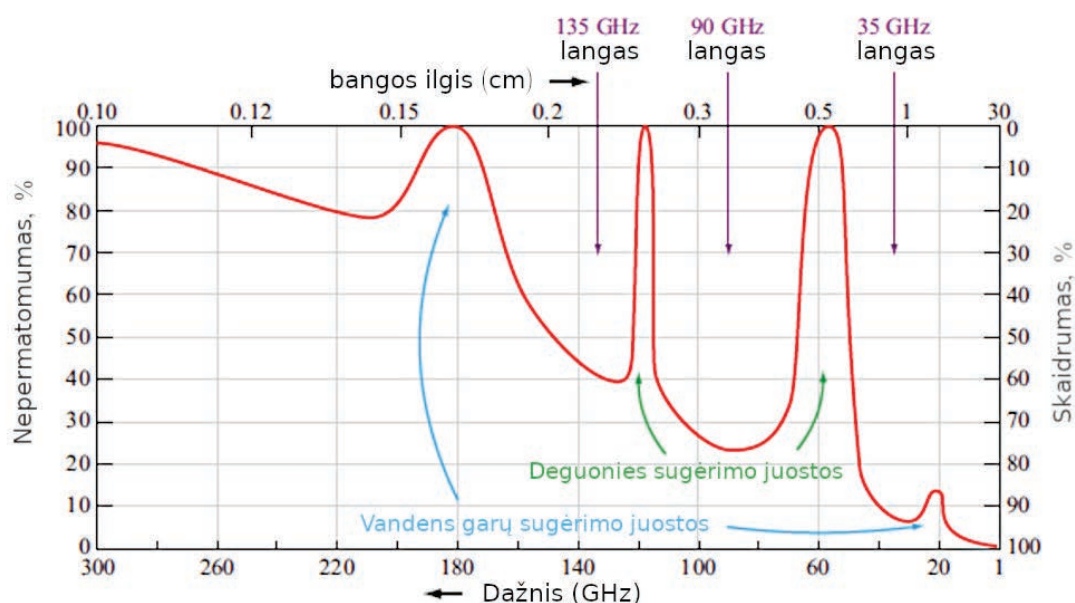


2.4.1. pav. Elektromagnetinių bangų spektras su pažymėtu mikrobangų intervalu (rausva spalva), kuris naudojamas nuotoliniuose stebėjimuose. Žemei stebėti tinkamas mikrobangų intervalas nuo 1 iki 90 GHz (pavertus į bangos ilgį maždaug nuo 0,1 cm iki 1 m) (pagal Mini Physics, 2016).

Palyginus su regimuoju ir infraraudonoju spektrais, mikrobangų pagrindinis privalumas yra tas, kad atmosfera mikrobangų spektre yra gerokai pralaidesnė ir stebėti Žemę galima beveik bet kokiomis oro sąlygomis, išskyrus labai stiprų lietų. Atmosferoje mikrobangos sugeria vandens garų (H_2O) ir deguonies (O_2) molekules, tačiau šis sugėrimas yra stipresnis esant trumpesnėms bangoms (2.4.2 pav.). Kai bangų dažnis $f < 10$ GHz (bangos ilgis $\lambda > 3$ cm), signalo silpimas atmosferoje, taip pat debesys ar rūkas beveik neturi poveikio mikrobangoms. Taip pat ties 35, 90 ir 135 GHz dažniu egzistuoja keletas atmosferos skaidrumo langų. Naudojant šiuos dažnius Žemės paviršių stebėti galima tiek dieną, tiek naktį. Mikrobangoms, kurių dažnis didesnis nei 300 GHz, atmosfera yra beveik nepermatoma (2.4.2. pav.).

Natūrali mikrobangų spinduliuotė pasižymi labai maža energija, todėl norint ją užfiksuoti prietaisai turi turėti didelį stebėjimo lauką ir plačias spektro juostas. Be to, Žemės paviršius yra įvairus ir kintantis, todėl signalas, kuris pasiekia pasyviuosius mikrobangų prietaisus, pa-

sižymi dideliu triukšmu. Fiksuojama pasyvi mikrobangų spinduliuotė priklauso nuo stebimo objekto paviršiaus elektrinių, cheminių savybių, tekstūros, formos ir stebėjimo kampo. Šios savybės atitinkamai lemia išspinduliuotos, atspindėtos ir perneštos energijos kiekius. Virš stebimo paviršiaus esanti atmosfera gali gerokai iškreipti signalą, nes pati atmosfera spinduliuoja energiją priklausomai nuo jos temperatūros ir spinduliavimo galios. Prie signalo triukšmo gali prisidėti ir Saulės spinduliuotė, kuri atspindima nuo paviršiaus ir pasiekia prietaiso anteną kartu su stebimo objekto skleidžiama mikrobangų spinduliuote. Palydovinį jutiklį pasiekiantis signalas yra objektų ir paviršių, esančių prietaiso stebėjimo lauke, skleidžiamos mikrobangų spinduliuotės vidurkis. Dėl silpno natūralaus signalo ir didelio triukšmo pasyviųjų mikrobangų prietaisų duomenis interpretuoti sudėtinga.



2.4.2. pav. Atmosferos skaidrumo langai ir vandens garų bei deguonies sugėrimo zonos mikrobangų spektre. Ties 135 GHz, 90 GHz ir 35 GHz dažnio bangomis atmosfera yra skaidri, žaliomis ir mėlynomis rodyklėmis atitinkamai pažymėti regionai, kur didžiąją mikrobangų dalį sugeria deguonis ir vandens garai (pagal Ulaby ir kt., 2013).

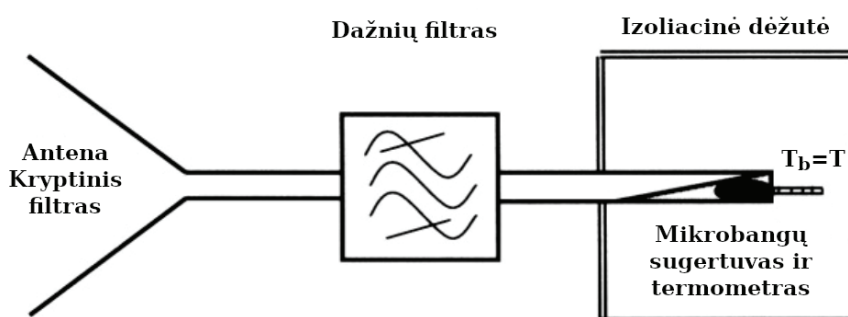
Kadangi stebėjimams mikrobangų spektre nereikalinga Saulės šviesa, šie prietaisai gali būti įrengiami bet kokios orbitos palydove ir palydovų trajektorija neprivalo būti Saulės sinchroninė. Pasyvieji mikrobangų prietaisai naudojami vertikaliems atmosferos temperatūros profiliams sudaryti, vandens atsargoms sniege nustatyti, jūros ledui stebėti, dirvožemio savybėms (mineralinei sudėčiai, drėgnumui) vertinti. Mikrobangų prietaisai taip pat plačiai naudojami astronomijoje, planetų ir žvaigždžių tyrimams.

2.4.2. Mikrobangų radiometrai

Mikrobangų prietaisų kaip ir infraraudonųjų spindulių jutiklių veikimas pagrįstas juodojo kūno spinduliuote – kūno temperatūros ir jo išspinduliuojamos energijos ryšiu. Pasyvieji mikrobangų prietaisai gali būti profiliuojantys žvalgytuvai, arba radiometrai.

Mikrobangų radiometrai veikia gana paprastai – energija, ateinanti nuo paviršiaus, yra surenkama naudojant anteną, kuri jautri atitinkamo dažnio ir poliarizacijos spinduliuotei. Silpnas ateinantis signalas yra sustiprinamas ir palyginamas su atskaitiniu signalu. T. y. sis-

tema sukalibruota remiantis temperatūra, kurią turi pasiekti juodasis kūnas, įrengtas antenoje, ir kuri atitinka energijos lygį, sklaidžiamą stebimo paklotinio paviršiaus ar objekto. Palyginus gautą signalą su atskaitiniu signalu nustatoma, kokia yra stebimo kūno temperatūra (2.4.3. pav.). Ekvivalentinė temperatūra nustatoma lyginant prietaiso antenos temperatūrą su pastovios temperatūros kūnu prietaiso viduje. Nustatyta ekvivalentinė temperatūra nėra tapati stebimo paviršiaus temperatūrai. Ekvivalentinė temperatūra yra paverčiama į skaitmeninius duomenis ir perduodama į Žemę išreikšta kaip ryškio temperatūra. Aukščiau aprašytas mikrobangų radiometrų veikimo principas yra labai supaprastintas, egzistuoja įvairių prietaiso modifikacijų.



2.4.3. pav. Mikrobangų radiometro konstrukcijos schema. Signalas yra priimamas antena su kryptiniu filtru, iš ten yra perduodamas į dažnių filtrą, kur signalas sustiprinamas, ir galiausiai patenka į detektorius, kuris surinktą mikrobangų spinduliuotę paverčia į temperatūrą T . Išmatuota temperatūra T yra prilyginama ryškio temperatūrai T_b (pagal Marzano, Visconti, 2002).

Didžiausias pasyviųjų mikrobangų radiometrų trūkumas yra tas, kad norint surinkti labai silpną natūralų signalą reikia didelės antenos apertūros. Juodojo kūno, kurio temperatūra yra apie 300 K (artima vidutinei Žemės temperatūrai), energinis skaitis mikrobangų spektre yra nedidelis. Todėl norint, kad antena užfiksuotų spinduliuotės srautą, panašų kaip ir optiniai prietaisai, reikalinga arba labai didelė antenos apertūra, arba didelis stebėjimo laukas (angl. Field of view, FOV). Kadangi dėl techninių raketų apribojimų į kosmosą šiuo metu galima pakelti tik 1–4 m dydžio pasyviųjų mikrobangų jutiklių antenas, dažniausiai yra didinamas stebėjimo laukas. Dėl šios priežasties pasyvieji mikrobangų radiometrai pasižymi maža, apie 5–100 km, skiriamąja geba. Be to, mikrobangų spindulinė gebos intensyvumas labai priklauso nuo stebėjimo kampo ir negalima taikyti skenavimo skersai skrydžio linijos, nes tokiu atveju keičiasi stebėjimo kampas. Pasyvieji mikrobangų jutikliai dažniausiai taiko kūginį skenavimo būdą, kai paviršius stebimas visada tuo pačiu kampu (Martin, 2014).

Galimi dviejų tipų mikrobangų radiometrai – profiliojamieji ir skenuojamieji. Profiliojamieji mikrobangų radiometrai registruoja mikrobangų emisijas vertikaliame pjūvyje. Šviesiu paros metu kartu atliekant stebėjimus optiniais prietaisais, šie duomenys gali būti naudojami susieti mikrobangų profilius su geografinėmis koordinatėmis. Konceptualiai skenuojamieji mikrobangų radiometrai veikia kaip ir profiliojamieji, tačiau antenos aprėpties laukas sukasi skersai skrydžio linijos. Skenuojamieji mikrobangų radiometrai naudojami tiek lėktuvuose, tiek palydovuose ir gali rinkti informaciją apie bangų poliarizaciją (Kim, 2009).

Skenuojamieji mikrobangų radiometrai, nors ir pasižymi maža skiriamąja geba, yra naudojami nustatyti dirvos drėgmės sąlygas, jūros ledo paplitimą, vandens atsargas sniege bei sinoptinėje meteorologijoje (2.4.1. lentelė). Pvz.: AMSR 2 (angl. Advanced Microwave Scanning

Radiometer 2) buvo sukurtas ir naudojamas kritulių, vandens garų, sniego dangos, vandenyno vandens temperatūrai, jūros ledo paplitimui matuoti. Šis prietaisas fiksuoja mikrobangų spinduliuotę 6-iose spektro juostose nuo 3,3 mm iki 4,3 cm bangos ilgio (89–7 GHz). Prietaiso 2 metrų antena skenuoja paviršių 40 kartų per minutę skersai skrydžio linijos, prietaiso aprėpties laukas siekia 1450 km. AMSR 2 skiriamoji geba svyruoja nuo 5 iki 10 km priklausomai nuo spektro juostos. Šio prietaiso duomenys labiausiai tinka stebėti didelio masto pokyčius.

Yra keletas būdų padidinti mikrobangų radiometrų jautrumą: 1) padidinti surenkamo signalo kiekį (stebėti didesnę plotą), 2) padidinti naudojamų dažnių juostos plotį, kad būtų surenkama daugiau įvairesnės spinduliuotės, arba 3) pailginti spinduliuotės surinkimo trukmę. Vienas dažniausiai naudojamų būdų yra stebėjimo teritorijos didinimas, todėl vienas mikrobangų radiometrų pikselis dažnai apima keliasdešimt kilometrų. Dažnių juostos didinimas nėra labai realistiškas, ir gali būti efektyvus tik specifinėms užduotims. Stebėjimo laiko ilginimas tinka tik tuomet, kai jutiklis gali būti nukreiptas viena kryptimi ilgą laiką. Tai įmanoma įgyvendinti antžeminėms sistemoms, tačiau nėra lengvai pritaikomos prietaisuose, kurie naudojami lėktuvuose ar palydovuose.

2.4.1. lentelė. Naudojami arba seniau naudoti palydoviniai mikrobangų radiometrai ir jų charakteristikos.

JUTIKLIS, NAUDOJIMO METAİ	NAUDOJAMI DAŽNIAI, GHz	STEBĖJIMO APRĖPTIS	PANAUDOJIMO SRITIS
SMMR (1981–1987)	6,6; 10,7; 18; 21; 37	783 km	Vėjo greitis virš vandenynų, vandens kiekis debesyse, bendras vandens garų kiekis, jūros ledas, sniego storis, dirvožemio drėgmė.
SMM/I (1987–2008)	19,4; 22,2; 37; 85,5	1400 km	Vėjo greitis virš vandenynų, vandens kiekis debesyse, bendras vandens garų kiekis, kritulių intensyvumas, jūros ledas, sniego storis, dirvožemio drėgmė.
TRMM TMI (1997–iki dabar)	10,7; 19,4; 23,8; 37; 85	878 km	Vėjo greitis virš vandenynų, vandens kiekis debesyse, bendras vandens garų kiekis, kritulių intensyvumas, sniego storis, dirvožemio drėgmė.
AMSR-E (2002–2012)	6,9; 10,7; 18,6; 23,8; 36,5; 89	1445 km	Vandenynų vandens paviršiaus temperatūra, vėjo greitis virš vandenynų, vandens kiekis debesyse, bendras vandens garų kiekis, kritulių kiekis, jūros ledas, sniego storis, dirvožemio drėgmė.
SMOS MIRAS (2009–iki dabar)	1,4	3000 km	Dirvožemio drėgmė, vandenyno paviršiaus druskingumas.
AMSR 2 (2012–iki dabar)	6,9; 7; 10,7; 18,6; 23,8; 36,5; 89	1450 km	Vandenynų vandens paviršiaus temperatūra, vėjo greitis virš vandenynų, debesų vandeninumas, bendras vandens garų kiekis, kritulių intensyvumas, jūros ledas, sniego storis, dirvožemio drėgmė.

Mikrobangų radiometrai gali būti naudojami ir dieną, ir naktį beveik bet kokiomis oro sąlygomis. Naudojant spektro juostas ties atmosferos skaidrumo langais, pasyvieji radiometrai gali būti naudojami Žemės paviršiui stebėti. Meteorologijoje, atvirkščiai, naudojamos spektro juostos, kur didelis atmosferos sugėrimas ir jos tinka atmosferos savybėms (vertikalaus temperatūros profilio nustatymui, vandens garų kiekiui ir pan.) stebėti.

2.4.3. Ryškio temperatūra

Visi natūralūs paviršiai ir struktūros spinduliuoja mikrobangas, o spinduliuotės intensyvumas priklauso nuo paviršių fizinių savybių visumos. Radiometrai matuoja kūnų ryškio temperatūrą arba kitaip – radiometrinę temperatūrą. Kūno ryškio temperatūra – tai juodojo kūno temperatūra, kuriai esant objektas išspinduliuotų tokį energinį skaištį, kurį užfiksuoja radiometras atitinkamoje dažnių juostoje. Maksimali kūno spinduliuojama energija esant atitinkamai temperatūrai išreiškiama Planko dėsniumi. Mikrobangų spektre galima naudoti supaprastintą Planko (Planck) dėsnį, kuris vadinamas Reilio ir Džinsio dėsniumi (angl. Rayleigh–Jeans Law). Reilio ir Džinsio lygtis nusako tiesinę išmatuotos ryškio temperatūros ir kūno spinduliuojamos energijos priklausomybę:

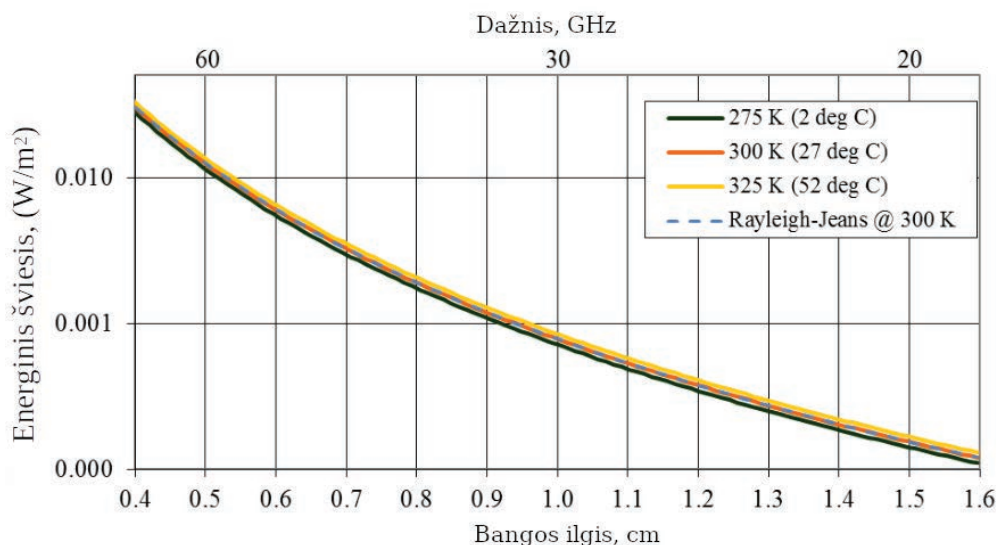
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4} \tag{2.4.1.}$$

kur B_{λ} – spinduliavimo galia esant atitinkamam bangos ilgiui; c – šviesos greitis, k_B – Bolcmano konstanta, T – paviršiaus (kūno) temperatūra kelvinais; λ – bangos ilgis.

Iš 2.3.1. lygties galima apskaičiuoti ir ryškio temperatūrą:

$$T_B = \frac{\lambda^4}{2ck_B} B_{\lambda} \tag{2.4.2.}$$

Reilio ir Džinsio tiesinis ryšys galioja tik žemo dažnio spinduliuotei ($h\nu \ll kT$), t. y. šis dėsnis puikiai tinka mikrobangoms, tačiau trumpesnėms bangoms (VIS, IR) reiktų naudoti Vyno (Wien) arba Planko dėsnius. 2.4.4. pav. parodyta, kaip kūnų spinduliuotė priklauso nuo bangos ilgio ir kūno temperatūros. Keičiantis kūno temperatūrai (275–325 K) spinduliuojama energija beveik nesikeičia, tačiau keičiantis bangos ilgiui (ypač mikrobangų diapazone) energinis šviesis keičiasi keliasdešimt ar net 100 kartų (2.4.4. pav.). Labai mažas energijos kiekis mikrobangų diapazone lemia silpną signalą ir mažą prietaisų skiriamąją gebą.



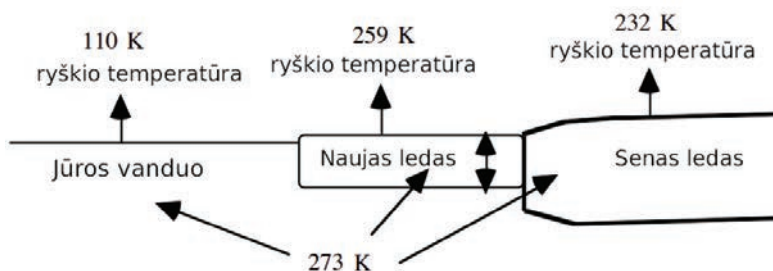
2.4.4. pav. Kūno spinduliuotės priklausomybė nuo bangos ilgio (dažnio). Ši priklausomybė beveik nekinta keičiantis temperatūrai ir Reilio ir Džinsio dėsnis gerai apibūdina šį ryšį (pagal Philipson ir Philpot, 2012).

Mikrobangų intervale juodasis kūnas skleidžia labai nedaug energijos. Natūraliai paklotinio paviršiaus ir atmosferos skleidžiama mikrobangų spinduliuotė yra labai silpna, todėl prietaisų surenkamas signalas sudarytas iš išspinduliuotos, atspindėtos bei foninės spinduliuotės. Virš tam tikro objekto pasyviųjų mikrobangų signalas yra nulėmtas:

- 1) tikrosios objekto paviršiaus temperatūros,
- 2) objekto spinduliavimo gebos,
- 3) stebėjimo kampo ir krypties,
- 4) bangos ilgio (dažnio),
- 5) poliarizacijos,
- 6) spinduliuotės iš papildomų šaltinių, jos sąveikos su atmosfera, atspindžių,
- 7) signalo triukšmo, kurį sukelia pats radiometro veikimas.

Ryšio temperatūra nors ir priklauso nuo stebimo kūno temperatūros, tačiau ją lemia ir kūno fizinės savybės, nuo kurių atitinkamai priklauso ir spinduliavimo geba. Mikrobangų prietaisai yra daug jautresni kūnų spinduliavimo gebos pokyčiams nei paties kūno temperatūrai. Kūno temperatūros pokyčius geriausiai fiksuoja infraraudonosios spinduliuotės jutikliai. Mikrobangų diapazone natūralių kūnų spinduliavimo geba varijuoja intervale nuo 0,4 iki 1,0. Pavyzdžiui, skysto vandens spinduliavimo geba yra 0,4 1, o ledo, plūduriuojančio vandenyje, yra 1,00. Dėl tokios skirtingos spinduliavimo gebos vanduo mikrobangų spektre atrodo labai šaltas, o ledas šiltas. 2.4.5. pav. pateiktas pavyzdys, kai jūros vandens, naujo ledo ir seno ledo reali temperatūra yra vienoda (237 K), tačiau mikrobangų spektre jūros vandens ryškio temperatūra gali būti net 2 kartus žemesnė už seno ledo. Interpretuojant mikrobangų jutikliais gautą ryškio temperatūrą reikia nepamiršti, kad ji labai priklauso nuo kūnų savybių ir nėra lygi realiai kūno temperatūrai.

2.4.5. pav. Ryškio temperatūros priklausomybė nuo kūno savybių, kai reali kūnų temperatūra yra vienoda.



Kūno spinduliavimo geba priklauso nuo dielektrinių kūno savybių (savitojo laidžio, vandens ir druskos kiekio), kūno paviršiaus šiurkštumo, stebėjimo kampo ir spinduliuotės poliarizacijos. Mikrobangų diapazone spinduliavimo geba yra atvirkščiai proporcinga santykinei dielektrinei skvarbai, kuri apibūdina kūno galimybes perduoti elektrinį lauką. Santykinę dielektrinę skvarbą (ϵ_r) sudaro reali (ϵ') ir menama dedamoji (ϵ''):

$$\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon'' \tag{2.4.3.}$$

Realioji santykinės dielektrinės skvarbos dalis, arba kitaip – dielektrinė konstanta (ϵ'), apibūdina kūno gebėjimą sukaupti elektros krūvį iš jį veikiančio elektromagnetinio lauko ir gebėjimą tą energiją perduoti. Kuo didesnė kūno dielektrinė konstanta, tuo mažiau mikrobangų pereis per kūną ir tuo mažesnė bus kūno spinduliavimo geba. Kadangi menama dedamoji (ϵ''), arba sugėrimo dalis, daugeliu nuotolinių stebėjimų atveju yra labai maža, laikoma, kad kūno spinduliavimo geba yra atvirkščiai proporcinga dielektrinei konstantai:

$$\epsilon \propto \frac{1}{\epsilon'} \tag{2.4.4.}$$

Daugelio natūralių medžiagų dielektrinė konstanta svyruoja nuo 1 iki 4 (oro = 1, augalijos = 3, ledo = 3,2). Vanduo yra labai jautrus elektriniam laukui (didelis elektrinis laidis), todėl jo dielektrinė konstanta (ϵ') yra ~80 ir tai reiškia, kad didesnis drėgmės kiekis sumažina ryškio temperatūrą. Panašiai veikia ir druskingumas – didelis druskos kiekis dirvožemyje padidina elektrinį laidį, padidėja dielektrinė konstanta, o spinduliavimo geba atitinkamai sumažėja.

2.4.4. Pasyviųjų mikrobangų jutiklių fiksuojamos ryškio temperatūros dedamosios

Netoli stebimo paviršiaus esantis mikrobangų jutiklis fiksuoja spinduliuotę, ateinančią nuo kūno bei kūno atspindėtą dangaus (Saulės, atmosferos, Mėnulio, kosmoso ir pan.) spinduliuotę ir ją išreiškia per ryškio temperatūrą. Jei kūno paviršius labai lygus, jis atspindi daugiau atmosferos ir kosmoso spinduliuotės. Pvz.: lygus vandens paviršius atspindi labai daug ir fiksuojama ryškio temperatūra priklausys nuo atspindėtos spinduliuotės, spinduliuotės poliarizacijos, paviršiaus temperatūros bei vandens spindulinės gebos. Lygus vandens paviršius pasižymi žema ryškio temperatūra. Vandens paviršiumi šiurkštėjant, keičiasi atspindimos spinduliuotės kiekis ir spinduliavimo galia (ryškio temperatūra padidėja). Esant neskaidriam paviršiui, jo ryškio temperatūra sudaro:

$$T_B = \epsilon T_s + (1 - \epsilon) T_i(\theta) \quad (2.4.5.)$$

kur T_B – ryškio temperatūra; ϵ – spinduliavimo geba; T_s – paviršiaus (kūno) temperatūra; T_i – vidutinė dangaus (atmosferos) temperatūra; θ_i – stebėjimo kampas.

Keletas svarbių dalykų, kuriuos reikia turėti omenyje interpretuojant pasyviųjų mikrobangų jutiklių signalą:

- kūnų, kurie pasižymi didele spinduliavimo geba ($\epsilon \approx 1$), ryškio temperatūrą mažai veikia kiti šaltiniai, pasižymintys vidutine ryškio temperatūra;
- kūnų, kurie pasižymi didele atspindžio geba (žema ϵ reikšme), ryškio temperatūra yra labai veikiamą foninės aplinkos spinduliuotės;
- natūralios medžiagos mikrobangų spektre pasižymi santykinai maža spinduliavimo geba, nors kitose spektro dalyse (pvz., infraraudonųjų spindulių) jos reikšmės gali būti didelės. Mikrobangų spektre vandens $\epsilon < 0,5$, vandenyno vandens $\epsilon \approx 0,4$, ledo $\epsilon \approx 1$, dirvožemio $\epsilon > 0,85$;
- spinduliavimo geba (ϵ) priklauso nuo stebėjimo kampo (θ), stebėjimo azimuto (φ) bei poliarizacijos. Nustatyta, kad didėjant stebėjimo kampui antenos fiksuojama temperatūra žemėja, tačiau būna išimčių. Stebint skirtingos poliarizacijos bangas fiksuojama temperatūra taip pat gali gerokai skirtis. Teorinio juodojo kūno skleidžiamos spinduliuotės poliarizacija yra atsitiktinė, tačiau realių kūnų skleidžiamų elektromagnetinių bangų poliarizacija gali būti iš anksto nulemta;
- spinduliavimo geba taip pat yra nulemta paviršiaus savybių (šiurkštumo) ir iš dalies – gilesnių sluoksnių savybių (dielektrinio koeficiento);
- dielektrinės savybės priklauso nuo stebėjimo kampo (θ), vandens kiekio medžiagoje, druskingumo ir pan.;
- jei paviršiaus šiurkštumas palyginus su bangos ilgiu (λ) yra didelis, foninė (išorinė) spinduliuotė, krentanti kitokiu stebėjimo kampu, gali gerokai pakeisti fiksuojamą ryškio temperatūrą.

Mikrobangų radiometrų kaip ir visų kitų nuotoliniuose tyrimuose naudojamų jutiklių gautas signalas yra veikiamas atmosferos sugerties, spinduliavimo ir sklaidos. Atmosfera yra skaidri bangoms, ilgesnėms nei 3 cm, tačiau trumpesnės bangos yra sugeriamos atmosferoje

esančių vandens garų (H₂O) ir deguonies (O₂) molekulių. Šios dujos taip pat spinduliuoja panašaus dažnio bangas ir tai apsunkina duomenų interpretavimą. Tačiau ši savybė yra išnaudojama tiriant atmosferos cheminę sudėtį ir komponentų koncentracijos kaitą.

Jei laikoma, kad atmosferos atspindžio reikšmės yra artimos nuliui, jutiklio stebimo paviršiaus ryškio temperatūrą sudaro du dėmenys:

$$T_B = \tau(\varepsilon T_s) + (1 - \tau_a)T_a \tag{2.4.6.}$$

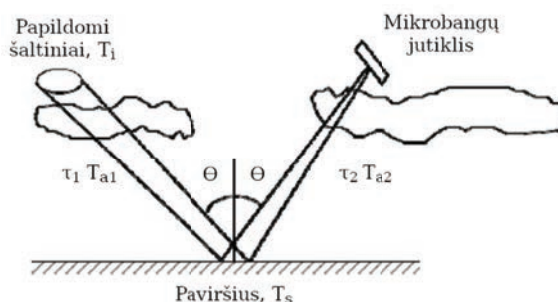
kur $\tau(\varepsilon T_s)$ – susilpninta paviršiaus ryškio temperatūra; $(1 - \tau_a)T_a$ – atmosferoje sugerta ir pakartotinai išspinduliuota energija.

Jei į 2.4.6. lygtį dar įtraukiama papildoma spinduliuotė, atspindėta nuo paviršiaus, ir spinduliuotė, sklaidžiama kitų šaltinių (pvz.: debesų) (2.4.6. pav.), tuomet:

$$T_B = \{[T_i \tau_i + (1 - \tau_i) T_{a1}] \rho + \varepsilon T_s\} \tau_s + (1 + \tau_i) T_{a2} \tag{2.4.7.}$$

kur $T_i \tau_i$ – energija, kurią sklaidžia papildomi šaltiniai ir kuri nėra sugerta; $(1 - \tau_i) T_{a1}$ – atmosferoje iš papildomų šaltinių sugerta ir pakartotinai išspinduliuota energija, kai atmosferos temperatūra T_{a1} ; εT_s – energija, kurią išspinduliuoja T_s temperatūros paviršius; $(1 + \tau_i) T_{a2}$ – atmosferoje sugerta ir pakartotinai išspinduliuota (pirminė) energija, kai atmosferos temperatūra T_{a2} .

2.4.6. pav. Sudėtinis atmosferos ir papildomų šaltinių poveikis paviršiaus ryškio temperatūrai. T_i – ryškio temperatūra iš papildomų šaltinių, τ_1 – atmosferos optinis storis kampu θ , τ_2 – atmosferos optinis storis tarp paviršiaus ir jutiklio, T_{a1} – vidutinė visos atmosferos temperatūra, T_{a2} – vidutinė atmosferos temperatūra tarp paviršiaus ir jutiklio (pagal Philipson ir Philpot, 2012).



2.4.5. Poliarizacija

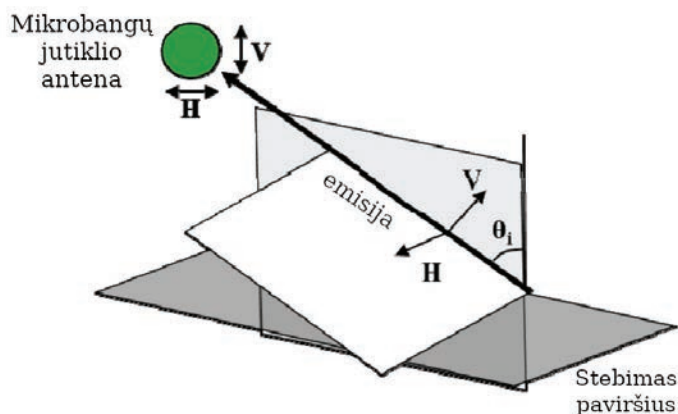
Poliarizacija yra neatskiriama mikrobangų jutiklių savybė. Mikrobangų poliarizacija yra apibūdinama kaip vertikali arba horizontali (fizikoje dažniau naudojamos sąvokos išilginė ir skersinė poliarizacija). Vertikali poliarizacija (V) atitinka išilginę poliarizaciją (elektrinis vektorius yra toje pačioje plokštumoje kaip ir statmuo stebimam paviršiui), o horizontali poliarizacija (H) atitinka skersinę poliarizaciją (2.4.7. pav.).

Kūnų spinduliuavimo geba kinta priklausomai nuo poliarizacijos. Tai ypač akivaizdu, kai keičiasi stebimo paviršiaus drėgnumas, pvz.: sausos ir drėgnos dirvos poliarizacija skiriasi (2.4.8. pav.). Žinoma, kūnų spinduliuavimo geba priklauso ne tik nuo poliarizacijos, bet ir nuo bangų dažnio ir stebėjimo kampo, todėl gautus duomenis interpretuoti sudėtinga.

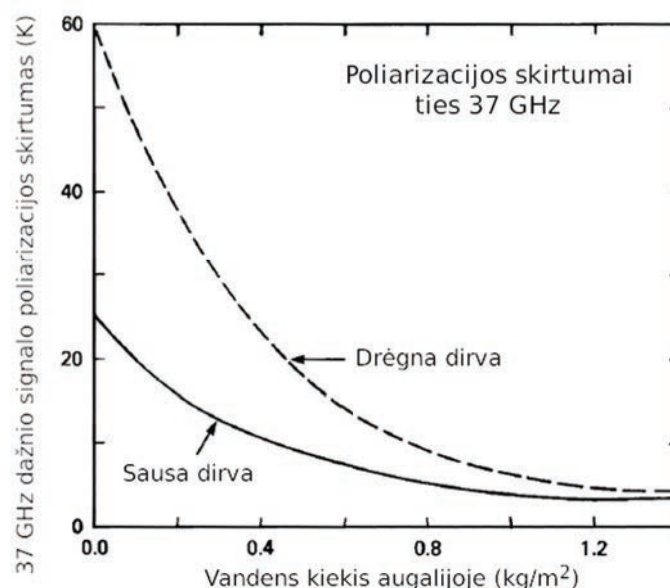
2.4.6. Pasyviųjų mikrobangų prietaisų privalumai

Naudojant mikrobangų prietaisus Žemės paviršių galima stebėti dieną ir naktį beveik bet kokiomis oro sąlygomis. Debesys, sudaryti iš ledo kristalų, yra permatomi mikrobangų spektre, o regimajame spektre jie visiškai užblokuoja nuo Žemės paviršiaus ateinančią spinduliuotę.

2.4.7. pav. Horizontali (H) ir vertikali (V) mikrobangų poliarizacija jutiklio ir stebimo paviršiaus atžvilgiu, θ_i – kampas tarp signalo plokštumos ir normalės į stebimą paviršių (pagal Philipson ir Philpot, 2012).



2.4.8. pav. Dirvos drėgmės įtaka ryškio temperatūros skirtumui tarp horizontalios ir vertikalios poliarizacijos, naudojant 37 GHz mikrobangas. Kuo dirva drėgesnė, tuo didesnis ryškio temperatūros skirtumas tarp skirtingos poliarizacijos signalų (pagal Choudhury, 1989).



Debesys, sudaryti iš vandens lašelių, blokuoja 30 GHz ir aukštesnio dažnio (trumpesnes bangas) elektromagnetines bangas. O 15 GHz ir dar mažesnio dažnio bangoms debesys iš vandens lašelių neturi beveik jokio poveikio. Mikrobangų radiometrų dažnio juostų parinkimas priklauso nuo prietaiso taikymo pobūdžio, tačiau norint stebėti Žemės paviršių reikia rinktis dažnius, kurie yra ties atmosferos skaidrumo langais (žr. 2.4.2. pav.).

Mikrobangų spektre prietaisu surenkamas signalas visiškai priklauso nuo stebimo paviršiaus ar objekto fizinių (šiuurkštumo, tekstūros ir pan.) bei dielektrinių savybių. Todėl signalas visiškai nepriklauso nuo Saulės šviesos, jos kritimo kampo ar intensyvumo. Naudojant mikrobangas informaciją apie stebimą objektą galima gauti ir naktį. O optiniams ir daugeliui infraraudonųjų spindulių prietaisų reikalinga Saulės šviesa, kad būtų galima gauti informaciją apie Žemės paviršių. Pasyvieji mikrobangų jutikliai leidžia nuolat stebėti Žemės paviršių Arktyje ir Antarktidoje. Naudojant optinius prietaisus to nebūtų galima padaryti dėl debesuotumo ir ilgos poliarinės nakties.

Mikrobangos iki tam tikro lygio gali prasiskverbti pro augaliją ir nestorą dirvos sluoksnius. Ilgesnės bangos prasiskverbia giliau. Naudojant aukštesnio dažnio (trumpesnes) bangas galima surinkti informaciją apie augalijos vainiką, o naudojant žemesnio dažnio (ilgesnes) bangas galima gauti informacijos apie dirvožemį ir podirvį. Atliekant šiuos stebėjimus labai

svarbus drėgmės kiekis ir augalijos tankis. Drėgnas ir sausas dirvožemis, kai mikrobangų spinduliuotės dažniai skirtingi, pasižymi skirtingomis savybėmis. Skirtumai atsiranda dėl skirtingos dielektrinės konstantos, kuri kinta, kai dirvožemis (ar kita natūrali medžiaga) yra sausa ir kai jis yra prisotintas skysto vandens arba vandens garų. Dielektrinės konstantos pokyčiai keičia mikrobangų signalo intensyvumą. Infraraudonųjų spindulių ir optinių bangų signalas keičiasi dėl molekulinio rezonanso paviršiniame augalijos ar dirvožemio sluoksnyje. Vienu metu panaudojant mikrobangų, infraraudonųjų spindulių ir optinius prietaisus galima gauti informaciją apie paviršiaus geometrines, struktūros ir dielektrines savybes.

2.4.7. Pagrindinės pasyviųjų mikrobangų jutiklių panaudojimo sritys

Pasyvieji mikrobangų radiometrai gali būti taikomi meteorologijoje, žemės naudmenų tipams klasifikuoti, sniegui ir ledui stebėti, Žemės ir vandenyno paviršiaus temperatūrai, vegetacijos savybėms bei dirvožemio drėgmei nustatyti.

Kritulių nustatymas. Naudojant mikrobangų radiometrus galima nustatyti kritulių intensyvumo reikšmes tiek virš vandenynų, tiek virš sausumos. Virš vandenyno kritulių intensyvumo tikslumas yra didesnis, nes naudojant pasyviuosius mikrobangų jutiklius vandenynas yra šaltas ir gana tolygus foninis paviršius. Be to, mikrobangos gali prasiskverbti pro smulkias suspenduotas debesų daleles ir užfiksuoti didesnius lietaus lašelius. Virš sausumos mikrobangų radiometrai tiesiogiai lietaus intensyvumo fiksuoti negali, tačiau matuoja debesų ledo kristalų sukeltą spinduliuotės išsklaidymą ir ši informacija yra panaudojama kritulių intensyvumui modeliuoti.

Vandenyno paviršiaus temperatūros nustatymas. Mikrobangų radiometrai gali nustatyti vandens temperatūrą nepaisydami debesų dangos ir debesų tipo. Kai giedra, IR radiometrai vandenyno paviršiaus temperatūrą nustato daug tiksliau, tačiau neteikia jokios informacijos esant prastoms oro sąlygoms. Vandenyno vandens temperatūros svyravimai turi dideli poveikį orams visame pasaulyje, todėl mikrobangų prietaisų galimybė atlikti stebėjimus bet koku oru labai padidina oro prognozių modelių tikslumą.

Bendro vandens garų kiekio atmosferoje nustatymas. Mikrobangų radiometrais bendrą vandens garų kiekį atmosferos storumėje galima išmatuoti virš vandenynų. Vandens garų kiekio stebėjimas padeda suprasti, kaip vanduo cirkuliuoja atmosferoje ir kokį poveikį tai turi orams bei Žemės energijos balansui.

Skysto vandens kiekio atmosferoje nustatymas. Mikrobangų radiometrais skysto vandens kiekį atmosferoje galima nustatyti virš vandenynų. Ši informacija naudojama apskaičiuoti, kaip keičiasi debesų galimybės atspindėti ir sugerti Saulės spinduliuotę ir kaip tai gali paveikti Žemės energijos balansą.

Vėjo greičio matavimai. Mikrobangų radiometrai geba užfiksuoti vandenyno paviršiaus šiurkštumo pokyčius, o šią informaciją galima paversti į paviršinio vėjo greitį. Vėjo greitis lemia, kiek vandens išgaruoja nuo vandenyno paviršiaus – stipresnis vėjas padidina vandens garų kiekį atmosferoje. Informacija apie vėjo greitį virš vandenynų naudojama laivininkystėje ir orų prognozėse.

Jūros ledo stebėsena. Jūros ledo plotų bei ledo tipo stebėsena padeda laivininkystei, o ilgalaikiai pokyčiai labai svarbūs klimato kaitai. Jūros ledas atspindi didžiąją dalį Saulės spinduliuotės ir neleidžia vandenynui išilti. Ledo danga taip pat sumažina vandens šilumos praradimą.

Sniego dangos stebėsena. Mikrobangų radiometrai gali fiksuoti sniego dangą bet kokiomis oro sąlygomis. Mikrobangos sniego (arba ledo) kristalų yra išsklaidomos. Kuo sausesnis sniegas, tuo labiau mikrobangos išsklaidomos ir šis ryšys panaudojamas vandens atsargoms sniege nustatyti. Šie ryšiai yra empiriškai susiejami su lauko matavimų rezultatais. Sniegas kaip ir

ledas veikia kaip paklodė, kuri sumažina dirvožemio šilumos praradimą bei atspindi didžiąją Saulės spinduliuotės dalį. Sniego danga per žiemą sukaupia didelį vandens kiekį ir padidina upių nuotėkį bei dirvožemio drėgmės atsargas.

Dirvožemio drėgmės stebėseną. Mikrobangų radiometrai gali užfiksuoti dirvožemio drėgmės atsargas, jei jo nedengia tanki augmenija. Geriausiai paviršiaus drėgnumui užfiksuoti tinka žemo dažnio (pvz., 6,9 GHz) mikrobangos, tačiau šis metodas pasiteisina tik virš didelių vienalyčių teritorijų (pvz., JAV Vidurio Vakarų lygumose). Dirvožemio drėgmės atsargos yra labai svarbios javų ir augalijos būklei, jos stebėseną padeda nustatyti sausras bei pažeidžiamas teritorijas.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Ties kokiais mikrobangų dažniais yra fiksuojami atmosferos skaidrumo langai?
- Kodėl mikrobangų radiometrai pasižymi maža skiriamąja geba?
- Kas sudaro pasyviaisiais mikrobangų jutikliais užfiksuotą objekto ryškio temperatūrą?
- Kodėl ryškio ir reali kūno temperatūra mikrobangų spektre skiriasi?
- Kokie mikrobangų radiometrų pranašumai lyginant su optinio ar infraraudonojo spektro jutikliais?
- Kam dažniausiai naudojami pasyvieji mikrobangų radiometrai?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Choudhury, B. J. (1989). Monitoring Global Land Surface Using Nimbus-7 37 GHz Data - Theory and Examples. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 10, 1579–1605.
- Jackson, T. J. (2008). Passive Microwave Remote Sensing for Land Applications. *Advances in Land Remote Sensing*. Dordrecht: Springer.
- Kim, Y., van Zyl, J. J. (2009). A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 8, 2519–2527.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation (7th edition)*. USA: Wiley.
- Martin, S. (2014). *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Marzano, F. S., Visconti, G. (Eds.) (2002). *Remote Sensing of Atmosphere and Ocean from Space: Models, Instruments and Techniques*. Kluwer Academic Publishers.
- Mini Physics (2016). *The Electromagnetic Spectrum* [žiūrėta 2020-02-25]. Prieiga internete: https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html
- Philipson, W. D., Philpot, W. R. (2012). *Remote Sensing Fundamentals*. Cornell University [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: http://ceeserver.cee.cornell.edu/wdp2/cee6100/6100_monograph/mono_10_Fa12_microwave.pdf
- Raizer, V. (2017). *Advances in passive microwave remote sensing of oceans*. CRC Press, New York., p. 262.
- Ulaby et al. (2013). *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. USA: University of Michigan Press.

2.5. ŽEMĖS STEBĖJIMAS NAUDOJANT RADARUS

2.5.1. Iš šono žvalgantis radaras

Radarą naudoti Žemės paviršiui stebėti patrauklu tuo, kad jį galima naudoti bet koku oru ir bet koku paros metu. Šios savybės leidžia reguliariai stebėti vietas, kurios dažnai yra dengiamos debesų, ten, kur dažnai lyja arba Saulės spindėjimo trukmė yra labai trumpa. Radaro signalo sąveika su paviršiumi yra visai kitokia nei kitų elektromagnetinių bangų, todėl naudojant jas galima gauti naujos įdomios informacijos apie aplinką.

6-ajame XX a. dešimtmetyje sukūrus iš šono žvalgantį radarą SLAR (angl. Side-Looking Airborne Radar) buvo įmanoma pradėti nuotolinius stebėjimus naudojant lėktuvus ar dirbtinius Žemės palydovus. SLAR sistemą sudaro radaras, esantis lėktuve ar palydove, kuris juda tiesia linija (azimutu) nustatytame aukštyje (2.5.1. pav.). Skirtingai nei daugelio optinių jutiklių, SLAR (ir bet kokio kito radaro) antena nukreipta ne nadyru, o tam tikru kampu θ_p , kuris vadinamas stebėjimo kampu. Jei radaras stebi tiesiai po jutikliu (nadyru), signalas iš skirtingų stebimos teritorijos dalių į jutiklį sugrįžtų panašiu laiku ir užfiksuotos atgalinės sklaidos nebūtų įmanoma priskirti konkrečiam objektui.

Skridamas radaras siunčia seriją trumpų mikrobangų impulsų, kurių ilgis τ_p . Kiekvienas impulsas nuskenuoja momentinį Žemės paviršiaus plotą, kuris vadinamas antenos stebėjimo plotu (2.5.1. pav. pažymėtas tamsiai pilka spalva). Šio momentinio užfiksuoto ploto dydis S , tiek stebėjimo, tiek judėjimo (azimuto) kryptimi priklauso nuo radare naudojamo bangos λ ir antenos ilgio L (šie abu dydžiai nusako antenos pluošto plotį $\beta = \lambda / L$) bei nuo radaro atstumo iki Žemės (R):

$$S \approx \frac{\lambda}{L} R = \beta \cdot R [m] \quad (2.5.1.)$$

Norint sudaryti 2D paviršiaus vaizdą, atgalinės sklaidos signalas nuo Žemės paviršiaus pagal laiką yra sudėliojamas stebėjimo ir radaro judėjimo kryptimi. Stebėjimo kryptimi atgalinės sklaidos signalo laikas nuo artimojo iki tolimojo stebėjimo juostos krašto kinta progresiškai. Skirtingi objektai gali būti išskirti, jei atstumas tarp jų yra didesnis nei pusė perduodamo impulso ilgio. SLAR skiriamąją gebą stebėjimo kryptimi apibrėžia formulė:

$$\rho_R = \frac{c \cdot \tau_p}{2} [m] \quad (2.5.2.)$$

kur c yra šviesos greitis; ρ_R – nuožulnus stebėjimo nuotolis, kuris apibūdina radaro gebėjimą atskirti objektus, skirtingai nutolusius nuo radaro (2.5.1. pav.). Nors užambus stebėjimo nuotolis (ρ_R) yra svarbus stebėjimo sistemos dizainui, nuotoliniam Žemės stebėjimui svarbesnis rodiklis yra paviršiaus skiriamoji geba. Radaro skiriamoji geba (ρ_G) apibūdina jutiklio galiybę atskirti objektus ant Žemės paviršiaus ir gali būti apskaičiuota naudojant ρ_R ir vietinį kritimo kampą θ_i :

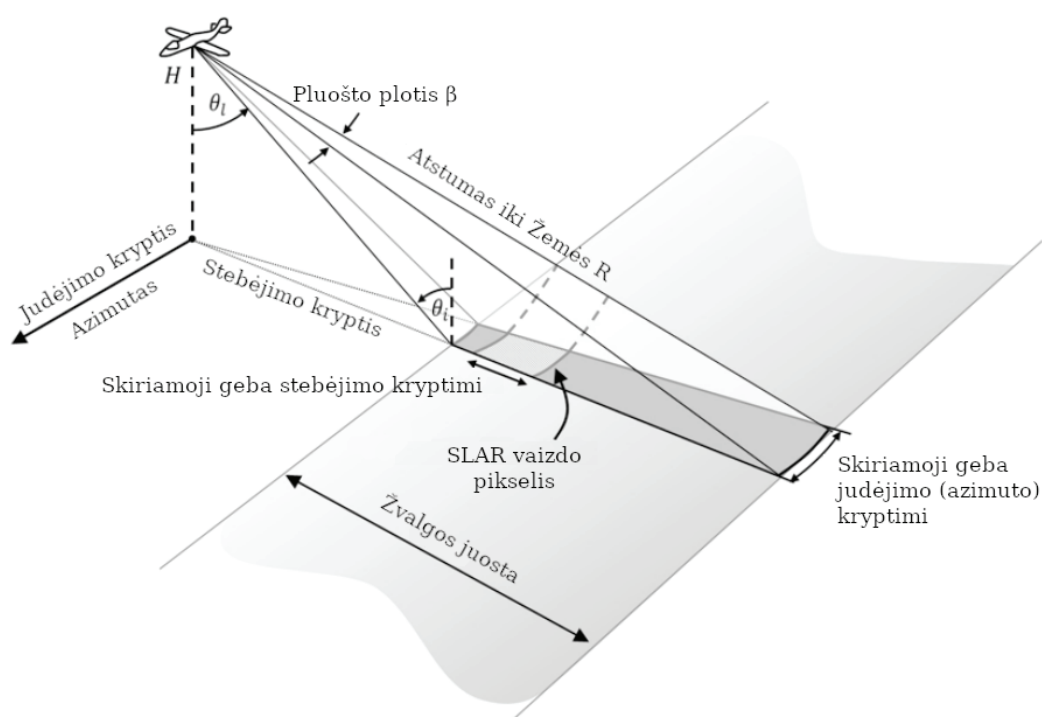
$$\rho_G = \frac{\rho_R}{\sin(\theta_i)} [m] \quad (2.5.3.)$$

Lygtis 2.5.3. parodo, kad ρ_G nėra pastovus visoje skenavimo juostoje ir didėja tolstant nuo nadyro (nes didėja θ_i). Ši radarų savybė visiškai priešinga daugeliui optinių jutiklių, kur skiriamoji geba mažėja didėjant θ_i .

Išilgai azimuto kryptimi Žemės paviršius skenuojamas stebėjimo platformai judant pirmyn. SLAR sistemos skiriamoji geba azimuto kryptimi ρ_{AZ} priklauso nuo antenos stebėjimo ilgio azimuto kryptimi S_{AZ} , kuris, savo ruožtu, yra apribotas fizinio antenos ilgio ta pačia kryptimi L_{AZ} . Todėl 2.5.1. formulę azimuto kryptimi galima perrašyti taip:

$$\rho_{AZ} = S_{AZ} \approx \frac{\lambda}{L_{AZ}} R = \beta_{AZ} \cdot R [m] \quad (2.5.4.)$$

Lygtis 2.5.4. parodo, kad skiriamoji geba azimuto kryptimi ρ_{AZ} didėjant atstumui tarp radaro ir Žemės paviršiaus R mažėja pagal tiesinę priklausomybę. Tai lemia dvi svarbias SLAR sistemų savybes: 1) keičiantis R atstumui nuo artimojo iki tolimojo skenavimo juostos krašto SLAR skiriamoji geba azimuto kryptimi nėra pastovi; 2) dėl ρ_{AZ} priklausomybės nuo atstumo R pritaikyti SLAR sistemas nuotolinių stebėjimo platformoms kosmose yra sudėtinga ir nepraktiška. Pvz.: C juostos SLAR sistema su 3 m ilgio fizine antena skridama 3 km aukštyje ir naudojanti 0,03 m bangos ilgį ($\lambda = 0,03$) stebėjimo kampų $\theta_i = 30^\circ$ galėtų pasiekti 60 m skiriamąją gebą azimuto kryptimis ($\rho_{AZ} = 0,01 \times 3000 \times 2 = 60$ m). Tačiau jei tas pats SLAR skristų kosmose 800 km aukštyje, ρ_{AZ} būtų 16 km. Tokia maža skiriamoji geba dažniausiai nėra tinkama Žemei stebėti.



2.5.1. pav. Iš šono žvalgančio radaro (SLAR) stebėjimo geometrija. Radaras atlieka stebėjimus kampu išilgai skrydžio linijos aukštyje H , kampu θ_i . Kartais nurodomas ne stebėjimo, bet kritimo kampas $\theta_i = (90^\circ - \theta)$. Paviršiaus plotas, kurį gali stebėti radaras, yra nulemtas antenos pluošto pločio (β) ir atstumo nuo palydovo iki Žemės paviršiaus (R). Radaro pluoštas yra platus stebėjimo kryptimi, bet siauras azimuto atžvilgiu (pagal Flores ir kt., 2019).

Pats paprasčiausias būdas palaikyti didelę skiriamąją gebą būtų pailginti anteną. Tačiau nesudėtingi matematiniai skaičiavimai rodo, kad tai nėra praktiška: norint pasiekti $\rho_{AZ} = 60$ m iš kosmoso, radaro anteną reikėtų pailginti (L) iki 800 m. Siekiant išvengti šių techninių apribojimų šiuo metu nuotoliniuose stebėjimuose iš kosmoso naudojamas sintetinės apertūros principas. Nepaisant skiriamosios gebos ir fizinių antenos dydžio apribojimų SLAR sistemos ir toliau naudojamos antžeminiuose stebėjimuose bei lėktuvuose. Jos išlieka populiarios dėl savo techninio dizaino ir duomenų apdorojimo paprastumo.

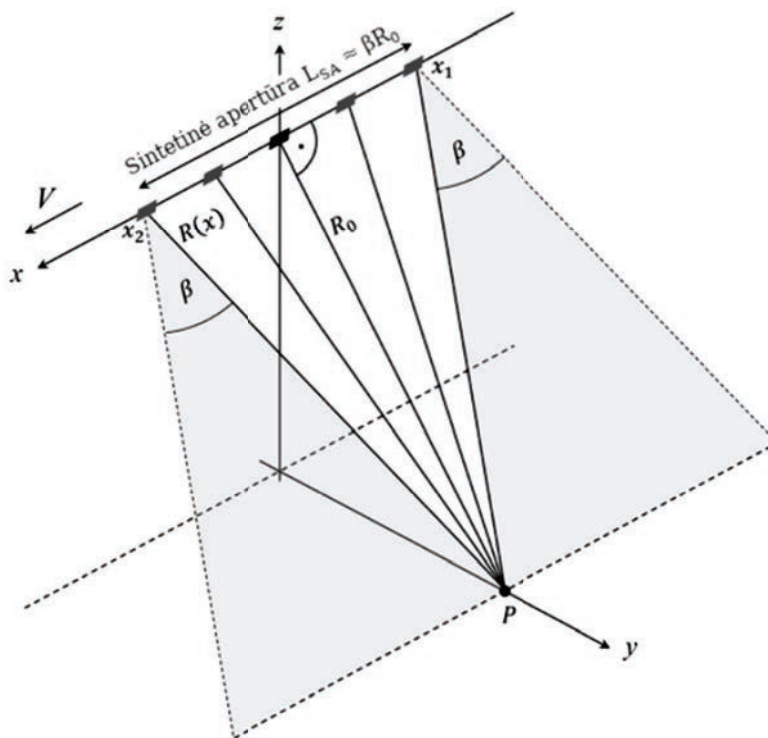
2.5.2. Sintetinės apertūros radaras

1953 m. inžinierius Carlos Wiley'is rado būdą, kaip išspręsti azimuto skiriamosios gebos problemą, kilusią SLAR jutikliams. Jis pastebėjo tiesioginį ryšį tarp signalų atspindinčio objekto santykinų koordinatų išilgai judėjimo krypties ir momentinio signalo Doplerio poslinkio. Tuomet jis iškėlė teiginį, kad užfiksuoto signalo dažnių analizė turėtų padėti pasiekti didesnę skiriamąją gebą išilgai judėjimo krypties. C. Wiley'io atradimas pirmiausiai buvo pavadintas Doplerio pluošto paryškinimu, bet dabar dažniausiai vadinamas sintetine apertūra. Sintetinė apertūra yra svarbiausias dabartinių didelės skiriamosios gebos radarų elementas. Tikslų matematinį ir techninį sintetinės apertūros aprašymą galima surasti Cummingo ir Wongo knygoje (2005).

Sintetinės apertūros principų taikymas leidžia naudojant stebėjimus, padarytus su trumpesne antena šiai judant išilgai skrydžio trajektorijos, sukurti („susintetinti“) ilgesnę anteną. Kadangi antenos ilgis tiesiogiai susijęs su skiriamąja geba (formulė 2.5.1.), C. Wiley'io principu susintetinta antena leidžia pasiekti didelę skiriamąją gebą net ir radarams, kurie naudojami palydovuose ir kurių antenos ilgis techniškai apribotas.

Supaprastinta C. Wiley'io koncepcija pateikta 2.5.2. paveiksle. Radaro antena (pažymėta pilku stačiakampiu) juda V greičiu išilgai skrydžio trajektorijos iš dešinės į kairę. Radaras judėdamas nuolat siunčia trumpus impulsus Žemės paviršiaus link ir fiksuoja nuo objektų atspindėtą signalą. Kiekvienas radaro impulsas pasiekia tam tikrą Žemės paviršiaus plotą S .

2.5.2. pav. Stebėjimų geometrija naudojama sudaryti sintetinę apertūrą paviršiaus stebėjimo taškui P . x – palydovo trajektorija, x_1 ir x_2 – palydovo padėties trajektorijoje skirtingais laiko momentais, y – radaro stebėjimų kryptis, β – antenos pluošto plotis, R_0 – atstumas iki Žemės (pagal Flores ir kt., 2019).



Norint sudaryti sintetinę apertūrą reikia, kad antenos pluoštui slenkant per Žemės paviršių objektas P radaro impulsų būtų nuskenuotas kuo daugiau kartų. 2.5.2. paveiksle pavaizduotos kelios antenos pozicijos, iš kur buvo stebėtas objektas P : pirmą kartą jis buvo nuskenuotas taške x_1 , o paskutinį kartą x_2 . Visi surinkti radaro duomenys apie šį objektą tarp palydovo pozicijų x_1 ir x_2 yra apdorojami ir sujungiami taip, kad atrodo, jog stebėjimai buvo atlikti su daug ilgesne antena. Ši ilga virtuali antena dažniausiai ir vadinama sintetinė apertūra, nes buvo susintetinta iš keleto stebėjimų su trumpa realia antena. Sintetinės apertūros ilgis L_{SA} gali būti apskaičiuotas naudojant formulę:

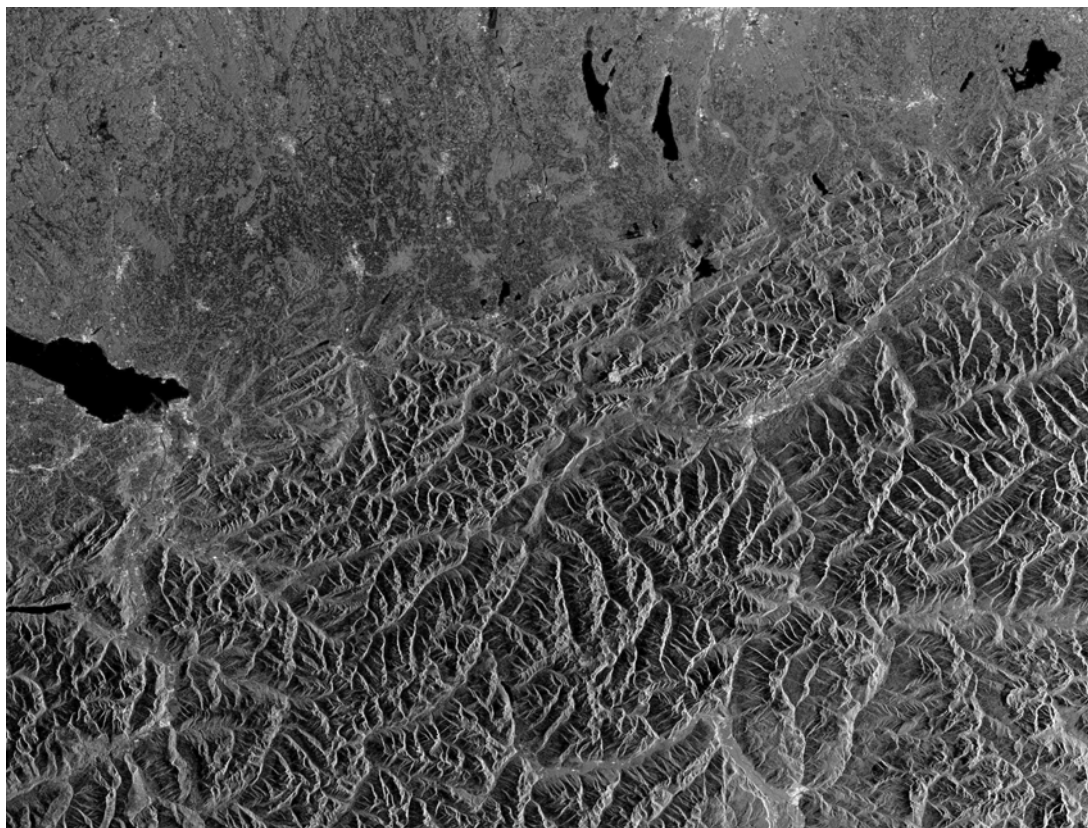
$$L_{SA} = \frac{\lambda}{L} R_0 \approx \beta \cdot R_0 [m] \quad (2.5.5.)$$

kur λ – bangos ilgis; L – radaro antenos ilgis; β – antenos pluošto plotis; R_0 – atstumas iki Žemės. Sintetinės apertūros ilgis L_{SA} atitinka realios radaro antenos momentinio užfiksuoto ploto dydį S (žr. formulę 2.5.1.). Duomenys, gauti naudojant apertūros sintezę, vadinami SAR vaizdais ir turi daug kartų didesnę skiriamąją gebą nei SLAR duomenys, užfiksuoti iš tokio pat atstumo.

SAR jutikliai dirbtiniuose Žemės palydovuose jau naudojami daugiau nei 40 metų. Pirmasis SAR jutiklis paleistas 1978 m. birželio 28 d. kartu su NASA palydovu *Seasat*, kuris buvo skirtas reiškiniams vandenyne stebėti. Kartu su kitais jutikliais *Seasat* palydove buvo HH poliarizacijos SAR prietaisas, įtaisytas tam tikru kampu, kuris atliko vandenyno bangų ir jūros ledo stebėjimus. Nors palydovas *Seasat* veikė tik 106 dienas (1978 m. spalio 8 d. įvyko trumpasis jungimas), misija pripažinta kaip labai sėkminga. Buvo parodyta, kad SAR puikiai tinka stebėti tiek vandenynus, tiek sausumą (Fu ir Holt, 1982).

Nuo *Seasat* laikų nuotoliniai tyrimai su SAR nuėjo ilgą kelią. Buvo paleistas ne vienas palydovas, SAR jutikliai nuolat buvo tobulinami, didėjo jų erdvinė ir radiometrinė skiriamoji geba. Palydovai su SAR jutikliais buvo paleisti skirtingų šalių, tarptautinių ir privačių organizacijų ir tai leido nenutrūkstamai radaru stebėti Žemę.

2.5.3. pav. pateiktas SAR vaizdo pavyzdys iš ESA palydovo *Sentinel 1*. Sintetinės apertūros principai naudojami visose moderniose radarų sistemose, tačiau yra kuriamos ir naujos radarų modifikacijos, kurios gali padidinti skiriamąją gebą (pvz.: Spotlight; Mittermayer ir kt., 1999) arba stebimos teritorijos dydį (pvz.: ScanSAR; Bamler ir Eineder, 1996). Priklausomai nuo jų techninio dizaino dabartiniai SAR jutikliai gali pasiekti 0,5–20 m skiriamąją gebą.



2.5.3. pav. Austrijos Alpių vaizdas, gautas iš palydovo *Sentinel 1A* SAR jutiklio 2014 m. gruodžio 16 d.

Nauji techninio dizaino ir duomenų apdorojimo būdai leido pasiekti didelę skiriamąją gebą net ir naudojant plačias žvalgos juostas. Šie atnaujinimai remiasi skaitmeniniu signalo formavimu (Younis ir kt., 2003) ir tai leido pradėti naudoti tokius stebėjimo būdus kaip TOPSAR (angl. Terrain Observation with Progressive Scans SAR; De Zan ir Monti Guarnieri, 2006) bei SweepSAR (Freeman ir kt., 2009).

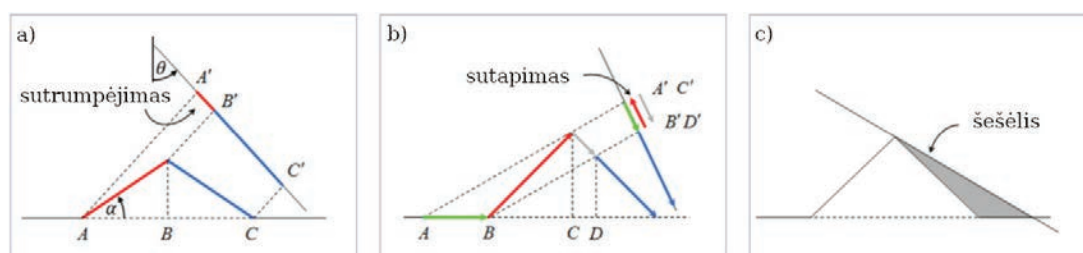
2.5.3. SAR duomenų geometrija

Visos nuotolinių stebėjimų radarų sistemos stebėjimus atlieka įžambiai, todėl kalnų šlaitai ir kitos Žemės reljefo formos sukuria geometrinius iškraipymus SAR vaizduose. Pagrindiniai iškraipimai yra: 1) reljefo sutrumpėjimas dėl perspektyvos, 2) paviršiaus objektų sutapimas, 3) šešėlis (2.5.4. pav.).

Aukšto kalno, kurio šlaitas yra pasviręs į radaro pusę, radaro signalas pirmiau pasiekia papėdę, o paskui viršūnę. Todėl radaro vaizde šlaitas sumažėjęs dėl perspektyvos. Dėl radaro signalo įžambumo realus šlaito ilgis AB radaro vaizde bus sumažintas ir bus lygus $A'B'$ (2.5.4. pav. a). Objektų sutrumpėjimas dėl perspektyvos priklauso nuo radaro signalo kritimo kampo (θ) ir kalno šlaito nuolydžio kampo (α) santykio. Didžiausias sutrumpėjimo efektas stebimas, kai θ artėja prie α . Jei radaro signalas yra statmenas šlaitui, kalno papėdė ir viršūnė nuskenuojama tuo pačiu metu ir šlaito ilgis radaro vaizde bus lygus nuliui. Sutrumpėję kalnų šlaitai radaro vaizduose atrodo kaip labai ryškūs (šviesūs) objektai.

Sutapimas atsiranda, kai radaro spindulys pirmiausia pasiekia objekto viršūnę (C), o tik paskui papėdę (B) (2.5.4. pav. b). Tuomet formuojant SAR vaizdą kalno šlaitas (BC) sutampa su informacija iš papėdės (AB) (2.5.4. pav. b, atitinkamai pažymėta raudona ir žalia spalva). Sutapimo efektas stipriausias kalnuotose vietovėse ir kai radaro signalo kritimo kampas yra mažas. Sutrumpėjimas dėl perspektyvos ir iškraipimai dėl sutapimo gali būti sumažinti, jei didėja SAR stebėjimo kampas (θ).

Tačiau didinant SAR stebėjimo kampą (θ) didėja šešėlis. Radaro signalo šešėlis atsiranda, kai signalas apskritai negali pasiekti paklotinio paviršiaus (2.5.4. pav. c). Šešėlyje esantys objektai radaro vaizduose yra tamsūs, nes iš ten nėra jokios atgalinės sklaidos. Kuo radaro signalo kampas nuožulnesnis, tuo didesni šešėliai. Nėra vieno būdo techniškai SAR vaizduose išvengti geometrinių iškraipymų. Norint gauti tikslių paviršiaus objekto vaizdą reikalinga radaru stebėti iš skirtingų pozicijų.



2.5.4. pav. Pagrindiniai geometriniai paviršiaus iškraipimai SAR vaizduose: a) sutrumpėjimas dėl perspektyvos. Realus atstumas ant paviršiaus AB (raudona tiesė) radaro vaizde sutrumpėja ir tampa $A'B'$; b) sutapimas – atgalinis signalas iš taško A ir C į SAR jutiklį grįžta tuo pačiu metu, todėl paviršius AB (žalia tiesė) ir BC (raudona tiesė) sutampa, gaunama, kad $A'B' = C'D'$; c) šešėlis – aukšti kalnai gali visiškai užstoti papėdę ir tuomet iš šios teritorijos negaunama jokios informacijos (pažymėta pilkai) (pagal Flores ir kt., 2019).

2.5.4. SAR vaizdų grūdėtumas

Be geometrinių iškraipymų SAR vaizdai pasižymi grūdėtumu, kuris kartais pavadinamas „druskos ir pipirų“ triukšmu (2.5.5. pav.). Grūdėtumas atsiranda, nes SAR jutiklis fiksuoja ne tik tiesioginę paviršiaus atgalinę sklaidą, bet ir stebimoje teritorijoje atsirandančius trikdžius dėl gausybės išsklaidytų atspindžių.

Vidutinės skiriamosios gebos SAR vaizduose atgalinis signalas iš vienos teritorijos gardelės (maždaug 10×10 m dydžio) yra koherentinė gardelės viduje vykstančių tūkstančių išsklaidymų suma (2.5.6. pav. a).

Įsivaizduokite situaciją, kad SAR sistema stebi vienalytį paviršių (pavyzdžiui, lygią pievą), o visi išsklaidymo atvejai išilgai vienos pikselio ašies yra vienodo stiprumo (pilkos rodyklės 2.5.6. pav. a). Dėl skirtingos padėties pikselyje, kiekvieno išsklaidymo fazė yra atsitiktinė, o bendra išsklaidymo reikšmė yra lygi visų atsitiktinių išsklaidymo vektorių sumai (juoda rodyklė 2.5.6. pav. a). Kadangi net ir esant vienalyčiam paviršiui kiekviename pikselyje radaro signalo išsklaidymo pasiskirstymas yra skirtingas, suminio išsklaidymo vektorius reikšmė ir fazė (juoda rodyklė) skirsis tarp gretimai esančių pikselių. Tai sukelia SAR vaizdams tipišką grūdėtumo efektą (2.5.5. pav.).

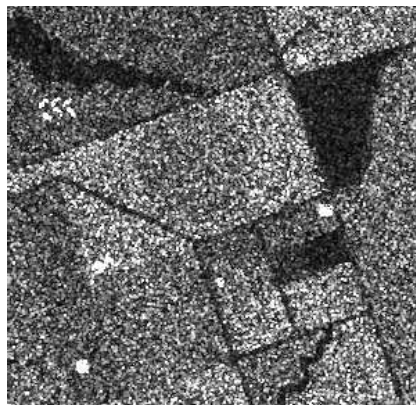
Jei atskirų išsklaidymo atvejų kiekis pikselyje yra didelis, SAR vaizdo intensyvumas kinta eksponentiškai:

$$pdf(I/\sigma^0) = \frac{1}{\sigma^0} \exp\left\{-\frac{I}{\sigma^0}\right\} \quad (2.5.6.)$$

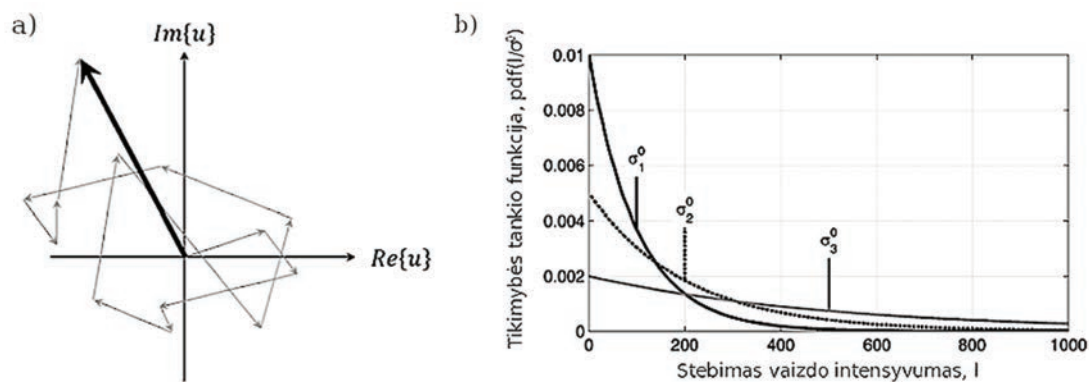
kur $I = \text{Re}\{u\}^2 + \text{Im}\{u\}^2$ yra vaizdo intensyvumas pikselyje; σ^0 – atgalinės sklaidos koeficientas; pdf – tikimybės tankio funkcija. Formulėje 2.5.6. apibrėžtas pasiskirstymas dažnai vadinamas grūdėtumo skirstiniu ir gerai apibrėžia triukšmą, stebimą vidutinės skiriamosios gebos SAR vaizduose virš vienalyčių paviršių.

Grūdėtumo skirstinio forma priklauso nuo atgalinės sklaidos koeficiento σ^0 – kuo ryškesnis vaizdo elementai, tuo intensyvesnis jų triukšmas. σ^0 apibūdina, kokia ateinančios radaro energijos procentinė dalis yra išsklaidoma atgal nuo Žemės paviršiaus objekto ir sugrįžta į jutiklį. Atgalinės sklaidos koeficientas σ^0 yra bedimensė, normalizuota objekto atgalinės sklaidos išraiška (žr. formulę 2.5.7.) 2.5.6. pav. b dalyje pavaizduota, kaip keičiasi grūdėtumo skirstiniai $pdf(I|\sigma^0)$ esant trimis skirtingoms σ^0 reikšmėms. Kuo didesnis atgalinės sklaidos koeficientas ($\sigma_1^0 > \sigma_3^0$), tuo grūdėtumo tikimybė didesnė. Tačiau jei vaizdo intensyvumas I labai didelis, grūdėtumo tikimybė ($pdf(I|\sigma^0)$) tampa labai panaši, nepriklausomai nuo atgalinės sklaidos koeficiento reikšmės (σ^0) (2.5.6. pav. b).

Kiti triukšmo šaltiniai dažniausiai yra pastovūs visame vaizde ir priklauso nuo vaizdo ryškumo, o grūdėtumas kiekvienu atveju kinta. Grūdėtumą sunku pašalinti, nes norint tiksliai apskaičiuoti $pdf(I|\sigma^0)$ reikia žinoti objekto atgalinės sklaidos koeficientą σ^0 . Siekiant kaip galima efektyviau pašalinti šį triukšmą sukurta daugybė filtravimo būdų. Labiausiai paplitę filtrai pateikti 2.5.1. lentelėje.



2.5.5. pav. Natūralus SAR vaizdo grūdėtumas.



2.5.6. pav. SAR vaizdo grūdėtumo prigimtis: a) atgalinis signalas yra koherentinė atskirų išsklaidymo atvejų suma stebimo pikselio viduje; b) vaizdų su skirtingais atgalinės sklaidos koeficientais σ^0 grūdėtumo tikimybės tankio funkcija (*pdf*) (pagal Flores ir kt., 2019).

2.5.1. lentelė. Labiausiai paplitę SAR vaizdų grūdėtumo filtrai, jų savybės ir autoriai.

GRŪDĖTUMO FILTRAS	APRAŠYMAS	AUTORIAI
Pokyčius išsaugantis daugialypis grūdėtumo filtras	Sumažina grūdėtumą filtruodamas SAR vaizdų seriją, tačiau išsaugo informaciją apie paviršiaus pokyčius per laiką (pvz.: dėl miškų kirtimo).	Quegan ir Yu, 2001.
Lee filtras	Statistinis filtras, paremtas standartiniu nuokrypiu. Skirtingai nei Gauso filtras, Lee ir kiti panašūs filtrai sumažindami triukšmą išsaugo vaizdo ryškumą ir detales.	Lee, 1980.
Patobulintas Lee filtras	Patobulintas Lee filtras suskirsto visus pikselius į tris kategorijas ir apdoroja jas skirtingai: 1) homogeniški (pikselio reikšmė yra pakeičiama į filtro lango vidurkį); 2) heterogeniški (pikselio reikšmė yra pakeičiama į svorinį vidurkį); 3) taškiniai (pikselio reikšmė nepakeičiama).	Lopes ir kt., 1990.
Frosto ir patobulintas Frosto filtras	Frosto filtras yra eksponentiškai slopinamas apskritas simetrinis filtras, paremtas lokalia taško statistika. Patobulintas Frosto filtras pirmiausia suklasifikuoja pikselius kaip ir patobulintas Lee filtras.	Frost ir kt., 1982; Lopes ir kt., 1990.
Nelokalaus vidurkio filtrai (angl. Non-local means filters)	Nelokalaus vidurkio filtrai remiasi bet kur vaizde esančių panašių pikselių arba didesnių vaizdo dalių suvidurkinimu. Algoritmas vaizde ieško vaizdo elementų, kurie būtų panašūs į pikselio, kuris yra filtruojamas, regioną. Naudojant apibrėžtus panašumo kriterijus surandamos visos panašios vaizdo dalys, jos suvidurkinamos ir taip pašalinamas triukšmas nesumažinant vaizdo skiriamosios gebos.	Buades ir kt., 2005; Chen ir kt., 2014; Martino ir kt., 2016; Martino ir kt., 2015.

2.5.5. SAR jutikliuose naudojami bangų ilgiai

Radarų sistemos naudoja elektromagnetinių bangų dažnius maždaug nuo 1 iki 90 GHz, o šis intervalas yra sudalytas į dažnių juostas (2.5.3. lentelė). Mikrobangos nuotoliniams tyrimams pradėtos naudoti per Antrąjį pasaulinį karą, todėl jų juostų pavadinimai buvo koduojami, kad priešai negalėtų suprasti. Kodavimas raidėmis (nuo Ka iki P juostos) išliko iki šių dienų, tačiau naujiems naudotojams tai nepatogi sistema. Pradžioje šios juostos buvo apibrėžtos pagal tai, kokia įranga yra reikalinga sugeneruoti ir aptikti tam tikro bangos ilgio signalus. Tačiau radaro dažnių juostos gali būti suvokiamos panašiai kaip spalvos optiniame elektromagnetinių bangų ruože.

Ne visos juostos, aprašytos 2.5.2. lentelėje, yra naudojamos SAR nuotoliniams tyrimams. Nors yra keletas eksperimentinių Ka ir Ku juostos SAR sistemų, tačiau visos be išimties Žemės paviršiaus stebėjimams skirtos palydovinės sistemos naudoja žemesnio dažnio bangas (nuo X iki P juostos) (2.5.2. lentelėje pažymėta pilkai). SAR jutiklio bangos ilgis lemia, kiek giliai į paviršių įsiskverbs mikrobangos. Ilgesnių bangų signalai (pvz., L ir P juostos) į augalijos vainiką ir dirvožemį įsiskverbia giliau. Taigi taikymo sritys priklauso nuo SAR jutiklyje naudojamų elektromagnetinių bangų dažnio.

2.5.2. lentelė. Mikrobangų juostos ir jų charakteristikos. Nuotoliniam Žemės stebėjimui naudojamos dažnių bangos pažymėtos pilka spalva. Kitose mokslo šakose naudojamos radaro dažnių klasifikacijos nėra identiškos šiai.

JUOSTA	DAŽNIS	BANGOS ILGIS	PAGRINDINĖ TAIKYMO SRITIS
Ka	27–40 GHz	1,1–0,8 cm	SAR naudojama retai, dažniausiai taikoma oro uostuose.
K	18–27 GHz	1,7–1,1 cm	SAR naudojama retai, šio dažnio bangas atmosferoje sugeria vandens garai.
Ku	12–18 GHz	2,4–1,7 cm	SAR naudojama retai (tinka palydovinei altimetrijai).
X	8–12 GHz	3,8–2,4 cm	Naudojama didelės skiriamosios gebos SAR jutikliuose (tinka stebėti urbanizuotas teritorijas, sniegą ir ledą, pasižymi maža skvarba į augalijos lają).
C	4–8 GHz	7,5–3,8 cm	SAR naudojama dažniausiai (tinka globaliai stebėti ledą, vandenyną, jūrų transportą, Žemės paviršiaus pokyčius, vidutinio tankumo augaliją. Pasižymi gera skvarba, aukšta koherencija).
S	2–4 GHz	15–7,5 cm	SAR Žemei stebėti naudojami retai (tinka žemės ūkiui stebėti, gali įsiskverbti į augalijos lają giliau nei C juostos radaras).
L	1–2 GHz	30–15 cm	Vidutinės skiriamosios gebos SAR (tinka geofiziniams Žemės stebėjimams, biomasei ir augalijai kartografuoti, pasižymi dideliu įsiskverbimo gyliu).
P	0,3–1 GHz	100–30 cm	Eksperimentinis SAR (tinka biomasei stebėti, augalijai kartografuoti).

SAR X juostos jutikliai dažniausiai naudojami stebėti urbanizuotas teritorijas ir infrastruktūrą. Dėl didelės skiriamosios gebos X juostos radarai taip pat naudojami transportui sekti bei stebėti pramonės įrenginius. Dėl menkos skvarbos į augalijos vainikus, X juosta netinka miškams ir augalijai stebėti.

C juostos jutikliai Žemei stebėti naudojami jau daugiau nei 30 metų ir jų taikymo sričių yra labai įvairių. C juostos jutikliai gali turėti didelę arba vidutinę skiriamąją gebą bei pasižymi geresne skvarba į paviršius nei X juostos jutikliai. Nors C juostos signalas įsiskverbia giliau į medžių vainiką, šios bangos dažniausiai negali visiškai kiauurai prasiskverbti per lają. Kai augalija tanki, C juosta gali būti taikoma tik viršutinio miško ardui stebėti. C juostos žvalgos juosta palyginus su X juostos yra platesnė, todėl ji geriau tinka regioniniams ar globaliems tyrimams.

S juostos SAR jutikliai Žemei stebėti anksčiau nebuvo taikomi. Vienas pirmųjų S juostos SAR jutiklių buvo paleistas 2018 m. rugsėjį kartu su NovaSAR-S palydovu. Ši misija skirta išsiaiškinti, ar vidutinės skiriamosios gebos S juostos SAR jutiklis gali būti taikomas stebėti ekstremalias situacijas, žemės ūkio kultūras, miškus (vidutinių platumų ir tropinius), žemės dangos pokyčius. NASA ir Indijos kosmoso tyrimų organizacijos (angl. Indian Space Research Organisation, ISRO) planuojamas NISAR palydovas taip pat turės S juostos jutiklį (kartu su L juostos jutikliu). Numatoma, kad šis SAR jutiklis turės keturgubą poliarizaciją ir jo duomenys bus laisvai prieinami.

Istoriškai daugiausia palydovinių SAR prietaisų naudojo C juostą, tačiau tikėtina, kad ateityje daugės L juostos jutiklių. L juostos SAR pasižymi mažesne skiriamąja geba nei trumpesnių bangų SAR jutikliai, tačiau jų savybė prasiskverbti pro augaliją gerokai padidina jų galimybes stebėti Žemės paviršius. L juostos radarų signalas gali kartografuoti paviršių po medžių vainikais. Pavyzdžiui, gali užfiksuoti vandeniui užlietas teritorijas ir potvynius miškuose. L juostos bangos taip pat suteikia galimybę apibūdinti medžių vainikų struktūrą, ypač tankiuose miškuose. Gebėjimas prasiskverbti pro augaliją padeda pasiekti geresnę bangų koherenciją, todėl galima dažniau naudoti interferometriją ir tiksliau nustatyti Žemės paviršiaus poslinkius.

P juostos SAR jutikliai kol kas yra tik vystomi ir išbandomi laboratorijoje. Norint juos naudoti kosmose reikia pašalinti jonosferos sukiamą triukšmą šiame dažnių diapazone. Tik visai neseniai buvo atrasti būdai, kaip atlikti signalo jonosferos korekciją, ir tai leido pradėti planuoti palydovinę P juostos radaro misiją. ESA misija „Biomass“ 2021 m. iškels pirmąjį palydovą su P juostos radaru. Jo pagrindinė taikymo sritis bus miškų kartografavimas ir biomasės pokyčių bei dinamikos stebėseną.

2.5.6. SAR atgalinė sklaida ir jos priklausomybė nuo paviršiaus šiurkštumo ir dielektrinių savybių

Siekiant nustatyti Žemės paviršiaus savybes SAR siunčia tam tikro dažnio mikrobangų signalą nuožulniu kampu ir matuoja atgalinę sklaidą, grįžtančią jutiklio kryptimi. Matematiškai objekto atgalinė sklaida σ apibrėžiama kaip siunčiamo ir grįžtančio signalo intensyvumo santykis:

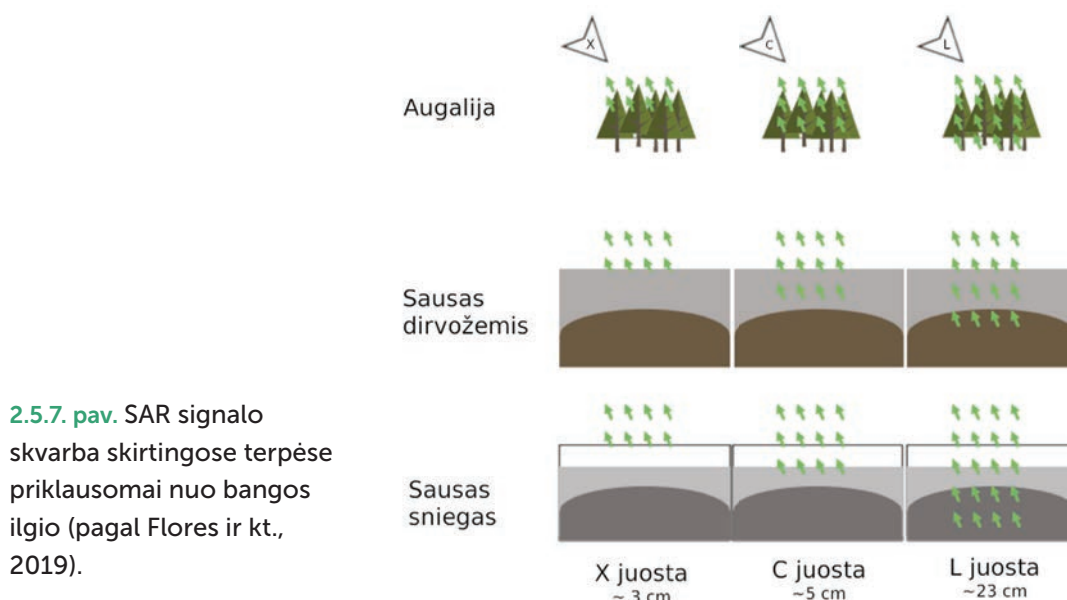
$$\sigma = \frac{I_{received}}{I_{incident}} 4\pi R^2 [m^2] \quad (2.5.7.)$$

kur $I_{received}$ – grįžtančio signalo intensyvumas; $I_{incident}$ – siunčiamo signalo intensyvumas; $4\pi R^2$ – sferos paviršiaus plotas. Atgalinė sklaida σ apibūdina atspindžio intensyvumą išreikštą kaip sferos, kuri pasižymi tokia pat atspindžio geba, geometrinę pjūvį ir matuojama ploto vienetais.

SAR užfiksuotą konkretaus paviršiaus atgalinę sklaidą interpretuoti nėra paprasta, nes šis santykis yra nulemtas tiek stebimo paviršiaus savybių, tiek jutiklio parametrų. Svarbiausi elementai, veikiantys atgalinę sklaidą, yra paviršiaus šiurkštumas ($h_{\text{šiurkšt.}}$) ir stebimo objekto dielektrinės savybės, kurias apibūdina santykinė dielektrinė konstanta (ϵ_r).

Nuo dielektrinės terpės savybių priklauso, kaip bangos ilgio λ mikrobangos yra išsklaidomos Žemės paviršiaus, vegetacijos ir kitų terpių. Ši charakteristika lemia, kiek spinduliuotės yra išsklaidoma paviršiuje, kiek giliai spinduliuotė įsiskverbia į terpę ir kiek energijos prarandama dėl energijos sugėrimo terpėje. Šių procesų intensyvumas priklauso nuo jutiklyje naudojamo bangos ilgio λ .

2.5.7. paveikslėlyje pateiktas apibendrinimas, kaip skiriasi radaro bangų skvarba į skirtingas terpes priklausomai nuo jutiklyje naudojamo bangos ilgio λ . Kuo ilgesnė banga, tuo giliau ji įsiskverbia į stebimą terpę. Ši savybė susijusi su dielektrine konstanta, kuri leidžia L juostos bangoms prasiskverbti giliau nei C ar X juostos bangoms (žr. 2.5.2. lentelę). Apaugusiose teritorijose X juostos radaro bangos yra išsklaidomos medžio vainikuose, o C ir L juostos bangos atitinkamai prasiskverbia vis giliau į medžių tūrį. Norint nustatyti augalijos savybes (pvz.: struktūrą, biomasę) reikėtų rinktis SAR jutiklius su ilgesnėmis bangomis. Taip pat ilgos bangos tinkamesnės tais atvejais, kai norima nustatyti paviršiaus sąlygas po medžių vainikais (pvz.: užliejimams fiksuoti).



SAR signalo skvarba į medžių vainiko tūrį taip pat priklauso nuo lajos tankio. Pavyzdžiui, C juostos SAR duomenys gali suteikti informacijos apie paklotinį paviršių retame borealinia-me miške, tačiau C juostos signalas negali prasiskverbti pro tankią ir daugiasluoksnę tropinių miškų lapiją.

Taisyklė, kad ilgesnės bangos įsiskverbia giliau, galioja ir atviriems paviršiams. Dirvožemyje ar lede X juostos signalas išsklaidomas paviršiuje, o C ir L juostos signalas atitinkamai įsiskverbia vis giliau į terpę. Norint apibrėžti įsiskverbimo gylį δ_p atviruose paviršiuose, reikia žinoti terpės dielektrines savybes (ϵ_r). Jei ϵ_r yra žinoma, t galima apskaičiuoti δ_p :

$$\delta_p \approx \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_r'}}{2\pi \epsilon_r''} \tag{2.5.8.}$$

kur ϵ_r' – reali dedamoji; o ϵ_r'' – menama dielektrinės konstantos dedamoji. ϵ_r' ir ϵ_r'' priklauso net tik nuo dirvožemio tankio, jutiklio naudojamo bangos ilgio, bet ir nuo drėgmės kiekio.

2.5.8. pav. a dalyje parodyta, kaip dielektrinės savybės keičiasi priklausomai nuo drėgmės kiekio priemolyje. Dielektrinės savybės priklauso nuo dirvožemio drėgmės ir skirtingų bangų ilgių (dažnių). ϵ_r' ir ϵ_r'' didėja didėjant dirvožemio drėgmei, tačiau bangų galimybė įsiskverbti

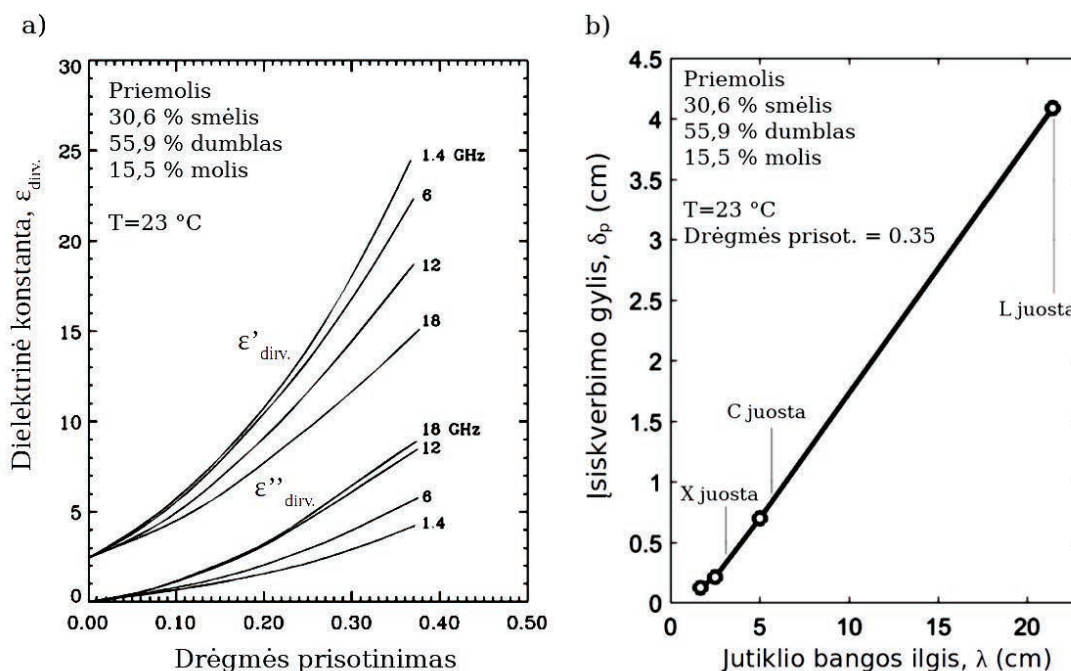
gilyn mažėja (formulė 2.5.8.). ϵ_r' ir ϵ_r'' taip pat priklauso nuo jutiklio naudojamo dažnio $f = c/\lambda$. Didėjant dažniui (trumpėjant bangos ilgiui) ϵ_r' sumažėja, o ϵ_r'' padidėja tokią proporcią, kad įsiskverbimo gylis δ_p yra gerokai didesnis esant žemo dažnio SAR signalui (ilgoms bangoms). 2.5.8. pav. b dalyje pateikta įsiskverbimo gylio δ_p priklausomybė nuo bangos ilgio λ . Pateiktas įsiskverbimo gylis yra apskaičiuotas pagal 2.5.8. formulę, laikantis prielaidos, kad dirvožemio drėgmė yra 0,35. Galima matyti, kad tarp jutiklio bangos ilgio ir įsiskverbimo gylio yra beveik tiesinė priklausomybė.

Daugeliu atveju (išskyrus sausą sniegą ir sausą smėlį) mikrobangos į atvirus arba mažai apaugusius paviršius įsiskverbia labai negiliai (2.5.8. pav. b) ir paviršiuje vykstantis išsklaidymas sudaro pagrindinį radaro fiksuojamo signalo dalį. Tokiu atveju paviršiaus šiurkštumas yra pagrindinis rodiklis, lemiantis SAR atgalinės sklaidos koeficientą.

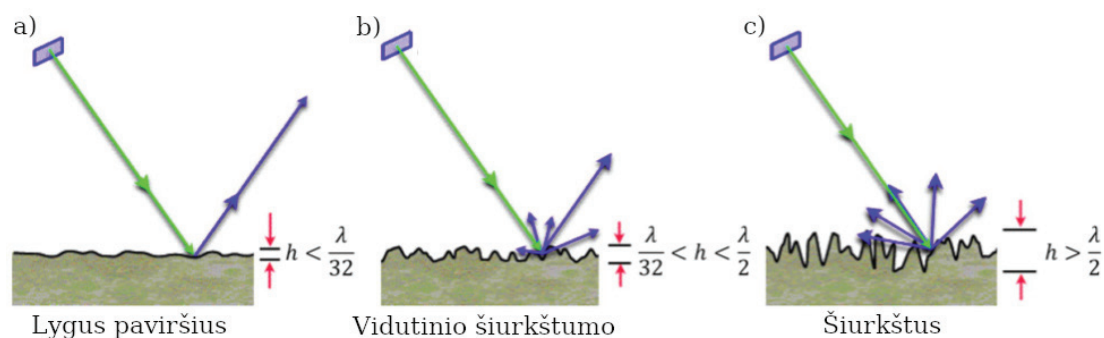
Ar Žemės paviršius SAR jutikliui atrodys šiurkštus, priklauso nuo naudojamo bangos ilgio. Atsitiktinio šiurkštumo paviršių galima apibūdinti naudojant aukščio nuokrypį nuo vidurkio h standartinį nuokrypį. Naudojant Fraunhoferio kriterijų, paviršius laikomas šiurkščiu, jei aukščio nuokrypis viršija $h_{\text{šiurkšt.}}$ reikšmę, kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$h_{\text{šiurk.}} > \frac{\lambda}{(32 \cdot \cos\theta_i)} \tag{2.4.9.}$$

Šiurkštumo priklausomybė nuo bangos ilgio pateikta 2.5.9. pav. Atgalinė sklaida didėja (mėlynos rodyklės nukreiptos jutiklio link) didėjant paviršiaus šiurkštumui. Šiurkštesni paviršiai pasižymi didesniu atgalinės sklaidos koeficientu nei lygūs paviršiai. Priklausomybė nuo bangos ilgio reiškia, kad paviršius SAR vaizduose atrodys vis tamsesnis einant nuo X juostos ($\lambda = 3,1$ cm), C juostos ($\lambda = 5,66$ cm) iki L juostos ($\lambda = 24$ cm).



2.5.8. pav. a) Dirvožemio drėgmės ir dielektrinės konstantos ryšys; b) įsiskverbimo gylio δ_p priklausomybė nuo bangos ilgio λ esant pastoviam dirvožemio drėgmės kiekiui (pagal Flores ir kt., 2019).



2.5.9. pav. Paviršiaus šiurkštumo ir bangos ilgio tarpusavio priklausomybė: a) lygus paviršius, veidrodinis atspindys; b) vidutinio šiurkštumo paviršius, vidutiniška atgalinė sklaida; c) šiurkštus paviršius, didelė atgalinė sklaida (pagal Flores ir kt., 2019).

2.5.7. Signalo poliarizacijos poveikis

SAR yra vienas iš nedaugelio nuotolinio stebėjimo jutiklių, kuris leidžia visiškai kontroliuoti siunčiamo ir priimamo signalo poliarizaciją. Poliarizacija apibūdina plokštumos, kurioje vyksta signalo osciliacija, padėtį. Tiesinės poliarizacijos prietaisuose osciliacijos plokštuma visuomet yra pastovi signalo sklaidimo kryptimi. Kai kurie SAR jutikliai gali turėti ir apskritiminę arba elipsinę poliarizaciją, kur osciliacijos plokštuma keičiasi ir yra apibūdinama naudojant geometrines figūras – elipses arba apskritimus.

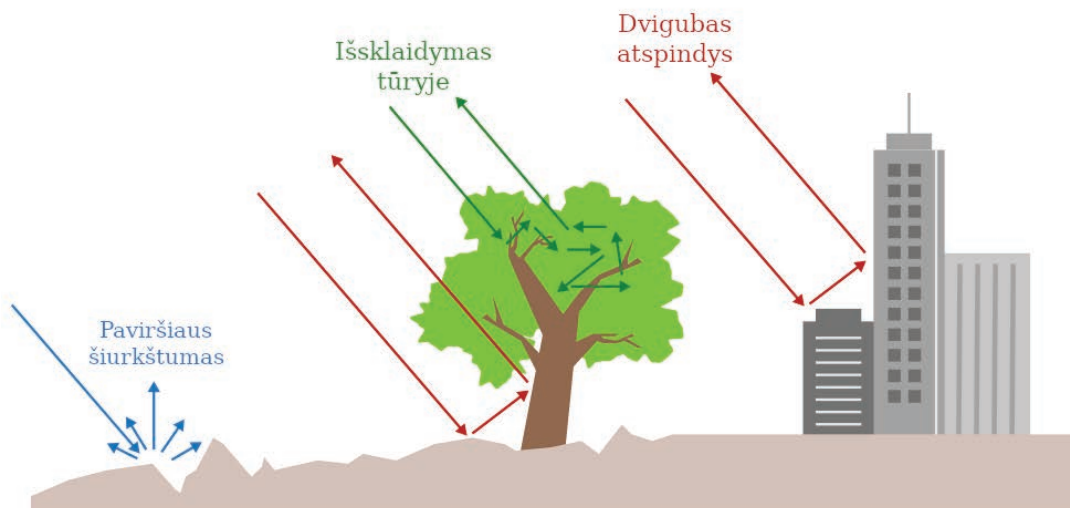
Dauguma dabartinių SAR jutiklių, skirtų stebėti Žemę, spinduliuoja tiesinės poliarizacijos bangas, kurios gali būti poliarizuotos horizontaliai arba vertikalčiai. Senesnių palydovinių misijų SAR jutikliai buvo tik vienos – tiesinės – poliarizacijos, dažniausiai HH (siunčiama horizontali ir priimama horizontali poliarizacija) arba VV (siunčiama vertikalči ir priimama vertikalči poliarizacija). Pradžioje SAR jutikliai, kurie galėjo siųsti vienos poliarizacijos bangas, o priimti kitos (pvz.: HV, siunčiama horizontali, priimama vertikalči poliarizacija) buvo gana reti.

Naujausi jutikliai turi dvigubą arba net keturgubą poliarizaciją. Pastarieji jutikliai gali pakaitomis spinduliuoti H ir V poliarizacijos bangas, ir vienu metu priimti grįžtančias H ir V bangas. Tai leidžia gauti vaizdus HH, HV, VH ir VV poliarizacijose. Skirtingos poliarizacijos signalas skirtingai sąveikauja su objektais ant Žemės paviršiaus, todėl svarbu žinoti, kokią poliarizaciją naudojant buvo sudarytas SAR vaizdas. Sąveika su paviršiumi lemia, kokio ryškumo bus objektas sudarytame radaro vaizde konkrečioje poliarizacijoje.

Supaprastintai galima laikyti, kad natūralaus kraštovaizdžio radaro signalo sklaida yra nulemta trijų pagrindinių veiksnių: 1) paviršiaus šiurkštumo; 2) dvigubo atspindžio; 3) signalo išsklaidymo tūryje (2.5.10. pav.). Žolinė augalija, dirva, keliai ir kiti paviršiai radaro signalą veikia per šiurkštumą (2.5.10. pav. mėlynos rodyklės). Dvigubas atspindys susidaro nuo pastatų, medžių kamienų, stulpų ar kitų vertikalčių objektų, kurie pirmą kartą nuo paviršiaus atspindėjusį signalą vėl nukreipia atgal į jutiklį (2.5.10. pav. raudonos rodyklės). Pro medžių lają besiskverbiantis radaro signalas yra atspindimas daugybę kartų ir tai sudaro trečiąjį tipą – išsklaidymą tūryje (2.5.10. pav. žalios rodyklės).

Anksčiau aptarti signalo išsklaidymo tipai skirtingose poliarizacijose yra fiksuojami skirtingu intensyvumu. Kiekviena poliarizacija išryškina tam tikrą signalo sklaidos tipą. Skirtingų poliarizacijos tipų sklaidos galia $|S|$ priklausimai nuo sklaidos tipų pateikta 2.5.3. lentelėje.

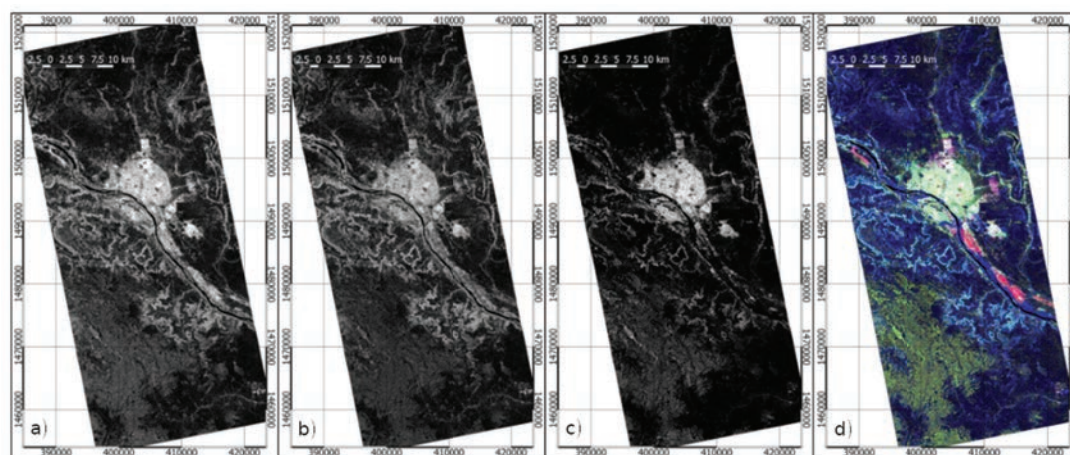
Šios bendros taisyklės padeda suprasti ir palyginti atgalinės sklaidos koeficientą skirtingose poliarizacijose. Jei prieinami visų keturių poliarizacijų duomenys, šios taisyklės gali būti panaudotos automatinei išsklaidymo tipų klasifikacijai.



2.5.10. pav. Pagrindiniai SAR signalo sklaidos tipai Žemės paviršiuje (pagal Flores ir kt., 2019).

2.5.3. lentelė. Santykinė sklaidos galia $|S|$ priklausomai nuo poliarizacijos.

Paviršiaus šiuurkštumas	$ SVV > SHH > SHV $ arba $ SVH $
Dvigubas atspindys	$ SHH > SVV > SHV $ arba $ SVH $
Išsklaidymas tūryje	Daugiausiai $ SHV $ ir $ SVH $



2.5.11. pav. Visų poliarizacijų palydovo ALOS jutiklio PALSAR vaizdai virš Niamejaus Nigeryje: a) $|SHH|$, b) $|SVV|$, c) $|SHV|$, d) RGB kompozicija panaudojant visas poliarizacijas (pagal Flores ir kt., 2019).

2.5.11. pav. pateiktas keturgubos poliarizacijos SAR duomenų pavyzdys. Pagal 2.5.3. lentelėje pateiktas taisykles, aukštos $|SHH|$ reikšmės indikuoja dominuojantį dvigubą atspindį (pvz.: nuo medžių kamienų ar pastatų), aukštos $|SVV|$ reikšmės susijusios su paviršiaus šiuurkštumu (pvz.: dirva, vanduo), erdviniai $|SHV|$ pokyčiai parodo, kaip pasiskirstę objektai su tūriniu išsklaidymu (pvz.: augalija, smėlis ar kiti sausi porėti dirvožemiai, kur signalas gali išsiskverbti giliai). Norint vizualiai paryškinti skirtumus tarp poliarizacijų, informaciją galima sudė-

ti į RGB vaizdą: |SHH| priskiriant raudoną spalvą, |SVV| mėlyną, o |SHV| žalią. 2.5.11. pav. dalyje RGB vaizde raudonos vietovės žymi urbanizuotas ir kai kurias žemės ūkio teritorijas (kultūros ilgais stiebiais). Žalia spalva pietinėje teritorijos dalyje rodo smėlėtus dirvožemius, į kuriuos radaro signalas išsiskverbia giliai ir jo tūryje vyksta daugkartinis išsklaidymas. Mėlynos ir mėlsvos spalvos vietovės indikuoja dirbamą žemę.

2.5.8. SAR duomenų tipai ir jų taikymas

Palydoviniai SAR jutikliai Žemei stebėti naudojami nuo 1979 m. Ir nors šie prietaisai yra surinkę daug svarbių ir ilgalaikių duomenų apie Žemėje vykstančius procesus, juos panaudoti ir sujungti yra sudėtinga, nes egzistuoja daugybė skirtingų duomenų tipų, formatų ir metaduomenų. Šiame skyrelyje pateikta skirtingų organizacijų SAR duomenų ir metaduomenų tipų santrauka. Prie kiekvieno duomenų tipo aprašytos pagrindinės duomenų taikymo sritys.

Duomenų tipų įvairovė yra susijusi su skirtinga informacija, kurią surenka konkretus SAR jutiklis. Kiekvienam vaizdo pikseliui SAR gali pateikti signalo amplitudės, fazės ir poliarizacijos reikšmes, o visi šie rodikliai, savo ruožtu, yra susiję su stebimo objekto ar paviršiaus fizinėmis savybėmis. Šių duomenų apdorojimas nėra vienareikšmiškas, o skirtingiems vartotojams gali reikėti skirtingos informacijos. SAR duomenų teikėjai duomenis apdoroja skirtingais lygiais. Kiekviename aukštesniame lygyje duomenys yra supaprastinami ir pritaikomi konkrečiai sričiai arba yra išryškintas tik vienas SAR duomenų aspektas.

Pirminiai SAR duomenys yra konvertuoti iš elektrinio antenos signalo į skaitmeninį, tačiau papildomai niekaip nepakeisti. Skirtingai nei optinių jutiklių, pirminių SAR duomenų atvaizdavimas nesuteikia daug naudingos informacijos apie stebimą paviršių. Tik sudarius dirbtinę (sintetinę) apertūrą pirminiai duomenys gali būti paversti į suprantamą vaizdą. Pirminiai duomenys nėra tiesiogiai pritaikomi Žemei stebėti, tačiau jie yra visų kitų lygių duomenų pagrindas. Ne visi duomenų teikėjai šiuos duomenis teikia vartotojams. Dažnai SAR jutiklių kūrėjai nėra linkę dalytis pirminiais duomenimis, nes jų apdorojimo algoritmai yra patentuota informacija. Pirminiai duomenys dažniausiai vadinami o lygio (Lo), išskyrus ALOS jutiklį PALSAR, kur pirminiai duomenys koduojami kaip L1.o.

Sudėtinis stebėjimo ruožas tai SAR duomenys, išlaikę pirminę skiriamąją gebą ir kurių kiekviename pikselyje yra informacija apie signalo amplitudę ir fazę. SLC (angl. Single Look Complex) duomenys dažniausiai pateikiami remiantis originalia nuožulnaus stebėjimo geometrija, nėra susieti su koordinatėmis ir nėra atlikta pataisa dėl reljefo. Skirtingai nei optinių jutiklių, SAR skiriamoji geba skiriasi judėjimo (azimuto) ir stebėjimo kryptimi. Dėl to SLC vaizdai dažniausiai atrodo geometriškai iškraipyti. SLC pateikiama jau sukalibruota radiometrinė informacija, tačiau nėra pašalintas grūdėtumas. Jei jutiklis atlieka matavimus su skirtinga poliarizacija, kiekvienam poliarizacijos tipui (HH, VV, HV, VH) dažniausiai pateikiamas atskiras SLC produktas. SLC duomenys gali būti naudojami paviršiaus reljefui ir deformacijai stebėti. SLC taip pat yra aukštesnio apdorojimo lygio duomenų pagrindas. SLC duomenys dažnai koduojami kaip L1 arba L1 SLC (1 lygio duomenys), išskyrus ALOS jutiklį PALSAR, kur SLC koduojami kaip L1.1.

Amplitudės vaizdai tai SAR duomenys, kuriuose pašalinta informacija apie fazę. Dažniausiai jie erdviškai nufiltruoti ir sumažintas vaizdo grūdėtumas, o pikseliai beveik atitinka kvadratą. Kai kurie senesnių SAR sistemų (pvz.: ERS-1/2, *Envisat*, RADARSAT 1, JERS-1, ALOS PALSAR) amplitudės vaizdai nėra susieti su geografinėmis koordinatėmis ir pateikiami originalios stebėjimo geometrijos. Kai kurie duomenų teikėjai šį apdorojimo žingsnį padaro patys ir pateikia vartotojams duomenis su koordinatėmis. Kiti jutikliai (pvz., *Sentinel 1*) pateikia amplitudės vaizdus kartu su georeferenciniu pagrindu. Amplitudės vaizdų paviršiaus topografijos korekcija dažniausiai nėra atlikta. Pirminiai amplitudės duomenys taikomi atvaizdavimui ir vizualiam duomenų patikrinimui. Susiejus šiuos duomenis su koordinatėmis ir

atlikus topografijos korekciją amplitudės vaizdai gali būti naudojami kartografuojant, stebint paviršiaus pokyčius, valdant ekstremalias situacijas ir pan. Šie vaizdai laikomi 1 lygio (L_1) duomenų rinkiniais. Siekiant juos atskirti nuo SLC jie vadinami $L_{1.5}$ (ALOS PALSAR), arba L_1 Detected (*Sentinel 1*, ERS-1 ir 2, *Envisat*, RADARSAT 1, JERS-1).

Poliarimetriniai produktai. Daugelis SAR jutiklių skirtingų poliarizacijų duomenis (HH, HV, VH, VV) pateikia kaip skirtingus sluoksnius L_0 , L_1 , SLC ar L_1 Detected duomenų rinkiniuose. Tačiau yra ir išimčių, pavyzdžiui, NASA jutiklio UAVSAR (naudojamo lėktuvuose), duomenys pateikiami dviem tipais: kaip suspausta Stokso (Stokes) matrica arba kaip suskaidyta Paulio (Pauli) matrica. Suspausta Stokso matrica pateikia informaciją apie matuoto signalo poliarizacijos būseną, o Paulio matrica – apie stebimo paviršiaus poliarimetrines sklaidos savybes. Ketinama šiuos produktus pateikti ir planuojamose NISAR bei TanDEM-L misijose. Poliarimetriniai duomenys naudojami stebimo paviršiaus struktūrai nusakyti bei taikant nekontroliuojamąjį vaizdą klasifikavimą. Poliarizacijos duomenys naudingi žemės ūkiui (klasifikuoti pasėlius, nustatyti dirvos drėgmės sąlygas), vandenynams (nustatyti paviršiaus sroves, vėją), miškams (klasifikuoti, nustatyti medžių aukštį), ekstremalioms situacijoms (naftos išsiliejimui), laivininkystei stebėti.

2 lygio (L_2) arba aukštesni produktai – jais gali būti laikomi visi produktai, pateikiami geografinėse koordinatėse, reguliariose gardelėse, o duomenys pakeisti į fizinius rodiklius (tokius kaip atgalinės sklaidos koeficientas, žiūros lauko deformacija ar poliarizacijos kintamieji). Šiuo metu tik labai nedaug sistemų (Seasat ir UAVSAR) turi L_2 lygio produktus, tačiau ateityje jų daugės. L_2 lygio duomenys gali būti naudojami labai įvairiose srityse: kartografuojant, žemės naudmenims klasifikuoti, Žemės paviršiaus pokyčiams nustatyti, ekstremalioms situacijoms valdyti. SAR interferometrija gali būti naudojama vertinant žalą, analizuojant paviršiaus geofizinius pokyčius ir pan.

2.5.9. Geokodavimas ir radiometrinė topografinė korekcija

Kadangi SAR jutikliai žvalgo iš šono palydovo judėjimo kryptimi, iš jų duomenų sudarytuose vaizduose būna nemažai geometrinių ir radiometrinių iškraipymų. Pasvirę Žemės paviršiai gali lemti geometrinius pikselio vietos iškraipymus, sudaryti šešėlių, o signalui statmeni kalnų šlaitai radiometriškai bus labai ryškūs dėl per didelės ekspozicijos (2.5.12. pav. a). Abu šie efektai labai apriboja SAR taikymą. Radiometriniai iškraipymai dažnai paslepia tikrąjį radaro stebėtą atspindį ir dėl to negalima tiksliai nustatyti paviršiaus savybių ir fiksuoti pokyčių. Jei naudojami skirtingo stebėjimo kampo jutikliai, geometriniai ir radiometriniai iškraipymai lemia klaidingą Žemės paviršiaus klasifikaciją. Norint konkretaus SAR duomenis naudoti kartu su kitų jutiklių duomenimis būtina atlikti geometrinę ir radiometrinę korekciją. Sukalibruoto SAR vaizdo pikselio atgalinės sklaidos koeficientą sudaro:

$$\sigma = \sigma^o(\theta_i) \cdot A_o(\theta_i) \quad (2.5.10.)$$

kur σ^o yra normalizuotas (nuo stebėjimo kampo priklausantis) atgalinės sklaidos koeficientas; θ_i – lokalus stebėjimo kampas; A_o – paviršiaus plotas, kurį dengia pikselis. Remiantis lygtimi (2.5.10.) galima teikti, kad vaizdai, gauti naudojant skirtingą geometriją, bus skirtingi, net jei Žemės paviršius visiškai nepakitęs.

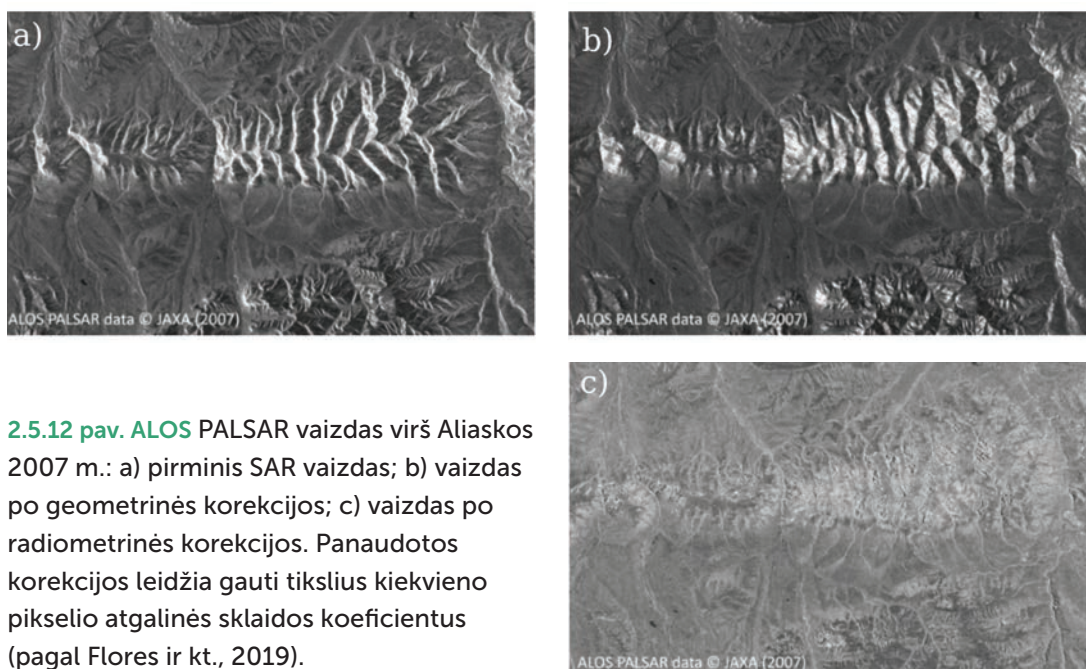
Norint gauti realų paviršiaus atgalinės sklaidos koeficientą, reikia pataisyti radaro užfiksuotą atgalinės sklaidos koeficientą σ^o , pašalinant $A_o(\theta_i)$. Dėmens $A_o(\theta_i)$ pašalinimas vadinamas radiometrine topografijos korekcija. Radiometrinę topografijos korekciją sudaro ir geometrinė, ir radiometrinė pataisa, atliekamos viena po kitos:

- Geometrinė reljefo korekcija (geokodavimas) atliekama siekiant panaikinti geometrinius vaizdo iškraipymus. Tam reikalingas skaitmeninis reljefo modelis (angl. Digital Elevation

Model, DEM). Laikoma, kad tarp $\pm 60^\circ$ platumos DEM, kuris sudarytas iš SRTM (angl. Shuttle Radar Topography Mission) yra pakankamai tikslus šiai užduočiai.

- Radiometrinis reljefo normalizavimas atliekamas siekiant panaikinti su stebėjimo geometrija susijusius radiometrinius iškreipimus pikseliuose. Tai atliekama pašalinant $A_\sigma(\theta_i)$ dėmenį naudojant skaitmeninį reljefo modelį (DEM).

2.5.12. paveikslo a dalyje pateiktas originalus ALOS PALSAR vaizdas virš Aliaskos Denali lūžio. 2.5.12. pav. b dalyje pateiktas SAR vaizdas po geometrinės korekcijos, o c dalyje po radiometrinės korekcijos. Normalizuotuose vaizduose pašalinti beveik visi geometriniai bei radiometriniai iškreipimai, atsirandantys skirtinguose SAR vaizduose dėl skirtingos stebėjimo geometrijos. Tai leidžia palyginti ir sujungti šiuos duomenis su kitų jutiklių informacija.



2.5.12 pav. ALOS PALSAR vaizdas virš Aliaskos 2007 m.: a) pirminis SAR vaizdas; b) vaizdas po geometrinės korekcijos; c) vaizdas po radiometrinės korekcijos. Panaudotos korekcijos leidžia gauti tikslus kiekvieno pikselio atgalinės sklaidos koeficientus (pagal Flores ir kt., 2019).

2.5.10. SAR interferometrija

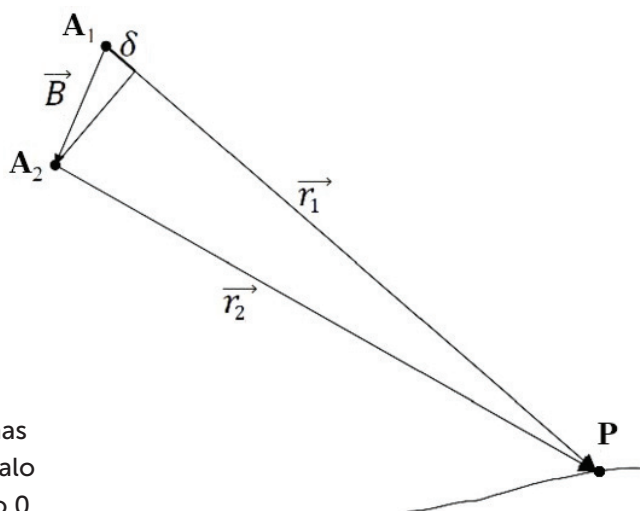
SAR interferometrija (InSAR) yra paremta analize signalo fazių tarp dviejų (arba daugiau) SAR stebėjimų iš skirtingų pozicijų arba skirtingu laiku. Fazių skirtumai padeda nustatyti Žemės paviršiaus topografiją ir deformacijas. Topografijos nustatymo tikslumas priklauso nuo SAR stebėjimo geometrijos, o paviršiaus deformacijų matavimo tikslumas – nuo signalo bangos ilgio ir gali siekti kelis mm arba cm.

Pradiniai SAR fazės matavimai yra užkoduoti išmatuotos atgalinės sklaidos reikšmėse, todėl norint sudaryti fazės žemėlapių pirmiausia reikia ištraukti šiuos duomenis. 2.5.13. pav. pateiktoje schemeje parodyta, kad nuo Žemės paviršiaus taško P grįžtantis radaro signalas į palydovus A_1 ir A_2 keliauja skirtingu atstumu r_1 ir r_2 . Skirtumas tarp r_1 ir r_2 (δ) lemia sugrįžtančio signalo fazės skirtumą φ , kuris gali svyruoti nuo 0 iki 2π radianų. Jei interferometrinis atstumas B tarp palydovų yra žinomas, naudojant fazių skirtumą galima apskaičiuoti P taško aukštį.

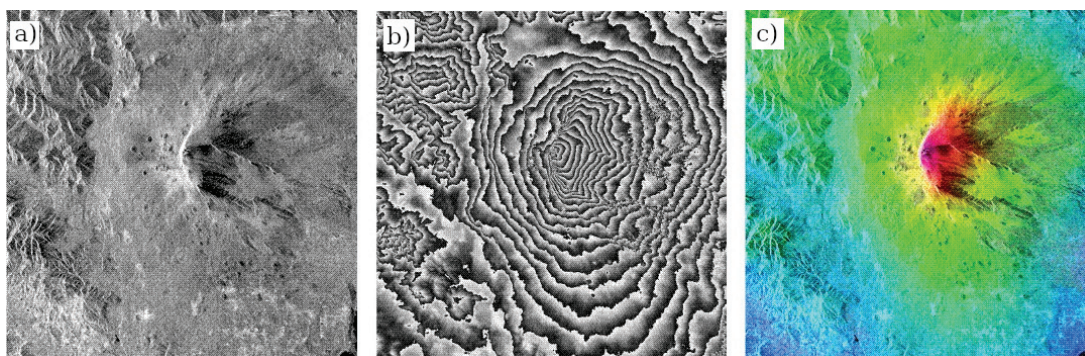
SAR interferometrijos panaudojimo pavyzdys reljefo aukščiui nustatyti pateiktas 2.5.14. pav.: a dalyje pateiktas vaizdas SAR signalo intensyvumo virš Etnos ugnikalnio, b dalyje pateikta interferograma, kuri parodo SAR signalo fazės pokyčius kiekviename pikselyje. Interferogramos raštą sudaro eilė juostelių, kurios atspindi reljefo aukščio skirtumus. Kuo tankesnės

juostelės, tuo staigiau kinta reljefo aukštis arba tuo didesni paviršiaus pokyčiai yra įvykę tarp skirtingų palydovų skrydžių. Naudojant interferogramą galima sudaryti reljefo aukščio modelį (2.5.14. pav. c)

Yra keletas būdų radarų interferometrijai reikalingai informacijai surinkti. Vienu atveju atliekamas vienas skrydis virš tiriamo regiono, tačiau orlaivis ar palydovas turi dvi radaro antenas. Viena antena siunčia ir priima grįžtantį signalą, o kita antena tik priima grįžtantį signalą. Tuomet interferometriniu atstumu B (2.5.13. pav.) yra realus fizinis atstumas tarp dviejų antenų. Kitu atveju palydovas ar orlaivis, turintis vieną radaro anteną, virš to paties regiono praskrenda du ar daugiau kartų ir kiekvieno skrydžio metu antena siunčia ir priima grįžtantį signalą. Tokiu atveju interferometriniu atstumu B yra skirtumas tarp lėktuvo skrydžio ar palydovo orbitos linijų. Norint gauti geresnius rezultatus reikėtų, kad šis atstumas būtų kaip galima mažesnis, o skrydžiai kuo panašesni. Lėktuvų pakartotiniams skrydžiams taikomas reikalavimas, kad skrydžių linijos nebūtų nutolusios daugiau nei kelios dešimtys metrų. Dirbtiniams Žemės palydovams šis skirtumas gali būti keli šimtai ar net tūkstančiai kilometrų.



2.5.13. pav. Radaro interferometrijos geometrinė schema. Nuo Žemės paviršiaus taško P į palydovus A_1 ir A_2 grįžtantis radaro signalas keliauja skirtingu atstumu tarp r_1 ir r_2 . Skirtumas tarp r_1 ir r_2 (δ) lemia sugrįžtančio signalo fazės skirtumą, kuris gali svyruoti nuo 0 iki 2π radianų.



2.5.14. pav. Etnos ugnikalnis: a) SAR signalo intensyvumo vaizdas; b) SAR interferometrijos vaizdas, kur baltos ir juodos juostelės parodo aukščio skirtumus. Kuo jos tankesnės, tuo staigesnis reljefo pokytis; c) skaitmeninis reljefo modelis (DEM), kur raudona žymi aukščiausius taškus, o mėlyna žemiausius.

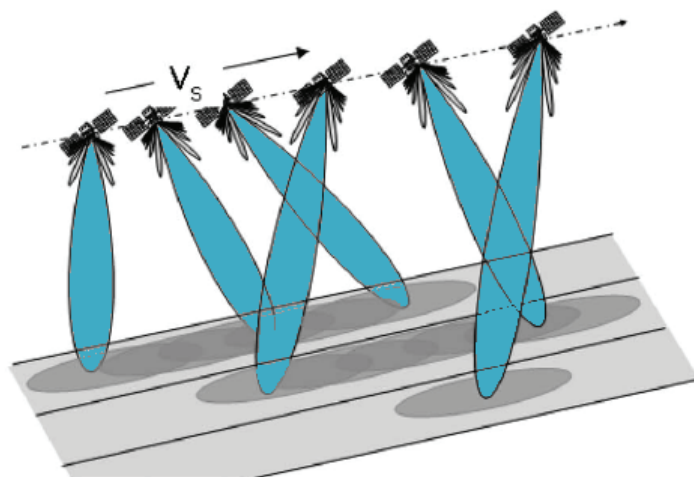
Taikant pakartotinių skrydžių interferometrijos būdą, Žemės paviršiaus objekto padėtis ir orientacija tarp skirtingų skrydžių gali pasikeisti, ypač jei jie atliekami po kelių dienų ar savaitių. Tai sukelia laiko dekoreliaciją ir jos metu suprastėja skirtingų signalų fazių tarpusavio ryšys. Pavyzdžiui, dėl vėjo SAR matavimus atliekant skirtingu metu, gali pasikeisti medžių šakų ir lapų padėtis bei orientacija. Sistemos, kurios naudoja trumpas bangas (pvz.: X juostos SAR), yra labai jautrios kiekvieno individualaus lapo padėties pokyčiams ir laiko dekoreliacija gali labai pabloginti signalų interferometriją. Atvirose vietovėse, kur augalijos nėra arba ji labai reta, laiko dekoreliacija nėra reikšminga. Jutikliai, naudojantys ilgesnes bangas, yra mažiau jautrūs laiko dekoreliacijai. Tais atvejais, kai naudojamas dviejų antenų viename orlaivyje interferometrijos metodas, problemų dėl laiko dekoreliacijos nekyla.

Pakartotinių skrydžių radaro interferometrija gali būti naudojama ne tik reljefo modeliui sudaryti, bet ir paviršiaus pokyčiams tarp skrydžių nustatyti. Tokiu atveju skaitmeninis reljefo modelis (DEM) turėtų būti žinomas iš anksto. Turint reljefo modelį radaro signalo fazės skirtumai tarp skirtingų skrydžių gali būti pataisyti atsižvelgiant į reljefo aukščius. Gauti nuokrypiai parodys, kur paviršius pasikeitė. Jei interferometrinė koreliacija tarp dviejų vaizdų yra didelė, paviršiaus pokyčiai gali būti tiksliai nustatyti 1 cm arba dar didesniu tikslumu. Turint du vaizdus, Žemės paviršiaus pasikeitimai gali būti įvertinti tik kaip poslinkiai stebėjimo ašyje, t. y. įvertinama, ar taškas paslinko arčiau ar toliau radaro stebėjimo kryptimi. Jei turimos dvi vaizdų poros su skirtinga stebėjimo geometrija (pvz.: SAR matavimai iš kylančios ir besileidžiančios orbitos), galima įvertinti paviršiaus poslinkius dvimatėje erdvėje. SAR interferogramos pateikia informaciją apie paviršiaus deformacijas, tačiau nesuteikia informacijos apie deformacijos priežastis. Tam naudojami papildomi informacijos šaltiniai ir modeliavimas.

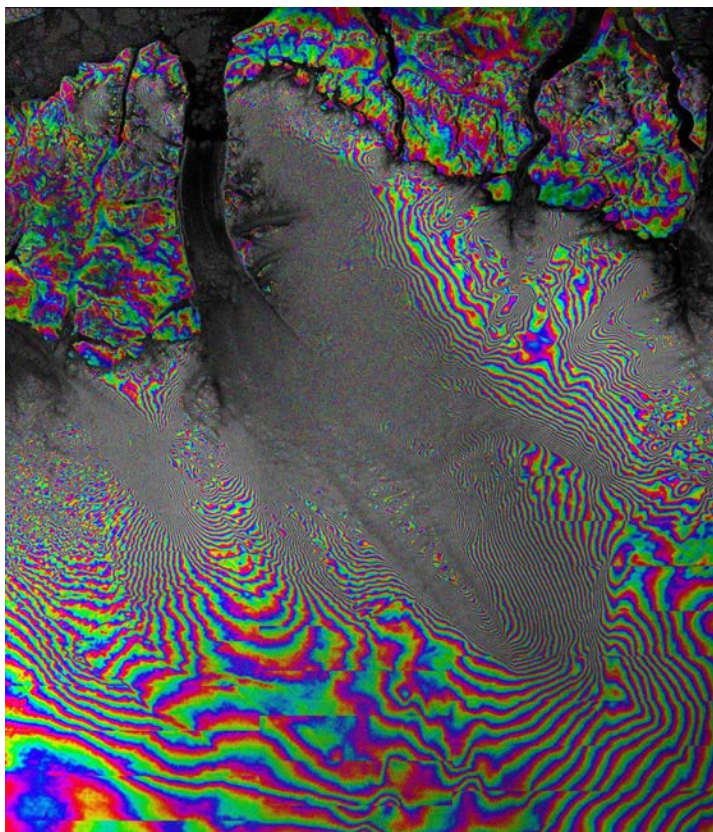
ESA misija *Sentinel 1* interferometrinei žvalgos (IW) juostai sudaryti naudoja TOPSAR stebėjimo būdą (2.5.15. pav.). IW juosta yra 250 km pločio, o skiriamoji geba 5 x 20 m. Interferometrinę žvalgos juostą sudaro trys mažesnės žvalgos juostos, kurios gaunamos naudojant TOPSAR. TOPSAR stebėjimo technika remiasi tuo, kad sistema elektroniniu būdu perjungama iš stebėjimo į priekį į stebėjimo atgal režimą ir tas pats taškas užfiksuojamas kelis kartus (2.5.15. pav.).

Sentinel 1 misijoje TOPSAR skenavimo būdas pakeitė tradicinį ScanSAR skenavimo būdą, tačiau išlaikė tokį pat žvalgos juostos plotį ir skiriamąją gebą bei užtikrino vienodą viso aprėpiamo ploto vaizdo kokybę. Pateikiami interferometriniai SLC duomenų rinkiniai turi po vieną vaizdą kiekvienai TOPSAR skenavimo juostai bei po vieną vaizdą kiekvienai poliarizacijai. Jei naudojama tik viena poliarizacija, duomenų rinkinį sudaro 3 vaizdai, jei naudojama dviguba poliarizacija, – 6 vaizdai. Kiekvienoje TOPSAR žvalgos juostoje skirtingų signalo pulsų informacija atskiriama juoda juoste.

2.5.15. pav. TOPSAR skenavimo principas naudojant vieną signalo bangos poliarizaciją. Duomenų rinkinį sudaro 3 matavimai (šviesiai pilkos juostos grafike), tamsiai pilkos teritorijos žymi signalo aprėptį, mėlyna spalva – SAR jutiklio stebėjimo kampą, V_s – palydovo judėjimo kryptį (pagal De Zan ir Guarnieri, 2006).



2.5.16. pav. SAR interferograma, rodanti paviršiaus pokyčius Petermano ledyne Grenlandijoje (ESA/MDA, 2014). Interferogramos raštą sudaro eilė juostelių, o viena vaivorykštės spalvų juostelė parodo maždaug 2,5 cm paviršiaus pokytį. Kuo tankesnės juostelės, tuo didesni paviršiaus pokyčiai yra įvykę tarp skirtingų palydovų skrydžių.



Radaro interferometrija gerai tinka įvertinti Žemės paviršiaus pokyčius dideliame erdviškai vienalyčiame plote, pavyzdžiui, viso ledyno paviršiaus slinkimą šlaitu žemyn. Medžių augimą miške įvertinti sunku, nes miško lajos paviršius nėra vienalytis. 2.5.16. pav. parodyta, kaip naudojant SAR interferometriją užfiksuotas Petermano ledyno Grenlandijoje slinkimas. Interferograma sudaryta naudojant du *Radarsat 2* TOPS (angl. Terrain Observation by Progressive Scans) vaizdus, gautus 24 dienų intervalais. Vaizde matyti, kad kai kurios ledyno vietos išliko stabilios, o kitur vyko spartūs pokyčiai. Ten, kur neįvyko jokių pokyčių, interferogramos juostelės plačios, o centrinėje ledyno dalyje bei vandens pakrantėje juostelės sutankėja, netgi susilieja, – ten ledas slinko daug greičiau ir pokyčiai didesni (2.5.16. pav.).

2.5.11. Žemės paviršiaus pokyčių aptikimas naudojant SAR

Žemės paviršiaus pokyčių nustatymas yra viena dažniausių nuotolinių tyrimų taikymo krypčių. Pats elementariausias pokyčių nustatymų būdas yra vizualus vaizdų palyginimas. GIS ar kitose vizualizavimo sistemose galima atsidaryti kelis vaizdus ir naudoti automatinį pelės žymeklio sekimą, kuris leidžia iš karto sužinoti to paties pikselio reikšmes skirtinguose vaizduose. Tai paprastas ir greitas būdas aptikti pokyčius Žemės paviršiuje, šis principas taikomas kai kuriose internetinėse platformose, kur pateikiami palydoviniai duomenys.

Norint nustatyti Žemės paviršiaus pokyčius didelėse teritorijose arba tai darant operatyviai, naudojami automatinio aptikimo algoritmai. Algoritmai priklauso nuo SAR jutiklio ir taikymo srities, bet visus juos galima susiskirstyti į du tipus: kontroliuojamuosius ir nekontroliuojamuosius. Nekontrliuojamojo klasifikavimo atveju, siekiant nustatyti paviršiaus pokyčius lyginami tos pačios SAR stebėjimo geometrijos, tačiau skirtingu metu gauti vaizdai. Priklausomai nuo pasirinktos ribinės reikšmės visi pikseliai suskirstomi į pasikeitusius ir nepasikeitusius. Nekontrliuojamojo klasifikavimo algoritmams nereikia pirminių kontrolinių

duomenų, o paviršiaus pokyčiai yra aprašomi signalo pokyčių modeliais. Nekontroliojamas klasifikavimas dažnai naudojamas ekstremalioms situacijoms stebėti, nes nėra žinoma, kada ir kur įvyks pokyčiai.

Kontroliuojamojo klasifikavimo atveju pasirenkami keli jau suklasifikuoti atvejai, skirti algoritmo apmokymui. Paviršiaus pokyčių įtaka radaro signalui yra išmokstama iš pirminių kontrolinių duomenų ir šio ryšio nereikia aprašyti sudėtingomis lygtimis. Tačiau kontroliuojamojo klasifikavimo efektyvumas labai priklauso nuo apmokymui pasirinktų duomenų. Kartais tokius duomenis sunku rasti ir juose taip pat gali būti klaidų.

SAR jutiklių panaudojimo paviršiaus pokyčiams nustatyti metodus galima suskirstyti pagal naudojamų duomenų tipą: metodai, paremti signalo amplitude, fazės, arba koherencijos, metodai ir poliarimetriniai metodai.

Metodai, paremti amplitude, remiasi SAR atgalinės sklaidos koeficiento duomenimis ir nenaudoja informacijos apie signalo fazę ar poliarizaciją. Amplitudės metodų privalumas tas, kad galima maksimaliai išnaudoti surinktus SAR duomenis. Informacija apie amplitudę yra prieinama kiekviename SAR duomenų rinkinyje. Atlikus geometrinę ir radiometrinę korekciją amplitudės duomenis galima sujungti į vieną laiko eilutę nepriklausomai nuo SAR stebėjimo kampo. Šių metodų trūkumas tas, kad dėl mažesnio jautrumo šie duomenys gali nustatyti Žemės paviršiaus pokyčius net ir tada, kai jų iš tikrųjų nėra (arba atvirkščiai).

Fazės, arba koherencijos, metodai remiasi principu, kad pasikeitus Žemės paviršiui sumažėja vaizdo interferometrinė koherencija, todėl naudojant tam tikras ribines koherencijos reikšmes galima automatiškai aptikti pokyčius. Bangų koherencija paremti metodai yra labai jautrūs paviršiaus pokyčiams ir tai yra jų pagrindinis privalumas ir trūkumas. Dėl didelio jautrumo sumažėja atvejų, kai neteisingai nustatomas pasikeitimas. Tačiau didelis jautrumas lemia ir tai, kad pokyčiai fiksuojami net ir tada, kai jų nėra. Labai sumažinti netikslių pokyčių atvejų galima naudojant papildomus statistinius ir kitokius metodus, tačiau tai apsunkina duomenų apdorojimą. Norint panaudoti šiuos metodus, skirtingų SAR stebėjimo geometrija turi būti tokia pati (koherentiška), o tai sumažina analizei tinkamų SAR vaizdų skaičių.

Poliarimetriniai metodai. Naudojant skirtingą poliarizaciją, Žemės paviršiaus pokyčius galima aptikti taikant informaciją apie skirtingo tipo signalo sklaidą (t. y. pokyčius, susijusius su dvigubu atspindžiu, paviršiaus šiurkštumo reikšmėmis ar išsklaidymu tūryje). Pokyčiai, susiję su signalo išsklaidymu tūryje, yra ypač aktualūs, nes parodo, ar nustatyti pokyčiai susiję su augalija, ar su Žemės paviršiumi. Poliarimetrinių metodų trūkumas tas, kad informaciją apie poliarizaciją teikia ne visos SAR misijos. Be to, apdoroti poliarimetrinius duomenis sudėtinga ir reikia daug žinių.

Siekiant optimaliai nustatyti Žemės paviršiaus pokyčius svarbu tinkamai parinkti ne tik metodą, bet ir jutiklį. Priklausomai nuo tiriamo regiono paviršiaus savybių ir apaugimo augalija reikėtų rinktis atitinkamo bangos ilgio SAR duomenis. Atviriems paviršiams geriau tinka trumpesnės bangos, nes tokių bangų atgalinės sklaidos koeficientas yra jautrus paviršiaus šiurkštumo pokyčiams.

2.5.12. Radaro panaudojimas altimetrijoje

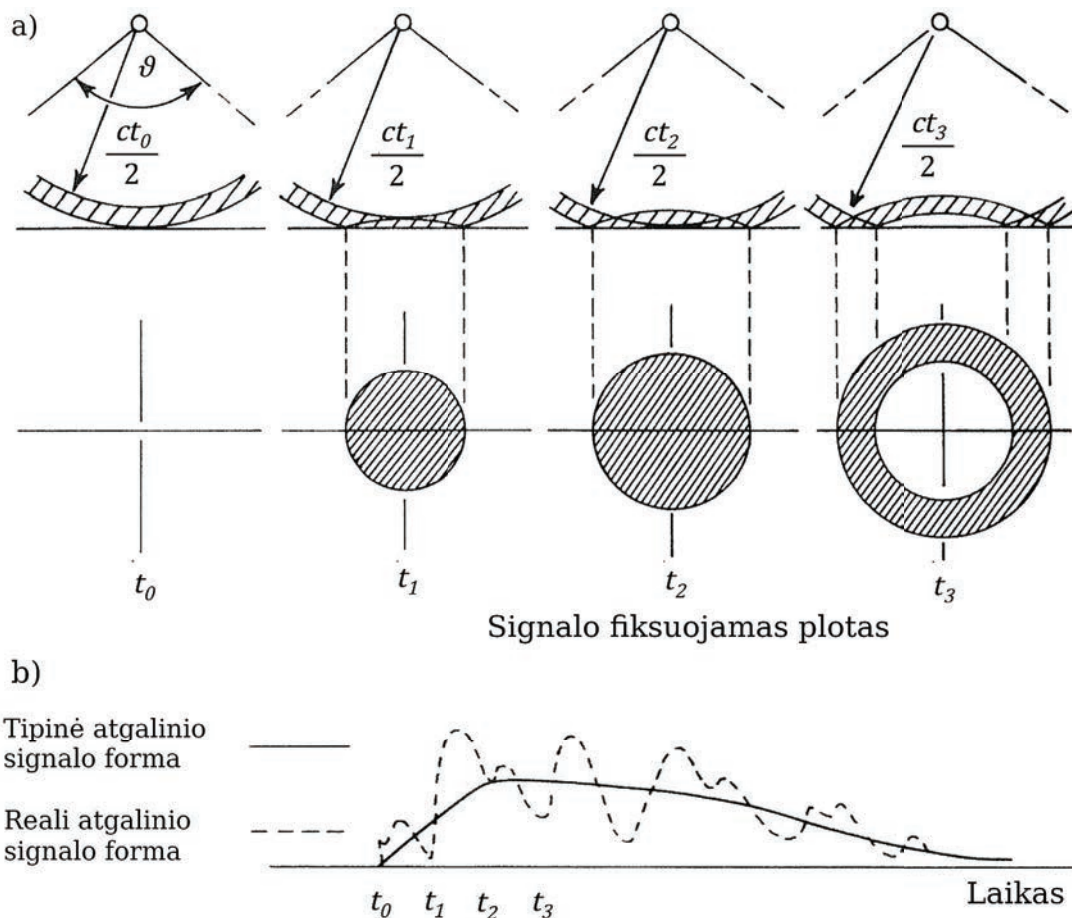
Sintetinės apertūros radarai (SAR) yra jutikliai tam tikru kampu iš šono žvalgantys paviršių, o duomenis surenka iš plačios žvalgos juostos. Tačiau yra ir kitokių radarų – nukreiptų tiesiai žemyn ir matuojančių tikslų atstumą tarp Žemės paviršiaus ir jutiklio. Šie jutikliai vadinami altimetrais ir juos naudojant gaunamas ne vaizdas, bet taškiniai duomenys. Sujungus šiuos duomenis galima gauti erdvinę informaciją apie vandenynų, ežerų, ledo skydų, sausumos paviršius. Šie duomenys plačiai naudojami geomoksluose, vandentvarkoje bei vandenynų stebėjimams.

Radarų altimetrijos principas labai paprastas: radaro antena siunčia mikrobangų signalą žemyn ir matuoja laiką, per kurį nuo Žemės paviršiaus atspindėtas signalas sugrįžta atgal. Išmatuotas laikas yra padauginamas iš šviesos greičio ir gaunamas atstumas nuo antenos iki paviršiaus. Jei antenos padėtis yra tiksliai žinoma, Žemės paviršiaus aukštis gali būti nustatytas labai tiksliai. Nors matavimo principas yra labai paprastas, tačiau yra keletas iššūkių, kurie apsunkina radarų-altimetrų kūrimą ir panaudojimą. Pavyzdžiui, radaro bangos keliaudamos per atmosferą gali būti pristabdomos vandens garų ir atmosferos jonizacijos, todėl į tai reikia atsižvelgti ir įvesti greičio korekcijas. Radarų altimetrijoje labai svarbu tikslai sekti ir žinoti palydovo aukštį bei kitus orbitos parametrus. Palydovų orbitos parametrai nėra pastovūs ir kinta dėl atmosferos trinties bei Žemės traukos poveikio. Palydovo orbitos parametrų pokyčiai gali būti sekami naudojant Doplerio reiškinį, GPS signalą arba sekimą lazeriu. Taip pat svarbu, kaip dažnai pasikartoja palydovo orbita, nes tai lemia, kaip dažnai galima užfiksuoti tą pačią vietovę. Norint dažniau gauti informaciją ir aprėpti visą Žemę naudojami kelių palydovinių altimetrų (pvz.: *Envisat*, *Topex / Poseidon*, *Jason 1*) duomenys.

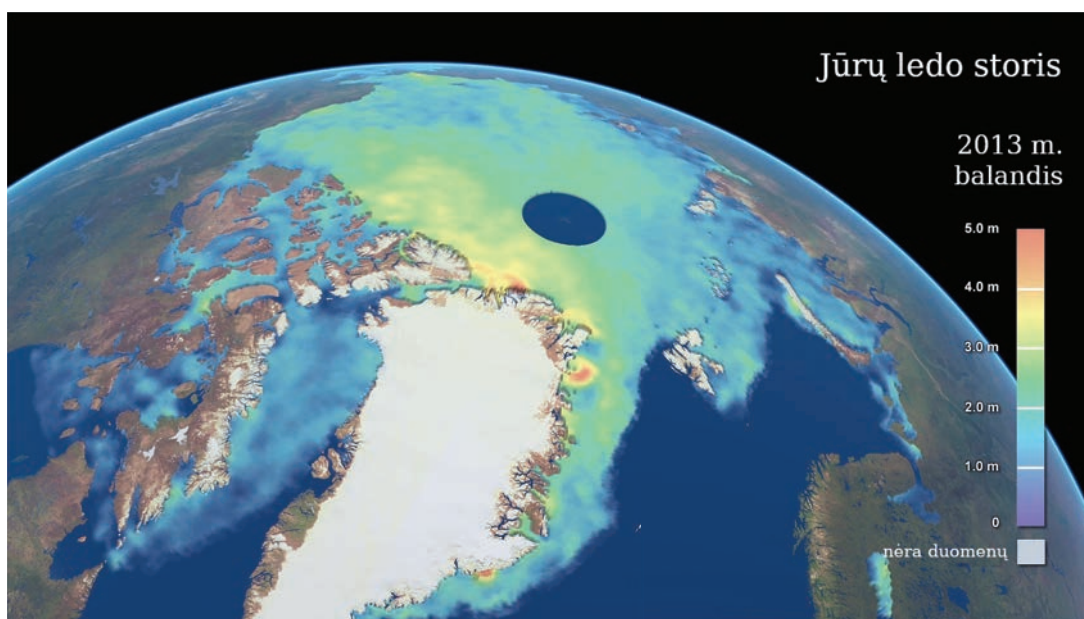
Daugeliu atveju Žemės paviršiaus altimetrijai reikalingas centimetrų tikslumas. Norint pasiekti tokį tikslumą siunčiamas radaro impulsas turi būti labai trumpas, vos kelios nanosekundės. Tokiam signalui generuoti reikia labai didelių energijos išteklių, kurių neįmanoma pasiekti nuotolinio stebėjimo sistemose. Siekiant išvengti šios problemos altimetrai naudoja papildomus signalo apdorojimo būdus, kurie leidžia suspausti bei moduluoti signalą. Radaro altimetrijai gali būti naudojamos įvairaus dažnio bangos (Ku, X, C, S juostos).

Signalas keliaudamas nuo antenos paviršiaus link išsiskleidžia į kūgį ir ant Žemės paviršiaus dažniausiai apima 3–10 km pločio apskritimą. Jei stebimas paviršius yra plokščias ir lygus, puikiai tinka siauresnę teritoriją aprėpiantis signalas, tačiau jei stebimas šiurkštus paviršius (pvz., labai banguota jūra), norint gauti tikslesnį aukštį naudojamas didesnio skersmens signalas (pvz., 10 km). Į anteną sugrįžtančio atspindžio bangos forma priklauso nuo daugybės atskirų paviršiaus sklaidos židinių visoje stebimoje teritorijoje. Paviršiui šiurkštėjant darosi vis sunkiau nustatyti konkretų stebimos vietovės aukštį. 2.5.17. pav. pateikta schema, kaip skirtingais laiko žingsniais keičiasi altimetro fiksuojamas paviršiaus plotas ir grįžtančio atspindžio bangos forma, kai stebimas paviršius yra plokščias ir vienalytis. 2.5.17. paveikslo a dalyje laiko žingsnyje t_0 signalas dar nepasiekė paviršiaus, todėl nėra atgalinio signalo (tačiau jutiklis gali fiksuoti tam tikrą triukšmą dėl paties prietaiso veikimo ir jonizacijos atmosferoje). Laiko momentu t_1 paviršių pasiekia tik centrinė signalo kūgio dalis, pradeda formuotis atgalinis signalas, kuris vis stiprėja. t_2 laiko momentu signalas pasiekia didelį paviršiaus plotą, o altimetrai esant tiesiai virš stebimos teritorijos susidaro labai stiprus atgalinis signalas. t_3 laiko momentu signalas pradeda grįžti jutiklio link ir tik išorinė siunčiamo signalo kūgio dalis dar fiksuoja stebimą paviršių, atgalinis signalas ima silpnėti (2.5.17. pav. a). Tokia signalo kaita laike sukuria tipinę į radarų-altimetrą grįžtančio signalo formą: pradžioje signalas sparčiai stiprėja, vėliau pasiekia maksimumą ir tada pamažu silpnėja (2.5.17. pav. b). Jei paviršius yra nevienalytis ir kinta jo šiurkštumas, į altimetrą grįžtančio atspindžio bangos forma pasižymi triukšmu, signalas stiprėja (t_1) ir silpnėja (t_3) lėčiau, o signalo maksimumas (t_2) nėra aiškiai išreikštas. Tiksliausi radarų altimetrijos stebėjimai yra virš vandenyno, nes jo paviršius homogeniškas ir pasižymi tomis pačiomis fizinėmis savybėmis.

Radarai-altimetrai palydovuose naudojami nuo 10-ojo XX a. dešimtmečio. Altimetrai buvo naudojami ERS-1, ERS-2, *Envisat* misijose, vandenynams stebėti skirtose *Topex / Poseidon* (1992–2005 m.), *Jason 1* (2001–2013 m.), *OSTM / Jason 2* (2008–2019 m.) misijose ir kitur. 2010 m. ESA paleido palydovą *Cryosat 2*, kurio altimetro jutiklis pirmiausia buvo skirtas ilgalaikiams ir sezoniniams jūros ledo, sausumos ledynų ir ledo skydų pokyčiams fiksuoti (2.5.18. pav.).



2.5.17. pav. Altimetro siunčiamo ir gaunamo signalo schema: a) siunčiamo ϑ pločio signalo fiksuojamas plotas skirtingu laiko momentu t_0-t_3 , c – šviesos greitis, pilki apskritimai žymi, iš kokio paviršiaus ploto gaunamas atgalinis signalas; b) į anteną grįžtančio atspindžio bangos forma t_0-t_3 , laiko momentais (pagal Rapley ir kt., 1983).



2.5.18. pav. 2013 m. balandžio mėn. jūros ledo storio žemėlapis, sudarytas naudojant Cryosat 2 altimetro duomenis (pagal Planetary Visions/CPOM/UCL/ESA).

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kodėl radaro stebėjimai atliekami nuožulniai, o ne statmenai paviršiui?
- Kas lemia radaro skiriamąją gebą ir kuo SAR jutikliai pranašesni už optinius?
- Išvardykite tris dažniausiai pasitaikančių SAR vaizdo iškraipymų tipus.
- Kokie yra pagrindiniai C ir L juostos SAR jutiklių panašumai ir skirtumai?
- Kokie radaro signalo sklaidos tipai dažniausiai fiksuojami natūraliame kraštovaizdyje?
- Kokiams tikslams naudojama SAR interferometrija, o kam altimetrija?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Buades, A., Coll, B., Morel, J. M. (2005). A non-local algorithm for image denoising. *Proceedings 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 2, 62, 60-65.
- Bamler, R., Eineder, M. (1996). ScanSAR processing using standard high precision SAR algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 1, 212-218.
- Chen, S., Hou, J., Zhang, H., Da, B. (2014). De-speckling method based on non-local means and coefficient variation of SAR image. *Electronics Letters*, 50, 18, 1314-1316.
- Cumming, I. G., Wong, F. H. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. Norwood, MA, Artech House.
- De Zan, F., Monti Guarnieri, A. (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 9, p. 2352-2360.
- Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E. (2019). *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. USA: NASA.
- Foucher, S., Boucher, J. M., Bénié, G. B. (2003). Wavelet filtering of correlated speckle. *Visual Information Processing XII*, 5108, 307-316.
- Frost, V. S., Stiles, J. A., Shanmugan, K. S., Holtzman, J. C. (1982). A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2, 157-166.
- Fu, L.-L., Holt, B. (1982). *Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar*. California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.
- Younis, M., Fischer, C., Wiesbeck, W. (2003). Digital beamforming in SAR systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 7, 1735-1739.
- Lee, J.-S. (1980). Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2, p. 165-168.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation. (7th Edition)*. USA: Wiley.
- Lopes, A., Touzi, R., Nezry, E. (1990). Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 6, 992-1000.
- Martino, G. D., Simone, A. D., Iodice, A., Riccio, D., Ruello, G. (2015). Non-local means SAR despeckling based on scattering. *Proceedings 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3172-3174.
- Martino, G. D., Simone, A. D., Iodice, A., Riccio, D. (2016). Scattering-based nonlocal means SAR despeckling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54, 6, 3574-3588.
- Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O. (1999). Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 5, 2198-2214.
- Planetary Visions/CPOM/UCL/ESA (2013). *Arctic Sea-Ice Thickness* [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga internete: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Search?SearchText=arctic+2013&result_type=images

- Rapley, C.G., Griffiths, H., Squire, V.A., Lefebvre, M., Birks, A.R., Brenner, A., Brossier, C., Clifford, L.D., Cooper, A.P.R., Cowan, A.M., Drewry, D.J., Gorman, M.R., Huckle, H.E., Lamb, P.A., Martin, T.V., McIntyre, N.F., Milne, K., Novotny, E., Peckham, G.E., Schogounn, C., Scott, R.F., Thomas, R.H., Vesecky, J.F. (1983). A study of satellite radar altimeter operation over ice-covered surfaces. ESA contract no. 5182/82/f/CG(SC). ESTEC, Noordwijk, Holland.
- Tilling R. L., Ridout A., Shepherd A. (2018). Estimating Arctic sea ice thickness and volume using Cryo-Sat-2 radar altimeter data. *Advances in Space Research*, 62, 6, 1203-1225.
- Quegan, S., Yu, J. J., (2001). Filtering of multichannel SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 11, 2373-2379.
- De Zan, F., Guarnieri, A. M. (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 9, 2352-2360.

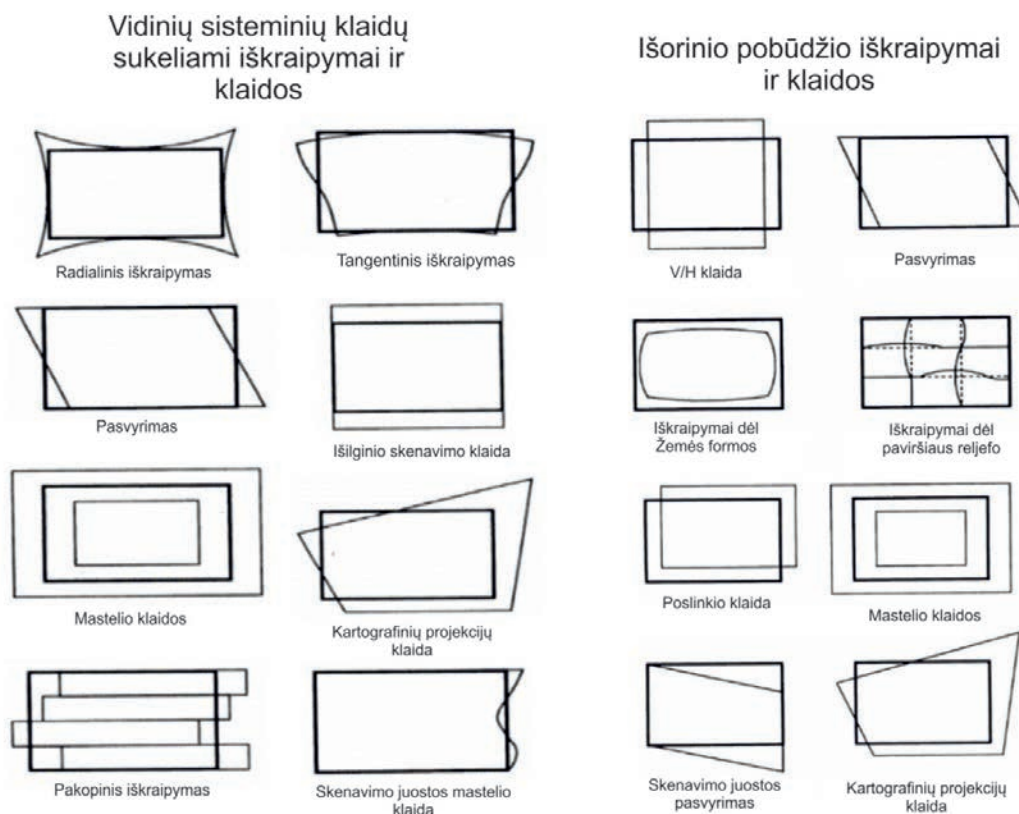
2.6. OPTINIŲ DAUGIASPEKTRIŲ PALYDOVINIŲ DUOMENŲ PIRMINIS APDOROJIMAS IR PARUOŠIMAS

Skaitmeniniai palydoviniai vaizdai įprastai yra sudaryti iš vaizdo matricos elementų – pikselių, esančių tam tikroje matricos eilutės bei stulpelio sankirtoje, o jų reikšmės priklauso nuo pasirinktos spektro juostos. Žemos pikselių reikšmės rodo mažą užfiksuotą elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumą konkrečioje vaizdo spektro juostoje, o aukštos – didelį intensyvumą. Vis dėlto pirminiuose – neapdorotuose – palydoviniuose vaizduose paprastai pasitaiko įvairaus pobūdžio iškraipymų ir klaidų, todėl jie duomenų analizei nėra tinkami. Minimimi iškraipymai ir klaidos gali būti sukeliama įvairių faktorių (pavyzdžiui, jutiklio aukščio ir greičio variacijų, Žemės sukimosi apie savo ašį ir jos formos, paviršiaus reljefo ypatumų ir kt.), todėl būtinas palydovinių vaizdų paruošimas bei jų pirminis apdorojimas.

Spektrinių palydovinių vaizdo duomenų paruošimas tolimesniam naudojimui – geometrinė korekcija ir radiometrinė kalibracija. Šie pirminio duomenų apdorojimo etapai būtini palydovinių vaizdų triukšmui eliminuoti, normalizuoti ir vaizdų taisyklingai geometrijai atstatyti.

2.6.1. Duomenų geometrinių klaidų pobūdis

Dalis netikslumų ir iškraipymų palydoviniuose vaizduose atsiranda dėl sisteminių palydovinių technologijų ir jutiklių klaidų, jų technologinių ypatumų. Tokios klaidos priskiriamos sisteminių grupei ir dažniausiai gali būti nuspėjamos, identifikuojamos bei ištaisomos. Kita grupė – tai nesisteminės klaidos, arba iškraipymai, kuriuos lemia stebimo ir fiksuojamo objekto savybės, padėtis ir dinamika (2.6.1. pav.).



2.6.1. pav. Vidinių sisteminių ir išorinių geometrinių vaizdo duomenų iškraipymų pobūdis (pagal Dave ir kt., 2015).

Sistemines klaidas sukelia skenavimo nuokrypiai, veidrodiniai atspindžiai, jutiklio skriejimo greičio variacijos, panoraminis iškraipymas, palydovo platformos greitis ir Žemės sukimasis apie savo ašį. Sisteminės palydovinių vaizdų duomenų klaidos gali būti ištaisytos išanalizavus sistemos charakteristikas ir efemerides. Efemeridės apima labai tikslius astronominių dangaus objektų padėčių tam tikram laiko momentui duomenis, kurie paprastai pateikiami kaip lentelės arba grafikai.

Nesisteminius palydovinių duomenų iškraipymus dažniausiai sukelia stebimo objekto ypatybės: aukščio, judėjimo greičio, reljefo ar formos ypatumai, padėties ir skirtingų palydovinių platformų orbitų aukščių skirtumas (kai siekiama sugretinti ar analizei naudoti kelių skirtingų palydovų ar jutiklių duomenis). Tokios klaidos koreguojamos naudojant kontrolinius Žemės paviršiaus taškus.

Geometriniai palydovinių vaizdų iškraipymai taip pat skirstomi į vidinius ir išorinius. Vidiniai tapatinami su sisteminėmis klaidomis, kai iškraipymai, sukeliama palydovo jutiklių judėjimo. Išoriniai iškraipymai – su nesisteminėmis klaidomis, nes vaizdo duomenys iškraipomi dėl stebimo objekto savybių (judėjimo, formos, padėties ir pan.). 2.6.1. paveiksle pavaizduoti skirtingo vaizdų iškraipymo efektai ir galimas klaidų pobūdis priklausomai nuo jų priežasties (vidiniai ar išoriniai trikdžiai).

2.6.2. Duomenų geometrinių klaidų korekcija

Aukščiau išvardytų vaizdų geometrinių iškraipymų korekcijai naudojami įvairūs metodai, pagrindinė jų paskirtis yra ištaisyti sistemines – vidines ir nesistemines – išorines klaidas, taip pat palydoviniuose vaizduose atvaizduotiems objektams priskirti geografines koordinatas, tiksliai atitinkančias jų padėtį vietovėje (ant Žemės paviršiaus) neiškraipant atstumų ir objektų formų, kampų tarp jų vaizde.

Skiriami keturi geometrinių korekcijų lygmenys:

- 1) registravimas – vaizdo išdėstymas ir išlygiavimas su kitu tą pačią teritoriją apimančiu vaizdu;
- 2) rektifikavimas (ištaisymas) – geografinis vaizdo orientavimas pagal pasirinktas geografinių koordinačių sistemas ir kartografines projekcijas;
- 3) geokodavimas – specifinis rektifikavimo būdas, apimantis mastelio keitimą į unifikuatą GIS pikselių formatą;
- 4) ortorektifikavimas – vaizdo paviršiaus erdvinių iškraipymų korekcija, taikoma kiekvienam pikseliui paeiliui.

Yra dvi skirtingų koregavimo metodų grupės:

- 1) modeliavimas;
- 2) empirinis koregavimas.

Modeliavimo metodai duomenų korekcijoms taikomi, kai žinomi klaidų šaltiniai, jų pobūdis ir priežastys, sukeliama deformacijų tipas ir dydis. Dažniausiai šie metodai efektyvūs taisant sistemines klaidas, kurias galima nuspėti ir įvertinti. Empirinis palydovinių vaizdų koregavimas apima duomenų korekcijas naudojant kontrolinius Žemės taškus, kurių geografinė pozicija yra tiksliai žinoma. Tokios geokorekcijos dažniausiai vykdomos dviem būdais: vaizdo susiejimo su žemėlapiu (pavyzdžiui, skaitmeniniais apibrėžtų koordinačių sistemų ir kartografinių projekcijų žemėlapiams) ir vaizdo susiejimo su kitu vaizdu. Antrasis atvejis dažnai taikomas, kai norima atlikti skirtingus vaizdų transformavimo, perdangos, matematinius veiksmus.

Vaizdų geometriniams korekcijoms taikomi ir įvairūs matematiniai modeliai, vienas iš tokių pavyzdžių galėtų būti polinominiai modeliai. Jų paskirtis – nustatyti atitikimą tarp neapdoroto (galimai turinčio iškraipymų) vaizdo koordinačių ir kontrolinio – atraminio (naudojamo kaip taisyčių pagrindą) vaizdo ar žemėlapiu su žinoma apibrėžta koordinačių sistema.

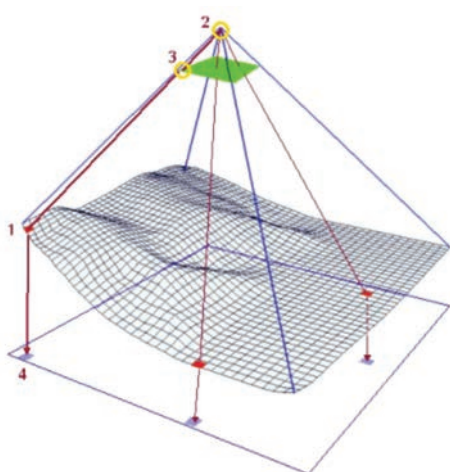
Polinominiai modeliai taikomi, kai norima atlikti koordinačių sistemos pakeitimus ir objektų ar vaizdų erdvinį pertvarkymą. Svarbu, kad polinominės lygtys padeda vaizdus perorientuoti pagal kontrolinius Žemės atskaitos taškus. Polinominiams modeliams dažnai naudojamos dviejų dimensijų lygtis, jų pavyzdys pateikiamas apačioje:

$$X = a + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (2.6.1.)$$

$$Y = b + b_1x + b_2y + b_3xy \quad (2.6.2.)$$

kur x, y – taško koordinatės; $a_{1,2,3}$ ir $b_{1,2,3}$ – polinominių lygčių koeficientai.

Kai palydovo jutiklis į stebimą objektą nukreiptas ne nadyro kampu, o vaizde matomi iškraipymai dėl paviršiaus reljefo nelygumų, vaizdai turi būti keičiami naudojant ortorektifikavimo metodą (2.6.2. pav.).

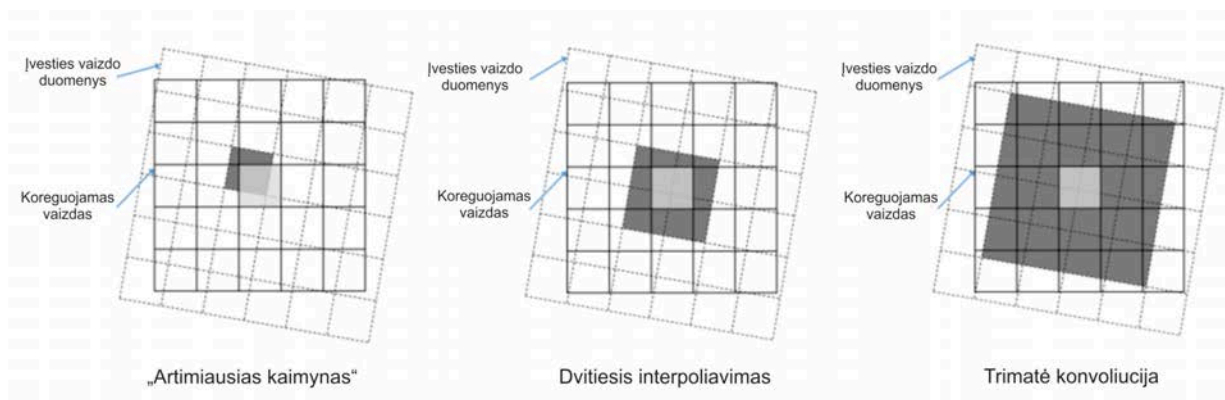


1. Paviršiaus reljefo (DEM) modelio pikselis
2. Išorinės orientacijos parametrai
3. Vaizde pikselio ryškumo reikšmės priskiriamos pagal aplinkinių pikselių perdėstymą
4. Aukštis, išorinės orientacijos parametrai ir pikselių ryškis naudojami vaizdo projektavimui į plokštumą

2.6.2. pav. Palydovinių vaizdų ortorektifikacija, kurios metu pašalinami paviršiaus reljefo nulemti geometriniai vaizdų iškraipymai (pagal Leica Geosystems, 2005).

Norint atlikti ortorektifikavimą būtina žinoti tikslus jutiklio duomenis, detalią informaciją apie jutiklio lokaciją ir orientaciją vaizdo registravimo metu, taip pat rektifikavimui naudojamus paviršiaus aukščio (DEM) modelius. Iš esmės ortorektifikavimas padeda keisti vaizdą ir perkelti jį į plokštumą neiškraipant stebimo ir fiksuojamo objekto formos, kai įsivaizduojama jutiklio pozicija vaizdo generavimo metodu būtų nukreipta į šiaurę ir orientuota tiesiai į objektą. Vis dėlto ortorektifikavimas gali lemti vaizdo pikselių intensyvumo iškraipymus kai kuriose jų dalyse. Šie iškraipymai kyla dėl vaizdo pikselių pertvarkymo į naujas gardeles. Bendrai kalbant, atliekant geometrinius keitimus vaizdai gali būti apkarpomi, perorientuojami, pasukami. Dėl to, kaip paminėta aukščiau, dalis vaizduose pateikiamos teritorijos pikselių gali prarasti juose koduojamą intensyvumo informaciją arba šie duomenys gali būti iškraipomi. Problema sprendžiama vaizdo duomenims taikant pikselių interpoliavimo metodus. Vaizdo pikselių interpoliacija – tai pikselių su klaidingomis ryškio reikšmėmis arba pikselių be jiems priskirtų ryškio reikšmių užpildymas.

Atliekant palydovinių duomenų geografinį orientavimą, kaip jau buvo minėta, taikomos tiesinės (afininės) ir netiesinės (antros, trečios eilės polinominės) koordinačių transformacijos. Vaizdo pikseliai šių transformacijų metu yra perkeliama – perstumiami, todėl būtina nustatyti, kokia kiekvieno pikselio reikšmė. Šis uždavinys sprendžiamas pertvarkant pikselių gardeles. Palydovinių vaizdų pikselių pertvarkymui iš esmės taikomi trijų tipų algoritmai: artimiausio kaimyno, trimatės konvoliucijos ir dvitiesio interpoliavimo (2.6.3. pav.). Trumpas šių metodų esmės aprašymas pateikiamas 2.6.1. lentelėje.



2.6.3. pav. Vaizdo pikselių pertvarkymo metodų principinė veikimo schema

2.6.1. lentelė. Vaizdo pikselių pertvarkymo metodų veikimo principas.

PERTVARKYMO METODŲ TIPAI	APIBŪDINIMAS
Artimiausias kaimynas	Pikslio reikšmė priskiriama pagal įvesties duomenų artimiausio pikslio vertę.
Dvitiesis interpoliavimas	Nauja taško reikšmė apskaičiuojama pagal artimiausių taškų įvesties sluoksnyje 4 (2x2) svertinį vidurkį.
Trimatė konvoliucija	Nauja taško reikšmė apskaičiuojama naudojant svertines 16 (4x4) aplinkinių pikselių reikšmes.

2.6.3. Radiometrinė palydovinių duomenų korekcija

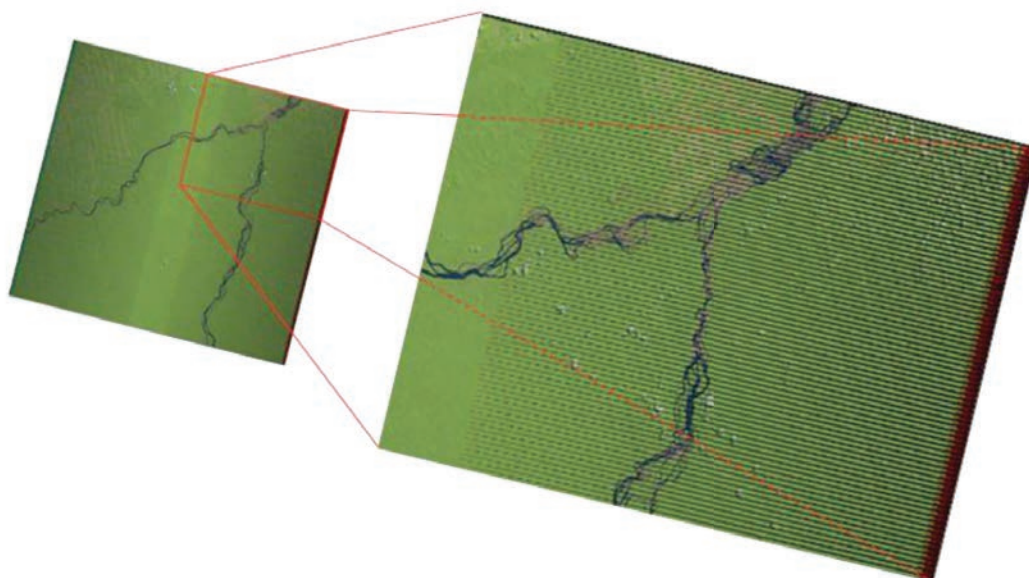
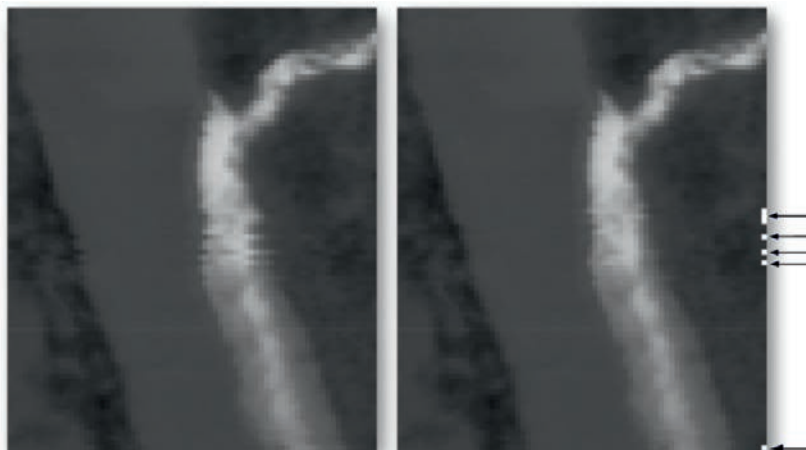
Palydovinių vaizdų paruošimo ir pirminio apdorojimo procedūros taikomos iš esmės visiems neapdorotų duomenų rinkiniams. Šios korekcijos yra būtinos dėl duomenyse atsirandančių netikslumų ir generuojamų triukšmų, kurių šaltinis gali būti tiek įvairūs išoriniai, tiek vidiniai veiksniai. Aukščiau aptarti geometrinių iškreipimų ir klaidų šaltiniai bei priežastys, jų korekcijų mechanizmai, tačiau be jų palydoviniuose vaizduose gali atsirasti įvairaus pobūdžio netikslumų ir triukšmų, susijusių su atmosferos sugertimi, elektromagnetinės spinduliuotės išsklaidymu atmosferoje ir paviršiuje, jutiklio ir „taikinio“ apšvietimo geometrija, jutiklio kalibracija, galų gale – palydovinių vaizdų apdorojimo procedūromis.

Kaip vienas iš dažniausiai palydoviniuose vaizduose pasitaikančių klaidų galima įvardyti skenavimo linijų pradžios ir pabaigos taškų nesutapimą, skenavimo juostų praleidimą ar nebuvimą, juostuotumą ir atsitiktinių klaidingų pikselių vaizde sugeneravimą, atsiradimą. Prieš nagrinėjant atmosferinių – radiometrinių korekcijų ir vaizdo duomenų paruošimo metodų įvairovę, būtina plačiau aptarti įvardytas vaizdų problemas ir jų koregavimo metodus.

Skenavimo linijų pradžios ir pabaigos taškų nesutapimas. Pasitaiko atvejų, kai skenuojamieji jutikliai (skenavimo skersai arba išilgai kelio) registruodami duomenis nesugeba surinkti duomenų skenavimo linijos pradžioje arba pabaigoje. Kai kuriais atvejais skenavimo pradžios ir pabaigos linijų pikseliai nesutampa (pavyzdžiui, visa skenavimo linija yra pasislinkusi pikseliu ar keliais į dešinę arba į kairę) (2.6.4. pav.).

Pateiktame pavyzdyje pavaizduota šiluminės spinduliuotės *Landsat* palydovo spektro juosta, kur 5 vaizdo matricos eilutės – skenavimo juostos pasislinkusios reikšmių stulpelių atžvilgiu.

2.6.4. pav. Skenavimo linijų geometrinės korekcijos pavyzdys. Rodyklės dešinėje rodo, kur buvo atlikti taisymai.



2.6.5. pav. *Landsat 7* ETM+ jutiklio skenavimo juostų iškritimo pavyzdys (USGS, 2020b).

Atsiradusios deformacijos tokiu atveju ne tik iškraipo objektų geometriją, bet ir spektrinę informaciją. Duomenys normalizuojami perstumiant skenavimo juostas vaizdo matricos stulpelių atžvilgiu.

Skenavimo juostų iškritimas. Dėl techninių nesklaidumų ar sugedus palydovo jutikliui kai kuriuose vaizduose atsiranda skenavimo juostos, kurių pikselių reikšmės visose spektro juostose yra lygios 0. Taip nutiko su palydovo *Landsat 7* daugiaspektriu skenuojamuoju jutikliu, kai 2003 m. birželio mėnesį sutriko jo veikimas, o tai lėmė, kad palydovo duomenyse atsirado juodų juostų, kur pikselių reikšmės buvo lygios 0 (2.6.5. pav.).

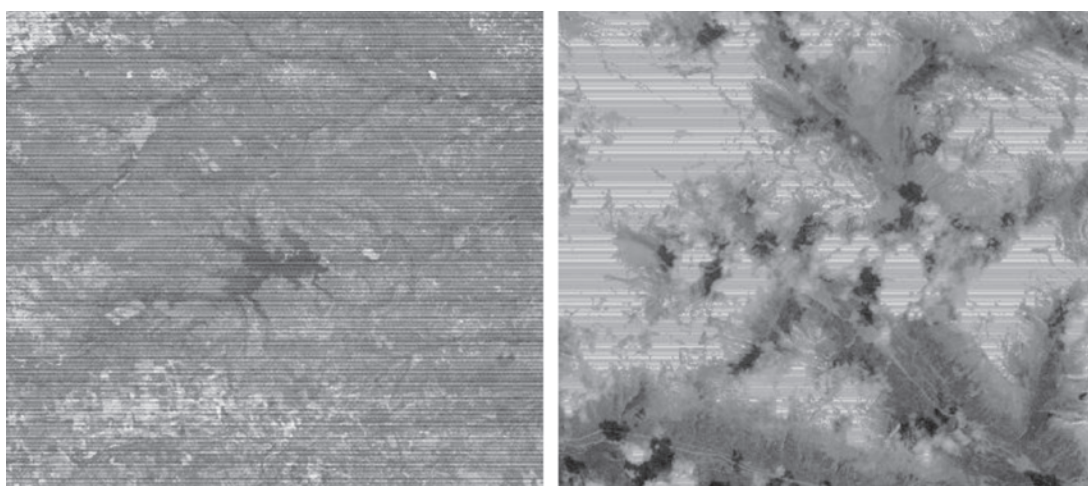
Galimybės atstatyti tokius duomenis nėra, tačiau nesudėtingai įmanoma pagerinti vizualinę duomenų kokybę perskaičiuojant kiekvienos „blogos“ (nepavykusios) skenavimo juostos ryškumo vertes. Tam pirmiausia reikia nustatyti ir vaizde išskirti kiekvieną nepavykusią skenavimo juostą (eilutę). Nesudėtingas slenksčio įvertinimo vaizdo reikšmėse algoritmas leidžia duomenų rinkinyje pažymėti bet kurią skenavimo juostą, kur pikselių reikšmės yra lygios 0. Paprastai tariant, dėl slenksčio algoritmų identifikuojami tamsiausi – 0 reikšmes turintys – vaizdo elementai. Toliau būtina nustatyti greta „tamsiųjų“ zonų esančių skenavimo juostų in-

tensyvumo reikšmes ($BV_{i-l,j,k}$ ir $BV_{i+l,j,k}$) ir paskaičiavus jų vidurkį priskirti jį „tamsiems“ išvesties sluoksnio pikseliams ($BV_{i,j,k}$).

$$BV_{(i,j,k)} = \int \left[\frac{BV_{i-l,j,k}}{BV_{i+l,j,k}} \right] \quad (2.6.3.)$$

Kiekvienas nepavykusios juostos pikselis turi būti apdorotas naudojant šiuos veiksmus (priskiriant artimiausių korektiškas reikšmes turinčių juostų vertes). Korekcijos rezultatas – interpoliuotas rastrinis vaizdas, kur „blogos“ reikšmės pakeistos greta esančių skenavimo juostų vidutinėmis reikšmėmis.

Juostuotumas. Kai palydovo jutiklio detektoriai išsikalibruoja skrydžio metu, generuojamuose duomenyse (vaizdo skenavimo juostose) gali atsirasti persotinimo požymių arba nenatūraliai ryškesnių pikselių juostų (2.6.6. pav.).



2.6.6. pav. Juostuotumas palydovo *Landsat* vaizduose (USGS, 2020a).

Duomenys tokiu atveju nėra prarandami ir gali būti normalizuojami atliekant radiometrinę jų korekciją, kuri išreiškiama:

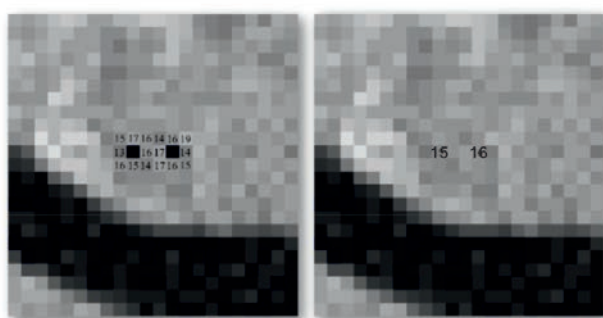
$$Y_{k(i,j)} = (\sigma/\sigma_k) \cdot [X_{k(i,j)} - M_k] + M \quad (2.6.4.)$$

kur $Y_{k(i,j)}$ – išvesties pikselio pilka vertė; $X_{k(i,j)}$ – įvesties pikselio pilka vertė; M – vaizdo pikselių vidurkio reikšmė; M_k – k detektoriaus vidurkio reikšmė; σ – vaizdo standartinis nuokrypis; σ_k – k detektoriaus standartinis nuokrypis.

Atsitiktinių klaidingų pikselių atsiradimas vaizduose siejamas su atsitiktinio taškinio triukšmo pasireiškimu. Tais atvejais, kai vaizde stebima daugybė tokių pikselių, triukšmingumas vadinamas šūvių triukšmu. Įprastai triukšmo paveiktų pikselių gali būti 0 arba 255 skaitmeninės reikšmės 8 bitų vaizdiniame faile ir matomi viename arba keliuose vaizdo spektro juostose (2.6.7. pav.).

Triukšmo paveiktų pikselių korekcijoms taikomas interpoliacijos metodas, kai nustatytiems ir atrinktiems triukšmo paveiktiems pikseliams priskiriama artimiausių vidutinė reikšmė (aštuonių artimiausių) (2.6.7. pav.).

Atmosferos korekcijos. Skirtingais laikotarpiais fiksuojami palydoviniai net ir tos pačios teritorijos vaizdai dažnai yra skirtingi ir sunkiai palyginami. Todėl norint kokybiškai atlikti kraštovaizdžio, atskirų jo komponentų pokyčių analizę, kuriai būtini paviršiaus, objektų atspindžio pokyčių įvairiais laikotarpiais duomenys, būtina taikyti radiometrines korekcijas. Bendrąja prasme galimi du radiometrinių korekcijų taikymo būdai: absoliutūs ir santykinis.



2.6.7. pav. Atsitiktinių klaidingų pikselių korekcija taikant interpoliaciją (pagal Mohan, Anand ir Verma, 2012).

Absoliučiojo būdo ir jo metodų taikymas reikalauja papildomų matavimų *in situ* vaizdų generavimo momentu. Šie duomenys reikalingi atmosferos korekcijoms ir jutiklio kalibracijai atlikti ir paskaičiuoti. Atmosfera bet kuriame vaizdo taške matuojamą spinduliuotę veikia dviem būdais:

- a) slopina (sugeria) spinduliuotę, pasiekiančią Žemės paviršių;
- b) veikia kaip reflektorius, kuris išsklaido, sugeria ir atspindi Saulės spinduliuotę, kartu papildoma išsklaidytos grįžtamosios spinduliuotės kiekį jutiklio registruojamame signale.

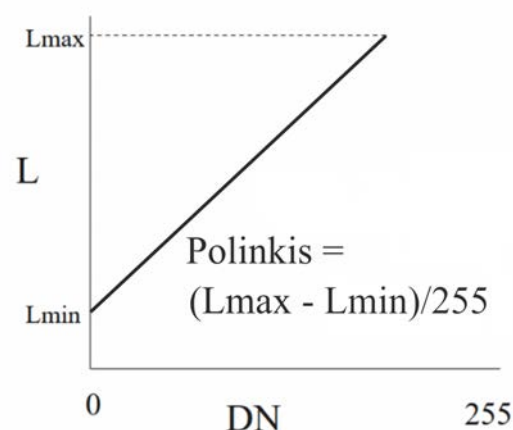
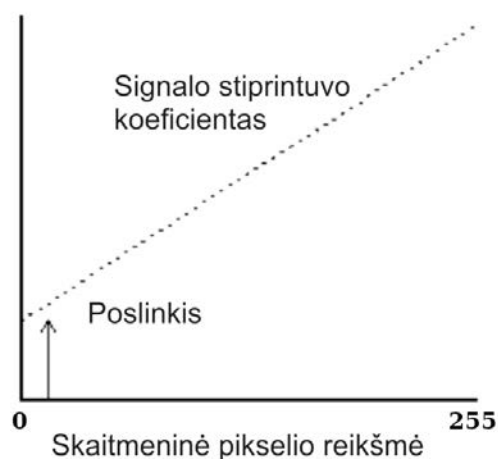
Šį poveikį galima išreikšti formule:

$$L_s = \frac{RE_g T_\theta}{\pi} + L_p \tag{2.6.5.}$$

kur L_s – bendra jutiklio registruojama spektrinė spinduliuotė; R – objekto atspindėta spinduliuotė, E_g – apšvieta ant objekto; T_θ – atmosferos optinis storis; L_p – signalą papildanti išsklaidytoji ir atmosferos skleidžiama spinduliuotė. Lygties skaitiklyje esantys nariai reprezentuoja duomenis apie Žemės paviršiaus atspindį, o papildomi nariai – signalą papildančią išsklaidytą ir atmosferos skleidžiamą spinduliuotę.

Palydovų jutiklių kalibravimas vyksta ir prieš paleidžiant palydovus. Vis dėlto per ilgą laiką jutiklių jautrumas mažėja, todėl periodiškai jutikliai perkalibruojami jau palydovui skriejant savo orbita. Kalibravimui naudojami įvairūs dirbtiniai šviesos šaltiniai, tokie kaip halogeninės lempos, juodojo kūno paviršiai, Saulės šviesa ir pan.

Kitas absoliutinių radiometrinių korekcijų metodas – tai skaitmeninių vaizdo pikselių reikšmių perskaičiavimas į jam tenkančios spinduliuotės vertes. Tokie skaičiavimai naudojami norint palyginti skirtingų jutiklių įvairiais laikotarpiais gautus duomenis. Konversija taip pat svarbi kuriant matematinius modelius, fiziškai susiejančius vaizdo duomenis su kiekybiniais matavimais *in situ* Žemės paviršiuje. Skaitmeninių reikšmių konvertavimui į spinduliuotės intensyvumo vertes reikalingos poslinkio ir signalo stiprintuvo koeficiento reikšmės kiekvienai spektro juostai (2.6.8. pav.). Pati transformacija yra paremta kalibravimo kreivėmis, kurias sudaro palydovinių sistemų operatoriai.



2.6.8. pav. 8 bitų palydovinių vaizdų kalibravimas. 2.6.9. pav. Radiometrinio atsako funkcija.

Stiprintuvo koeficiento dydis nusako kalibravimo gradientą (jautrumą elektromagnetinei spinduliutei) arba kiek sukauptų jutiklio nuskaitymo registre elektronų pavirsime į skaitmeninę reikšmę – ADU (analoginiai į skaitmeninius vienetus), savo ruožtu, poslinkis – spektrinę jutikliui tenkančią spinduliuotę kiekvienai skaitmeninei reikšmei, kai ji lygi 0.

Toliau skaitmeninių reikšmių transformavimas į spinduliuotės intensyvumo reikšmes vykdomas pagal lygtį:

$$L_{\lambda} = Bias + (Gain \times DN) \quad (2.6.6)$$

kur L_{λ} – palydovo jutiklį pasiekianti spektrinė spinduliuotė; $Bias$ – poslinkis; $Gain$ – stiprintuvo koeficientas; DN – skaitmeninė pikselio reikšmė. Poslinkis = $Lmin_{\lambda}$, stiprintuvo koeficientas = $(Lmax_{\lambda} - Lmin_{\lambda}) / 255$ (2.6.9. pav.).

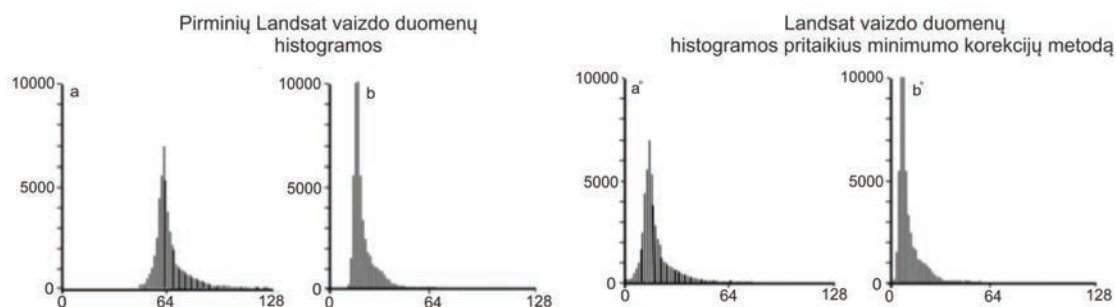
Apibendrinant absoliutinių radiometrinių korekcijų temą derėtų paminėti, kad šių korekcijų kelias yra sunkiai įgyvendinamas ir reikalauja didelių tyrimų bei matavimų apimčių, papildomų duomenų. O santykinis radiometrinių korekcijų būdas, dar žinomas kaip santykinė radiometrinė normalizacija, nereikalauja *in situ* matavimų *in situ*. Čia atliekamas kelių datų vaizdų pikselių intensyvumo normalizavimas – ištaisymas kiekvienai spektro juostai naudojant etaloninį vaizdą, kurį pasirenka pats analitikas.

Tokio normalizavimo proceso rezultatas – vaizdai, t. y. jų pikselių reikšmės yra tokios, lyg jie visi būtų gauti naudojant tą patį jutiklį tokiomis pačiomis atmosferos ir apšvietimo sąlygomis kaip etaloninis vaizdas.

Skirtingi santykinės radiometrinės korekcijos metodai skirti koreguoti duomenis, gautus nevienodais jutikliais skirtingu metu. Kai kuriais atvejais jie taikytini ir atskiriems vaizdams.

Palydovinių vaizdų normalizavimas naudojant histogramų korekcijas grindžiamas žinomų ar numanomo ryškumo objektų, užfiksuotų palydovų optiniais daugiaspektriais jutikliais, spektrinių charakteristikų tikrinimu. Dar kitaip šis metodas vadinamas „atvaizdu paremta atmosferos korekcija“. Atmosferos poveikio vaizdų kokybei normalizavimas atliekamas remiantis pačiame vaizde esančiais įrodymais – pikselių ryškumo charakteristikų nukrypimais ir anomalijomis, jų detekcija, pačių pikselių duomenų aibės normalizavimu. Taikant šį metodą būtina žinoti specifinių vaizde esančių gamtos ar Žemės paviršiaus objektų optines savybes (sugerties ir atspindėjimo charakteristikas skirtingose elektromagnetinių bangų spektro juostose). Viena iš metodo taikymo strategijų susijusi su tamsių objektų vaizduose identifikavimu. Tokie objektai galėtų būti ežerai ar šešėlinės vaizdų vietos, kur pikselių reikšmės artimajame infraraudonajame spektre bus artimos nuliui. Pikselių ryškio minimumą lemia vandens

ir šešėlinių vaizdo vietų optinės savybės (pavyzdžiui, vanduo stipriai sugeria infraraudonojo spektro spinduliuotę), todėl palydovo jutiklis registruoja itin nedidelį jos kiekį. Vis dėlto pirminių duomenų infraraudonojo spektro vaizduose dažnai pasitaiko atveju, kai net ir vandens telkinių paviršių pikselių reikšmės yra > 0 . Darant prielaidą, kad tokios variacijos duomenyse atsiranda dėl atmosferos išsklaidymo ir signalą papildančios grįžtančiosios spinduliuotės, žemiausios skaitmeninės skaitinės pikselių reikšmės visose vaizdo spektrinėse juostose yra nufiltruojamos (identifikuojant jas iš vaizdo pikselių histogramų) ir pakeičiamos į nulį (2.6.10. pav.). Toks histogramų minimumų korekcijų metodas yra sąlygiškai paprastas ir greitai realizuojamas.



2.6.10. pav. Histogramų minimumo metodo taikymas *Landsat* vaizdo pikselių radiometrinei korekcijai ir vaizdų normalizavimui. *a* ir *b* – histogramos prieš korekciją; *a'* ir *b'* – po korekcijos.

Histogramų minimumo metodo privalumas yra tas, kad duomenims normalizuoti nereikalingi papildomi duomenys, be to, histogramas galima naudoti vaizdų analizei, pasinaudojant pikselių pasiskirstymo duomenų aibėje ypatumais. Vis dėlto kai kuriais atvejais šis metodas gali neduoti norimų rezultatų. Dėl atmosferos poveikio kai kurie žemas reikšmes turintys pikseliai gali tapti ryškesni, o didelio intensyvumo pikseliai – tamsesni. Tokiu atveju histogramų minimumo analizė nepadės atlikti tikslios vaizdų normalizacijos.

Žemės paviršiaus pokyčių analizei naudojami daugiaserijiniai istoriniai ir faktiniai įvairių laikotarpių palydoviniai vaizdai. Pačiai pokyčių analizei dažnai naudojamos transformavimo, įvairios perdangos operacijos, tad taikomi du tokių skirtingais laikotarpiais fiksuotų ir galimai tarpusavyje besiskiriančių duomenų radiometrinės korekcijos būdai:

- periodinių duomenų empirinis radiometrinis normalizavimas;
- periodinių duomenų deterministinis radiometrinis normalizavimas.

Empirinis radiometrinis normalizavimas. Tais atvejais, kai atmosferos sąlygos palydovinių vaizdų generavimo metu yra nežinomos ir norima normalizuoti kelių laikotarpių duomenis, būtina sukurti etaloninį – atskaitinį vaizdą. Tam naudojami erdvėje nekintantys atskaitos taškai. Vaizdas toliau normalizuojamas taikant tiesinius modelius, kurie padeda prognozuoti, kokios vaizdo pikselių ryškumo reikšmės būtų, jeigu jis būtų sugeneruotas tokiomis pat sąlygomis kaip atskaitinis – etaloninis vaizdas (įvairiose jo spektro juostose).

Aprastai atliekant palydovinių vaizdų korekciją, regresija taikoma nustatyti kontrastingų spektrinių savybių paviršių ar objektų pikselių intensyvumo išskrypimus.

Kontrastą sudaro ryškūs – didelę skaitmeninę vertę turintys, ir tamsūs – žemų mažų skaitmeninių reikšmių pikseliai. Metodas remiasi geriausiai tinkančios tiesinės kreivės nustatymu kontrastingų spektrinių savybių pikselių aibėms. Laikoma, kad šios pikselių aibės, pagal joms būdingas atspindėtos šviesos kiekio reikšmes, atitinka skirtingo pobūdžio dangas. Regresinės kreivės tam tikroje vietoje turi susikirsti. Kreivių susikirtimo taškas žymi nulinio Žemės at-

spindžio tašką, kuriame spektriniu požiūriu skirtingų objektų radiometrinės vertės yra lygios. Susikirtimo vietos taškų koordinatės žymi reikalingų radiometrinių korekcijų vertes skirtinguose vaizdo spektriniuose spektro ruožuose juostose (2.6.11. pav.).

Priešingai nei empiriniams metodams, periodinių duomenų deterministiniam radiometriniui normalizavimui reikia papildomų įvesties duomenų. Taikant šį metodą, būtina žinoti Saulės zenito kampą, atstumą tarp Žemės ir Saulės, normalizuojamo ir atskaitinių vaizdų pikselių ryškumo parametrus ir kitus kintamuosius. Iš esmės deterministinis radiometrinis normalizavimas apima kelis nuoseklius etapus, kurių metu įvertinami ir paskaičiuojami normalizavimo lygties nariai:

$$BV_{norm} = BV_{ref} + C / M \tag{2.6.7.}$$

kur BV_{norm} – normalizuojamo vaizdo ryškumo reikšmė; BV_{ref} – atskaitinio – etaloninio vaizdo ryškumo reikšmė; C – papildančioji korekcija (apskaičiuojama pagal 2.6.9. formulę); M – daugybinė korekcija (apskaičiuojama pagal 2.6.8. formulę).

$$M = \frac{\cos\theta_{oref} \left(\frac{1}{(ES_{ref}^2 A_{ref})} \right)}{\cos\theta_{onorm} \left(\frac{1}{(ES_{ref}^2 A_{norm})} \right)} \tag{2.6.8.}$$

$$C = D_{ref} - (D_{norm}) (M) \tag{2.6.9.}$$

kur D – tamsiausio normalizacijos objekto / pikselio ryškumo reikšmė; $1/A$ – elektromagnetinės spinduliuotės intervalas tarp paeiliui einančių BV , gaunamas iš metaduomenų; θ_o – Saulės zenito kampas; ES_{ref} – atstumas tarp Žemės ir Saulės; A_{norm} – normalizuojamas vaizdas; A_{Ref} – atskaitinis – etaloninis vaizdas.

2.6.11. pav. Nulinio Žemės atspindžio taško taikant tiesinę duomenų analizę grafiko pavyzdys Landsat 7 TM duomenims (pagal Crippen, 1987).



Saulės pakilimo kampo korekcija. Palydoviniuose vaizduose, gautuose skirtingu metu (pavyzdžiui, skirtingais metais ar mėnesiais), atliekamos Saulės kampo ir atstumo iki Žemės korekcijos. Vaizdai normalizuojami laikantis prielaidos, kad skenavimo metu Saulė buvo zenite virš Žemės paviršiaus. Ši korekcija atliekama dalijant Saulės pakilimo kampo kosinusą iš jutiklio zenito kiekvienam vaizdo pikseliui. Reikia paminėti, jog kad tokios korekcijos neatsižvelgia neapima į atmosferos ir topografinių sąlygų efektų vaizduose.

Atstumo tarp Žemės ir Saulės korekcija. Siekiant palydoviniuose vaizduose suvienodinti sezoninius atstumo tarp Žemės ir Saulės pokyčius, kurie veikia Žemę pasiekiančios elektro-

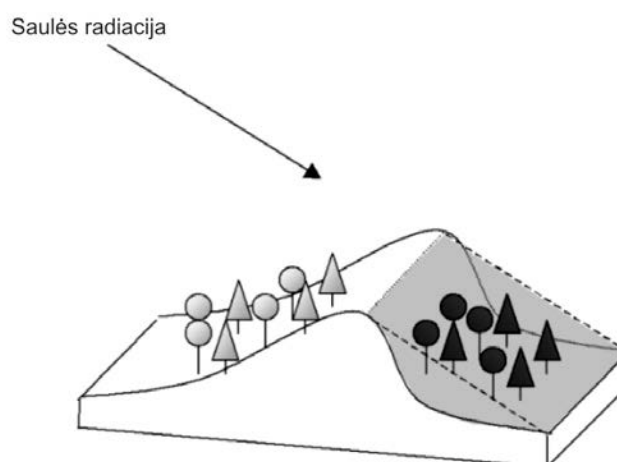
magnetinės spinduliuotės kiekį, perskaičiuojama Saulės apšvieta. Žemės atstumas nuo Saulės paprastai išreiškiamas astronominiais vienetais, vienas astronominis vienetas yra lygus $149,6 \times 10^6$ km. Tokios korekcijos būtinos, nes saulės apšvieta mažėja didėjant Žemės atstumui nuo Saulės. Saulės apšvieta yra atvirkščiai proporcinga paviršiaus atstumo iki Saulės kvadratui:

$$E = \frac{E_0 \cos \theta_0}{d^2} \quad (2.6.10.)$$

kur E – normalizuota Saulės apšvieta; E_0 – Saulės apšvieta esant vidutiniam atstumui tarp Žemės ir Saulės; θ_0 – Saulės kampas nuo jutiklio zenito; d – atstumas tarp Žemės ir Saulės astronominiais vienetais.

Topografinės (paviršiaus reljefo įtakos) korekcijos. Topografinės Žemės paviršiaus reljefo sąlygos (šlaitų statumas, ekspozicija, aukštis) gali turėti įtakos palydovinių duomenų kokybei. Tai pasireiškia kaip vaizdų pikselių ryškumo variacijos. Ypač kalnuotose vietovėse paviršiaus reljefo ypatumai, jo morfometrinių parametrų lemia šešėlių – mažesnio intensyvumo reikšmių pikselių – atsiradimą, dažniausiai kalnų šlaitų zonose. Prie duomenų ryškumo nukrypimų vaizdo gavimo momentu taip pat prisideda ir Saulės pakilimo virš horizonto kampas. Nuo saulės kampo priklauso elektromagnetinės spinduliuotės kiekis ir jos pasiskirstymas Žemės paviršiuje, taip pat vaizdo pikselio ryškumas ir atspindžio reikšmės jame (2.6.12. pav.).

2.6.12. pav. Topografinių sąlygų įtaka palydoviniams duomenims (pagal Riano ir kt., 2003).

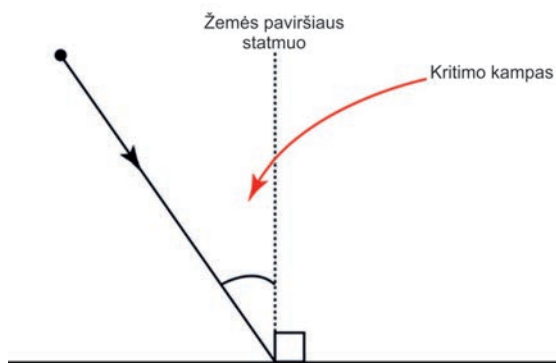


Teritorijose, esančiose šiaurinės ekspozicijos šlaituose (Šiaurės pusrutulyje), saulės kampui esant $< 90^\circ$, dėl gaunamo elektromagnetinės spinduliuotės kiekio netolygumo būdingos atspindžio reikšmės yra mažesnės negu pietinės ekspozicijos šlaitų. Tokie skirtumai lyginant augmenijos ar sniego, ledo dangos ir kitų objektų kiekybinius parametrus riboja jų kiekybinį palyginimą ir pačios analizės atlikimo galimybes. Tų pačių savybių objektai, esantys skirtinguose šlaituose, optiniu spektrometriniu požiūriu gali atrodyti labai skirtingi. Dėl to topografinių sąlygų vaizdų kokybei eliminavimas yra vienas iš svarbių duomenų normalizavimo ir paruošimo etapų.

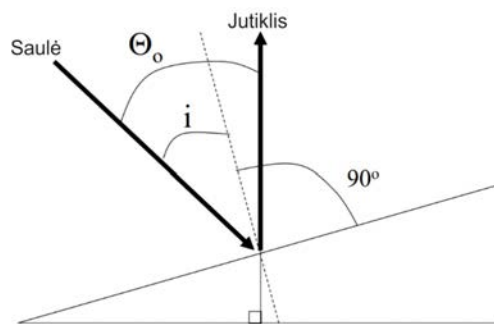
Topografinių korekcijų metodai pagal jų pobūdį skirstomi į dvi grupes:

- spektro juostų santykio;
- apšvietimo sąlygų modeliavimo.

Pirmoji metodų grupė yra paprastesnė ir lengviau realizuojama, be to, nereikalauja papildomų įvesties duomenų. Taikant šiuos metodus daroma prielaida, kad atspindžio reikšmės pikseliuose kinta proporcingai abiejose spektro juostų vaizduose, o įvedamas koeficientas tarp jų kompensuos topografinį efektą. Tokia prielaida tinka tokiems kritimo kampams paviršių atžvilgiu, kurie yra nepriklausomi nuo bangų ilgių. Geometrinėje optikoje kritimo kampas yra kampas tarp paviršiuje esančio spindulio ir paviršiaus statmenos linijos kritimo taško (2.6.13. pav.).



2.6.13. pav. Saulės spinduliuotės kritimo kampas.



2.6.14. pav. Lamberto kosinuso korekcijos principinė schema.

Prielaida negalioja išsklaidytai spinduliuotei, kuri gali kisti skirtingai įvairiose spektro juostose. Taikant spektro juostų santykių metodiką, kyla ir spektrinės skiriamosios gebos praradimo problema.

Antroji – apšvietimo sąlygų modeliavimo metodų grupė. Šioms korekcijoms atlikti būtini papildomi skaitmeninio reljefo modelių (DEM) duomenys, naudojami Saulės spinduliuotės kritimo kampui įvertinti. Svarbu, kad DEM modelių skiriamoji geba būtų tokia pati kaip ir palydovo vaizdo. Patys apšvietimo modeliavimo metodai dar skirstomi į dvi grupes – tai Lamberto ir ne Lamberto korekcijos. Toliau plačiau nagrinėjamos abi metodų grupės.

Lamberto topografinės korekcijos. Kosinuso korekcijos – plačiausiai iš Lamberto korekcijų naudojamas metodas. Taikant šį metodą daroma prielaida, kad apšvietos dydis, pasiekiantis tašką šlaite, yra tiesiogiai proporcingas spinduliuotės kritimo kampo „i“ kosinusui. Kritimo kampas „i“ apibrėžiamas kaip kampas tarp normalios vaizdo elemento ir zenito krypties (2.6.14. pav.). Vis dėlto šis metodas turi tam patikrų trūkumų. Visų pirma jis leidžia įvertinti tik tiesioginę apšvietos (angl. irradiance) dalį, kuri tenka taškui ant Žemės. Neatsižvelgiama į išsklaidytąją grįžtamąją atmosferos spinduliuotę ir šviesą, atsispindinčią iš aplinkinių kalnų šlaitų ar paviršiaus taškų, kurie gali apšviesti tašką. Taigi silpnai apšviestos reljefo vietos įgauna neproporcingai ryškių pikselių vaizde efektą.

Kuo mažesnė kosinuso vertė tuo didesnė nuolydžio pataisa taikoma.

$$\rho_H = \rho_T \frac{\cos\theta_Z}{\cos i} \tag{2.6.11.}$$

kur ρ_H – spinduliuotė, tenkanti horizontaliam paviršiui; ρ_T – spinduliuotė, tenkanti šlaitui; θ_Z – Saulės kampas nuo jutiklio zenito; i – Saulės spinduliuotės kritimo kampas statmeniui į reljefo paviršių.

Ne Lamberto korekcijos. Metodų esmė – atliekant korekcijas atsižvelgiama į modeliuojamą paviršiaus šiurkštumą. Įprastai šių korekcijų taikymas reikalauja koregavimo koeficientų įvertinimo ir skaičiavimo. Koeficientai, savo ruožtu, priklauso nuo elektromagnetinės spinduliuotės bangų ilgio. Tad kiekvienos spektro juostos korekcijos atliekamos atskirai. Pataisos koeficientai išskaičiuojami naudojant vaizdo (atskirose spektro juostose) pikselių grupę iš tos pačios žemės dangos klasės. Vykdamt pačią koregavimo procedūrą, pirmiausia iš vaizdo spektro juostų gaunamos pikselių reikšmės ir tuomet apskaičiuojamas pataisos koeficientas.

Minarto (Minnaert) korekcijos yra vienas iš ne Lamberto korekcijų grupės metodų pavyzdžių. Čia topografinės korekcijos dydis ir koeficientas priklauso nuo paviršiaus tipo ir spektro juostų bangų ilgio. Pataisos koeficiento reikšmės gali svyruoti tarp 0 (ne Lamberto paviršiaus

dangos pobūdis) ir 1 (idealus Lamberto matinis arba difuziškai šviesą atspindintis paviršius). Pats metodas yra patobulintas kosinuso korekcija:

$$\rho_H = \frac{\cos\theta_Z}{\cos i} \quad (2.6.12.)$$

Ir išreiškiamas:

$$\ln(\rho_T) = \ln(\rho_H) + K_i \ln\left(\frac{IL}{\cos\theta_Z}\right) \quad (2.6.13.)$$

Korekcija gali būti realizuota naudojant tiesinę regresiją, kur: $\ln(\rho_H)$ ir K_i – regresijos koeficientai; ρ_H – spinduliuotė, tenkanti horizontaliam paviršiui (jos reikšmė pastovi visam vaizdui); θ_Z – Saulės kampas nuo jutiklio zenito; i – Saulės spinduliuotės kritimo kampas statmeniui į reljefo paviršių.

Dar viena ne Lamberto korekcijų empirinio statistinio metodo variacija yra pasiūlyta Teillet (1982). Šiuo atveju daroma prielaida, kad tarp konkrečioje spektrinėje juostoje užfiksuoto atspindžio ir apšvietimo sąlygų yra tiesinė koreliacija.

$$\rho_T = \rho_H + m_k IL \quad (2.6.14.)$$

kur ρ_H – spinduliuotė, tenkanti horizontaliam paviršiui; ρ_T – spinduliuotė, tenkanti šlaitui; m_k – tiesinė kreivės polinkis (nuolydis) k vaizdo ruožui. ρ_H išlieka pastovus visam vaizdui (konkrečioje spektro juostoje). Šio empirinio metodo variacija dar vadinama C korekcija:

$$\rho_H = \rho_T \left(\frac{\cos\theta_Z + c_k}{IL + c_k} \right) \quad (2.6.15.)$$

kur ρ_H – spinduliuotė, tenkanti horizontaliam paviršiui, ρ_T – spinduliuotė, tenkanti šlaitui, θ_Z – Saulės kampas nuo jutiklio zenito, $c_k = b_k/m_k$, o $\rho_T = b_k + m_k$.

Atspindėtos šviesos kiekio rodiklio vaizduose perskaičiavimas. Norint palydovinius vaizdus taikyti kiekybinei Žemės paviršiaus objektų ir paviršių analizei svarbu paviršiui tenkančios spinduliuotės reikšmės perskaičiuoti į atspindžio reikšmės. Kiekvieno pikselio atspindėtos spinduliuotės kiekio reikšmė konkrečioje vaizdo spektro juostoje gali būti apskaičiuota pagal formulę:

$$p_\lambda = (\pi L_\lambda d^2) / (ESUN_\lambda \cos\theta) \quad (2.6.16.)$$

kur p_λ – jutiklio užfiksuota atspindžio reikšmė, kai bangos ilgis λ ; L_λ – spektrinės spinduliuotės intensyvumas ($w^*sr^{-1} m^{-2} nm^{-1}$); θ – Saulės zenito kampas; $ESUN_\lambda$ – Saulės egzoatmosferinė apšvieta, būdinga konkrečiam bangos ilgiui; d – atstumas tarp Žemės ir Saulės, išreikštas astronominiais vienetais (priklausomai nuo metų laiko šis dydis svyruoja nuo 0,9832 iki 1,0167).

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokie keturi skiriamosios gebos tipai apibūdina palydovinių vaizdų duomenų savybes?
- Kas sukelia vidinius sisteminius ir išorinius palydovinių vaizdo duomenų iškraipymus?
- Kokie yra keturi pagrindiniai geometrinių korekcijų lygmenys?
- Kuo skiriasi modeliavimo ir empirinio geometrinio koregavimo modeliai?
- Kokia yra radiometrinių palydovinių vaizdo duomenų korekcijų paskirtis?
- Kokie faktoriai sukelia radiometrinius palydovinių vaizdo duomenų iškraipymus ir klaidas juose?
- Kodėl palydoviniams vaizdams būtina taikyti atmosferos ir topografines korekcijas?
- Radiometrinių triukšmų tipai skiriami palydoviniuose vaizduose ir kokie metodai taikomi jų korekcijoms?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Baghdadi, N., Zribi, M. (eds) (2016). *Optical remote sensing of land surfaces*. Oxford: Elsevier.
- Campbell, J. B., Wynne, R., H., (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). New York: The Guilford Press.
- Crippen, R. E., (1987). The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 2, 137-155.
- Dave, Ch, P., Joshi, R. J. Sirvastava, S. S., (2015) A Survey on Geometric Correction of Satellite Imagery. *International Journal of Computer Applications*, 116, 1, 24-27.
- EOS (2019). *Satellite data: what spatial resolution is enough for you?* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: <https://eos.com/blog/satellite-data-what-spatial-resolution-is-enough-for-you>
- Green, E., P., Clark, Ch., D., Edwards, A. J. (2000). Geometric correction of satellite and airborne imagery. *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Paris: UNESCO.
- Janzen, D.T., Fredeen, A. L., Wheate, R. D. (2006). Radiometric correction techniques and accuracy assessment for Landsat TM data in remote forested regions. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32, 5, 330-340.
- Leica Geosystems (2005). *Orthorectification process of remote sensed image data* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: https://legacy.satimagingcorp.com/media/images/Orthorectification_Leica_19-NOV-05.jpg
- Liang, Sh., Li, X., Wang, J. (2012). *Advanced Remote Sensing. Terrestrial Information Extraction and Applications*. Academic Press.
- Mohan, K. Anand, A., Verma O. (2012). Processing and classification of remotely sensed images. In *Remote sensing and image interpretation*. New Delhi: IGNOU.
- Riano, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I. (2003). Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 5, 11056-1061.
- USGS (2020a). *Landsat Known Issues. Detector Striping* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/detector-striping>
- USGS (2020b). *Landsat Missions. Landsat 7* [žiūrėta 2020-07-01]. Prieiga internete: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7>

- Riano, D., Chuvieco, E., Aguado, I. 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol – 45, Issue: 5; p.: 1056-1061.
- Waldhoff, G., Bubenzer, O., Bolten, A., Koppe, W., Bareth, G. (2008). Spectral analysis of aster, hyperion, and quickbird data for geomorphological and geological research in Egypt (Dakhla oasis, Western Desert). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, B8, 1201-1206.



③ Palydovinių duomenų taikymas

3.1. ŽEMĖS DANGOS KAITOS STEBĖSENA

Žemės dangos kaita tai procesas, kai žemės danga ir naudojimo funkcijos pasikeičia arba yra antropogeniškai pakeičiamos, dažniausiai siekiant ekonominės naudos. Deja, keičiant žemės naudojimo paskirtį dažnai sulaukiama ne vien palankių pasekmių, bet ir tokių neplanuotų reiškinių kaip dykumėjimas, vandens trūkumas, biologinės įvairovės nykimas.

Žemė ir galimybė ją naudoti yra svarbi visuomenės natūralaus kapitalo dalis. Žemės danga niekuomet nebuvo statiška, tačiau paprastai pokyčiai buvo lėti, laipsniški ir sunkiai pastebimi, tačiau moderniam pasaulyje jie vis greitėjo ir pastaraisiais dešimtmečiais pokyčių tempas tik dar labiau įsibėgėjo. Labiausiai pokyčiai matomi kaimiškose vietovėse, tiek išsivysčiusiose, tiek besivystančiose šalyse. Populiarėjantis miestiškas gyvenimo stilius daro vis didesnę įtaką žemės naudojimo kaitai kaimiškose vietovėse.

Dėl spartėjančios urbanizacijos, kintančių demografinių ir mitybos įpročių, technologinių pokyčių, gilėjančios rinkos integracijos ir klimato pokyčių didėja precedento neturintis žemės poreikis. Tačiau tinkamos žemės plotas yra ribotas, todėl žemė turėtų būti naudojama taip, kad būtų išsaugotas jos potencialas tiekti prekes ir paslaugas. Šios paslaugos prarandamos arba susilpnėja dėl sutrikusio vandens ir maistinių medžiagų ciklo, taip pat kai vis daugiau žemės naudojama būsto, pramonės, prekybos ar transporto infrastruktūros plėtrai. Kai kurios žemės naudojimo ir tvarkymo formos, pvz., žemės ūkio intensyvinimas ar žemės ūkio naudmenų apleidimas, skatina degradaciją: dirvožemio eroziją, dirvožemio organinių medžiagų mažėjimą, buveinių praradimą, kraštovaizdžio fragmentaciją.

Siekiant išvengti arba bent jau mažinti neigiamas tokios kaitos pasekmes, norint sukurti veiksmingą ir efektyvią žemės naudojimo politiką, reikia žinoti, kokie pokyčiai atsiranda žemės dangoje ir žemės naudojimo srityse, nustatyti šių pokyčių priežastis ir kur šie pokyčiai vyrauja.

Kalbant apie žemės naudojimo stebėseną visuomet pirmiausia iškyla dilema, kas turi būti stebima: žemės naudmenos ar žemės danga. Iš pirmo žvilgsnio tai gali pasirodyti kaip vienas ir tas pats dalykas, tačiau esminis skirtumas yra tas, kad žemės naudojimas turi socialinės ekonominės funkcijos atspalvį.

Žemės danga yra fizinis ir biologinis Žemės paviršius, įskaitant antropogeninius paviršius, pvz.: miškus, miestus, kelius, pelkes, dirbamus laukus, ežerus ir t. t. O žemės naudojimas yra kartu su žemės danga stebima tos teritorijos funkcija pagal esamą ar planuojamą panaudojimą, pvz., gyvenamoji, agrarinė, miškų ūkio, rekreacinė ir t. t.

Gana paprasta žemės dangą nustatyti yra pakankamai paprasta iš vienkartinės palydovinio vaizdo analizės, tačiau nustatyti žemės naudojimą yra kur kas sudėtingiau. Pavyzdžiui, ūkiniam miškui auginti naudojama žemė nepriklausomai nuo to, kokia miško auginimo fazė, priskiriama miškui net jei miškas šiuo metu yra iškiristas ar atsodintas jaunuolynas daug labiau primena krūmelius nei mišką. Tačiau jei nagrinėjami ne žemės naudmenys, bet žemės danga, nei jaunuolyno, nei kirtimo negalima laikyti mišku.

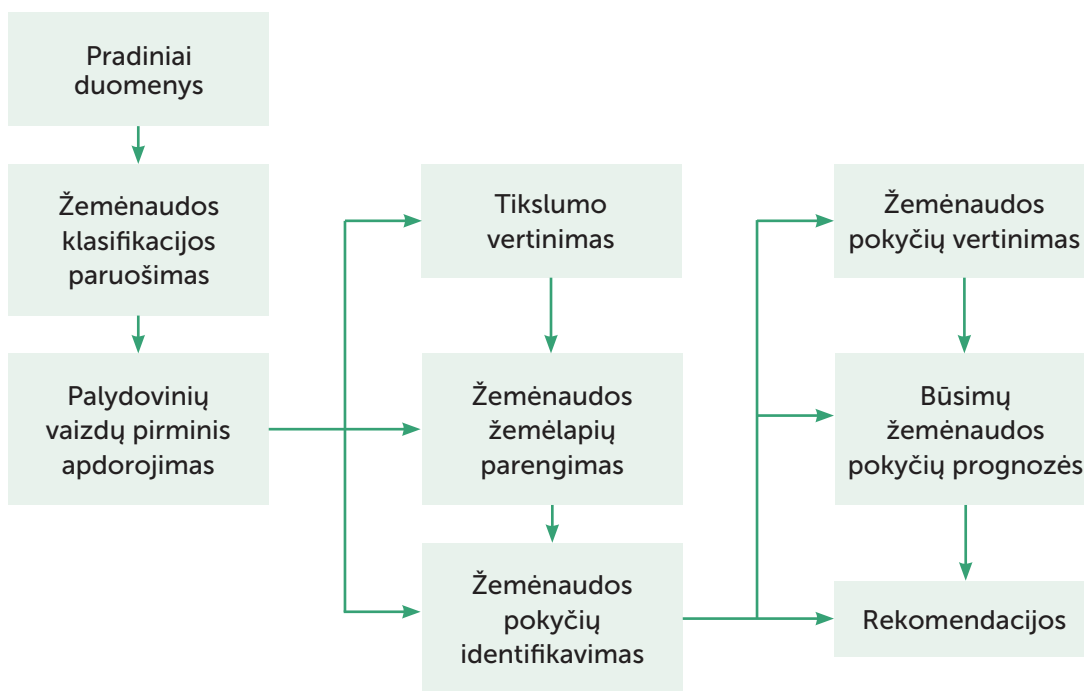
Kurią žemėnaudos koncepciją rinktis atliekant jo kaitos tyrimą, kiekvienu atveju reikia nuspręsti atsižvelgiant į tyrimo tikslą ir uždavinius. Vienas dalykas tikrai yra aiškus: jei siekiama ištirti žemės naudmenis ir jų kaitą, o ne žemės dangą, reikės surinkti daugiau duomenų, nes vien nuotolinių tyrimų metodais gauti vaizdai nesudaro galimybių nustatyti, kaip žemė naudojama. Paprastai siekiant nustatyti, kaip žemė naudojama, ir to pokyčius, pasitelkiami įvairios paskirties žemėlapiai, planai, planavimo dokumentai, rašytiniai šaltiniai, kartais net nuotraukos.

Žemės dangos kaitos tyrimų objektas yra kraštovaizdžio pokyčiai, urbanizacijos plėtra, natūralių buveinių fragmentacija, pakrančių linijų pokyčiai, sausrų ir potvynių ar kitų ekstremalių reiškinių paveiktos teritorijos, dykumėjimas ir kt.

Šių tyrimų rezultatai gali būti panaudojami tiek fundamentalaus, tiek taikomojo mokslo srityse. Stebėdami žemės dangos pokyčius galime geriau įvertinti antropogeninį poveikį aplinkai, ypač buveinių pokyčiams, jų fragmentacijai įvertinti. Paprastai žemės naudojimo ir jo kaitos tyrimai naudojami kuriant valstybinius strateginius ir teritorinius planus, formuojant aplinkos apsaugos politiką ir vykdant šios politikos įgyvendinimo stebėseną, nevyriausybinių įstaigų veikloje, informuojant visuomenę.

Žemės dangos kaitos tyrimai susideda iš kelių tos pačios teritorijos skirtingų laikotarpių žemės naudmenų žemėlapių palyginimo ir pasikeitusių teritorijų identifikavimo (3.1.1. pav.). Pradedant žemės naudmenų kaitos analize, pirmiausia reikia identifikuoti tyrimo laikotarpį ar kelis laikotarpius, kurie bus lyginami tarpusavyje. Tuomet pradedami rinkti pradiniai duomenys, kuriuos sudaro palydoviniai vaizdai ar jau turimi žemėlapiai, taip pat papildoma informacija, padedanti identifikuoti žemės naudmenis, jei siekiama tirti ne vien žemės dangą. Jei tyrimas nėra kartotinis, t. y. nėra pakartotinai vertinama ta pati teritorija pagal tą pačią žemės naudmenų klasifikaciją, retai kada žemės naudmenų kaitos tyrimams galima panaudoti jau esamus žemėlapius ar anksčiau atliktus žemės naudmenų tyrimus, nes kiekvienas tyrimas atliekamas siekiant konkretaus tikslo ir imant aiškiai apibrėžtą laikotarpį.

Idealiu atveju tyrimui naudojami palydoviniai vaizdai turėtų būti panašaus spektro, skiriamosios gebos ir daryti tuo pačiu metų laiku. Deja, praktikoje tai pasitaiko retai. Taip pat jei tyrimui naudojami ne vien palydoviniai vaizdai, o, pavyzdžiui, jau esami žemėlapiai, šie žemėlapiai turėtų būti tokio paties ar bent palyginamo mastelio, geometrijos ir detalumo.



3.1.1. pav. Žemės naudojimo kaitos identifikavimo principinė schema.

Kitas etapas yra žemės naudmenų klasifikavimas. Priklausomai nuo tyrimo tikslo yra sudaroma žemės naudmenų klasifikacija arba naudojama jau esama. Žemės naudmenų klasifikacijos tikslas yra suskirstyti esamą žemės naudmenų įvairovę tikrovėje į atskiras dalis, kiekvieną iš jų įvardijant konkrečiu pavadinimu ir parenkant teritorijos požymius taip, kad nė viena teritorijos dalis (nė viena klasė) negalėtų sutapti. Be to, klasifikacija turi būti sudaryta, kad neliktų teritorijos dalių, kurių neįmanoma priskirti nė vienai klasei. Klasifikacijos gali būti kelių lygių,

tuomet visos žemesnio lygio klasės turi priklausyti kuriai nors vienai ir tik vienai aukštesnio lygio klasei. Pavyzdžiui, dar 1976 m. JAV Geologijos tarnybos pradėta naudoti žemės naudmenų ir žemės dangos klasifikacijos sistema buvo sukurta specialiai aerofotografinėms nuotraukoms, joje išskiriamos 9 pirmo lygio klasės, kurios toliau padalijamos į 37 antro lygio klases.

Žemės naudojimo klasifikacijos pavyzdys yra ir Lietuvos Respublikos žemės įstatyme nustatytas visos Lietuvos tiek valstybinės, tiek privačios žemės klasifikavimas (pirmasis lygis pagal pagrindinę žemės naudojimo paskirtį, antrasis – pagal teritorijų planavimo dokumentuose ar žemės valdos projektuose nustatytą naudojimo būdą):

1) **žemės ūkio paskirties žemė:**

- mėgėjų sodo žemės sklypai;
- sodininkų bendrijų bendrojo naudojimo žemės sklypai;
- specializuotų sodininkystės, gėlininkystės, šiltnamių, medelynų ir kitų specializuotų ūkių žemės sklypai;
- rekreacinio naudojimo žemės sklypai;
- kiti žemės ūkio paskirties žemės sklypai;

2) **miškų ūkio paskirties žemė:**

- ekosistemų apsaugos miškų sklypai;
- rekreacinių miškų sklypai;
- apsauginių miškų sklypai;
- ūkinių miškų sklypai;

3) **vandens ūkio paskirties žemė:**

- ūkinei veiklai naudojami vandens telkiniai;
- rekreaciniai vandens telkiniai;
- ekosistemas saugantys vandens telkiniai;
- bendrojo naudojimo vandens telkiniai;

4) **konservacinės paskirties žemė:**

- gamtinių rezervatų žemės sklypai;
- kultūros paveldo objektų žemės sklypai;

5) **kitos paskirties žemė:**

- vienbučių ir dvibučių gyvenamųjų pastatų teritorijos;
- daugiabučių gyvenamųjų pastatų ir bendrabučių teritorijos;
- visuomeninės paskirties teritorijos;
- pramonės ir sandėliavimo objektų teritorijos;
- komercinės paskirties objektų teritorijos;
- susisiekimo ir inžinerinių komunikacijų aptarnavimo objektų teritorijos;
- susisiekimo ir inžinerinių tinklų koridorių teritorijos;
- rekreacinės teritorijos;
- bendro naudojimo (miestų, miestelių ir kaimų ar savivaldybių bendro naudojimo) teritorijos;
- naudingųjų iškasenų teritorijos;
- teritorijos krašto apsaugos tikslams;
- atliekų saugojimo, rūšiavimo ir utilizavimo (sąvartynai) teritorijos;
- teritorijos valstybės sienos apsaugos tikslams;
- atskirųjų želdynų teritorijos.

Kitas žemės naudojimo klasifikacijos pavyzdys Lietuvos CORINE žemės dangos duomenų bazė. Jos sudarymui buvo panaudota standartinė Europos CORINE žemės dangos klasifikacija (3.1.1 lentelė), kurios 1 lygyje Lietuvoje buvo užregistruotos 5 žemės dangos klasės, 2 lygyje – 14 klasių ir 3 lygyje – 31 klasė. Visos CORINE žemės dangos GIS duomenų bazės buvo sukurtos naudojant standartinę Lietuvos koordinacių sistemą LKS94 (plačiau apie CORINE 3.1.5 poskyryje).

3.1.1 lentelė. CORINE žemės dangos klasifikacija.

1 LYGIS	2 LYGIS	3 LYGIS	
1. Dirbtinės dangos	1.1. Užstatymo teritorijos	1.1.1. Ištinis užstatymas	
		1.1.2. Neištinis užstatymas	
	1.2. Pramoniniai, komerciniai ir transporto objektai	1.2.1. Pramoniniai ir komerciniai objektai	
		1.2.2. Kelių ir geležinkelių tinklas ir su juo susijusi žemė	
		1.2.3. Uostų teritorijos	
		1.2.4. Oro uostai	
	1.3. Karjerai, sąvartynai ir statybos	1.3.1. Naudingųjų iškasenų gavybos vietos	
		1.3.2. Sąvartynai	
		1.3.3. Statybų plotai	
	1.4. Apželdinto dirbtinės ne ž. ūkio paskirties teritorijos	1.4.1. Žalieji miestų plotai	
		1.4.2. Sporto ir poilsio vietos	
	2. Žemdirbystės teritorija	2.1. Dirbama žemė	2.1.1. Nedrėkinamos dirbamos žemės
		2.2. Daugiametės kultūros	2.2.2. Vaismedžių ir uogų plantacijos
2.3. Ganyklos		2.3.1. Ganyklos	
2.4. Kompleksinės žemdirbystės teritorijos		2.4.2. Kompleksiniai žemdirbystės plotai	
		2.4.3. Dirbamos žemės plotai su natūralios augalijos intarpais	
3. Miškai ir kitos gamtinės teritorijos	3.1. Miškai	3.1.1. Lapuočių miškai	
		3.1.2. Spygliuočių miškai	
		3.1.3. Mišrus miškas	
	3.2. Krūmų ir /arba žolinės augalijos bendrijos	3.2.1. Natūralios pievos	
		3.2.2. Dykvietės ir viržynai	
		3.2.4. Pereinamosios miškų stadijos ir krūmynai	
	3.3. Žemė su reta augaline danga, arba be jos	3.3.1. Pliažai, kopos, smėlynai	
		3.3.3. Teritorijos su menka augaline danga	
		3.3.4. Gaisravietės	
4. Pelkės	4.1. Kontinentinės pelkės	4.1.1. Kontinentinės pelkės	
		4.1.2. Durpynai	
5. Vandens telkiniai	5.1. Vidaus vandenys	5.1.1. Vandens tėkmės	
		5.1.2. Vandens telkiniai	
	5.2. Jūrų vandenys	5.2.1. Pakrančių lagūnos	
		5.2.3. Jūra ir vandenynas	

Jeigu žemės naudojimo kaitos analizei naudojami jau parengti žemėlapiai ar dešifruoti skirtingų laikotarpių palydoviniai vaizdai, labai svarbu įsitikinti, ar sutampa šių duomenų klasifikavimo sistemos. Ar dirbama žemė viename žemėlapyje, kuris reprezentuoja lyginamojo laikotarpio pradžią, apibrėžiama lygiai taip pat (ar bent palyginamai) kaip dirbama žemė apibrėžiama lyginamojo laikotarpio pabaigą reprezentuojančiame žemėlapyje ar dešifruotame palydoviniame vaizde. Jei skirtingų lyginamų laiko atskaitos taškų skirtumus lems ne pats žemės naudojimas, o jam klasifikuoti naudota metodika, gauti žemės naudojimo kaitos tyrimo rezultatai bus niekiniai. Pavyzdžiui, jei laikotarpio pradžioje naudojamoje jau turimoje kartografinėje medžiagoje dirbama žemė – tik pasėliams naudojami laukai, o laikotarpio pabaigoje naudojamoje medžiagoje dirbama žemė – pasėliai ir ganyklos, neatkreipę dėmesio į klasifikacijų skirtumą ir padarę žemės naudojimo kaitos analizę gausime neegzistuojantį dirbamos žemės plotų padidėjimą.

Žinoma, jei abu lyginamų skirtingų laikotarpių žemėlapiai rengiami iš turimų palydovinių vaizdų ar palydoviniai vaizdai dešifruojami tyrimo metu, paklaidų dėl skirtingos žemės naudojimo klasifikacijos bus išvengta.

Žemės naudojimo klasifikacijos sistema turi būti sudaryta taip, kad klasės viena nuo kitos skirtųsi tuo pačiu loginiu parametru, taip pat, kaip jau minėta, visos žemesnio lygio klasės turi logiškai įsikomponuoti į aukštesnes klases. Jei vienos klasės nuo kitų atskiriamos pagal ekonominius požymius, visa klasifikavimo sistema turi tai atspindėti.

Kitas žingsnis yra pirminis palydovinių vaizdų apdorojimas, kurio metu būtina kruopščiai suregistruoti palydovinius vaizdus, taip pat, jei reikia, pakoreguoti vaizdus dėl atmosferos ar sisteminių klaidų. Optimaliausia naudoti skirtingų metų, tačiau to paties sezono palydovinius vaizdus, gautus tuo pačiu dienos laiku, siekiant sumažinti sezoninius Saulės polinkio kampo ir sezoninės augalijos dangos kaitos įtaką tyrimo tikslumui. Parenkant palydovinius vaizdus tolimesnei analizei reikia atsižvelgti, kuriuo metų laiku darytuose vaizduose geriausiai matomi kontrastai, pagal kuriuos bus išskiriamos žemės dangos klasės. Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į tuo metu buvusias oro sąlygas, nes ekstremalios sausros, drėgmės perteklius ar potvynis vieno iš tyrimų laiku gali turėti didelės įtakos galutiniams tyrimo rezultatams.

Tyrimui naudojami nuotoliniai vaizdai turi būti teisingai koordinuoti, vieno pikselio paklaida tarp dviejų laikotarpių duomenų rinkinių gali lemti, kad bus neteisingai nustatyta žemės dangos kaita, pvz., neteisingai nustatytas naujas kelias dėl duomenų persislinkimo.

Renkantis palydovinius vaizdus ir jų apdorojimo metodiką reikia pasirinkti būsimo žemėlapių gardelės dydį, t. y. mažiausią vienalytę teritoriją, nuo šio pasirinkimo priklausys analizės detalumas. Detalumas pasirenkamas atsižvelgiant į tyrimo tikslą, taip pat tiriamos teritorijos dydį ir tyrimus laiko bei technologijų ir žmogiškuosius išteklius. Jei atliktos galutinės palyginamosios analizės tikslas nustatyti bendras didelio regiono, tarkim, visos Europos žemės dangos kaitos tendencijas, netgi patogiau pasirinkti didesnes gardeles, nes tokiu atveju duomenys iš karto bus labiau apibendrinami, žinoma, ir paklaida gali būti didesnė nei tiriant teritoriją itin detalai. Tačiau atliekant didelės teritorijos itin detalius tyrimus bus sunaudota daug daugiau laiko ir žmogiškųjų išteklių. Todėl reikia atsakingai pasverti, kokio detalumo duomenys yra reikalingi. Tiriant vieno miesto teritoriją reikalingas visai kitoks detalumas nei tiriant visą šalį.

Toliau reikia pasirinkti, koku būdu bus apdorojami palydoviniai vaizdai, kokia metodika naudojama jiems dešifruoti. Galima rinktis vizualinį dešifravimą, kontroliuojamąjį klasifikavimą, nekontroliuojamąjį klasifikavimą, įvairių indeksų naudojimą ir kitus metodus.

Skaitmeninis palydovinių vaizdų klasifikavimas yra procesas, kurio metu gardelės (pikseliai) yra priskiriamos kuriai nors žemės dangos klasei. Paprastai kiekviena gardelė laikoma atskiru vienetu, kurios vertinimas susideda iš kelių spektrinių juostų verčių. Lyginant gardeles tarpusavyje ir žinomo žemės dangos tipo gardeles įmanoma sugrupuoti panašias gardeles į klases, kurios yra reikalingos nuotolinių duomenų naudotojams. Tokios identifikuojamos žemės

mės dangos klasės formuoja arealus, kurie žemėlapyje ar dešifruotame palydoviniame vaizde pažymimi spalva ar indeksu. Teoriškai klasės yra homogeniškos, t. y. vienos klasės gardelių spektro vertės tarpusavyje yra daug panašesnės nei kitos klasės gardelių spektrinės vertės. Praktiškai kiekvienoje klasėje gardelių spektro vertės gali būti gana įvairios, priklausomai nuo kraštovaizdžio įvairovės.

Mokslininkai yra sukūrę daugybę palydovinių vaizdų interpretavimo ir klasifikavimo metodų ir strategijų. Analitikai turi pasirinkti klasifikacijos metodą, kuris geriausiai atitiks konkrečią užduotį, bet kol kas nėra sudaryta viena pati geriausia metodika, tinkanti visiems atvejams, nes kiekvienai analizei išskirti konkretūs tikslai ir uždaviniai, o palydovinių vaizdų charakteristikos skiriasi tarpusavyje. Todėl ypač svarbu, kad analitikas gebėtų parinkti tinkamą klasifikavimo strategiją ir galėtų parinkti tinkamiausią kompiuterinę programinę įrangą konkrečiai užduočiai atlikti. Programinę įrangą, priskiriančią arealus ar atskiras gardeles kuriai nors klasei, toliau vadinsime klasifikatoriais.

3.1.1. Vizualinis dešifravimas

Vizualiniam dešifravimui reikia ypač daug laiko ir žmogiškųjų išteklių, todėl šiuo metu naudojamas retai arba naudojamas kaip gretutinė priemonė šalia pusiau automatinio palydovinių vaizdų dešifravimo. Naudojant šią metodiką apmokyti palydovinių vaizdų dešifravimo specialistai identifikuoja kiekvieną objektą ar vienalytę teritoriją ir vektorizuoja ribas. Naudojant šį metodą dešifravimo tikslumas tiesiogiai priklauso nuo dirbančių specialistų kompetencijos ir gebėjimo vienodai naudotis parengta žemės dangos klasifikavimo sistema. Identifikuojant objektus palydoviniuose vaizduose vertinama objekto forma, dydis, atspalvis, tekstūra, šešėliai, vieta, struktūra, gretimų objektų asociacijos (3.1.2. pav.).



3.1.2. pav. Vizualinis dešifravimas. Vizualinio dešifravimo metu identifikuojant objektus palydoviniuose vaizduose vertinama objekto forma, dydis, atspalvis, tekstūra, šešėliai, struktūra, gretimų objektų asociacijos (pagal Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

Paprasciausias pusiau automatinis skaitmeninio vaizdo klasifikavimo metodas yra vertinti kiekvieną gardelę atskirai, ją priskiriant kuriai nors klasei pagal kelias skirtingų spektro juostų vertes. Tokias klasifikavimo metodikas galima vadinti spektrinėmis arba taškinėmis, nes jos kiekvieną gardelę vertina atskirai, be gretimų gardelių asociacijos. Taigi šie metodai ne tik paprasti, bet ir gana ekonomiški, tačiau yra riboti, nes neįvertinama gardelių tarpusavio sąveika ir jos suteikiama informacija. Žmonės, dešifruojantys skaitmeninius vaizdus, daug daugiau informacijos gauna iš asociacijų, tokių kaip homogeniško objekto forma, santykinis dydis, išsidėstymas aplinkoje, nei iš kiekvienos gardelės spektrinės informacijos.

Taškinio klasifikatoriaus alternatyva yra kompleksiškesni klasifikatoriai, vertinantys kaip ir žmonės, dešifruojantys vaizdus, ne tik kiekvieną gardelę atskirai, bet gardelių grupes ir jų išsidėstymą, kontekstą. Šie klasifikatoriai vadinami erdviniais, naudojant juos yra analizuojama ne tik spektrinė, bet ir tekstūrinė palydovinio vaizdo informacija nedidelėje teritorijoje. Šiuos klasifikatorius yra žymiai sunkiau sudaryti, todėl jų parengimo kaštai didesni nei taškinių klasifikatorių. Kai kurie erdviniai klasifikatoriai pasiekia gana gerą tikslumą, tačiau tik keletas jų yra naudojami kaip standartinė nuotolinių tyrimų palydovinių vaizdų apdorojimo įranga.

Pažiūrėjus kitu kampu išryškėja kitas skirtumas tarp palydovinių vaizdų klasifikavimo sistemų, kurį galime pavadinti kontroliuojamuoju ir nekontroliuojamuoju klasifikavimu. Kontroliuojamojo klasifikavimo procedūros reikalauja žmogaus dalyvavimo, analitikas turi identifikuoti žinomus kiekvieno žemės dangos tipo arealus. O nekontroliuojamajam klasifikavimui reikalingas tik minimalus analitiko įsikišimas palydoviniame vaizde ieškant natūralių gardelių grupių. Yra ir metodikų, kurios nevisiškai telpa į šiuos apibrėžimus, šie klasifikatoriai vadinami hibridiniais, nes turi tiek kontroliuojamojo, tiek nekontroliuojamojo klasifikavimo bruožų.

3.1.2. Kontroliuojamasis klasifikavimas

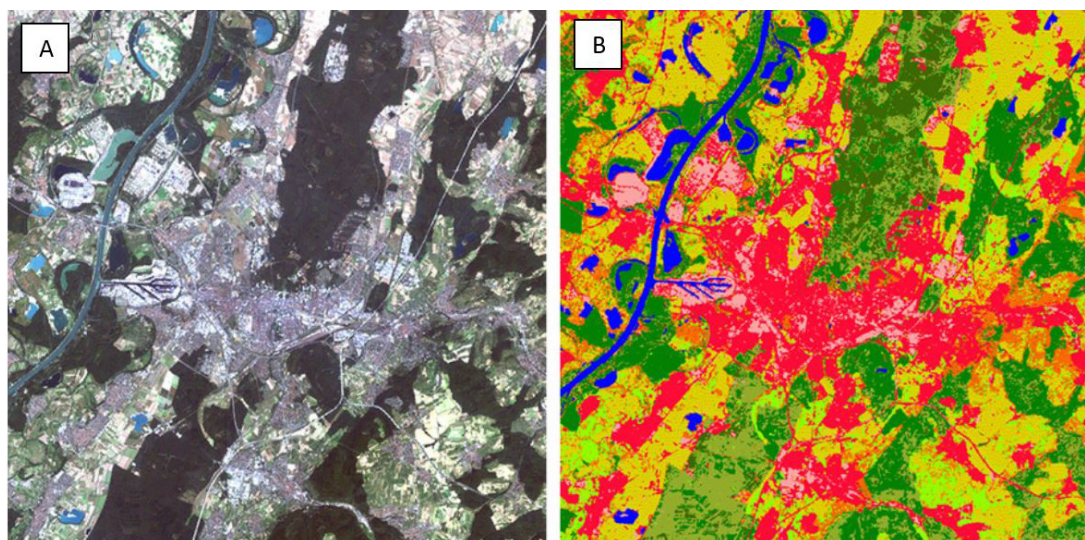
Kontroliuojamąjį klasifikavimą atliekantis operatorius turi parinkti žemės dangos klasių etalonus ir pažymėti juos tam tikrame vektoriniame sluoksnyje. Toliau klasifikavimas atliekamas automatiškai, naudojant etaloninių mažiausiųjų vaizdo elementų reikšmes. Kontroliuojamojo klasifikavimo metodas yra pusiau automatinis palydovinių vaizdų dešifravimo būdas. Šį klasifikavimo būdą galima apibūdinti kaip nežinomų gardelių identifikavimą pagal žinomas gardeles. Pirmiausia analitikas nustato tipines kiekvienos žemės dangos klasės teritorijas ekrane, pagal kurių spektrines vertes sukuriama dešifravimo raktas. Paskui statistiniais metodais gardelės priskiriamos žemės dangos klasei atsižvelgiant į tai, kuri tipinė klasė geriausiai atitinka kiekvienos gardelės spektrinius duomenis.

Tipinių žemės dangos klasių teritorijų, arba kontrolinių teritorijų, parinkimas yra ypač svarbus kontroliuojamojo klasifikavimo metodikos etapas. Šiame etape tipines kiekvienos žemės dangos teritorijas reikia parinkti labai atidžiai, įsitikinant, kad kiekviena žemės dangos klasė tinkamai atspindėta spektriniais poklasiais, atsižvelgiant į spektrinius pokyčius, atsirandančius dėl šešėliavimo, šlaitų ekspozicijos ir kitų faktorių.

Išskirtas spektrines klases reikia priskirti informacinėms klasėms. Tai reiškia, kad vieną žemės dangos klasę atspindės ne viena spektrinė klasė ir šių spektrinių klasių priskyrimas konkrečiai žemės dangos klasei yra kitas svarbus etapas. Pavyzdžiui, išskiriant ilgametės pievos kaip žemės dangos klasę, gali reikėti grupuoti tokias spektrines klases kaip pietų ekspozicijos pievos, šiaurinės ekspozicijos pievos, pievos su pavieniais krūmais ir pan. Baigus klasifikavimą visos subklasės turi būti priskirtos vienai klasei ir žymimos vienu simboliu ar spalva (3.1.3. pav.). Jei žemės dangos klasifikacija yra kelių lygių, visos žemesnio lygio klasės turi būti papildomai sugrupuotos į aukštesnio lygio klases.

Kontroliuojamojo klasifikavimo metu analitikas pasirenka informacinių klasių meniu, pritaikytą konkrečiam tikslui ar geografiniam regionui. Ši savybė gali būti ypač svarbi, jei reikia

sukurti klasifikaciją konkrečiam tikslui, pvz., siekiama palyginti kelis geografinius regionus kuriais nors aspektais. Tačiau reikia įvertinti ir tai, kad tokia iš anksto parenkama klasifikacija ne visada gali atitikti tikrovėje esančią situaciją, kai kurias teritorijos dalis gali būti labai sudėtinga priskirti iš anksto nustatytioms klasėms, ypač kai siekiama kartografuoti didelę ir kompleksinę teritoriją. Kontrolinės teritorijos dažnai apibrėžiamos pirmiausia atsižvelgiant į informacines klases ir tik po to į spektrines savybes, todėl kontrolinė teritorija, kuri yra tipinis miškas, gali būti tiksli miško žymėjimo atžvilgiu, tačiau ji vis dar gali būti labai įvairi atsižvelgiant į tankį, amžių, šešėlį ir panašiai, todėl gali sudaryti prastą kontrolinį plotą.



3.1.3. pav. Kontroliuojamojo klasifikavimo rezultatas. Naudojant daugiaspektrį palydovinį vaizdą (paveikslėlis A) ir pritaikius kontroliuojamojo klasifikavimo metodą gaunamos gana tiksliai išskirtos žemės dangos klasės (paveikslėlis B) (SEOS project, 2013).

Taip pat šis klasifikavimas susietas su konkrečiomis identifikuotomis sritimis, kurios nustatomos parenkant kontrolines teritorijas. Naudojant kontroliuojamąjį klasifikavimą galima identifikuoti dideles klasifikavimo klaidas vertinant kontrolinių teritorijų duomenis, jei jie buvo neteisingai klasifikuoti. Netikslus kontrolinių teritorijų duomenų klasifikavimas rodo klaidas vykdant klasifikavimą arba neteisingą kontrolinių teritorijų parinkimą. Iš kitos pusės, teisingas kontrolinių teritorijų duomenų klasifikavimas ne visada parodo, kad bus teisingai klasifikuojama ir visa likusi teritorija.

Labai nuosekliam ir kruopščiam kontrolinių teritorijų pasirinkimui gali reikėti daug laiko, brangaus ir varginančio darbo, net jei turima pakankamai išteklių. Analitikui gali būti sudėtinga derinti būsimas kontrolines teritorijas, apibrėžtas žemėlapiuose ir palydoviniuose vaizduose, prie klasifikuojamo vaizdo. Galiausiai atliekant kontroliuojamąjį klasifikavimą galima nesugebėti atpažinti ir pavaizduoti specialių ar unikalių kategorijų, neišskirtų kontrolinėse teritorijose, nes jos nėra žinomos analitikui arba užima labai mažus palydovinio vaizdo plotus.

Kontrolinės teritorijos yra žinomos tapatybės sritys, apibrėžtos skaitmeniniame paveikslėlyje, paprastai nurodant kvadrato ar stačiakampio srities kampinius taškus, naudojant linijų ir stulpelių numerius skaitmeninio vaizdo koordinatų sistemoje. Paprastai analitikas pradeda surinkdamas ir studijuodamas klasifikuojamos teritorijos žemėlapius bei aerofotografines nuotraukas ir tirdamas pasirinktas vietas lauko tyrimais. Nustatomos specifinės kiekvienos informacinės klasės kontrolinės teritorijos. Tikslas – nustatyti taškų rinkinį, tiksliai atspindintį kiekvienoje informacinėje klasėje esančias spektrines vertes.

Rekomenduojama, kad analitikas kontrolines teritorijas parinktų taip, jog keliose atskirose kiekvienos klasės kontrolinėse teritorijose iš viso susidarytų kiekvienos klasės bent 100 gardelių. Kontrolinių teritorijų dydis yra svarbus. Kiekviena kontrolinė teritorija turi būti pakankamai didelė, kad būtų galima patikimai nustatyti klasių spektrines vertes, tačiau ne pernelyg didelė, kad nesukurtų ypač didelių verčių variacijų. Rekomenduojama, kad kontrolinė teritorija vietovėje užimtų bent 4 ha, o geriausia – apie 16 ha. Mažas kontrolines teritorijas yra sunku identifikuoti palydoviniuose vaizduose ir akumuliuoti pakankamą gardelių skaičių, tuomet reikėtų ieškoti papildomų teritorijų, tačiau naudojant itin dideles kontrolines teritorijas atsiranda tikimybė per klaidą įtraukti spektrinių nehomogeniškumų. Kontrolinių teritorijų forma nėra svarbi, nes neturi jokios įtakos tolesnei analizei. Paprastai parenkamos kvadrato ar stačiakampio teritorijos, nes paprasta nustatyti koordinatas.

Kontrolinių teritorijų vieta yra svarbi, nes kiekvieną klasę turi reprezentuoti kelios kontrolinės teritorijos, išsidėsčiusios tolygiai visame palydoviniame vaizde, o ne susitelkusios vienoje vaizdo dalyje. Pageidautina, kad analitikas lauko tyrimų metu apžiūrėtų pasirinktas kontrolines teritorijas, deja, tai dažniausiai sunkiai pasiekama. Dažnai aerofotografinės nuotraukos ar patikimi žemėlapiai pakeičia lauko tyrimus.

Optimalus kontrolinių teritorijų skaičius priklauso nuo išskiriamų klasių skaičiaus, jų išskirtinumo ir turimų resursų. Idealiu atveju kiekviena spektrinė klasė turėtų turėti bent jau 5–10 kontrolinių teritorijų, siekiant teisingai atspindėti spektrines vertes. Kadangi kiekvieną informacinę klasę gali sudaryti keletas poklasių (pietinės ekspozicijos pieva, šiaurinės ekspozicijos pieva, šienaujama pieva, natūrali pieva ir t. t.), atskiru duomenų rinkiniu turi būti atspindėtas kiekvienas poklasis. Parinkti keletą kontrolinių teritorijų svarbu dar ir dėl to, kad vėlesniuose klasifikavimo etapuose kai kurios teritorijos gali būti pripažintos netinkamomis ir jų reikės atsisakyti, todėl geriau apsibrėžti daugiau smulkių kontrolinių teritorijų, nei naudoti kelias dideles. Kontrolinės teritorijos turėtų būti išdėstytos toliau nuo kitos klasės teritorijų ir pereinamųjų zonų.

Labai svarbi geros kontrolinės teritorijos savybė yra jos vienodumas. Kiekvienos kontrolinės teritorijos duomenys turėtų parodyti nevienodą kiekvienos naudojamos spektrinės juostos dažnį. Galimų kontrolinių teritorijų, kuriose yra bimodalinės histogramos, reikėtų atsisakyti, jei jų ribos negali būti pakoreguotos, kad būtų daugiau vienodumo. Gauti kontrolinių teritorijų duomenys pateikia būdingas pikselių vertes, kurios apima keliuose spektriniuose kanaluose išmatuotų duomenų vidurkius, dispersijas ir kovariacijas. Kiekvienoje klasifikuojamoje klasėje šios vertės apytiksliai nustato kiekvienos juostos vidutines vertes, kintamumą ir juostų tarpusavio ryšius. Šios vertės turėtų atspindėti kiekvieną klasę, esančią teritorijoje, ir taip sudaryti pagrindą klasifikuoti gardeles, esančias už kontrolinių teritorijų ribų. Praktikoje teritorijų sudėtingumas labai skiriasi, o nuo analitiko žinių apie tiriamą teritoriją ir jo profesionalumo priklauso gebėjimas parinkti geriausias kontrolines teritorijas, kurios tiksliausiai atspindėtų informacines klases. Be to, kai kurios informacinės klasės nėra spektriškai vienodos ir negali būti patogiai pavaizduotos vienu kontrolinių duomenų rinkiniu.

Nuo tinkamai ar netinkamai parinktų kontrolinių teritorijų priklauso galutiniai klasifikavimo rezultatai ir jų tikslumas, taip pat ir viso žemės dangos kaitos tyrimo tikslumas.

Toliau apžvelgsime tipinę, gal kiek idealizuotą kontroliuojamojo klasifikavimo eigą. Pradedant kontroliuojamąjį klasifikavimą pirmiausia surenkama reikalinga informacija, įskaitant esamus žemėlapius ir aerofotografines nuotraukas. Toliau renkama pirminė informacija apie tiriamą teritoriją, jei analitikas pažįsta teritoriją ir turi patikimus žemėlapius arba aerofotografines nuotraukas, šį etapą galima ir praleisti. Tada planuojami lauko tyrimai, numatomi maršrutai, šiuo metu svarbu suplanuoti lauko tyrimuose tirti visas numatomas žemės dangos klases ir pageidautina, kad sutaptų lauko tyrimų metų laikas su palydovinių vaizdų darymo metų laiku.

Taip pat patikrinami skaitmeniniai duomenys, nustatomi orientyrai, kurie gali būti naudingi išskiriant kontrolines teritorijas, įvertinama vaizdo kokybė. Tada parenkamos ir pažymimos

kontrolinės teritorijos. Kontrolinių teritorijų vietos turi būti apibrėžtos atsižvelgiant į ypatybes, kurias lengva atpažinti palydoviniame vaizde, žemėlapiu bei nuotraukos, naudojami kaip papildoma informacija. Reikia įsitikinti, kad kontrolinių teritorijų ribos gerai išdėstytos tipinėje žemėnaudoje, kad į kontrolinę teritoriją nepatektų mišrios žemės dangos gardelių. Atlikus šį žingsnį turėtų būti nustatytos visų kontrolinių teritorijų koordinatės.

Tada vertinami kontrolinėse teritorijose gaunami duomenys. Paprastai įvertinamas dažnio histogramos vientisumas, klasės atskyrimas pagal diferencialo matricą. Jeigu vertinant duomenis identifikuojamos klaidos ar netinkamai parinktos kontrolinės teritorijos, visa tai ištaisoma, jei reikia, viskas pradedama nuo pradžių.

Kai klasifikavimo pagrindas yra paruoštas, klasifikuojama visa likusi teritorija. Šiame etape programinei įrangai suteikiama prieiga prie kontrolinių teritorijų duomenų ir apibrėžiamos tiriamos teritorijos ribos. Po klasifikavimo jo rezultatai matomi ekrane. Galiausiai baigus klasifikavimą reikia įvertinti jo tikslumą. Jeigu klasifikavimo tikslumas yra tinkamas, galima pereiti prie kitų žemės dangos kaitos tyrimo etapų.

3.1.3. Nekontroliuojamasis klasifikavimas

Nekontroliuojamasis klasifikavimas atliekamas statistiniais metodais. Nustatomi galimų žemės dangos klasių reikšmių diapazonai, nenurodant etaloninių reikšmių ir nepasirenkant klasių. Naudojantis nekontroliuojamojo klasifikavimo metodu automatiniai algoritmai sugrupuoja vaizdo elementus į klases, remdamiesi daugiaspektrių duomenų atspindžių vertėmis, o analitikas naudodamas papildomus duomenis (lauko tyrimus, GIS duomenų sluoksnius), išskirtus poligonus priskiria konkrečioms žemės dangos klasėms. Nekontroliuojamasis klasifikavimas gali būti laikomas natūraliu gardelių grupavimu pagal daugiaspektrius duomenis. Natūralių, būdingų spektrinių verčių grupavimas gali būti intuityviai neakivaizdus, tačiau palydoviniai vaizdai paprastai sudaryti iš spektrinių klasių, kurių savybės yra panašios skirtinguose spektriniuose kanaluose. Nekontroliuojamasis klasifikavimas apibrėžia, identifikuoja ir išskiria šias natūralias gardelių klases.

Naudojant nekontroliuojamąjį klasifikavimą nereikia pirminių žinių apie tiriamą teritoriją. Tiksliau sakant, reikia kitokių žinių apie tiriamą teritoriją nei kontroliuojamajam klasifikavimui. Naudojant kontroliuojamąjį klasifikavimą detalios žinios reikalingos siekiant teisingai parinkti tipinius kiekvienos žemės dangos arealus, kurie bus kartografuojami. Naudojant nekontroliuojamąjį klasifikavimą reikia žinių apie regioną, kad būtų galima teisingai suprasti ir interpretuoti klasifikavimo proceso metu gautus rezultatus ir juos priskirti konkrečiai žemės dangos klasei.

Nekontroliuojamasis klasifikavimas sumažina žmogiškosios klaidos galimybes, nes jį vykdamas analitikas paprastai parenka tik pageidaujamą klasių skaičių (arba minimalų ir maksimalų jų skaičių) ir kartais apibrėžia išskiriamų grupių vienodumą ir skirtumus. Daugybė sprendimų, kuriuos reikia padaryti naudojant kontroliuojamąjį klasifikavimą, nekontroliuojamojo klasifikavimo metu nėra reikalingi, todėl sumažinama analitiko klaidų tikimybė. Jei analitikas turi išankstinių nuostatų dėl analizuojamo regiono, šios nuostatos turės mažai galimybių pasireikšti per nekontroliuojamąjį klasifikavimą. Nekontroliuojamojo klasifikavimo metu suformuojamos klasės paprastai pasižymi kur kas didesniu spektriniu homogeniškumu nei kontroliuojamojo klasifikavimo klasės.

Taip pat unikalios klasės yra atpažįstamos kaip atskiri vienetai. Mažų arealų klasės per nekontroliuojamąjį klasifikavimą yra išskiriamos, o tokios klasės gali būti neidentifikuotos kaip atskiros kontroliuojamojo klasifikavimo metu ir inkorporuotos į kitas klases, taip sukuriama sisteminė viso klasifikavimo klaida.

Iš kitos pusės, sudarius natūralias grupes yra gana sudėtinga jas priskirti informacinėms klasėms, kurios kaip galutinis rezultatas ir domina tyrimo atlikėjus ar užsakovus. Nekontro-

liuojamojo klasifikavimo metu išskiriamos natūralios spektrinės grupės nebūtinai atitiks išskeltus tyrimo uždavinius. Atsižvelgiant į tai, kad analitikas turi tik ribotą galimybę pasirinkti klasių išskyrimo parametrus, norint gauti specifinius rezultatus ir naudoti specifinę klasifikaciją, pvz., norint palyginti kelis regionus pagal žemėnaudą jau pasirinkus klasifikaciją, nekontroliuojamasis klasifikavimas gali netikti.

Taip pat svarbu atkreipti dėmesį, kad informacinių klasių spektrinės savybės keičiasi priklausomai nuo metų laiko ar palydovinių vaizdų darymo metu buvusių meteorologinių sąlygų. Todėl spektrinės informacinių klasių savybės negali būti automatiškai taikomos kitam palydoviniam vaizdui.

Tipinė nekontroliuojamojo klasifikavimo darbo seka prasideda nuo mažiausio ir didžiausio išskiriamų skirtingų kategorijų skaičiaus, kurį išskirs naudojamas algoritmas, nustatymo. Šie skaičiai gali būti nustatomi pagal analitiko turimas žinias apie tiriamą teritoriją arba pagal galutinio naudotojo poreikius, siekiant sudaryti tam tikrą žemės dangos klasių skaičių. Klasifikavimas prasideda nuo parinktų gardelių grupių, kurios laikomos klasterių centrais. Dažnai parenkama atsitiktinai siekiant užtikrinti, kad analitikas negalėtų paveikti parinkimo proceso, ir atsižvelgiant į tai, kad pasirinktos gardelės atspindėtų analizuojamoje teritorijoje esančias vertes.

Tada klasifikavimo algoritmas nustato atstumus tarp gardelių ir sudaro pradinis klasterių centrų įverčius, kuriuos leidžia analitiko nurodyti apribojimai. Klasę gali atitikti vienintelis taškas, vadinamas klasės centroidu, kuris gali būti laikomas tam tikros klasės gardelių klasterio centru, net jei daugelis klasifikavimo procedūrų ne visada jį apibūdina kaip tikslų klasterio centrą. Kol kas klases sudaro tik parinktos gardelės, parinktos kaip pradiniai klasės centroidų įvertinimai. Kitame etape visos likusios tiriamos teritorijos gardelės priskiriamos artimiausiam klasės centroidui.

Nors suklasifikuota jau visa teritorija, tačiau šis klasifikavimas sudaro tik apytikslį rezultatą, nes pradinio bandymo metu suformuotos klasės greičiausiai nebus optimalus klasių rinkinys ir gali dar neatitikti analitiko nurodytų apribojimų. Pradedant kitą žingsnį, algoritmas kiekvienai klasei nustato naujus centroidus, pridėdamas naujų gardelių, pradiniai centroidai nebetenka tikslumo. Tada visa teritorija vėl klasifikuojama, kiekvieną gardelę priskiriant artimiausiam centroidui. Ir vėl apskaičiuojami nauji centroidai. Jei nauji centroidai skiriasi nuo ankstesniame žingsnyje nustatytų, procesas kartojamas, kol klasės centroiduose neaptinkama reikšmingų pokyčių ir klasės atitinka visus analitiko nustatytus apribojimus.

Klasifikavimo procese analitikas paprastai nedalyvauja, todėl klasifikavimas objektyvus atsižvelgiant į analitiko pateiktus apribojimus. Be to, nekontroliuojamasis klasifikavimas identifikuoja natūralią struktūrą ta prasme, kad nustato vienodas elementų grupes, sudarančias skirtingas klases be išankstinių nuostatų dėl jų tapatybės ar išsidėstymo. Vis dėlto visas procesas negali būti laikomas visiškai objektyviu, nes analitikas priėmė sprendimus dėl tiriamų duomenų, naudojamo algoritmo, išskiriamų klasių skaičiaus ir (galbūt) klasių vienodumo ir išskirtinumo. Kiekvienas iš šių sprendimų daro įtaką galutinio produkto pobūdžiui ir tikslumui.

Gali būti daug skirtingų nekontroliuojamojo klasifikavimo procedūrų, tačiau dažniausiai jos grindžiamos čia aprašyta bendra strategija. Galimi pakeitimai siekiant pagerinti klasifikavimo greitį ir efektyvumą, tačiau šis procesas iš esmės yra klasifikavimas kartojant gardelių priskyrimą ir paskirstymą grupėms. Pagrindiniai bet kurio nekontroliuojamojo klasifikavimo algoritmo komponentai yra veiksmingi atstumo duomenų erdvėje matavimo, klasės centroidų identifikavimo ir klasių išskirtinumo tyrimo metodai. Kiekvienas iš šių užduočių atlikti yra daugybė skirtingų strategijų, kurių čia aprašyti nėra prasmės. Toliau išskirtas spektrines klases reikia priskirti informacinėms klasėms.

Automatiniam informacijos išfiltravimui iš palydovinių vaizdų naudojami įvairūs indeksai. Kiekvienas indeksas naudojamas tam tikrai žemės dangos klasei išryškinti, pvz., NDVI – norma-

lizuotas augalijos skirtumo indeksas; NDWI – normalizuotas vandens skirtumo indeksas; NBI – normalizuotas užstatytų teritorijų indeksas; NDSI – normalizuotas sniego skirtumo indeksas ir kt.

Sudarius visus reikalingus skirtingų laikotarpių, kuriuos planuojama lyginti, žemės dangos tipų žemėlapius, jie sutapdinami ir identifikuojami žemės dangos pokyčius. Paprastai identifikuojamas ne tik pats žemės dangos pokyčio faktas, bet ir tai, iš kokios į kokią žemės dangos klasę įvyko pokytis. Galimas ir atvirkščios variantas, kai sudarius ankstesnės datos žemės dangos žemėlapius, jie yra sutapdinami su naujesniais palydoviniais vaizdais ir iš karto yra identifikuojami žemės dangos pokyčiai, toliau yra vertinamas šių pokyčių nustatymo tikslumas, kuris bet kuriuo atveju priklauso, ar kokybiškai parengti pirminiai žemėlapiai ir pačių pokyčių išskyrimo proceso kokybės.

Išskyrus ir identifikavus žemės dangos pokyčius, galutinis produktas paprastai yra ne vien pačių pokyčių identifikavimas ir jų tendencijų nustatymas, bet gali būti pateikiamos ir prognozės, kokie žemės dangos pokyčiai laukia ateityje.

Toliau eina pats svarbiausias etapas – įvertinti ne tik pačią žemės dangos kaitą, bet nustatyti ir jos daromą poveikį ir pateikti rekomendacijas, kaip turėtų toliau vykti ar nevykti žemės dangos kaita, nes tyrimai vien dėl tyrimų rezultatų retai kada vertingi, svarbiausia, kokią galutinę naudą visuomenei jie gali atnešti. Tačiau tai jau nėra nuotolinių Žemės tyrimų objektas.

3.1.4. CORINE žemės dangos duomenys

Vienas iš ryškiausių žemės dangos kaitos stebėjimo pavyzdžių yra Europos Sąjungos vykdoma programa CORINE, kurią aptarsime plačiau. Ši programa įgyvendinama labai didelėje teritorijoje, šiuo metu net 39 šalyse. Iš dalies būtent dėl to ji yra gremėzdiška ir lėta. Duomenų surinkimas ir apibendrinimas užtrunka ilgai, metodologija nelanksti, tačiau kitos tokios kompleksinės ir ilgalaikės programos nėra.

Programa CORINE (angl. Co-ordination of Information on the Environment) pradėta įgyvendinti 1985 m. Iki 1990 m. buvo sukurta Europos aplinkos būklės informacinė sistema, sukurta ir europiniu lygiu patvirtinta nomenklatūra ir metodologijos. Kaip dalis visos programos CORINE įgyvendinama ir CORINE žemės dangos (angl. CORINE Land Cover, CLC) programa, kurios pagrindinis tikslas yra teikti informaciją apie fizines Žemės paviršiaus charakteristikas ir jo naudojimą. Informacijai išgauti pagrindinis informacijos šaltinis yra palydoviniai vaizdai. CORINE žemės dangos klasifikacijoje išskirtos žemės dangos klasės atsispindi ne tik žemės danga, šios klasės yra kaip žemės dangos ir žemės naudojimo mišinys, atspindintis esamą ar bent jau tuo metu, kai buvo kuriama klasifikacija, buvusį aktualų Europos kraštovaizdį.

CORINE žemės dangos kaitos analizei naudojami referenciniai metai yra 1990 m., 2000 m., 2006 m., 2012 m. ir 2018 m. žemės dangos klasifikacija susideda iš trijų lygių ir apima atitinkamai 5, 15 ir 44 klases. Klasifikacija sudaryta pagal pirmųjų programoje dalyvavusių šalių kraštovaizdžius, todėl geriausiai atspindi Viduržemio jūros ir centrinės Europos šalių teritorijas. Nors klasių pavadinimai liko nepakeisti, jų apibūdinimai gerokai keitėsi. Vis dėlto šiauriniai regionai nėra taip gerai atspindimi klasifikacijoje. Bet nors tokia klasifikacija ir netobula, kol kas neketinama jos keisti, siekiant išlaikyti beprecedentes duomenų eiles ir tyrimų tęstinumą.

Minimalus vienalytis kartografuojamas žemės dangos vienetas yra 25 ha arealas, minimalus kartografuojamo linijinio objekto plotis yra 100 m. Identifikuojamas mažiausias žemės dangos pokytis yra 5 ha. žemės dangos kaitą identifikuojantys žemėlapiai yra didesnės skiriamosios gebos nei statiniai žemės dangos žemėlapiai. Reikia atkreipti dėmesį, kad metodologija sudaryta 9-ajame dešimtmetyje, kai techninės duomenų apdorojimo galimybės buvo kur kas mažesnės nei dabar, o tiriama teritorija buvo labai didelė.

Kiekviena šalis sudaro savo žemės dangos žemėlapius, dažniausiai vizualinio dešifravimo būdu, tik kelios valstybės naudoja pusiau automatinį palydovinių vaizdų dešifravimą. Vėliau

šiuos nacionalinius duomenų sluoksnius į vieną duomenų bazę integruoja Europos aplinkos agentūra.

Technologinis progresas padarė poveikį CORINE žemės dangos kartografavimui. 1990 m. CORINE žemės dangos sluoksnis buvo sudarytas išspausdintų palydovinių vaizdų rankinio dešifravimo ant plastikinių plėvelių būdu, vėliau jas skaitmenizuojant ir priskiriant atributinius duomenis. Nuo 2000 m. kompiuterinė fotointerpretacija tapo pagrindiniu įrankiu CORINE žemės dangos žemėlapiams sudaryti, tai lemia nuolat didėjančios GIS programinės įrangos galimybės ir prieinamumas, vis galingesnė kompiuterinė technika ir skaitmeninių erdvinų duomenų skaičius.

Didžioji dalis šalių CORINE žemės dangos žemėlapius sudarinėja vektorizuodamos poligonus ekrane, o anksčiau išvardyti papildomi duomenys naudojami žemės dangos patikslinimui. Vis daugiau šalių turi pakankamai daug ir geros kokybės duomenų *in situ* ir nuotolinių tyrimų duomenų apdorojimo galimybių, kad savo CORINE žemės dangos sluoksnius sudarytų sujungdamos esamus duomenų rinkinius su palydoviniais duomenimis, kuriuos vėliau dar peržiūri analitikai (3.1.2. lentelė). Toks sluoksnių kūrimas reikalauja geresnių analitinių žemės dangos klasių aprašymų.

3.1.2. lentelė. Skirtingų metų CORINE žemės dangos žemėlapių sudarymo palyginimas įvairiais aspektais.

	1990 m.	2000 m.	2006 m.	2012 m.	2018 m.
Palydovai, kurių duomenys naudoti	<i>Landsat 5 MSS/TM</i>	<i>Landsat 7 ETM</i>	<i>SPOT 4 ir 5 ir IRS P6 LISS III</i>	<i>IRS P6 LISS III ir RapidEye</i>	<i>Sentinel 2 ir Landsat 8, kur trūko duomenų</i>
Laikotarpis	1986–1998 m.	2000 +/- 1 metai	2006 +/- 1 metai	2011–2012 m.	2017–2018 m.
Palydovo duomenų geometrinis tikslumas	≤ 50 m	≤ 25 m	≤ 25 m	≤ 25 m	≤ 10 m (<i>Sentinel 2</i>)
Mažiausias kartografuojamo objekto plotas / plotis	25 ha / 100 m	25 ha / 100 m	25 ha / 100 m	25 ha / 100 m	25 ha / 100 m
Žemės dangos sluoksnio geometrinis tikslumas	100 m	> 100 m	> 100 m	> 100 m	> 100 m
Žemės dangos sluoksnio tematinis tikslumas	≥ 85 % (gali būti, kad nepasiektas)	≥ 85 % (pasiektas)	≥ 85 %	≥ 85 % (greičiausiai pasiektas)	≥ 85 %
Žemės dangos kaitos žemėlapis	Nevykdytas	Ribų pokytis min. 100 m; esamų poligonų pokytis ≥ 5 ha; naujų poligonų ≥ 25 ha	Ribų pokytis min. 100 m; visi poligonų pokyčiai ≥ 5 ha	Ribų pokytis min. 100 m; visi poligonų pokyčiai ≥ 5 ha	Ribų pokytis min. 100 m; visi poligonų pokyčiai ≥ 5 ha

	1990 m.	2000 m.	2006 m.	2012 m.	2018 m.
Žemės dangos kaitos sluoksnio tematinis tikslumas	-	netikrintas	≥ 85 %	≥ 85 %	≥ 85 %
Pagamavimo laikas	10 metų	4 metai	3 metai	2 metai	1,5 metų
Dokumentacija	Nepilni metaduomenys	Standartiniai metaduomenys	Standartiniai metaduomenys	Standartiniai metaduomenys	Standartiniai metaduomenys
Duomenų prieinamumas	Neaiški viešinio politika	Iš anksto suderinta viešinimo politika	Laisvas priėjimas prie duomenų	Laisvas priėjimas prie duomenų	Laisvas priėjimas prie duomenų
Dalyvaujančių šalių skaičius	26 (plius 1 pavėluotai)	30 (plius 5 pavėluotai)	38	39	39

CORINE žemės dangos kaitos sluoksniai pirmą kartą sudaryti 2000 m., o nuo 2006 m. tapo pagrindiniu žemės dangos programos CORINE produktu. žemės dangos kaitos duomenys kuriami kaip pirminiai duomenys pirmiausia kartografuojant pokyčius, vizualiai lyginant ir vertinant Žemės stebėjimo duomenis. Vizualinis skirtingų laikotarpių duomenų lyginimas vyksta palydovinius vaizdus tapdinant su senesniais statiniais (be pokyčių) žemės dangos vektoriniais duomenimis ir vektorizuojant pirmiausiai pakitusius žemės dangos poligonus. Analitikas suteikia du žemės dangos kodus kiekvienam pakitusiam poligonui: kodas SENAS ir kodas NAUJAS, kiekvienas su atskira atributine medžiaga. Šie kodai atspindi poligono žemėnaudą dviem skirtingais laikotarpiais. Dėl vėlesnės generalizacijos sudarant statinius žemės dangos sluoksnius žemėnauda SENAS ir žemėnauda NAUJAS, ne visos pokyčio kodų poros gali atsispindėti galutiniame statiniame žemės dangos žemėlapyje. Proceso pabaigoje žemės dangos-kaita SENA-NAUJA poligonai sujungiami su ankstesnės datos poligonais, kad būtų gauta naujesnės datos poligonų duomenų bazė:

Žemėnauda-NAUJA = Žemėnauda-SENA (+) žemės dangos-kaita SENA-NAUJA

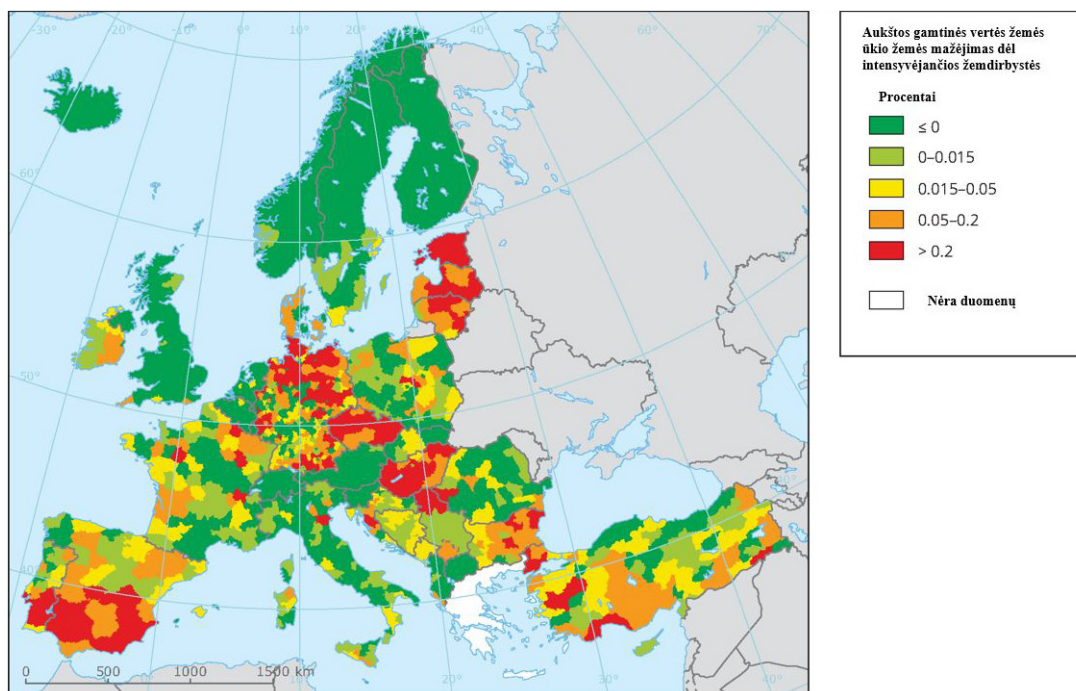
Kai (+) reiškia Žemėnauda-SENA ir žemės dangos-kaita SENA-NAUJA yra sutapdinama; pirmiausia žemės dangos-kaita poligonuose kodas SENAS pakeičiamas į kodą NAUJAS ir galiausiai greta esantys poligonai su vienodais kodais yra sujungiami. Prieš nubrėžiant kaitos poligonus, reikia atlikti duomenų tematinę/geometrinę korekciją, kad būtų išvengta klaidų keičiant iš Žemėnauda-SENA į Žemėnauda-NAUJA.

Nepaisant išpūdingo technikos progreso pusiau automatinis žemės dangos kaitos sluoksnių žemės dangos programoje CORINE kūrimas yra neįprastas net progresyviose šalyse, po pusiau automatinio sukūrimo analitikai duomenis tikrina ir koreguoja.

Kiekviena valstybė, dalyvaujanti programoje CORINE, savo šalių kartografuoja savarankiškai. Vėliau duomenų sluoksniai sujungiami į vientisą sistemą. Duomenų integracijos metu duomenys harmonizuojami palei valstybių sienas. Atitaikomi vienalyčiai poligonai ir sutapatinamos jų ribos, pakartotinai analizuojant palydovinius vaizdus 2 km pločio juostose šalia valstybių sienų.

Apibendrinant CORINE žemės dangos stebėsenos sistemą galima teigti, kad pagrindiniai jos plusai yra standartizuota itin didelę teritoriją apimanti žemės dangos kaitos stebėsenos

sistema, turinti ilgą duomenų eilę, todėl leidžianti atsekti žemės dangos pokyčius nuo 1990 metų. Programoje dalyvauja net 39 valstybės, tai užtikrina dideles bendrų tendencijų analizės galimybes (3.1.4 pav.).



3.1.4. pav. Aukštos gamtinės vertės žemės ūkio žemės mažėjimas dėl intensyvėjančios žemdirbystės 2006–2012 m. procentais (pagal EEA, 2017b).

CORINE žemės dangos duomenų sluoksniai kuriami arba tikrinami duomenų analitikų, o ne automatiškai jungiant du sluoksnius, ir tai, kol nepasiektas dar didesnis technologinis šuolis, leidžia užtikrinti duomenų patikimumą. Vis dėlto CORINE turi ir nemažai trūkumų. Pirmiausia tai netolygus biogeografinių regionų atspindėjimas klasifikacijoje, kurioje detaliau atspindimi pietiniai ir centrinės Europos regionai, taip pat kombinuota žemės dangos ir žemės naudojimo klasifikacija kelia sunkumų nustatant kaitą, kai keičiasi tik žemės danga, o naudojimas nesikeičia, arba atvirkščiai. Nelanksti klasifikacija neleidžia įterpti naujų klasių, pvz., elektros plantacijų. Dėl metodikoje nustatytų didelių mažiausių kartografuojamų vienetų, CORINE žemės dangos sluoksniai sunkiai pritaikoma nacionaliniu lygmeniu, tokio dydžio gardelės nepritaikomos miestų vystymosi analizei. CORINE žemės dangos sluoksnių gamybai reikia daug laiko ir žmogiškųjų bei finansinių išteklių ir neretai dubliuoja nacionalinius kartografavimo darbus. Todėl norint ir toliau išlaikyti šią programą ir jos duomenų eiles, reikės ieškoti efektyvesnių technologinių sprendimų, galbūt CORINE duomenų sluoksnių kūrimas iš jau turimų nacionalinių duomenų, t. y. metodas iš apačios į viršų, galėtų būti palankiausias sprendimas, sumažinantis sąnaudas.

Vis dėlto, nepaisant šių trūkumų, CORINE žemės dangos analizės teikiami duomenys leidžia stebėti bendras Europos žemės naudojimo kitimo tendencijas, numatyti ateities pokyčius, planuoti turimų išteklių racionalų naudojimą, kelti aplinkosauginius tikslus ir stebėti jų įgyvendinimą. Juk nuo žemės naudojimo sistemos priklauso ne tik apsirūpinimas maistu, gyvulių pašaru, audinių pluoštais, bet ir statybinėmis medžiagomis, bioenergtikos potencialo nustatymo ir naudojimo ir daugybės kitų produktų gamyba. Taip pat reikia nepamiršti, kad nuo to, kaip naudojama žemė, priklauso ir mūsų ekologinio gyvenimo sąlygos, kultūros paveldo išlaikymas ir turizmo potencialas.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Paaiškinkite žemės dangos kaitos stebėsenos problematiką.
- Apibūdinkite skaitmeninį palydovinių vaizdų klasifikavimo procesą.
- Paaiškinkite vizualinio dešifravimo procesą. Išskirkite privalumus ir trūkumus.
- Paaiškinkite kontroliuojamojo klasifikavimo procesą. Išskirkite privalumus ir trūkumus;
- Paaiškinkite nekontroliuojamojo klasifikavimo procesą. Išskirkite privalumus ir trūkumus.
- Apibūdinkite CORINE žemės dangos stebėsenos sistemos tikslą. Išskirkite pagrindinius privalumus ir trūkumus.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Butt, A., Shabbir R., Ahmad S. S., Aziz N. (2015). Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18, 2, 251-259.
- Canada Centre for Remote Sensing (2009). Fundamentals of Remote sensing [žiūrėta 2019-08-06]. Prieiga internete: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- EEA (2017a). *Landscapes in transition – An account of 25 years of land cover change in Europe* [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: <https://www.eea.europa.eu/publications/landscapes-in-transition>
- EEA (2017b). *Loss of HNV farmland due to agricultural intensification per NUTS3* [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/loss-of-hnv-farmland-due/>
- ESA (2012). *Global Monitoring for Environment and Security (GMES)* [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2012/Global_Monitoring_for_Environment_and_Security_GMES
- di Gregorio, A., Jansen L. J. M. (2000). *Land cover classification system (LCCS)* [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: <http://www.fao.org/3/x0596e/x0596e00.htm>
- Kosztra, B., Arnold S. (2014). *Proposal for enhancement of CLC nomenclature guidelines*. [žiūrėta 2020-01-08]. Prieiga internete: https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/CLC2006_Nomenclature_illustrated_guide_enhanced_final.pdf
- Land Copernicus (2018). *Corine Land Cover 2018* [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=metadata>
- Land Copernicus (2020). *CORINE Land Cover* [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Lietuvos Respublikos žemės įstatymas. Nr. IX-1983, 2004-01-27, Žin., 2004, Nr. 28-868. <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.CC10C5274343/asr>
- SEOS project (2013). *Classification*. [žiūrėta 2020-01-06]. Prieiga internete: <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-co6-po3.html>

3.2. ĮVADAS Į PALYDOVINIŲ TECHNOLOGIJŲ TAIKYMĄ ŽEMĖS ŪKYJE

Žvelgiant į istoriją, pirmieji moksliniai tyrimai, susiję su nuotolinių tyrimų metodų taikymu žemės ūkyje, pradėti JAV XX a. 5–6 dešimtmečiuose (MacDonald, 1984). Tuo metu didelių pasėlių plotų bei augalijos streso nustatymui pradėtas skirti itin didelis dėmesys, vis dėlto pirmasis didesnis proveržis siejamas su 1972 m., kada į orbitą buvo paleistas palydovas ERTS-1. Pirmieji ERTS-1, vėliau pervadinto į *Landsat*, misijos palydovai paskatino intensyvius nuotolinius augalinės žemės dangos tyrimus, palydovinius duomenis taikyti įvairiose gamtinės aplinkos pažinimo ir ūkio srityse. Tyrimų pradžia sietina su augalinės dangos ir jos sezoniniais stebėjimais, augmenijos monitoringu, fenologija Šiaurės Amerikos didžiosiose lygumose (Rouse ir kt., 1974). Vykdytų mokslinių tyrimų ir eksperimentų metu mokslininkai pastebėjo, kad naudojant palydovinių vaizdų spektrinę (iš palydovų daugiaspektrių fotografavimo kamerų) informaciją įmanoma nusakyti pagrindines augalinės dangos biofizinės charakteristikas. Taikant tuo metu jau turimas augalų fiziologijos ir spektroskopijos žinias (pavyzdžiui, kad augalų chlorofilo sugerties spektras rodo, jog chlorofilas intensyviai sugeria raudonusius (620–700 nm), regimosios šviesos spindulius, o kitų, pavyzdžiui, artimojo infraraudonojo spektro, nesugeria beveik visai (išsklaido arba atspindi)), sukurti pirmieji spektriniai rodikliai, leidę identifikuoti augmenijos dangą, perteikti jos savybes (pavyzdžiui, chlorofilo kiekį, jo koncentraciją) pašalinant Saulės zenito kampo skirtumus išilgai skirtingų platumų (Rouse ir kt., 1974; Tucker ir kt., 1979). Šie tyrimai padėjo spektrinių rodiklių metodologijos ir tolimesnių nuotolinių Žemės paviršiaus tyrimų, susijusių su daugiaspektre fotografija, paviršių ir žemės dangos savybių analize, galiausiai šių tyrimų taikymu žemės ūkyje, pagrindą.

Šiandien palydovų spektriniai palydoviniai vaizdai ir spektriniai rodikliai (RVI, GNDVI, NDVI, TDVI, LAI, MCARI, SAVI, OSAVI, NDWI ir daugelis kitų) taikomi augalinei biomasei, piktžolėms pasėliuose identifikuoti, pasėliams bendrai, ligoms ir kenkėjams žemės ūkio kultūrose, jų paveiktiems plotams nustatyti, augalų vandens streso, derliaus prognozavimo, dirvožemio savybių (uždruskėjimo lygio ir drėgmės kiekio) nustatymo ir kitose žemės ūkiui svarbiose srityse. Tarp atviros prieigos palydovų, turinčių tokius jutiklius, paminėtini ESA programos „Copernicus“ palydovai *Sentinel*, taip pat NASA programos palydovai *Landsat* (3.2.1. pav.). Ir vieni, ir kiti plačiai naudojami nuotoliniuose Žemės tyrimuose.

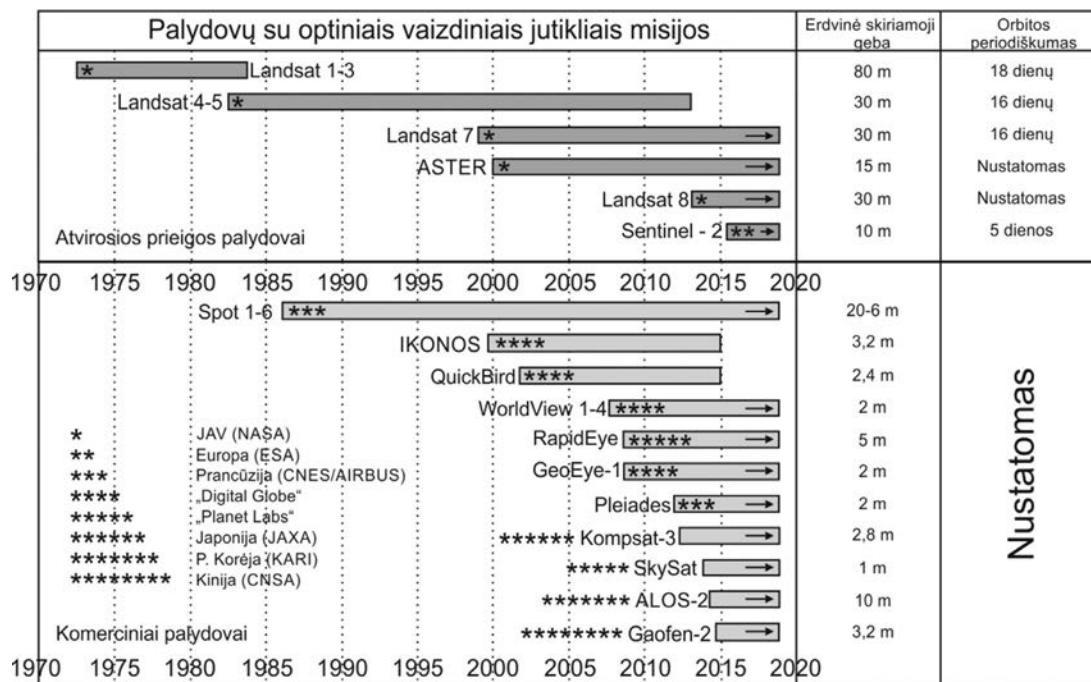
Antrasis palydovinių technologijų taikymo žemės ūkyje šuolis siejamas su aktyviųjų jutiklių atsiradimu ir jų perkėlimu į palydovus. Pirmąjį sintetinės apertūros radarą (SAR) ESA į orbitą paleido 1991 m. su erdvėlaiviu ERS-1.

Aktyviųjų jutiklių, tokių kaip SAR, pagrindinis privalumas lyginant su optiniais prietaisais (pavyzdžiui, *Sentinel 2* daugiaspektri skeneriu) yra tas, kad jutiklio siunčiamas signalas prasišverbia pro debesų dangą, duomenims mažai įtakos turi ir kitos atmosferos savybės, tokios kaip krituliai, apšvietimas, paros laikas, aerozolių kiekis pažemio atmosferoje, elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumas dėl sezoniskumo ir geografinės platumos.

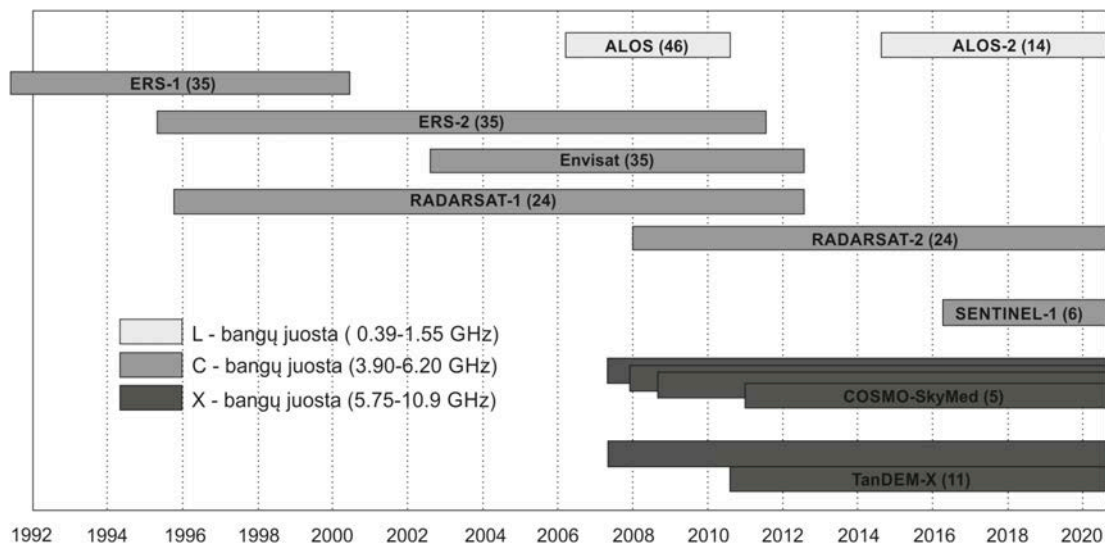
Apskritai SAR palydoviniai jutikliai ir juos skraidinančios sistemos taikomos žemės ūkio pasėlių riboms, augalijos tipui ir pasėliuose auginamoms kultūroms identifikuoti, fenologiniuose tyrimuose, taip pat dirvožemio drėgmei vertinti, derliui prognozuoti.

Tarp atvirosios prieigos tokio tipo palydovų paminėtina ESA programa „Copernicus“ ir *Sentinel 1A*, *Sentinel 1B*, Kanados kosmoso agentūros RADARSAT 1 ir 2 palydovai. Poliarinėmis orbitomis apie Žemę skrieja ir kiti SAR palydovai, kurių šiuo metu priskaičiuojama iki 6 (3.2.2. pav.).

Vertinant palydovinių technologijų galimybę pritaikyti žemės ūkyje, atskirai paminėtinos ir regimojo spektro didelės skiriamosios gebos palydovinės nuotraukos, kurios gali būti taikomos gyvulininkystėje, stambaus ploto teritorijose skaičiuojant gyvulių skaičių, vertinant jų judėjimo išsidėstymo ypatumus.



3.2.1. pav. Palydovų su optiniais vaizdiniais jutkliais misijos (pagal Vos ir kt., 2019).



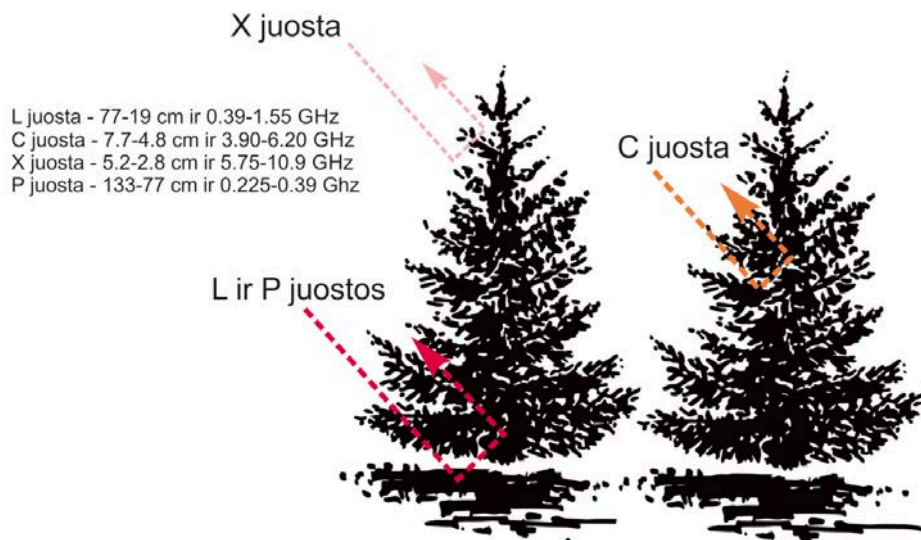
3.2.2. pav. Aktyviųjų SAR jutklių misijos (pagal UNAVCO, 2019).

3.2.1. Aktyviųjų jutklių palydovinių duomenų taikymas žemės ūkyje

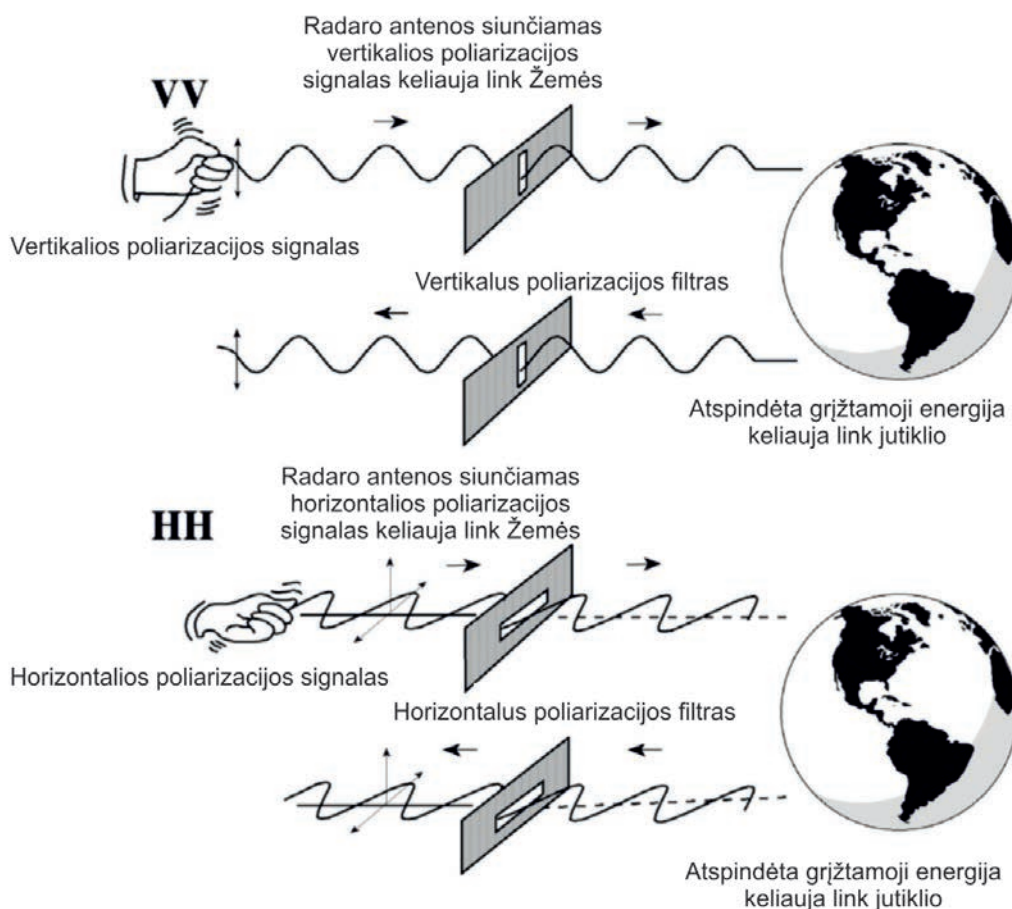
Sintetinės apertūros radarai (SAR) pasižymi skirtingomis techninėmis savybėmis, nuo kurių ir priklauso jų taikymo sritys, potencialas, gaunamų rezultatų tikslumas. Šios savybės apibūdinamos per SAR prietaiso spindulių šaltinio bangos ilgį, poliarizacijos pobūdį, spindulių sklaidimo kampą ir skiriamąją gebą. Augalijos tyrimuose ir palydovuose, kuriuose naudojami SAR jutkliai, naudojamos trijų tipų mikrobangų spektro juostos:

- 1) 77–19 cm ir 0,39–1,55 GHz (L juosta);
- 2) 7,7–4,8 cm ir 3,90–6,20 GHz (C juosta);
- 3) 5,2–2,8 cm ir 5,75–10,9 GHz (X juosta).

Konkrečių palydovų naudojamos spektro juostos pateikiamos 3.2.2. paveiksle. Priklausomai nuo SAR jutiklių bangų dažnio ir ilgio, skiriasi jų skvarbumo savybės (3.2.3. pav.). Atviros priegios *Sentinel 1* (ESA palydovas) ir RADARSAT 2 (Kanados kosmoso agentūros palydovas) palydovų SAR jutikliai naudoja C juostą.



3.2.3. pav. Skirtingų SAR jutiklių naudojamų bangų skvarba augalinėje dangoje (pagal Persson, 2014).



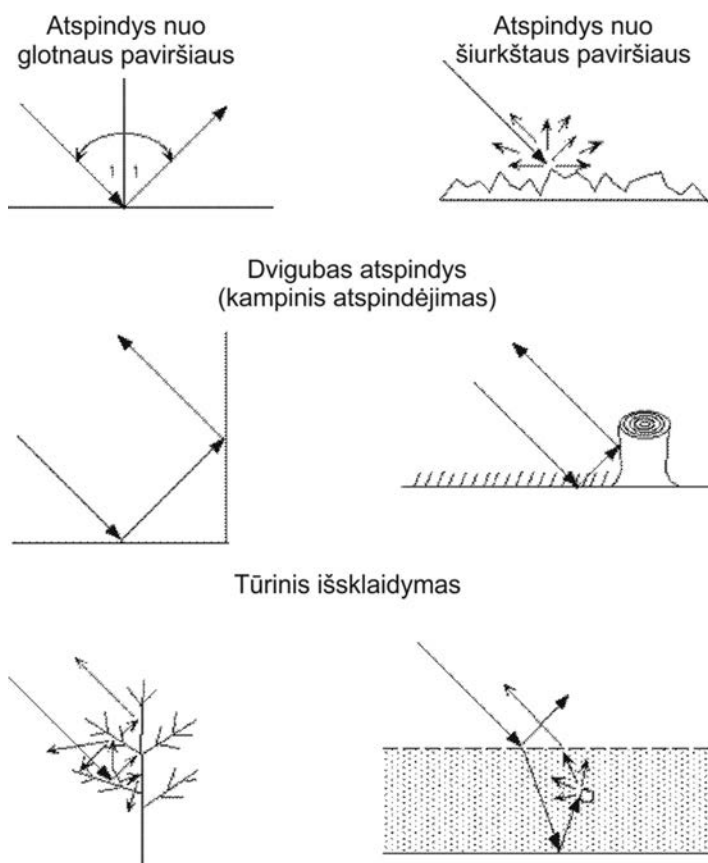
3.2.4. pav. SAR jutiklio siunčiamų ir registruojamų bangų poliarizacijos pobūdis (pagal Jensen, 2007).

Svarbi SAR duomenų savybė yra generuojamos ir gaunamos spinduliuotės poliarizacijos pobūdis (3.2.4. pav.). Poliarizacija apibrėžiama kaip skersinių bangų savybė, apibūdinanti virpesių orientaciją plokštumoje, statmenoje sklidimo kryptčiai. Priklausomai nuo spinduliuojamų ir registruojamų grįžtančių bangų poliarizacijos laipsnio SAR palydovų duomenų rinkiniuose skiriami VV (vertikaliai išsiunčiami ir vertikaliai priimami) bei HH (horizontaliai išsiunčiami ir horizontaliai priimami) poliarizacijos duomenys, taip pat ir mišrūs poliarizacijos variantai (3.2.4. pav.). Palydovas *Sentinel 1* (1A ir 1B) generuoja HH arba VV, bei dvigubos (HH + HV ar VV + VH) poliarizacijos duomenų rinkinius.

SAR signalas nuo lygaus paviršiaus (pvz., nuo vandens) gali atsispindėti kaip nuo veidrodžio, nuo medžių ar pastatų SAR signalas gali būti atspindėtas du kartus, o medžių lajoje vyksta tūrinis siunčiamo signalo išsklaidymas (3.2.5. pav.). Didelį poveikį SAR signalo atgalinei sklaidai turi ir stebimo paviršiaus šiurkštumas (3.2.6. pav.).

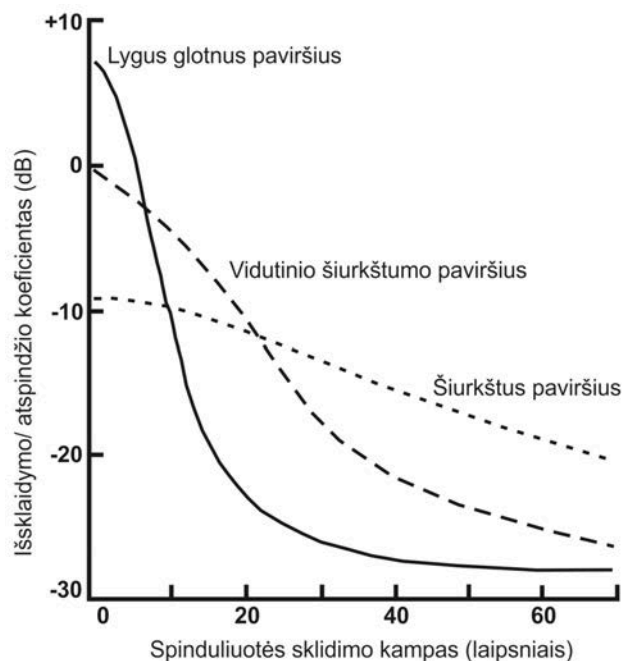
Įvairių SAR palydovų yra ir skirtingi darbiniai režimai, nuo to priklauso ir jų generuojamų duomenų skiriamoji geba. Palydovai *Sentinel 1* (1A ir 1B) turi 4 darbinis režimus. Didžiausia skiriamąja geba pasižymi SM režimas. Jo skiriamoji geba yra 5x5 m, o žvalgos juostos aprėptis – 80 km.

SAR palydovai *Sentinel 1A* ir *Sentinel 1B* skrieja artimomis poliarinėmis orbitomis, todėl iš jų gaunamų duomenų periodiškumas yra 6 paros. Dėl palyginti dažno periodiškumo, taip pat jutiklių savybių, leidžiančių eliminuoti atmosferos skaidrumo, debesuotumo, kritulių ir kt. trikdžius, ir dėl aukščiau išvardytų savybių SAR palydoviniai duomenys turi platų taikymo potencialą, įskaitant ir įvairias žemės ūkio sritis. Viena jų – auginamų žemės ūkio kultūrų pasėlių ir jų ribų identifikavimas. Tokia užduotis sprendžiama kombinuojant periodinius palydovinius duomenis su augalų fenologiniais išsklaidomos šviesos modeliais.



3.2.5. pav. SAR jutiklio spinduliuotės poliarizacijos laipsnio pokytis priklausomai nuo paviršiaus savybių.

3.2.6. pav. SAR spinduliuotės priklausomybė nuo spinduliuotės sklidimo kampo ir paviršiaus savybių bei grįžtančio signalo stiprumo.

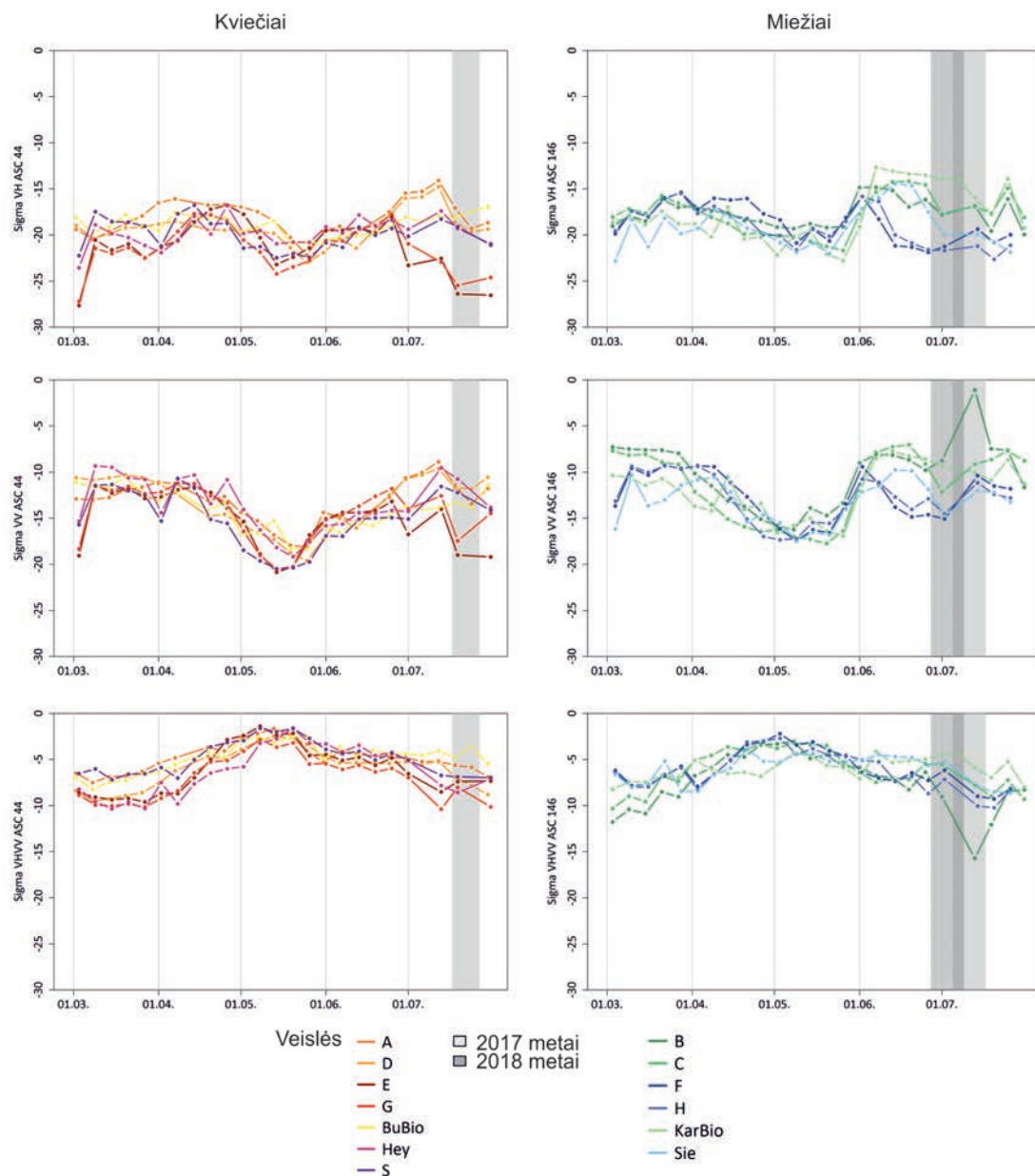


Žinant konkrečių žemės ūkio kultūrų fenologinius ir fiziologinius ypatumus, konkretiems jų augimo tarpsniams būdingas lapų optines savybes (atspindėtos spinduliuotės konkrečiose elektromagnetinės spinduliuotės spektro juostose kiekį), pasireiškiančias jutiklių veikimo diapazone (konkrečiame mikrobangų ruože, kurį naudoja palydovų jutikliai) bei naudojant kombinuotus aktyvios vegetacijos laikotarpio SAR palydovinius duomenis, taip pat nesant augalų augimo sutrikimų (pasireiškiančių dėl sausrų, potvynių, šalnų, kenkėjų, ligų ir kt. išorinių abiotinių ir biotinių faktorių), įmanoma identifikuoti žemės ūkyje auginamas kultūras (3.2.7. pav.) kiekviename lauke atskirai bei tiksliai įvertinti ir nustatyti jų pasėlių ribas. Žemiau esančiame paveiksle (3.2.8. pav. a) pateikiamas pavyzdys apie žieminių kviečių ir rapsų pasėlius, išskirtus naudojant palydovo *Sentinel 1* duomenis (Zhou ir kt., 2017).

Vis dėlto SAR ir optinių palydovinių duomenų sutapdinimas leidžia pasiekti dar geresnių rezultatų (3.2.8. pav. b). Tokie modeliai apima periodiškus aktyviųjų jutiklių fiksuojamus duomenis, kurie sutapdinami su augalijos rodiklių sluoksniais, kurie sudaromi naudojant optinių pasyviųjų daugiaspektrių jutiklių duomenis.

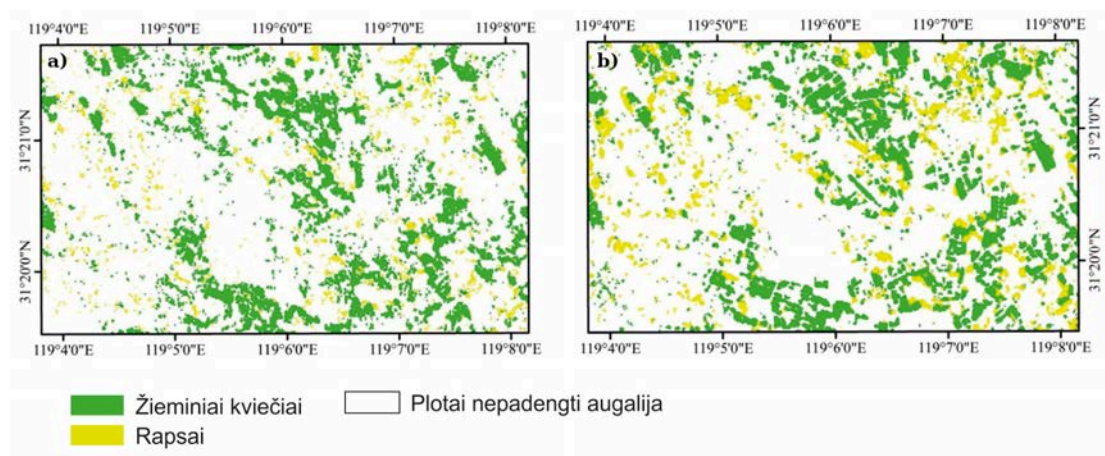
Dirvožemio dangos savybių tyrimai – kita itin aktuali bei plačiai vystoma žemės ūkio nuotolinių tyrimų sritis. Palydoviniai SAR jutikliai naudojami dirvožemio drėgmei tirti. Yra bandymų SAR duomenis pritaikyti ir kitoms dirvožemio dangos savybėms (uždruskėjimo laipsniui, organinės medžiagos kiekiui, pH rodikliui, kalcio karbonatų, molio mineralų, organinės anglies kiekiui) nustatyti. Tai pavieniai tyrimai, kurių rezultatai publikuoti mokslo leidiniuose.

Kitokia situacija yra su dirvožemio dangos drėgme. Yra žinoma, kad SAR jutiklių grįžtamąjį signalą nuo dirvožemio lemia tiek jutiklių (bangos ilgis, poliarizacijos pobūdis, spinduliuotės sklidimo kampas), tiek paties dirvožemio savybės, kurios apibūdinamos keletu dydžių, tai paviršiaus šiurkštumas ir dielektrinė skvarba. Žemės santykinė dielektrinė skvarba tam tikroje vietovėje tiesiogiai priklauso nuo dirvožemio sudėties, dalelių dydžio ir elektromagnetinių bangų dažnio. Kadangi dirvožemis yra sudarytas iš mineralinių ir/arba organinių medžiagų, surištų vandens ir oro, tai kuo didesnis vandens kiekis dirvožemyje, tuo didesnė jo santykinė dielektrinė skvarba (3.2.9. pav.). Remiantis įvardijamomis savybėmis bendrais bruožais įmanoma nusakyti santykinę dirvožemio drėgmę taikant skirtingų SAR bangų ilgių jutiklius.



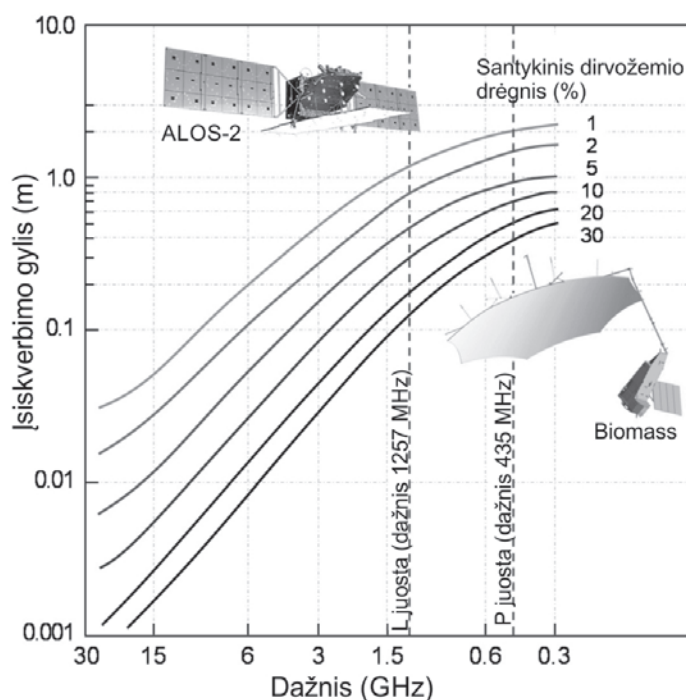
3.2.7. pav. Kviečių ir miežių išsklaidytas SAR palydovo signalas vegetacinio 2017–2018 m. periodo metu identifikuojant žemės ūkio kultūras iš SAR duomenų (Harfenmeister ir kt., 2019).

Dirvožemio drėgnumas įvairiuose mokslo darbuose nustatinėtas su visomis palydovinėse sistemose esančiomis SAR jutiklių juostomis, tai yra X (Baghdadi, Aubert, ir Zribi, 2012; Kseneman, Gleich, 2012; Zribi ir kt., 2012), C (Jacome ir kt., 2013; Şeker ir kt., 2013), L (Balenzano ir kt., 2013; Paloscia, Pettinato ir Santi, 2012) bangų ilgių diapazonuose veikiančios juostos. Pati dirvožemio drėgnumo tyrimų eiga – duomenų normalizavimas, paruošimas ir korektūra, tačiau į skaičiavimus turi būti įtraukti ir palydovo signalo sklidimo kampo duomenys, paviršiaus šiurkštumo koeficientas ir paviršiaus skaitmeninio reljefo modelio duomenys. Modelio tikslumas gerokai padidinamas į skaičiavimus įtraukiant empirinius drėgmės matavimų duomenis.



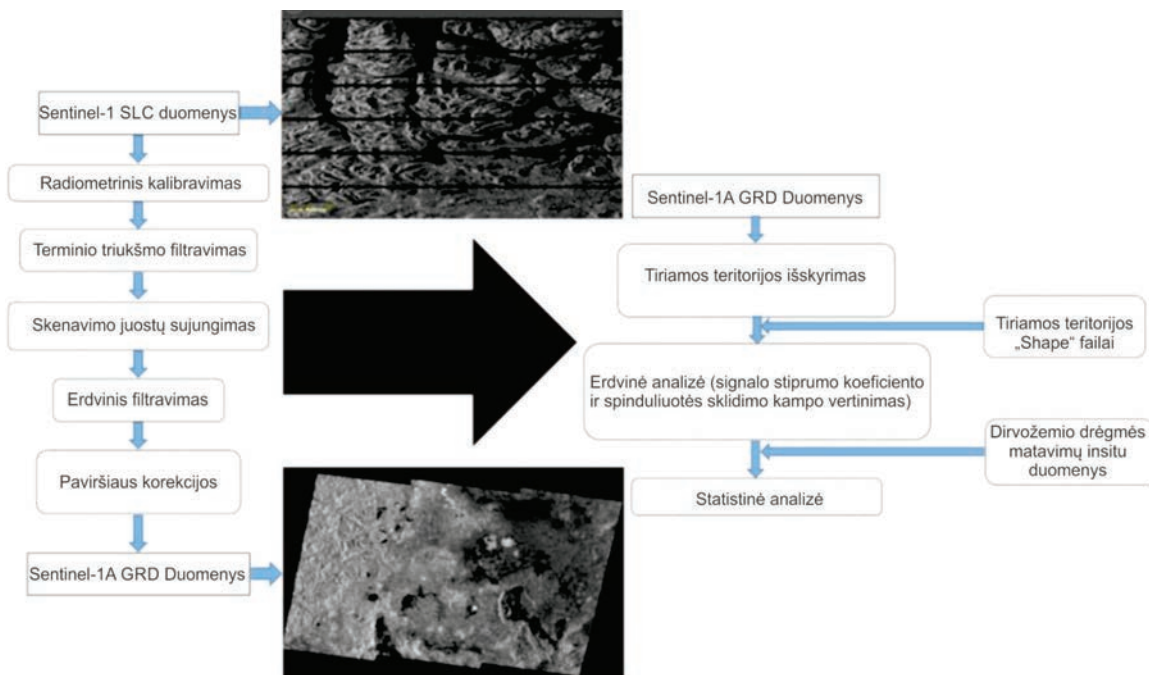
3.2.8. pav. Žieminųjų kviečių ir rapsų pasėliai išskirti naudojant: a) tik SAR duomenis; b) kombinuojant SAR ir optinius spektrinius palydovinius vaizdus (pagal Zhou ir kt., 2017).

3.2.9. pav. SAR spinduliuotės skvarbos į dirvožemio viršutinį horizontą funkcija priklausomai nuo spinduliuotės dažnio (Koyama ir kt., 2017).

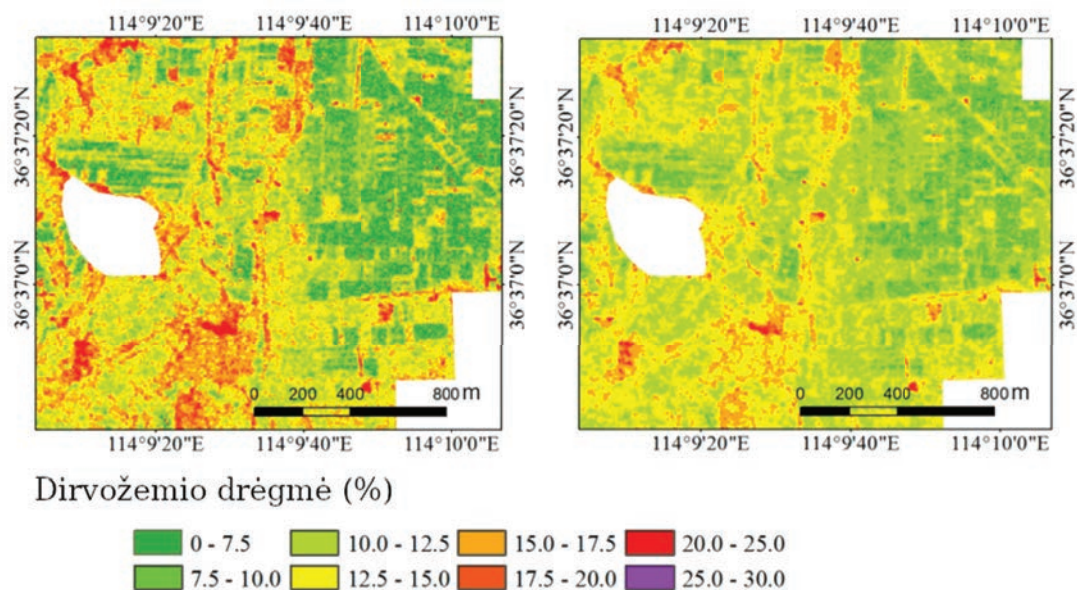


3.2.10. paveiksle pateikta schema, kaip apdoroti SAR duomenis ir kartografuoti dirvožemio drėgnumo erdvinius ypatumus. Tačiau tam reikia daug laiko ir ne tik pagrindinių, bet ir papildomų duomenų, tokių kaip dirvožemio dangos šiurkštumo rodikliai. Papildomų duomenų poreikį galima išspręsti, kai naudojami ne vieno, o kelių juostų sujungti SAR palydoviniai duomenys, kurių spinduliuotės poliarizacijos pobūdis yra vienodas (Dubois ir kt., 1995; Zhang ir kt., 2015).

Apibendrinant daugiamečių mokslinių tyrimų patirtį, galima teigti, kad optimaliausia dirvožemio drėgmę tirti naudojant C juostos SAR jutiklį, kurio stebėjimo kampas 7–17 laipsnių. Laikantis šių sąlygų sumažinamas dirvožemio šiurkštumo efektas, išlaikomas jutiklio spinduliuotės jautrumas drėgmei, sumažinama augmenijos įtaka duomenims (3.2.11. pav.).



3.2.10. pav. Dirvožemio drėgmės analizės seka naudojant SAR duomenis (Sekertkin ir kt., 2018).



3.2.11. pav. Wanniano (Kinija) teritorijose esančių eksperimentinių plotų dirvožemio drėgmės žemėlapiai gauti naudojant TerraSAR-X ir Radarsat-2 palydovų SAR duomenis. Kairėje pusėje – žemėlapis gautas duomenų analizei taikant atraminių vektorių metodą; dešinėje – žemėlapis gautas duomenų analizei taikant modifikuotą Dubois modelį (Zhang ir kt., 2016).

3.2.2. Pasyviųjų daugiaspektrių jutiklių duomenų taikymas žemės ūkyje

Pasyvieji Žemės stebėjimo palydovų jutikliai ir juos skraidinantys palydovai dažniausiai ap- rūpinami daugiaspektrių radiometrų sistemomis. Tokių jutiklių sistemose išdėstomi siauros žvalgos zonos jutikliai, kurie palydovui skrendant virš Žemės paviršiaus skenuotų, formuotų ir generuotų dvimatį paviršiaus vaizdą įvairiose apibrėžtose elektromagnetinės spinduliuotės šviesos spektro juostose. Spekrinių vaizdų duomenims gauti skenavimo procesas, priklausomai nuo pačių jutiklių tipo, gali būti vykdomas dviem būdais: skenuojant Žemės paviršių skersai palydovo judėjimo trajektorijos arba skenuojant išilgai palydovo judėjimo trajektorijos. Naujausi Žemei stebėti skirti moksliniai palydovai, tokie kaip *Landsat 8*, *Sentinel 2* ir jų sistemos, veikia išilginio skenavimo principu, generuodami vaizdus regimojo, artimojo infraraudonojo (NIR), trumpabangės infraraudonosios (SWIR) ir šiluminės infraraudonosios (TIR) spinduliuotės diapazonuose.

Optinių daugiaspektrių palydovų taikymas skirtingose tyrimų bei Žemės stebėjimo sferose yra nulemtas stebimų reiškinių ar objektų savybių (fizikinių, geografinių ir cheminių), išorinių sąlygų komplekso (atmosferos skaidrumo, debesuotumo, paros laiko ir kt.) bei techninių palydovų parametrų, svarbiausi kurių yra:

- spektrinė skiriamoji geba;
- erdvinė skiriamoji geba;
- spektrinis veikimo diapazonas;
- Žemės paviršiaus aprėpties plotas;
- periodiškumas.

Palydovinių daugiaspektrių vaizdų taikymo žemės ūkyje galimybės ir potencialas priklauso ir nuo įvardytų technologinių palydovų jutiklių savybių. Sprendžiant augalijos ir pasėlių kartografavimo, fenologijos, pagrindinių mitybos elementų stygiaus, augalų bendrųjų fiziologinių parametrų, drėgmės kiekio nustatymo, ligų ir kenkėjų bei gamtinių stichijų poveikio pasėliams uždavinius, svarbūs regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro bei trumpabangės infraraudonosios spinduliuotės diapazono ruožai, šių ruožų išdėstymas ir skaičius. Jų svarba pasireiškia per augalijos spektrometrines savybes, nes augalai sugeria daugiau kaip 50 % juos pasiekiančios saulės spinduliuotės. Didžiąją dalį regimojo spektro spinduliuotės sugeria augalo audiniai. Žvelgiant giliau galima išskirti keturias augalams svarbias šviesos sugerties sritis:

1. 300–500 nm bangų ilgio šviesą sugeria protoplazmų, ląstelių sultys, karotinoidai ir chlorofilas;
2. 520–700 nm bangų ilgio šviesa, kuri sugeriama išimtinai chlorofilo;
3. 750–1050 nm bangų ilgio šviesa augalų didžiąja dalimi atspindima;
4. > 1050 nm bangų ilgio šviesa sugeriama vandens, protoplazmos, kai kurių kitų augalo ląstelių.

Remiantis šiomis augalų spektrometrinėmis savybėmis, jų tyrimams kuriami bei naudojami įvairūs spektriniai rodikliai. Rodiklius pagal jų taikymo pobūdį ir jiems skaičiuoti naudojamą spektrines juostas galima suskirstyti į:

- 1) regimojo–artimojo infraraudonojo spektro (naudojami analizuoti chlorofilo kiekį ir koncentraciją bei žaliosios masės, augalų streso dėl ligų, kenkėjų pažeidimus);
- 2) artimojo infraraudonojo–trumpabangio infraraudonojo spektro (dažniausiai skirti drėgmės kiekiui ar deficitui vertinti).

Atskirai derėtų išskirti specialiai dirvožemio dangai sukurtus ir naudojamus rodiklius. Dirvožemio paviršiaus drėgnumui dažniausiai taikomos trumpabangės infraraudonosios (SWIR) ir trumpabangės – artimosios infraraudonosios spinduliuotės (NIR) juostos. Kitų dirvožemio savybių analizei, pavyzdžiui, humusingojo dirvožemio sluoksnio organinės anglies rodikliai,

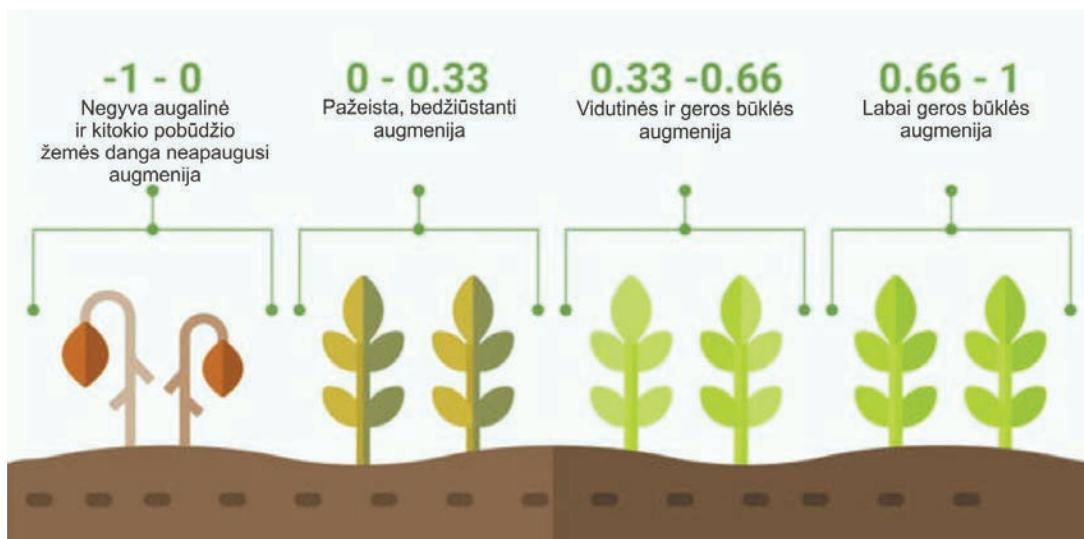
apskaičiuojami naudojant artimojo Infraraudonojo spektro duomenis. Dažnai žemės ūkio pasėlių savybėms vertinti naudojami įvairūs indeksai, apskaičiuoti naudojant kelias spektro juostas.

Normalizuotas augalijos skirtumo indeksas (angl. Normalized Difference Vegetation Index NDVI) nustatomas naudojant skirtumo ir sumos santykį tarp atspindėtų artimojo infraraudonojo spektro dalies (NIR) ir regimųjų spindulių spektro dalies (VIS) vaizdų. Apskaičiuojamas pagal formulę:

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Raudonas})}{(R_{NIR} + R_{Raudonas})} \quad (3.2.1.)$$

kur R_{NIR} – atspindžio reikšmės NIR spektre (0,7–1,1 μm); $R_{Raudonas}$ – atspindžio reikšmės regimajame spektre (0,4–0,7 μm) ties raudona spalva.

NDVI yra vienas populiariausių ir plačiausiai naudojamų augalijos savybių spektrinių rodiklių. Juo nustatomi augalija apaugę plotai (aktyvią fotosintezę vykdanči augalija), įmanoma įvertinti pasėlių biomasę, bendrąsias fiziologines augalų charakteristikas, kurios gali būti išreiškiamos per chlorofilo koncentraciją augaluose (3.2.12. pav.). Žemės ūkyje NDVI dažnai naudojamas pasėlių erdviniam zonavimui, augalijos streso požymiams identifikuoti. NDVI taip pat padeda identifikuoti stresą patiriančius augalus, tačiau metodas nesuteikia galimybės nustatyti streso priežastį.



3.2.12. pav. NDVI spektrinio rodiklio priklausomybė nuo augmenijos biomasės (EOS, 2019).

Tačiau nors šis spektrinis rodiklis aktyviai naudojamas, NDVI turi ir trūkumų. Visų pirma, rodiklio reikšmės stipriai veikia dirvožemio foninis efektas (nuo dirvožemio paviršiaus atspindima šviesa). Antra, esant didelėms rodiklio reikšmėms, kurios indikuoja tankią augmeniją, mažėja indekso jautrumas. Dėl to itin tankiai apaugusiuose pasėlių plotuose, kurių NDVI reikšmės bus santykinai didelės, pasireiškiantys fiziologiniai augalijos pokyčiai NDVI reikšmėse atsispindės labai nežymiai (nors iš tiesų šie pokyčiai gali būti žymūs). Trečia, rodiklio reikšmės priklauso nuo augmenijos tankio bei augalų (turima omenyje žemės ūkio kultūrų) augimo stadijų (bendrajai prasme – biomasės), todėl skirtingų žemės ūkio kultūrų rodiklio reikšmės gali varijuoti tiek dėl augalijos išsivystymo stadijos, tiek dėl jos tankumo, tiek dėl išorinių veiksnių sukeliama streso požymių.

Lapų ploto indeksas (angl. Leaf Area Index, LAI). Šio rodiklio palydoviniai jutikliai tiesiogiai nematuoja. Tai išvestinis dydis, išreiškiamas lapų ploto vienetais į paviršiaus ploto vieneta (pvz., m^2/m^2), todėl kartais jis perteikiamas ir kaip bedimensis. LAI dažniausiai taikomas žemės ūkio kultūrų derliui prognozuoti ir modeliuoti, pasėlių biomasei vertinti. Kadangi LAI yra išvestinis rodiklis, jo skaičiavimui naudojami tokie spektriniai rodikliai kaip NDVI ir kt., kurie yra jautrus chlorofilo turintiems junginiams ir objektams. Dėl šios priežasties įmanomos ir problemos bei kylantys netikslumai, susiję su LAI reikšmėmis (nors lapų plotas ploto vienetu bus tas pats, blyškesnių lapų (dėl mažesnės jų chlorofilo koncentracijos) rodiklio reikšmės bus mažesnės, vadinasi, rezultatas bus neteisingas). Todėl ir LAI skaičiavimus reikia koreguoti paprastai atsižvelgiant į konkrečią vietovę. Žemiau pateikiama LAI rodiklio skaičiavimo regresinė lygtis taikant palydovo *Sentinel 2* duomenis (Sun ir kt., 2020):

$$LAI = 0,0328 + 46,0712 * ((R_{03} - R_{02}) / (R_{03} + R_{02}))^{1,4608} \quad (3.2.2.)$$

kur R_{02} – palydovo *Sentinel 2* 2-oji spektro juosta (458–523 nm); R_{03} – atitinkamai palydovo *Sentinel 2* 3-oji spektro juosta (543–578 nm).

Modifikuotos chlorofilo absorbcijos santykio indeksas (angl. Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index, MCARI). Tai vienas iš CARI spektrinių rodiklių, kurie sukurti siekiant pašalinti įvairius išorinius faktorius, dažnai turinčius įtakos gaunamiems rezultatams. CARI indeksai sumažina dirvožemio ir aktyvios fotosintezės nevykdančių objektų įtaką. Pats MCARI parodo chlorofilo absorbcijos gilumą ir yra labai jautrus chlorofilo koncentracijos bei lapų ploto indekso variacijoms. Mokslo darbuose rodiklis taikomas ligų, gamtinių stichijų, pavyzdžiui, sausrų pažeistų pasėlių plotams išskirti, taip pat augalams zonuoti lauko ribose, chlorofilo koncentracijos augalinėje dangoje ir bendriems žemės ūkio kultūrų augmenijos streso erdviniamis požymiams identifikuoti. MCARI apskaičiuojamas pagal formulę:

$$MCARI = [(R_{700} - R_{600}) - 0.2(R_{700} - R_{550})] * \left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right) \quad (3.2.3.)$$

kur R_{550} , R_{600} , R_{670} , R_{700} – spinduliuotės atspindžio reikšmės atitinkamai ties 550, 600, 670, 700 nm bangos ilgiu.

Drėgmės trūkumo streso rodiklis (angl. Moisture Stress Index, MSI). Kadangi rodiklio skaičiavimui naudojami NIR ir SWIR spinduliuotės diapazonai, jis gali parodyti augalų streso dėl drėgmės trūkumo požymius. MSI reikšmės gerai koreliuoja su vandens kiekiu augaluose reikšmėmis. Taip yra todėl, kad vandens molekules sugeria didelę dalį jas pasiekiančios trumpabangės infraraudonosios spinduliuotės, tad keičiantis vandens kiekiui augaluose keičiasi ir lapų sugeriamos SWIR spinduliuotės kiekis. NIR diapazone atvirkščiai – kiek spinduliuotės lapai sugeria, beveik visiškai nepriklauso nuo vandens kiekio augaluose. Todėl taikant šių dviejų spinduliuotės spektro juostų santykį, galima efektyviai išryškinti sausus, turinčius pakankamą drėgmės atsargas arba nepakankamai drėgmės gaunančius augalus. Pats rodiklis nuotoliniuose žemės ūkio tyrimuose naudojamas derliaus prognozėms modeliuoti, sausringoms zonoms stambiuose pasėlių plotuose nustatyti. MSI apskaičiuojamas naudojant šią formulę:

$$MSI = \frac{R_{1599}}{R_{819}} \quad (3.2.4.)$$

kur R_{1599} , R_{819} – spinduliuotės atspindžio reikšmės atitinkamai ties 1599 ir 819 nm bangos ilgiu.

Augalijos savybėms iš palydovų duomenų vertinti yra sukurta daugybė skirtingų spektrinių rodiklių. Aukščiau paminėta tik nedidelė jų dalis. Kai kurie rodikliai sukurti pagal konkrečių palydovų spektro juostų, spektrinės skiriamosios gebos palydovų vaizdų specifika.

Gerokai mažiau spektrinių rodiklių sukurta dirvožemio dangos savybėms analizuoti. Bene dažniausiai spektriniai vaizdai naudojami dirvožemio dangos drėgnumui analizuoti. Tokiam

tikslui skirtas normalizuotas vandens skirtumo indeksas (angl. Normalized Difference Water Index, NDWI), kuris kaip ir MSI naudoja NIR ir SWIR spinduliuotės informaciją. Indekso skaičiavimo formulė:

$$NDWI = \frac{(R_{830} - R_{1610})}{(R_{830} + R_{1610})} \quad (3.2.5.)$$

kur R_{830} , R_{1610} – spinduliuotės atspindžio reikšmės atitinkamai ties 830 ir 1610 nm bangos ilgiu.

NDWI skaičiavimo ir naudojamų spektro juostų specifika leidžia įvertinti drėgmės kiekį tiek augalijoje, tiek dirvožemio paviršiuje.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokiems žemės ūkio uždaviniams spręsti dažniausiai taikomi SAR jutiklių duomenys?
- Kodėl vegetacinių spektrinių rodiklių skaičiavimui dažnai naudojami NIR ir raudonos spalvos bangų ilgio juostos?
- Kokios yra stipriosios ir silpnosios vegetacinių rodiklių pusės?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Baghdadi, N., Aubert, M., Zribi, M. (2012). Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9, 512–516.
- Balenzano, A., Satalino, G., Lovergine, F., Rinaldi, M., Iacobellis, V., Mastronardi, N., and Mattia, F. (2013). On the use of temporal series of L-and X-band SAR data for soil moisture retrieval. Capitanata plain case study. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 1, 721–737.
- Dubois, P. C., van Zyl, J., and Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 4, 915–926.
- ESA (2013). *Sentinel-1 SAR User Guide* [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga internete: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/overview>
- EOS (2019). NDVI FAQ: all you need to know about index [žiūrėta 2019-09-23]. Prieiga internete: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>
- Harfenmeister, H., Spengler, D., Veltzien, C. (2019). Analyzing Temporal and Spatial Characteristics of Crop Parameters Using Sentinel-1 Backscatter Data. *Remote Sensing*, 11, 13, 1569.
- Jacome, A., Bernier, M., Chokmani, K., Gauthier, Y., Poulin, J., and De Sève, D. (2013). Monitoring Volumetric Surface Soil Moisture Content at the La Grande Basin Boreal Wetland by Radar Multi Polarization Data. *Remote Sensing*, 5, 10, 4919–4941.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd edition)*. USA: Prentice Hall.
- Koyama, Ch., Liu, H., Takahashi, K., Stato, M. (2017). In-Situ Measurement of Soil Permittivity at Various Depths for the Calibration and Validation of Low-Frequency SAR Soil Moisture Models by Using GPR. *Remote Sensing*, 9, 6, 580.
- Kseneman, M., Gleich, D. (2013). Soil-Moisture Estimation From X-Band Data Using Tikhonov Regularization and Neural Net. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 7, 3885–3898.
- MacDonald, R. B. (1984). A summary of the history of the development of automated Remote Sensing for agriculture applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22, 473–481.
- Paloscia, S., Pettinato, S., and Santi, E. (2012). Combining L and X band SAR data for estimating biomass and soil moisture of agricultural fields. *European Journal of Remote Sensing*, 45, 1, 99–109.
- Pasqualotto, N., Delegido, J., Van Wittenberghe, Sh., Rinaldi, M., Moreno, J. (2019). Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). *Sensors*, 19, 4, 904.
- Persson, H. J. (2014). *Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data*. Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry. Swedish University of Agricultural Sciences: Thesis for Ph.D.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell J.A., Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA, 309–317.
- Şeker, D.Z., Direk, Ş., Musaoğlu, N. and Gazioğlu, C. (2013). Determination of Effects of Coastal Deformation Caused by Waves and Storms at Black Sea Coast of Turkey utilizing InSAR Technique. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 1629.
- Sekertkin, A., Marangoz, A. M., Abdikan, S. (2018). Soil Moisture Mapping Using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar Data. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 5, 2, 178–188.

- Sentinel-hub (2017). *Sentinel-2 RS indices* [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga internete: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/indexdb/>
- Sun, Y., Qin, Q., Ren, H., Zhang T., Chen, S. (2020). Red-Edge Band Vegetation Indices for Leaf Area Index Estimation From Sentinel-2/MSI Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58, 2, 826-840.
- Tucker, J. C. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 2, 127-150.
- UNAVCO (2019). *Synthetic Aperture Radar (SAR) Satellites* [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga internete: <https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html>
- Vos, K., Harley, D. M., Splinter, K. D., Simmons, J. A., Turner I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160-174.
- Walker W. (2016). *Introduction to RADAR Remote Sensing for Vegetation Mapping and Monitoring* [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga internete: http://whrc.org/wp-content/uploads/2016/02/Walker_SAR_Veg_Mapping.pdf
- Zhiang, X., Chen, B., Fan, H., Huang, J., Zhao, H. (2016). The Potential Use of Multi-Band SAR Data for Soil Moisture Retrieval over Bare Agricultural Areas: Hebei, China. *Remote Sensing*, 8 (1), 7.
- Zhou, T., Pan, J., Zhang, P., Wei, Sh., Han, T. (2017). Mapping Winter Wheat with Multi-Temporal SAR and Optical Images in an Urban Agricultural Region. *Sensors*, 17, 6, 1210.
- Zribi, M., Kotti, F., Chabaane, Z. L., Bakhdadi, N. (2012). Soil Texture Estimation Over a Semiarid Area Using TerraSAR-X Radar Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9, 3, 353-357.

3.3. MIŠKŲ STEBĖSENA IŠ PALYDOVŲ

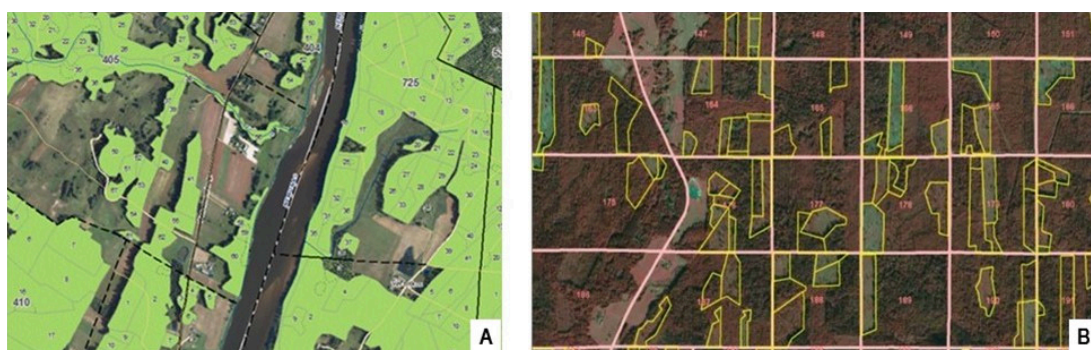
3.3.1. Miškų charakteristikos, bendrieji principai

Nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai gali padėti identifikuoti, klasifikuoti, įvertinti ir išmatuoti įvairias miškų charakteristikas dviem būdais: kokybiškai (miškų tipų išskyrimas: spygliuočiai, lapuočiai, mangrovės, pelkiniai miškai, miškų plantacijos; rūšinė sudėtis ir pan.) ir kiekybiškai (miškų plotų parametrų išmatavimas: aukštis, plotis, plotas, tankis, biomasė ir t. t.) (3.3.1. lentelė).

3.3.1. lentelė. Nuotolinių tyrimų panaudojimas miškams stebėti.

PRITAIKYMAS MIŠKŲ STEBĖSENJOJE	AEROFOTO- GRAFIJA	AVIACINĖS IR PA- LYDOVINĖS SKENA- VIMO JUTIKLIŲ SISTEMOS (MSS)	AVIACINIAI IR PA- LYDOVINIAI RA- DARAI	LIDARO SISTEMA
Miškų tipų išskyrimas (kokybinis kartografavimas)	+	+	+	+
Individualių rūšių identifikavimas (kokybinis kartogra- favimas)	+	+	+	+
Užliejamų miškų kartografavimas	-	-	+	
Miškų gaisrų nustatymas ir rizika (kokybinis)	+	+	+	
Miškų būklės identifikavimas (stresas, ligos) (kokybinis kartografavimas)	+	+	-	+
Miškų nuniokojimas dėl klimato reiškinių (vėjavartos, uraganai) (kokybinis) (kokybinis kartografavimas)	+	+	-	
Miškų kirtimai (kokybinis kartografavimas)	+	+	+	
Miškų monitoringas (kirtimai, miško atsikūrimas, me- dienos tūris, inventorizacija, tvarkymas, dirvožemio erozija, rekreacinė veikla, miško buveinių tvarkymas) (kokybinis kartografavimas)	+	+	+	
Miškų plotų skaičiavimas (kiekybinės charakteristikos)	+	+	+	
Medžių kiekis ploto vienetu (kiekybinės charakteristikos)	+		+	
Medžių aukštis (kiekybinės charakteristikos)	+	+	+	+
Lajos tankumas, diametras (kiekybinės charakteristikos)	+	+	+	+
Medžių amžius (kiekybinės charakteristikos)	+	+	+	
Medienos tūris, medienos metinis prieaugis (kiekybinės charakteristikos)	+	+	+	+
Biomasė (kiekybinės charakteristikos)	+	+	+	+
Žuvę medžiai (kiekybinės charakteristikos)	+			

Tradicškai miškų tyrimuose, miškotvarkoje, inventorizacijoje buvo naudojamos **aerofotografinės nuotraukos** – tai buvo ir vis dar yra svarbus nuotolinių tyrimų prietaisas lokaliu ar regiono mastu. Tokios nuotraukos leidžia detaliau įvertinti natūralią vietovės būklę – vingiuotus upelius, jaunos miškėlius, nedidelius dirbamos žemės sklypus, apsodintus medžiais (žr. 2.2.7. pav. 2.2.2. skyrelyje). Lietuvoje aerofotografinės nuotraukos bei jų pagrindu sudaryti ortofotografiniai žemėlapiai nuo XX a. 6-ojo dešimtmečio naudojami kaip techninis sklypinės miškų inventorizacijos pagrindas. Nuo 2001 metų kasmet naudojant regimosios ir artimosios infraraudonosios spinduliuotės jutiklius vykdomas apie 15 % šalies teritorijos specializuotas aerofotografavimas miškams inventorizuoti. Galutinis produktas – ortofotografinis miškų žemėlapis, kurio pagrindinis pritaikymas – sklypinė miškų inventorizacija valstybės kadastrui sudaryti ar atnaujinti. Žemėlapiai taip pat naudojami vidinės miškotvarkos projektams parengti: miško sklypų ribų projekto parengimui, ribų koregavimui lauko darbų metu bei miško sklypų geografinių duomenų bazių sudarymas. Nacionalinėje miškų inventorizacijoje atrankos metodais ortofotografiniai žemėlapiai naudojami žemės naudmenų tipams ir potipiems identifikuoti bei jų kaitai įvertinti, privačių miškų inventorizacijos kontrolei vykdyti ir kt. (3.3.1. pav.).

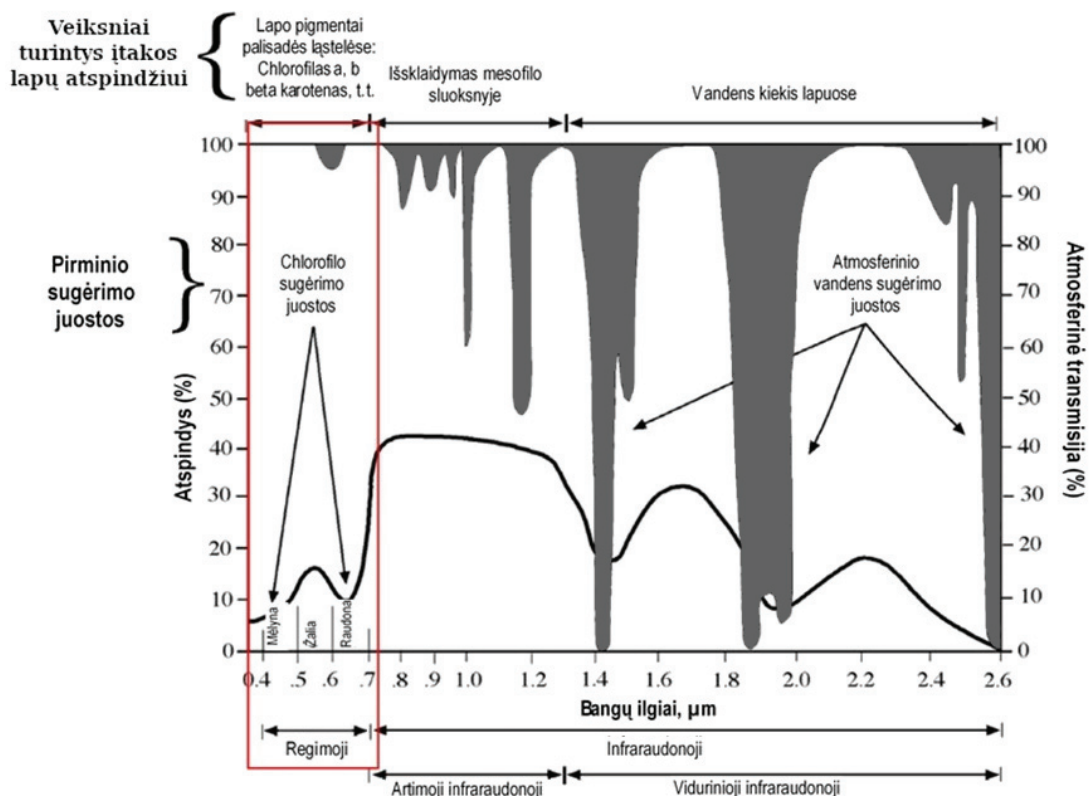


3.3.1. pav. Aerofotografinių nuotraukų panaudojimas sklypinei miškų inventorizacijai (A) bei miškų valstybės kadastrui (B) (žalia spalva, skaičiais (A) ir geltonomis linijomis (B) pažymėti inventorizuojami bei įtraukiami į valstybės kadastrą miškų sklypai) (nuotraukos iš www.miskodarbai.lt, www.forest.lt).

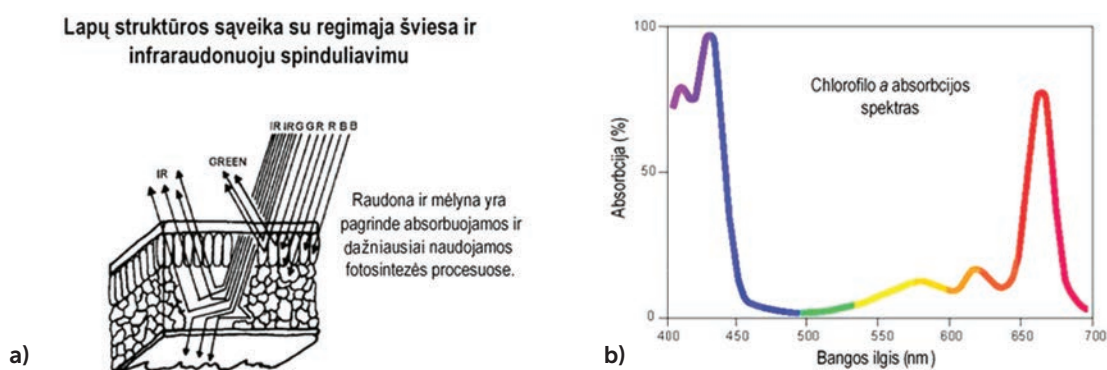
Palydovinių jutiklių panaudojimas ypač svarbus tose teritorijose, kuriose lauko darbai reikalauja didelių fizinių ir finansinių išteklių. Pirmiausia palydoviniai vaizdai, kurie buvo naudojami miškų inventorizacijai, ilgalaikei stebėsenai, buvo gaunami iš optinių jutiklių, bet jų tinkamumas yra apribojamas, nes jie vaizdus gali tiekti tik esant šviesiam paros metui ne-debesuotą dieną. Optiniai jutikliai naudoja 0,4–2,5 μm bangų ilgių atspindėtą Saulės spinduliuotę. Regimosios spektro dalies spinduliuotė (0,4–0,7 μm), taip pat vadinama fotosintetiškai aktyvia spinduliuote, yra labai naudinga augalų fotosintezės procesams nustatyti (3.3.2. pav.). Regimosios ir artimosios infraraudonosios spektro dalies bangų ilgiai, naudojami vaizdams gauti, sąveikauja su ląstelių struktūra bei jose esančiais pigmentais.

Pagrindinis procesas, vykstantis regimojo spektro dalyje, yra pigmento vykdomas spinduliuotės sugėrimas, artimojoje infraraudonojoje spektro dalyje – išsklaidymas, o viduriniojoje infraraudonojoje spektro dalyje – vandens vykdomas bangų sugėrimas (3.3.3. pav.). Todėl buvo sukurta keletas metodų nustatyti medžių lapų biochemijai bei informacijai apie augalų būklę gauti (3.3.3. pav.). Iš chlorofilo α absorbcijos spektro matyti, kad daugiausiai chlorofilo α turinčios lapų struktūros geriausiai sugeria mėlynos ir raudonos spalvų bangų ilgius, o atspindi žalią spalvą. Todėl kuo daugiau chlorofilo yra lapuose, tuo jie žalesni (3.3.4. pav.). Žalieji augalai, sugeriantys Saulės spinduliuotę regimajame spektriniame diapazone (0,4–0,7 μm),

panaudoja tą sugertą spinduliuotę kaip energijos šaltinį fotosintezės procese. Lapų ląstelės taip pat gali išsklaidyti (t. y. atspindėti ir perduoti) Saulės spinduliuotę artimajame infraraudonajame spektriniame diapazone, nes tame diapazone energijos lygis yra nepakankamas, kad būtų naudojamas organinių molekulių sintezei. Jei šiame bangų diapazone vyktų spinduliuotės sugėrimo procesai, augalas perkaistų ir greičiausiai jo audiniai būtų sugadinti.

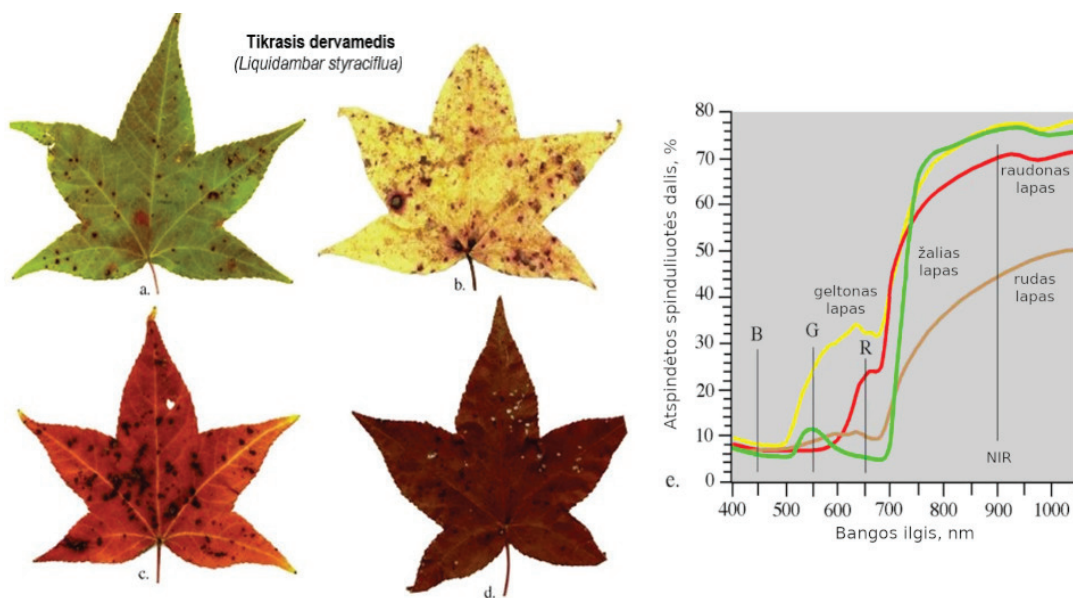


3.3.2. pav. Pagrindiniai veiksniai, kontroliuojantys lapų atspindį (pagal Jensen, 2007).

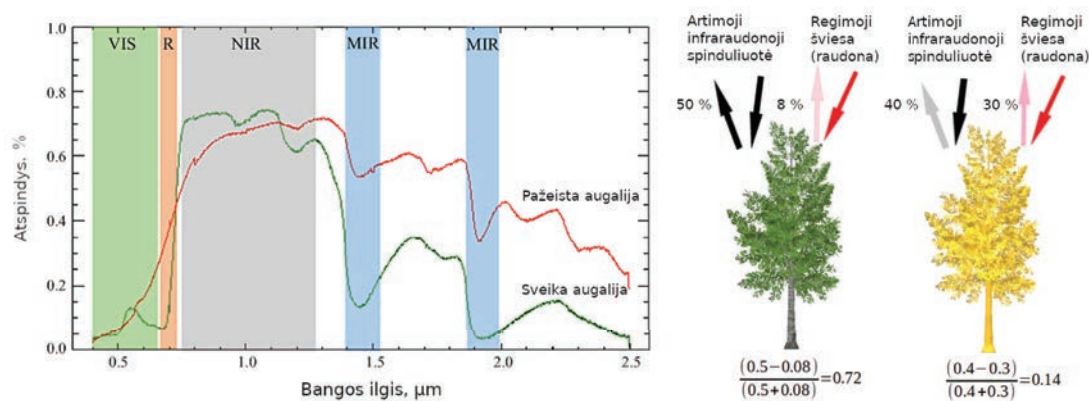


3.3.3. pav. a) Lapų struktūros sąveika su regimąja šviesa ir infraraudonuoju spinduliavimu; b) chlorofilo *a* absorbcijos spektras. Daugiausiai chlorofilo *a* turinčios lapų struktūros geriausiai absorbuoja mėlynos ir raudonos spalvų bangų ilgius, o atspindi žalią spalvą. Todėl kuo daugiau chlorofilo lapuose, tuo jie žalesni (pagal Jensen, 2007).

Vienas iš populiariausių būdų apskaičiuoti miškų augalijos būklę remiantis nuotoliniais tyrimais yra naudoti normalizuotą augalijos skirtumo indeksą (NDVI). Tai skirtumas tarp atspindėtų artimojo infraraudonojo spektro dalies (NIR) ir regimųjų spindulių spektro dalies (VIS) bangų ir yra skaičiuojamas pagal 3.2.1. formulę (žr. skyrelį 3.2.3.). Sveika žalia augalija sugeria didžiąją regimojo spektro bangų dalį, o atspindi Saulės spinduliuotę NIR spektriniame diapazone. Pažeista arba reta augalija atspindi mažiau NIR spinduliuotės, tačiau atspindi daugiau vidurinės infraraudonosios spinduliuotės (MIR) (3.3.5. pav.).



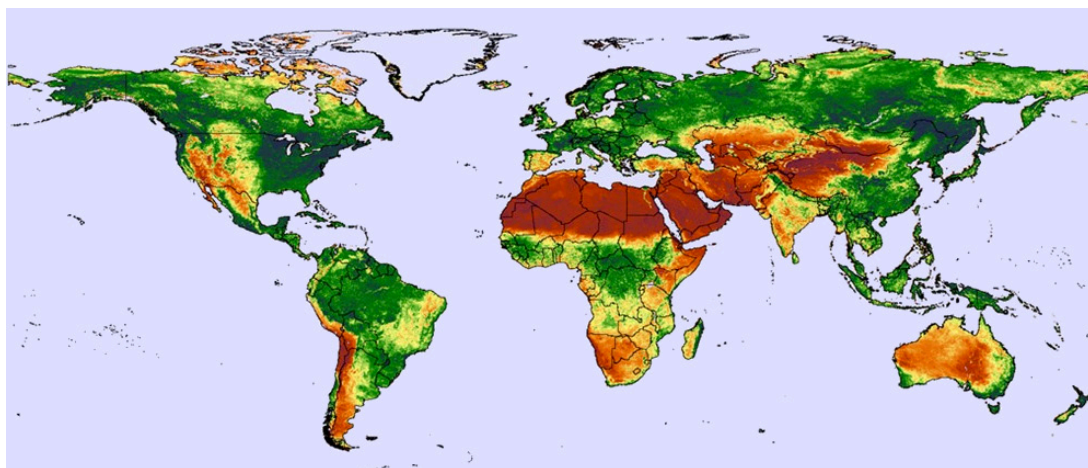
3.3.4. pav. Tikrojo dervamedžio (*Liquidambar styraciflua*) spektrinio atspindžio skirtumai (a – žalias lapas; b – geltonas lapas; c – raudonas lapas; d – rudas lapas. B – mėlynoji spektro juosta; G – žalioji spektro juosta; R – raudonoji spektro juosta; NIR - artimoji infraraudonoji spektro juosta (pagal Jensen, 2007).



3.3.5. pav. Sveikos ir pažeistos augalijos atspindžio skirtumai bei šiems atvejams apskaičiuotos vegetacijos indekso NDVI reikšmės (pagal Ibarrola-Ulzurrun ir kt. 2019, NASA Earth Observatory, 2000).

3.3.2. Miškų tyrimuose naudojami pasyvieji optiniai jutikliai

Paprastai NDVI produktai yra sudaromi iš AVHRR arba MODIS jutiklių duomenų ir globaliu mastu parodo augalijos tendencijas tam tikru laikotarpiu. NOAA (angl. National Oceanic and Atmospheric Administration) jutiklis AVHRR turi 5 elektromagnetinės spinduliuotės detektorius, iš kurių 2 yra jautrūs 0,55–0,77 ir 0,73–1,0 μm ilgio bangoms. Su jutikliu AVHRR tyrėjai gali išmatuoti šviesos, einančios nuo Žemės, intensyvumą regimajame ir artimajame infraraudonajame spektriniuose diapazonuose ir suskaičiuoti fotosintezės pajėgumą duotajame Žemės teritorijos pikselyje (AVHRR pikselis yra lygus 1 km). Apskritai, jeigu artimajame infraraudonajame spektriniame diapazone yra daugiau atspindėtos spinduliuotės nei regimojo spektro juostoje, tada augalija nagrinėjamame pikselyje bus tankesnė ir gali būti apibūdinta kaip miško augalija. Ir atvirkščiai, jeigu regimojo ir artimojo infraraudonojo spektrinių diapazonų skirtumas tarp atspindėtos spinduliuotės intensyvumo yra mažas, galima daryti išvadą, jog augalija nagrinėjamoje teritorijoje greičiausiai bus reta ir gali būti apibūdinta kaip pieva, tundra ar dykuma (3.3.6. pav.).



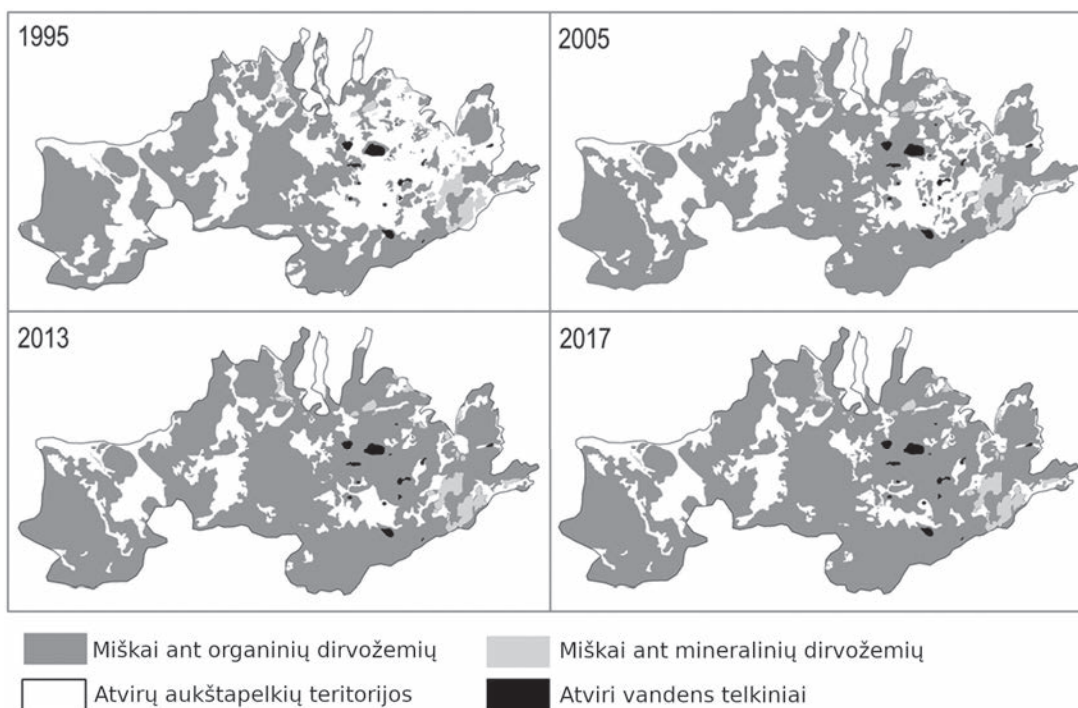
3.3.6. pav. AVHRR jutikliu nustatytas NDVI 1982–2014 m. (Clark Labs, 2016).

Lietuvos pavyzdys. MODIS duomenų panaudojimas mišku užaugančios aukštapelkės analizei. Pagrindinė tyrimo idėja – atvirų aukštapelkių buveinių fragmentacija (t. y. apaugimas mišku ir kiminų dangos degradacija), kuri gali atsispindėti NDVI pokyčiuose, o pastarieji gali būti susiję su vandens lygio aukštapelkėje pokyčiais.

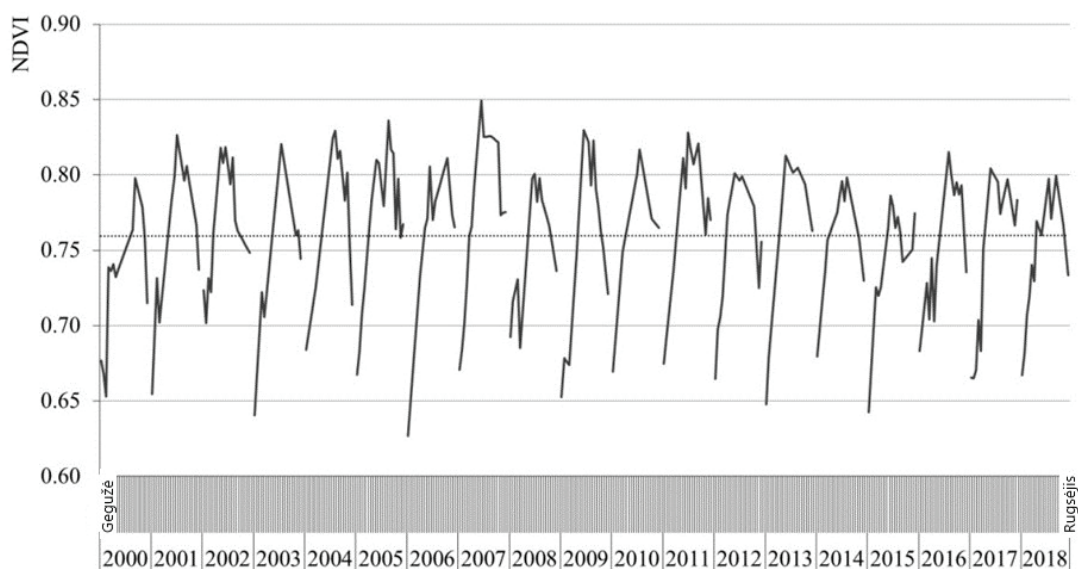
XX a. aerofotografinių ir ortofotografinių vaizdų analizė parodė akivaizdžius atviros aukštapelkės (Čepkelių raiste) užaugimą medine augalija (3.3.7. pav.). NDVI skaičiavimams buvo panaudoti 2000–2018 m. palydovo *Terra* jutiklio MODIS duomenys (MOD09Q1), kurie buvo derinami su lauko tyrimų metu 4 vandens lygio matavimo šulinių (W1–W4) – 2002–2018 m. duomenimis. Tyrimo rezultatai parodė, kad vidutinis vegetacijos sezono NDVI svyruoja nuo 0,74–0,78 ir beveik visais metais yra mažesnis nei mediana (3.3.8. pav., 3.3.9. pav. a). Tai patvirtina palankias sąlygas aukštapelkės augalijai formotis (jos sutampa ir su kitais tyrimais patvirtintų šiaurinių pelkių NDVI reikšmėmis). Tačiau maksimalios NDVI reikšmės turi tendenciją mažėti. Daugiametės tendencijos rodo, kad ypač geros augimo sąlygos pasitaiko vis rečiau.

MODIS duomenų skiriamoji geba – 250 m, tokiaame gana smulkaus mastelio žemėlapyje mes negalime išskirti vien tik medžių nulemtų NDVI reikšmių, nes pelkėje pro medžius prasišviečia ir samanų, kiminų. Taigi, šiame tyrime buvo gautas suminis NDVI, kuris parodė, kad (3.3.9 pav. b) geriausios augimo sąlygos yra liepos–rugpjūčio mėnesiais, kai būna nukritęs

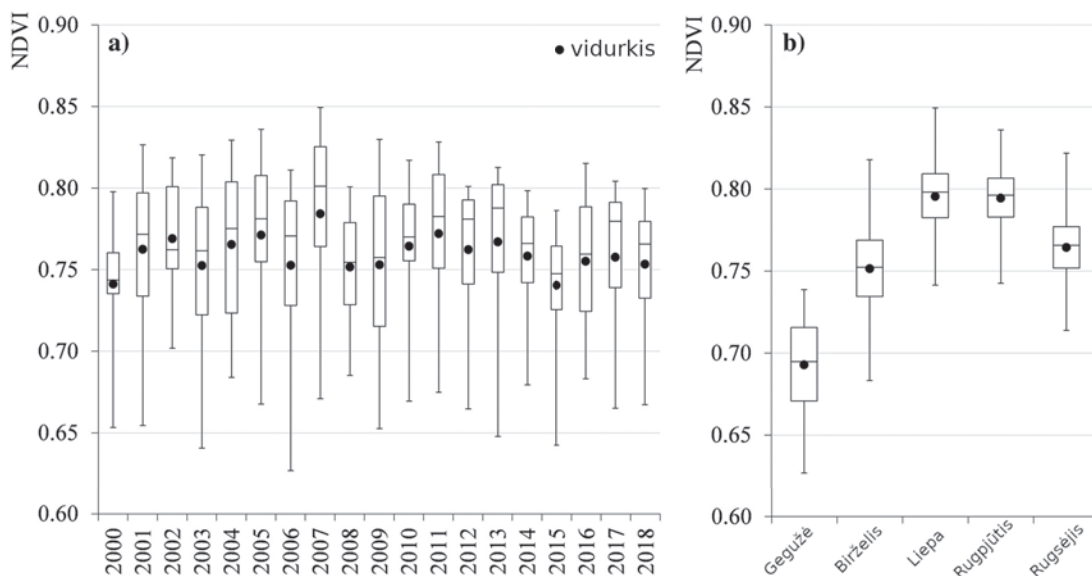
vandens lygis ir vyrauja aukšta oro temperatūra. O gegužę ir birželį, nepaisant to, kad po pavasarinio sniego tirpsmo yra fiksuojamas aukščiausias vandens lygis, yra stebimos mažiausios NDVI reikšmės per visą vegetacijos sezoną.



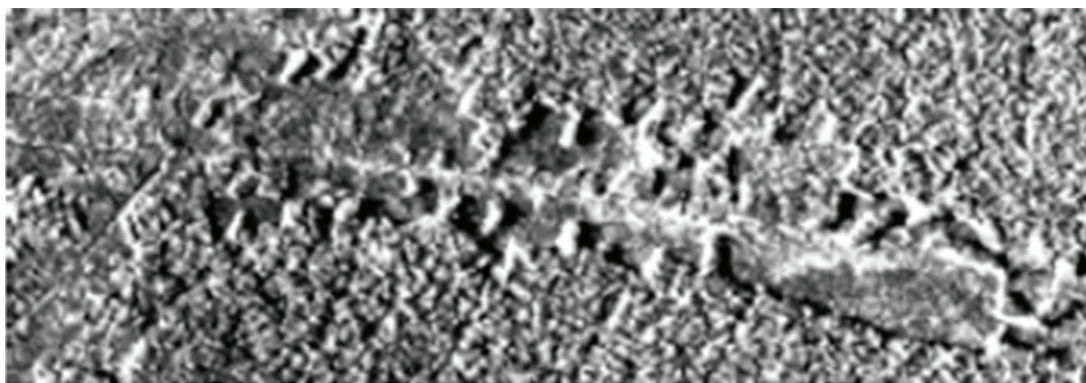
3.3.7. pav. Miškų dangos pokyčiai Čepkelių raisto aukštapielinėje dalyje (Šimanauskienė ir kt., 2019).



3.3.8. pav. NDVI sezoniniai pokyčiai Čepkelių raiste 2000–2018 m. vegetacijos laikotarpiu (Šimanauskienė ir kt., 2019)



3.3.9. pav. Vidutinis NDVI 2000–2018 m.: a) metinis, b) mėnesio (Šimanauskienė ir kt., 2019).



3.3.10. pav. Miškų kirtimai SAR vaizde (viršuje) ir fotografijoje (apačioje). Fotografijoje: tamsiai žalia spalva – miškai, šviesiai žalia spalva – buvęs kirtimas; SAR vaizde – šviesesni pilkos spalvos tonai rodo išlikusius miškus, o tamsesni pilkos spalvos tonai – iškirstus plotus. Taip yra todėl, kad SAR vaizduose kirtimai radaro signalą atspindi daug mažiau nei medžių laja. Miškų pakraščiai išryškėja dėl tamsių ir šviesių pikselių kontrasto (Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

Buvo nustatyti statistiškai patikimi ryšiai tarp NDVI ir hidrologinių rodiklių bei aukštapelkę drenuojančios upės. Analizė parodė, kad optimalios aukštapelkės augalijai sąlygos susiformuoja, kai vandens lygis nesiekia nei labai aukštų, nei labai žemų reikšmių.

Ateityje panaudojant didesnės skiriamosios gebos optinius vaizdus (pvz., *Sentinel 2*) galima būtų išskirti atskirus augalijos tipus, kas padėtų detaliau išnagrinėti vandens lygio ir augalijos tipo bei NDVI ryšius. Radaro jutiklių (mikrobangų vaizdų) panaudojimas taip pat turėtų atverti daugiau tyrimų galimybių šiai problemai išnagrinėti.

Šiuo metu nuotolinės sistemos su aktyviaisiais optiniais jutikliais – lidarais ir SAR yra taikomos miškų stebėsenai iš palydovų (3.3.10. pav.). Šiems jutikliams yra visiškai nesvarbu nei paros laikas, nei oro sąlygos. Jie taip pat naudoja ilgesnes bangas nei optiniai jutikliai, o tai leidžia išmatuoti skirtingas tiriamos teritorijos charakteristikas. Taigi, optiniai ir radarų nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai pateikia skirtingą, bet vienas kitą papildančią informaciją, norint įvertinti bendrą miškų būklę, pvz., lajos aukštį, tankį ir formą, užimamą plotą, medienos tūrį ir biomasę.

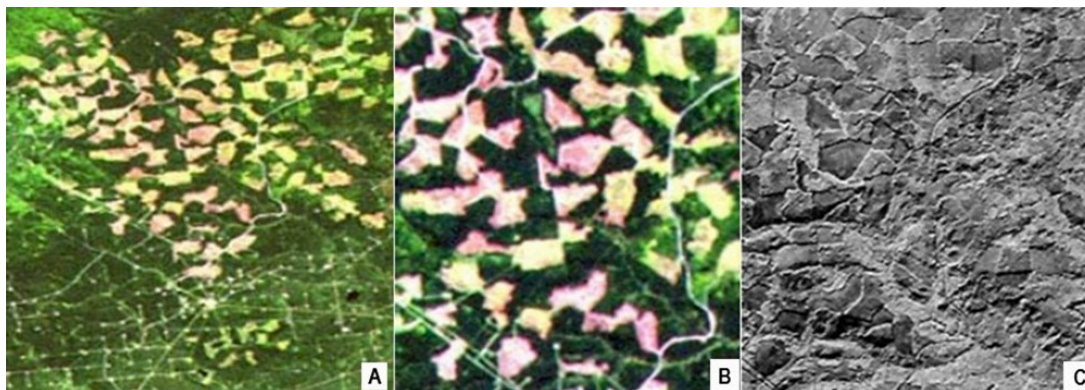
3.3.3. Miškų kirtimai ir jų kartografavimas

Nuotolinių tyrimų svarba. Tai globalinė problema, kuriai spręsti pasitelkiamos nuotolinių tyrimų technologijos. Pastarosios sujungia keletą įrankių, padedančių analizuoti šios problemos mastą. Nuotolinių tyrimų duomenys, pateikiantys tiriamos teritorijos vaizdus tam tikrais laiko intervalais, leidžia analizuoti miško ekosistemų pokyčius skirtingu laiku. Lyginant ankstesnių metų vaizdus su dabartiniais, realiai galima išmatuoti miško kirtimų apimtis, fragmentų dydžius ir t. t. Duomenys, gauti iš įvairių nuotolinių tyrimų jutiklių, leidžia sukaupti papildomos informacijos. Radarų pateikiami duomenys, sujungti su optiniais duomenimis, gali būti puikusiai panaudoti egzistuojančių kirtimų būklei stebėti arba fiksuoti naujai atsirandančius kirtimus, taip pat įvertinti miškų atsinaujinimo pažeistose vietose potencialą. Tose šalyse, kuriose kirtimai yra kontroliuojami, nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai pasitarnauja kaip stebėsenos įrankis, norint įrodyti, kad kirtimų kompanijos nepiktnaudžiauja ir darbus atlieka pagal teisės aktus ir reglamentus.

Didelės skiriamosios gebos vaizdai pateikia detalų miškų resursų išseikvojimo vaizdą, o radarų pateikiama informacija gali pasitarnauti tais laikotarpiais, kai teritorija buvo padengta debesimis. Visi nuotoliniai prietaisai leidžia pažvelgti į nutolusias ir dažnai žmogui nepasiekiamas teritorijas, kur nelegalūs kirtimai ar kita žala miškui gali būti nepastebėta ilgą laiką, jeigu nebūtų nuotolinių tyrimų galimybių. Palydoviniai duomenys (SPOT 4HRVIR, *Landsat*, lazerinio skanavimo sistemos ir kt.), derinant su ortofotonuotraukomis bei lauko tyrimais yra naudojami Lietuvos miškų monitoringui bei kirtimų apimtims įvertinti (Juknelienė ir Mozgeris, 2015; Mozgeris, 2008; Mozgeris ir kt., 2017).

Duomenų reikalavimai. Pasaulinio masto miškų stebėsenai, pvz., drėgnųjų miškų kirtimų studijos, priklauso nuo didelio masto teritorijas apimančių duomenų tęstinumo, todėl labai svarbu naudoti jutiklius, kurie informaciją nuotoliniu būdu renka daugelį metų. Miškų kirtimų stebėsenai ir kartografavimas taip pat reikalauja ir regioninio masto vaizdų, ir vidutinės ar didelės skiriamosios gebos duomenų, priklausomai nuo to, kaip lengvai kirtaviečių teritorijos yra išskiriamos. Kaip daroma daugelyje daugiamečių tyrimų, didesnės skiriamosios gebos vaizdai yra naudojami išskirti kontūrus, o mažesnės skiriamosios gebos vaizdai gali būti naudojami pokyčiams per tam tikrą laiką analizuoti jau išskirtų kontūrų ribose.

Kanados pavyzdys. Kanadoje miškų kirtimams kartografuoti ir stebėti vis dar labai populiariau naudoti optinius jutiklius, nes miškų augalija, kirtimai ir atauganti augalija turi gerai išsiskiriančias spektrines savybes ir optiniai jutikliai gali pateikti pakankamą kiekį duomenų, kai nedebebuota.



3.3.11 pav. Optiniais (a ir b) ir radaro (c) jutikliais gauti vaizdai yra naudojami miškų kirtimams identifikuoti (Alberta, Kanada). (a) ir (b) – tamsiai žalia spalva – išlikę miškų fragmentai, šviesiai geltona spalva – iškiršti miškų plotai; (c) – šviesesni pilkos spalvos tonai identifikuoja išlikusius miškus, o tamsesni pilkos spalvos tonai – iškirstus plotus (Canada Centre for Remote Sensing, 2009).

Radariai drėgnųjų tropinių miškų studijose yra naudingesni, nes tiriamose teritorijose dažnai būna debesuota. Kirtimai gali būti išskiriami ir naudojant radaro vaizdus, nes jie pasižymi daug mažesnėmis atgalinės sklaidos reikšmėmis nei sveiki medžiai. Miškai SAR vaizduose atrodo šviesūs, o kirtimai tamsūs dėl mažos signalo atgalinės sklaidos. Tačiau paprastai yra labai sunku atskirti ataugančias kirtavietes, nes paaugę regeneruojantys plotai ir brandaus miško lajos visiškai nesiskiria. Mangrovių miškai paprastai susiformuoja pakrančių teritorijose, kurios dažnai padengtos debesimis, todėl reikia itin patikimo stebėsenos įrankio miško išėjimo mastams tinkamai išmatuoti. Mokslinės studijos patvirtino radarų tinkamumą atskirti mangrovių miškus nuo kitų žemės naudmenų. Kai kurios juostos taip pat turi ilgąsias bangas, galinčias prasiskverbti per debesis ar lietu. Vienintelis radarų trūkumas yra tas, kad neišskiria skirtingų mangrovėse augančių rūšių.

Albertoje, Vaitkorto teritorijoje, kirsti spygliuočių miškus buvo populiariu jau seniai. Pastaraisiais metais kirtimas suintensyvėjo, nes padidėjo medienos poreikis. Dėl kirtimų išryškėjo fragmentuotas kraštovaizdis (3.3.10. ir 3.3.11. pav.).

3.3.4. Rūšių identifikavimas ir miškų tipizavimas

Miškų tipizavimas bei rūšių identifikavimas yra svarbu tiek miškų išsaugojimo specialistams, tiek miškų išteklių naudojimo įmonėms. Miškų tipų išskyrimas gali prasidėti nuo didelės teritorijos pažintinio kartografavimo, o rūšių inventorizacijos sąrašų sudarymas reikalauja daugiau laiko ir tyrimų, nes reikia detaliai aprašyti medžius (medžių rūšis, aukštį, tankį ir t. t.).




Nuotolinių tyrimų reikšmė. Panaudojant nuotolinius tyrimus galima greitai ir efektyviai identifikuoti bei išskirti miško tipus. Lyginant su tradiciniais lauko tyrimais, nuotoliniai Žemės paviršiaus tyrimai taupo laiką. Be to, priklausomai nuo tyrimų mastelio, yra prieinami įvairių laikotarpių ir mastelių nuotoliniai duomenys. Rūšių identifikavimas regioninio mastu gali būti vykdomas panaudojant tiek daugiaspektrius, tiek hiperspektrinius duomenis, tiek aerofotografijas, o miškų tipų išskyrimas smulkesniu masteliu gali būti atliekamas naudojant daugiaspektrius arba radarų duomenis.

Hiperspektriniai vaizdai gali pateikti labai didelės erdvinės skiriamosios gebos informaciją. Tokia detali spektrinė informacija gali būti naudojama norint gauti atskirų medžių rūšims bei jų būklei (pvz., ligų) identifikuoti svarbius spektrinius požymius.

Duomenų reikalavimai. Duomenų poreikis labai priklauso nuo tyrimo tikslų. Pvz., regioniniam kartografavimui reikia jutiklio, jautraus miškų dangos (lajos tekstūros, lapų tankio, spektrinio atspindžio) skirtumams. Daugiamečiai duomenys (įvairių laikotarpių) taip pat suteikia informacijos apie miškų fenologiją, kuri gali padėti interpretuoti sezoninius rūšių pokyčius. Detaliai rūšinei analizei, biofizinių miškų parametrų stebėsenai yra reikalingi labai didelės skiriamosios gebos gerai sukalibruoti daugiaspекtriai duomenys (3.3.12. pav.).



3.3.12. pav. Didžiosios pocūgės (lot. *Pseudotsuga menziesii*) paplitimo Vankuverio saloje (netikrų spalvų) hiperspektrinis vaizdas: a) 60 cm raiška, 1995 m. ruduo CASI (angl. Compact Airborne Imaging Spectrometer); b) balti plotai juodame fone – tai šioje teritorijoje esančių medžių kamienai; c) žemės danga: tamsiai žalia – spygliuočiai, šviesiai žalia – apatinės medžių šakos, šviesiai violetinė – žvyras, geltona – lapuočiai, oranžinė – sausa žemė, raudona – drėgna žemė, šviesiai mėlyna – vanduo, tamsiai mėlyna – gilus arba švarus vanduo (Canada Centre for Remote Sensing, 2009)

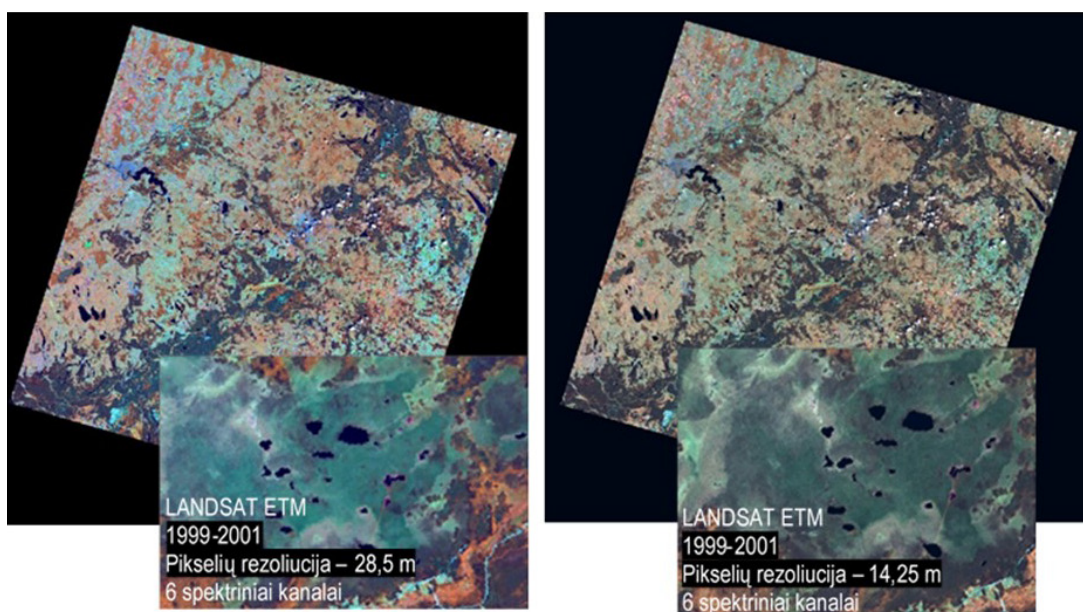
Objektas	Visi šalies miškai	Atskiri miškų rajonai, šimtai tūkstančių ha	Atskiri miško objektai, atskiri medžiai, dešimtys – šimtai ha
Naudojimo tikslai	Miško dangos dinamikos stebėseną, pakitimų identifikavimas, apibendrintų miško charakteristikų lokalizavimas, miškų būklės identifikavimas, ...	Inventorizacija ūkinei veiklai planuoti, jos stebėsenai vykdyti, stichinių veiksnių padarinių bei kenkėjų židinių identifikavimas, medynų būklės identifikavimas, ...	Lokalių vietovės matavimo duomenų surinkimas, miško produkcijos apskaita, medžių būklės identifikavimas...
Įranga	Kosminiai optiniai jutikliai, potencialiai RaDAR 	Pilotuojamuose orlaiviuose montuojami optiniai jutikliai, LiDAR 	Pilotuojamuose ir bepiločiuose orlaiviuose montuojami optiniai jutikliai, LiDAR 
Skiriamoji geba	5-10-20 m, kasmet	0,3-1 m, pagal poreikį	0,05-0,3 m, pagal poreikį

3.3.13. pav. Populiariausi Lietuvoje miškų tipams išskirti ir rūšims identifikuoti naudojami nuotolinių tyrimų duomenys (Mozgeris ir kt., 2018).

Drėgnose tropinėse platumose SAR duomenys dažnai būna pagrindinis šaltinis, padedantis stebėti tokių teritorijų miškų pokyčius. Šiose platumose, aerofoto- ir ortofoto- duomenys dažniausiai naudojami, kai reikalinga didelė skiriamoji geba, pvz., miško tipui išskirti. O vidutinėse platumose galima gana efektyviai naudoti palydovinių optinių jutiklių vaizdus derinant juos su radarų duomenimis.

Miškų tipams išskirti bei rūšims identifikuoti Lietuvoje populiariausi yra aerofotografiniai, ortofotografiniai, *Landsat*, SPOT, *Sentinel* duomenys. *Landsat* duomenys yra labiausiai naudojami miškų tipams atpažinti, o aerofotografiniai ir skaitmeniniai ortofotografiniai duomenys – lokalinio lygmens medžiams identifikuoti. Pvz., SAR jutikliai (RADARSAT) papildo optinių jutiklių informaciją, kai debesuota (3.3.13. pav.).

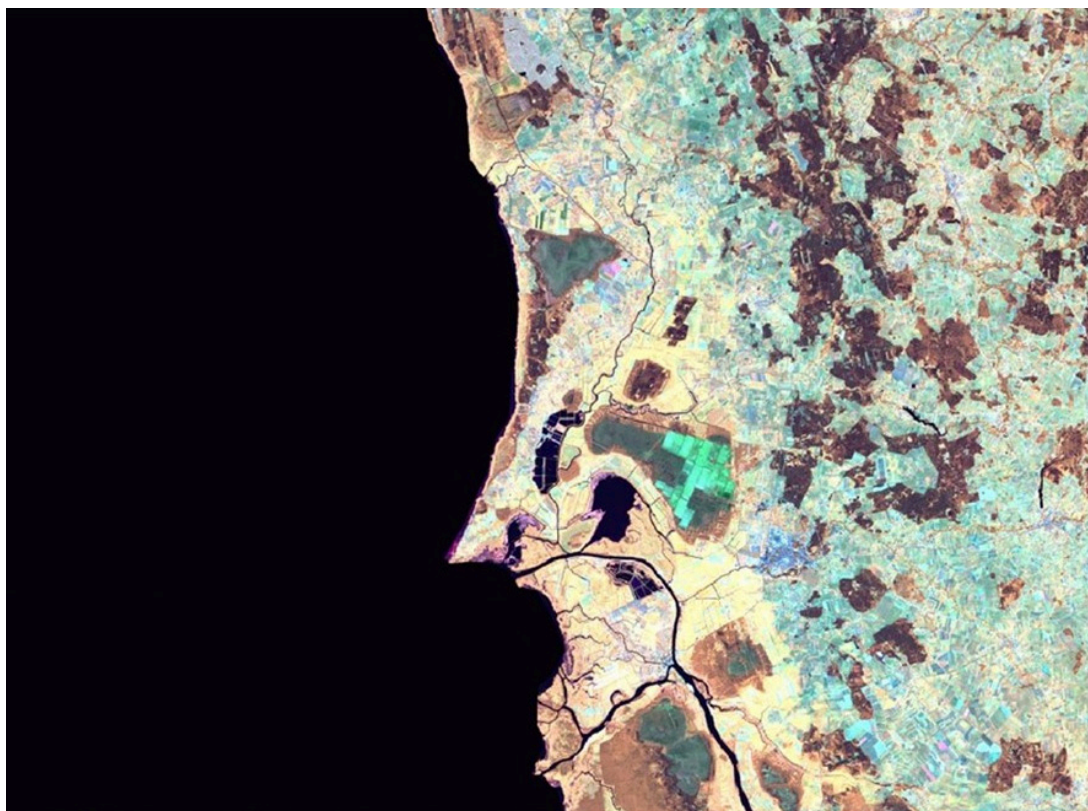
Lietuvos pavyzdys (Miškų dangos identifikavimas aukštapelkių buveinėse). Viena iš aktualiausių šių laikų problemų – gyvųjų organizmų buveinių fragmentacija – palietė ir jautrias Lietuvos aukštapelkių buveines. Dėl antropogeninės veiklos, o nuo XX a. 7-ojo dešimtmečio ir paaštrėjus klimato pokyčiams sutrikdytas hidrologinis režimas lemia medinės augalijos invaziją į Europos mastu unikalias atviras aukštapelkių ekosistemas. Jų išsaugojimas yra viena iš prioritetinių LR bioįvairovės apsaugos politikos kryptių. Todėl buvo atliktas medinės augalijos invazijos į aukštapelkių buveines tyrimas: 1999–2001 m. panaudojant palydovo *Landsat 7* duomenis (*Landsat* ETM nuotraukas), ERDAS IMAGINE programiniu paketu buvo atliekama 6 pelkinių masyvų daugiaspektrė analizė. Detalesnei medinės augalijos kaitos analizei buvo pasirinktos trys aukštapelkės – Amalvo, Rėkyvos ir Aukštumalos pelkiniai kompleksai, kurių skirtingos fizinės geografinės sąlygos. Medinės augalijos kaitos analizei naudota trijų laikotarpių kartografinė medžiaga: 1946–1951 m. aerofotografinės nuotraukos, atspindinčios santykinai natūralią medinės augalijos situaciją prieš melioracijos darbus; 1972–1983 m. aerofotografinės nuotraukos, atspindinčios dėl melioracijos įtakos atsiradusius medinės augalijos pokyčius; 1999–2001 m. *Landsat* ETM vaizdo iš kosmoso nuotraukos. Tyrimui buvo naudojami tiek daugiaspektriai (1, 2, 3, 4, 5 ir 7 spektro juostos) ETM vaizdai, kurių pikselių skiriamoji geba siekia 28,5 m, tiek vaizdai su paryškinta skiriamąja geba – 14,25 m (3.3.14. pav.).



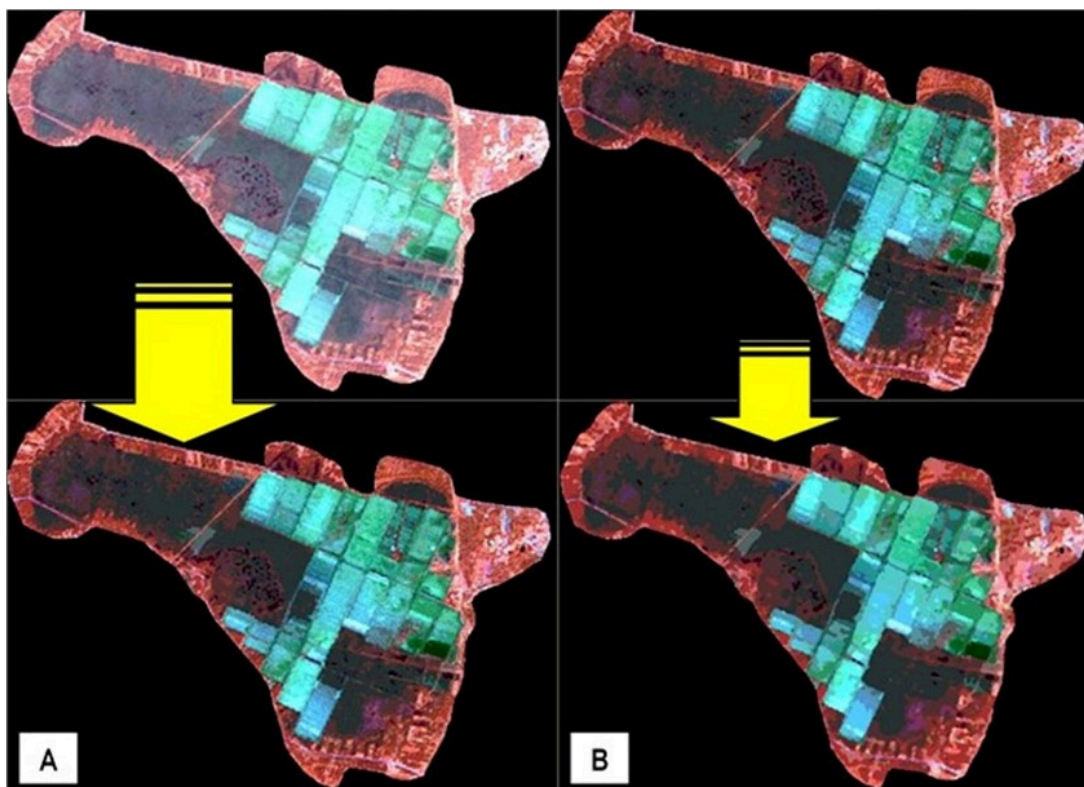
3.3.14. pav. Miškų dangai aukštapelkių buveinėse identifikuoti naudoti skirtingos skiriamosios gebos *Landsat* ETM vaizdai.

Norint iš šių nuotraukų išgauti kuo daugiau informacijos, spektrinei analizei buvo naudojama skirtingų skenavimo juostų kombinacija: artimųjų infraraudonųjų spindulių ruožas (NIR) (4 juosta), trumpųjų infraraudonųjų spindulių ruožas (SWIR) (5 juosta), raudonos spalvos ruožas (3 juosta) (3.3.15. pav.). Ši kombinacija augaliją perteikia skirtingais rusvo, žalio ir oranžinio atspalvio tonais bei geriausiai atspindi chlorofilo kiekį žemės dangoje. Pelkinei augalijai klasifikuoti panaudotas vienas iš spektrinės analizės algoritmų – RGB klasterizacija (3.3.16. pav. A). Vykdam šią funkciją, pasirenkami 3 spektro juostos (4, 5, 3) ir jų pagrindu yra suformuojamas vientisas tematinis rastrinis sluoksnis, kuriame spalvų reikšmės kinta nuo 0 iki 255. Atliekamas gauto tematinio rastrinio sluoksnio statistinis filtravimas (naudojamas daugumos filtras 5×5), kad skirtingi elementai būtų sulieti į erdviškai vientisas struktūras (3.3.16. pav. B). Atlikus šiuos veiksmus buvo gauti 2 tos pačios teritorijos skirtingos skiriamosios gebos tematiniai rastriniai sluoksniai (3.3.17. pav.).

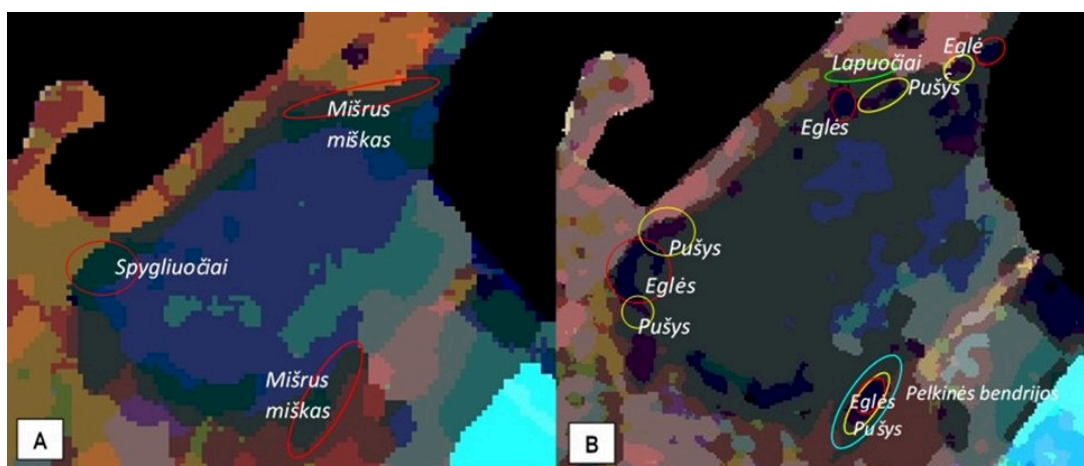
Remiantis atlikta hidrologinių ir klimatinių rodiklių analize bei turint omenyje nagrinėtų aukštapelkių užaugimo medine augalija tendencijas (per paskutinius 30 m. augalijos prieaugis stebimas visose pelkėse – Aukštumaloje 61,4 %, Amalve 49,6 % ir Rėkyvoje 4,5 %), galima prognozuoti laipsnišką europinės svarbos buveinių – aukštapelkinių plynių – nykimą.



3.3.15. pav. Landsat ETM spektro juostų RGB kombinacija, panaudota spektrinėje analizėje: *Red* – 4 juosta (NIR, 0,77–0,90 μm); *Green* – 5 juosta (SWIR, 1,55–1,75 μm); *Blue* – 3 juosta (raudonos spalvos ruožas, 0,63–0,69 μm).



3.3.16. pav. Spektrinės analizės algoritmo taikymo metu buvo suformuoti vienetas tematinis rastrinis sluoksnis (A) ir su gautu sluoksniu buvo atliekamas statistinis filtravimas (filtras 5×5), kad skirtingi elementai būtų sulieti į erdviškai vienetas struktūras (B). Lyginant apatinius A ir B vaizdus, centrinėje pelkės dalyje matyti pačių smulkesnių fragmentų sujungimas.



3.3.17. pav. Gauti 2 skirtingos erdvinės skiriamosios gebos (A – 28,5 m, B – 14,25 m) tematiniai rastriniai sluoksniai (skirtingos A ir B vaizduose esančios spalvos identifikuoja skirtingą augalinį paviršių).

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokios miškų charakteristikos yra koduojamos aviacinėse ir palydovinėse platformose gaunamuose vaizduose?
- Kokie pagrindiniai elektromagnetinių bangų spektro ruožai yra naudojami, norint gauti informacijos apie medžių būklę?
- Kodėl lapų ląstelės išsklaido saulės spinduliuotę artimajame infraraudonajame (NIR) spektriniame diapazone?
- Jums, remiantis nuotoliniais metodais, reikia ištirti Vilniaus mieste esančių pavienių medžių būklę. Tam tikslui tiktų AVHRR ar MODIS jutiklių duomenys? Kodėl?
- Pateikite jutiklio MODIS panaudojimo pavyzdžių.
- Kodėl aktyvieji optiniai jutikliai ir radaro jutikliai yra pranašesni už optinius jutiklius miškų tyrimuose?
- Kodėl svarbu naudoti nuotolinius tyrimus miškų kirtimų diagnostikai?
- Kokie yra pagrindiniai nuotolinių tyrimų duomenų reikalavimai, norint juos naudoti kartografuojant miškų kirtimus?
- Kokie jutikliai yra naudingesni drėgnųjų tropinių miškų kirtimų tyrimuose?
- Kokius nuotolinių tyrimų duomenis yra racionalu naudoti miškams tipizuoti stambiu ir smulkiu masteliu? Kodėl?
- Kokie pagrindiniai nuotolinių tyrimų duomenų reikalavimai, norint juos naudoti miško rūšims identifikuoti?
- Kokie populiariausi nuotolinių tyrimų duomenys naudojami inventorizuojant ir kartografuojant Lietuvos miškus?

NAUDOTA LITERATŪRA

- ASU Miškotvarkos ir medienotyros institutas (2018). *Konferencijos „Lietuvos miškotvarkos iššūkiai ir perspektyvos“ medžiaga* [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga internete: <https://forest.lt/go.php/lit/Mokslines-konferencijos-Lietuvos-misko-ukio-issukiai-ir-perspektyvos-2018-medziaga/6163>
- Clark Labs (2016). *Global Data Archive 2: AVHRR NDVI (3g) 0.083 degree 1982–2014* [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga internete: <https://clarklabs.org/additional-products/global-archive-2-avhrr/>
- Hussin, Y. A., Bijker, W. (2000). Inventory of remote sensing applications in forestry for sustainable management. *International Archives of Photogrammetry and remote sensing*, XXXIII, Part B7.
- Ibarrola-Ulzurrun, E., Marcello, J., Gonzalo-Martín, C., Martín-Esquivel, J. L. (2019). Temporal dynamic analysis of a mountain ecosystem based on multi-source and multi-scale remote sensing data. *Ecosphere*, 10(6):e02708.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd edition)*. USA: Prentice Hall.
- Juknelienė D., Mozgeris G. (2017). The spatial pattern of forest cover changes in Lithuania during the second half of the twentieth century, *Žemės ūkio mokslai*, 22 (4): 209-215
- NASA Earth Observatory (2000). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)* [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga internete: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- Mozgeris G. (2008). Estimation and use of continuous surfaces of forest parameters: options for Lithuanian forest inventory, *Baltic Forestry* 4 (2): 176-184
- Mozgeris G., Bikuviene I., Jonikavičius D. (2017). The opportunities and challenges of using airborne laser scanning for forest inventories in Lithuania, *Proceedings of the 8th International Conference Rural Development 2017*, <http://doi.org/10.15544/RD.2017.023>

- Mozgeris, G., Jonikavičius, D., Juodkienė, V. (2018). *Nuotolinių tyrimų reikšmė Lietuvos miškininkystėje bei užduotys mokslui*. Cartocon konferencija, Vilnius [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga internete: <https://cartocon.lt/material/2018/Pranesimai/MozgerisG-CartoCon2018-NuotoliniuTyrimuReiksme.pdf>
- Šimanauskienė R., Linkevičienė R., Bartold M., Dąbrowska-Zielińska K., Slavinskienė G., Veteikis D., Taminskas J. (2019). Peatland degradation: The relationship between raised bog hydrology and normalized difference vegetation index. *Ecohydrology*, 12e2159.

3.4. EKSTREMALIŲJŲ SITUACIJŲ VALDYMAS

3.4.1. Ekstremaliosios situacijos ir ekstremalieji įvykiai

Ekstremalioji situacija – dėl ekstremaliojo įvykio susidariusi padėtis, kuri gali sukelti staigų didelį pavojų gyventojų gyvybei ar sveikatai, turtui, aplinkai arba gyventojų žūtį, sužalojimą ar padaryti kitą žalą (Civilinė sauga, 2019).

Kalbant apie ekstremaliųjų situacijų valdymą, įvykiu vadinamas gamtinis arba dėl žmogaus veiklos kylantis įvykis, keliantis pavojų žmonių sveikatai, gerovei ir aplinkai. Įvykis vadinamas ekstremalioju, kai atitinka nustatytus kriterijus, apibūdinančius įvykio poveikį žmonėms, turtui ar aplinkai. Ekstremaliųjų įvykių pavyzdžiai:

- potvynis, poplūdis;
- gaisras;
- sausra;
- augalų ligos, parazitų antplūdžiai;
- audra, vėjai, viesulas;
- hidrotechninių įrenginių avarijos, gedimai (užtvankų, dambų, pylimų, rezervuarų);
- nuošliaužos, kranto erozija;
- karinė ataka, maištas, sukilimas;
- žemės drebėjimas;
- sniego lavinos, cunamis, vulkanų išsiveržimai.

Šiame vadovėlyje terminai „ekstremalioji situacija“ ir „ekstremalusis įvykis“ bus naudojami platesne prasme negu nurodyta teisės aktuose. Palydovinių duomenų panaudojimo metodika dažnai nesiskiria dėl to, ar įvykis atitinka ekstremaliojo įvykio kriterijus, ar ne. Pavyzdžiui, tie patys duomenys ir metodai gali būti naudojami gaisro ir ekstremalaus gaisro poveikiui vertinti. Pats ekstremaliojo įvykio nustatymas ir ekstremaliosios situacijos paskelbimas gali būti paremtas informacija, gaunama iš Žemės stebėjimo palydovų. Terminu „ekstremalusis“ vadovėlyje akcentuojama, kad toks įvykis gali sukelti pavojų žmonių sveikatai, turtui ar aplinkai, o susidarius palankioms sąlygoms gali tapti ekstremalioju įvykiu.

Palydovų svarba valdant ekstremaliąsias situacijas. Palydovinės informacijos panaudojimas valdant ekstremaliąsias situacijas yra nulemtas daugelio veiksnių. Vienas iš svarbiausių veiksnių yra tas, kad patys palydovai nepatiria Žemėje vykstančių ekstremaliųjų situacijų poveikio. Ekstremaliųjų situacijų poveikis galėtų pasireikšti tik jei būtų pažeidžiama palydovinės informacijos gavimo ir apdorojimo sistemos antžeminė dalis, tačiau atsitiktinė tokio įvykio tikimybė labai maža.

Kitas svarbus palydovinės informacijos privalumas, kad informaciją apie ekstremaliojo įvykio erdvinį paplitimą, jo intensyvumą, padarytą žalą galima gauti iš karto iš didelės teritorijos ir kai kuriais atvejais artimu tikrajam laikui. Kokia teritorija bus aprėpiama ir kokių dažnumu gaunama informacija, priklauso nuo konkrečių palydovų ir juose sumontuotų prietaisų. Informacija iš didelės teritorijos svarbi valdant didelės erdvinės aprėpties ekstremaliuosius įvykius, tačiau net ir nedidelės erdvinės aprėpties įvykių paveiktą teritoriją dažnai patogiau įvertinti pagal nuotolinių stebėjimų duomenis nei remiantis antžeminiiais tyrimais.

Žemės stebėjimo palydovais gaunama erdvinė informacija apie ekstremaliuosius įvykius, kurią kitais metodais gauti būtų labai sudėtinga ar brangu. Pavyzdžiui, sausros išplitimą ir jos daromą poveikį žemės ūkiui galima įvertinti pagal dirvožemio drėgmę ir augalijos būklę. Dirvožemio drėgmė ploname (iki kelių milimetrų) paviršiniame Žemės sluoksnyje gali būti įvertinama pagal palydovų duomenis, o naudojant matematinius dirvožemio modelius gali būti apskaičiuojama ir giliau esančių sluoksnių drėgmė. Dirvožemio drėgmės duomenys, gauti iš stebėjimų *in situ*, yra daug tikslesni, tačiau jie atspindi tik konkretaus tašo dirvožemio drėgmę.

Jei teritorijoje nėra dirvožemio drėgmės monitoringo tinklo, palydoviniai duomenys gali būti vienintelis, nors už antžeminius stebėjimus ir mažiau patikimas informacijos šaltinis. Sausros poveikis augalijai gali labai priklausyti nuo to, kokios žemės ūkio kultūros kokiame dirvožemyje auginamos, kokia ūkininkavimo praktika taikoma. Vertinant pagal antžeminių matavimų duomenis būtų išsiaiškinama augalijos būklė konkrečiomis sąlygomis, todėl norint įvertinti didelio masto sausros poveikį reiktų labai daug brangių tyrimų *in situ*. Pagal augalijos atspindžio spektrą galima apskaičiuoti daug su augalijos būkle susijusių indeksų, kurie, kad ir mažiau patikimi, irgi leistų mažomis sąnaudomis įvertinti sausros poveikį didelėje teritorijoje.

Galimybė gauti tikrajam laikui artimus duomenis yra svarbus palydovinių stebėjimų privalumas. Tai ypač svarbu stebint santykinai greitai besivystančias ekstremaliąsias situacijas. Dauguma poliarine orbita skriejančių Žemės stebėjimo palydovų tą pačią teritoriją praskrenda kas dieną ar kas kelias dienas, todėl įvertinti mažos trukmės įvykių kaitą jais dažnai negalima. Tokie palydovai gali būti naudingi vertinant ekstremaliojo įvykio poveikį bei priimant sprendimus šiam poveikiui pašalinti.

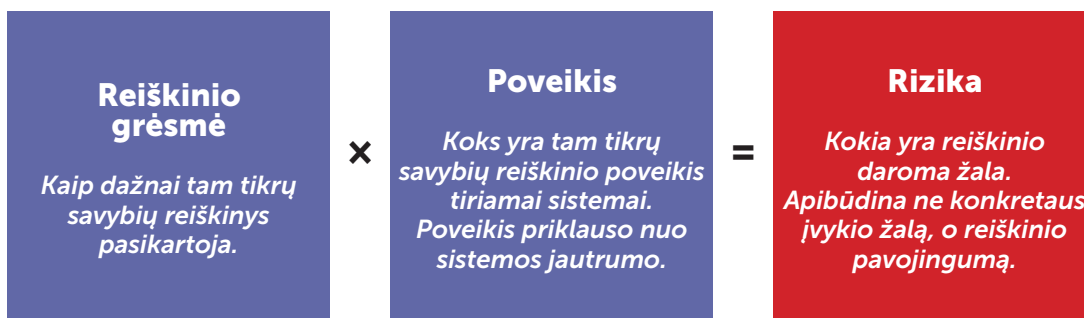
Dažnai antžeminiai tyrimai ir stebėjimai neįmanomi, nes į įvykio teritoriją negalima patekti dėl paties įvykio keliamo pavojaus sveikatai ar gyvybei arba dėl apribojimų, susijusių su politinėmis priežastimis.

Jei didelis įvykių sukeliančio reiškinio kaitos greitis ir apimta didelė teritorija, įvykių kaitą galima stebėti pasitelkus ir geosinchronine orbita skriejančių palydovų duomenis. Šių palydovų duomenų erdvinė raiška dažnai būna mažesnė lyginant su poliarine orbita skriejančių palydovų, nes norint, kad palydovas skrietų geosinchronine orbita, jo aukštis virš Žemės paviršiaus turi būti apie 35786 km, t. y. keliasdešimt kartų aukščiau nei poliarine orbita skriejančių palydovų. Geosinchroninės orbitos palydovai dažnai taikomi meteorologijoje ir gali būti panaudoti sudarant ciklonų ar uraganų prognozes bei skelbiant išankstinius perspėjimus.

Vertinant ilgos trukmės reiškinų, tokių kaip sausros, poveikį užtenka ir rečiau gaunamų duomenų. Pavyzdžiui, sausrų poveikis dažnai vertinamas pagal augalijos biofizinius rodiklius, kurie apskaičiuojami pagal optinių jutiklių duomenis. Optinių prietaisų galimybę matuoti apriboja atmosferos ir debesų poveikis, todėl palydovui praskriejus ne visoje skenavimo teritorijoje gaunami patikimi duomenys. Sujungus kelių matavimų duomenis gaunamas patikimesnis, geriau situaciją teritorijoje apibūdinantis produktas, kuris gali būti naudojamas valdant sausras.

Palydovinė informacija ekstremaliųjų situacijų valdymo stadijose. Prieš įvykį. Su gamtiniais reiškiniais susijusių ekstremaliųjų įvykių rizika apibūdina, koks yra reiškinio konkrečioje vietovėje pavojingumas. Riziką būtų galima apibūdinti vidutiniais reiškinio nuostoliais per daugiametį laikotarpį. Reiškinio rizikos dydis priklauso nuo dviejų dedamųjų: reiškinio grėsmės ir jo daromo poveikio (3.4.1. pav.). Reiškinio grėsmė apibūdina, kokia reiškinio tikimybė konkrečioje vietovėje. Pavyzdžiui, stiprių vėjų ir audrų tikimybė ir grėsmė Vakarų Lietuvoje yra didesnė nei Rytų Lietuvoje. Tikėtina, kad tokio paties greičio vėjas padarys didesnę žalą miestuose nei pievose, todėl vėjo rizika bus didžiausia Vakarų Lietuvos miestuose, mažesnė Rytų Lietuvos miestuose, o mažiausia Rytų Lietuvos pievose.

Žemės stebėjimo palydovais renkama informacija ne tik per patį ekstremalų įvykį ar ekstremaliąją situaciją arba po jų, o nuo misijos pradžios. Informacija, surinkta iki ekstremaliojo įvykio, leidžia įvertinti, kokia yra to įvykio tikimybė ir grėsmė. Pavyzdžiui, remiantis palydoviniais duomenimis galima įvertinti, kokia teritorija užliejama per potvynius. Intensyviau Žemę stebėti iš palydovų pradėta dar ne taip seniai, todėl tiksliai įvertinti ekstremaliųjų reiškinų tikimybę vien pagal palydovinius duomenis yra sudėtinga, dažnai jie pasitarnauja kaip papildomas informacijos šaltinis vertinant reiškinų grėsmę. Vietovėse, kuriose antžeminių stebėjimų duomenų nėra, palydoviniai duomenys tampa vieninteliu ir svarbiausiu informacijos šaltiniu, pagal kurio duomenis galima nustatyti reiškinio grėsmę.



3.4.1. pav. Gamtinio reiškinio rizika ir ją sudarantys komponentai.

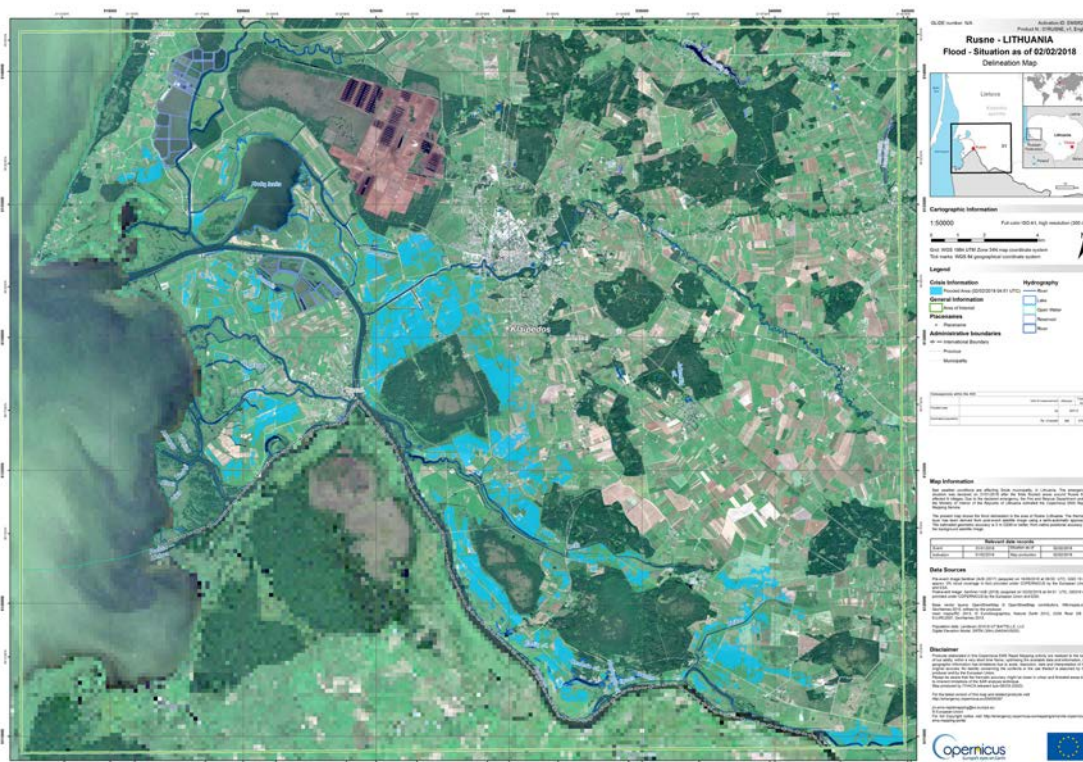
Žinant reiškinio grėsmę galima identifikuoti objektus ar teritorijas, kuriems šis reiškinys pavojingiausias, ir imtis atitinkamų priemonių. Palydovinė informacija gali būti vienas iš informacijos šaltinių, leidžiančių sumažinti teritorijoms kylantį pavojų. Pavyzdžiui, pagal palydovinius duomenis nustatčius teritoriją, kur galimi potvyniai, ir iš ten iškėlus labiausiai pažeidžiamus objektus sumažinamas teritorijos „jautrumas“ potvyniams ir potvynių rizika.

Palydovinę informaciją galima naudoti ir numatant kai kuriuos reiškinis ar kada reikia skelbti perspėjimus apie jų keliamą pavojų. Dažniausiai palydovinė informacija naudojama perspėjant apie pavojingus meteorologinius ar hidrologinius įvykius, tačiau palydovinė informacija gali būti naudojama ir nuspėjant ugnikalnių išsiveržimus, nuošliaužų pavojų ir kitus įvykius.

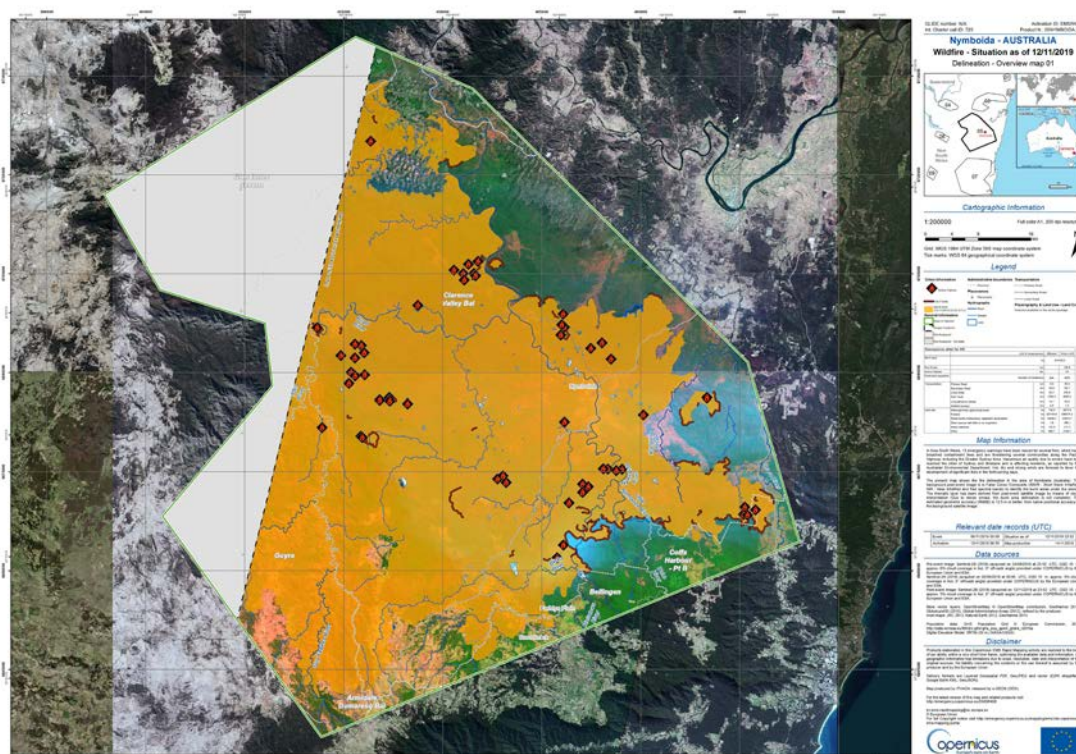
Įvykio metu ir po įvykio. Ekstremaliosios situacijos ar ekstremaliojo įvykio metu palydovinė informacija padeda įvertinti apimamą teritoriją, poveikio mastą, numatyti įvykio vystymosi ir plitimo tendencijas. Informacija apie įvykį sukėlusio reiškinio paveiktą teritoriją ir jos kaitą labai svarbi planuojant gyventojų evakuaciją, pagalbos gabenimo maršrutus, su reiškinio kovojančių pajėgų logistiką. Šiam tikslui svarbiausias kritinės infrastruktūros: kelių, tiltų, pagalbos centrų, prieglaudų, būklės ir pasiekiamumo vertinimas. Svarbiausias palydovinės informacijos privalumas yra tas, kad galima įvertinti sąlygas net ir didelėje teritorijoje išplitusio įvykio metu.

Pavyzdžiui, „Copernicus“ ekstremaliųjų situacijų valdymo tarnyba (angl. Copernicus Emergency Management Service) parengtuose 2018 m. pavasario potvynio Nemuno deltoje žemėlapiuose pavaizduota visa paveikta teritorija, įvertintas jos plotas ir galimai paveiktų gyventojų skaičius (3.4.2. pav.) 2019 m. lapkričio viduryje Australijos Naujojo Pietų Velso valstijoje dėl užsitęsusių sausrų žiemos laikotarpiu ir įvykio metu vyravusių stiprių vėjų labai išplito krūmynų gaisrai. Remiantis palydoviniais duomenimis „Copernicus“ ekstremaliųjų situacijų valdymo tarnyba parengė ekstremaliųjų situacijų žemėlapius, kuriuose pavaizduoti aktyvūs gaisrų židiniai ir gaisrų frontai, paveikta teritorija, kelių tinklas (3.4.3. pav.).

Žemės stebėjimo palydovai nuolat kaupia informaciją, todėl turime duomenis apie teritoriją tiek prieš įvykstant įvykiui, tiek po įvykio. Lyginant šiuos duomenis galima įvertinti ne tik paveiktą teritoriją, bet ir poveikio intensyvumą. Ekstremaliosios situacijos poveikio vertinimo informacija padeda koordinuoti atstatymą ir atkūrimą po ekstremaliosios situacijos. Remiantis šia informacija gali būti išmokamos draudimo išmokos ar skiriamos lėšos kompenсуoti patirtus nuostolius.



3.4.2. pav. „Copernicus“ ekstremaliųjų situacijų valdymo tarnybos 2018 m. pavasario potvynio Nemuno deltoje žemėlapis. *Sentinel 2* duomenys naudoti foniniam žemėlapiui, o *Sentinel 1* – identifikuojant užlietas teritorijas 2018 m. vasario 2 d.



3.4.3. pav. „Copernicus“ ekstremaliųjų situacijų valdymo tarnybos 2019 m. krūmynų gaisrų Australijoje ekstremaliosios situacijos valdymo žemėlapis. *Sentinel 2* duomenys naudoti foniniam žemėlapiui, taip pat siekiant įvertinti gaisrų paveiktą teritoriją bei aktyvius gaisrų židinius ir frontus 2019 m. gruodžio 11 d.

3.4.2. Ekstremaliosioms situacijoms valdyti naudojami palydoviniai duomenys ir metodai

Optinių jutiklių duomenys. Vidutinės ir didelės raiškos regimajame elektromagnetinių bangų spektre galima stebėti žmogaus akimi matomą ekstremaliųjų situacijų poveikį. Naudojant monochromatinius, arba natūralių spalvų, RGB kompozicijos vaizdus dažnai galima įvertinti ekstremaliojo įvykio padėtį ir aprėptį. Pagrindinis tokių vaizdų privalumas yra lengvai vartotojo interpretuojama vaizde matoma informacija. Tokiuose vaizduose intuityviai ir be specialaus pasiruošimo galima atskirti skirtingas žemės dangas, todėl monochromatiniai, arba natūralių spalvų, RGB kompozicijų vaizdai dažnai naudojami suteikiant kontekstą ekstremaliojo įvykio ar ekstremaliosios situacijos paveiktai teritorijai. Pavyzdžiui, *Sentinel 2* daugiaspektrio jutiklio natūralių spalvų RGB kompozicijoje 2019 m. rugpjūtį Brazilijos Amazono valstijoje vykę gaisrai aiškiai matomi vartotojams be specialaus pasirengimo (3.4.4. pav.). Gaisro metu dalį teritorijos dengia dūmai, todėl sunku tiksliai įvertinti, kas vyksta po šia dūmų uždanga.

Pagal natūralių spalvų kompozicijos vaizdą nustatyti, kurie iš gaisro židinių yra aktyvūs ir intensyviausi, galima tik labai subjektyviai, pavyzdžiui, pagal tai, kiek dūmų kyla iš konkretaus gaisro židinio. Suprantama, kad toks metodas yra ne visai tikslus, nes degant skirtingoms medžiagoms išsiskiria skirtingas dūmų kiekis.

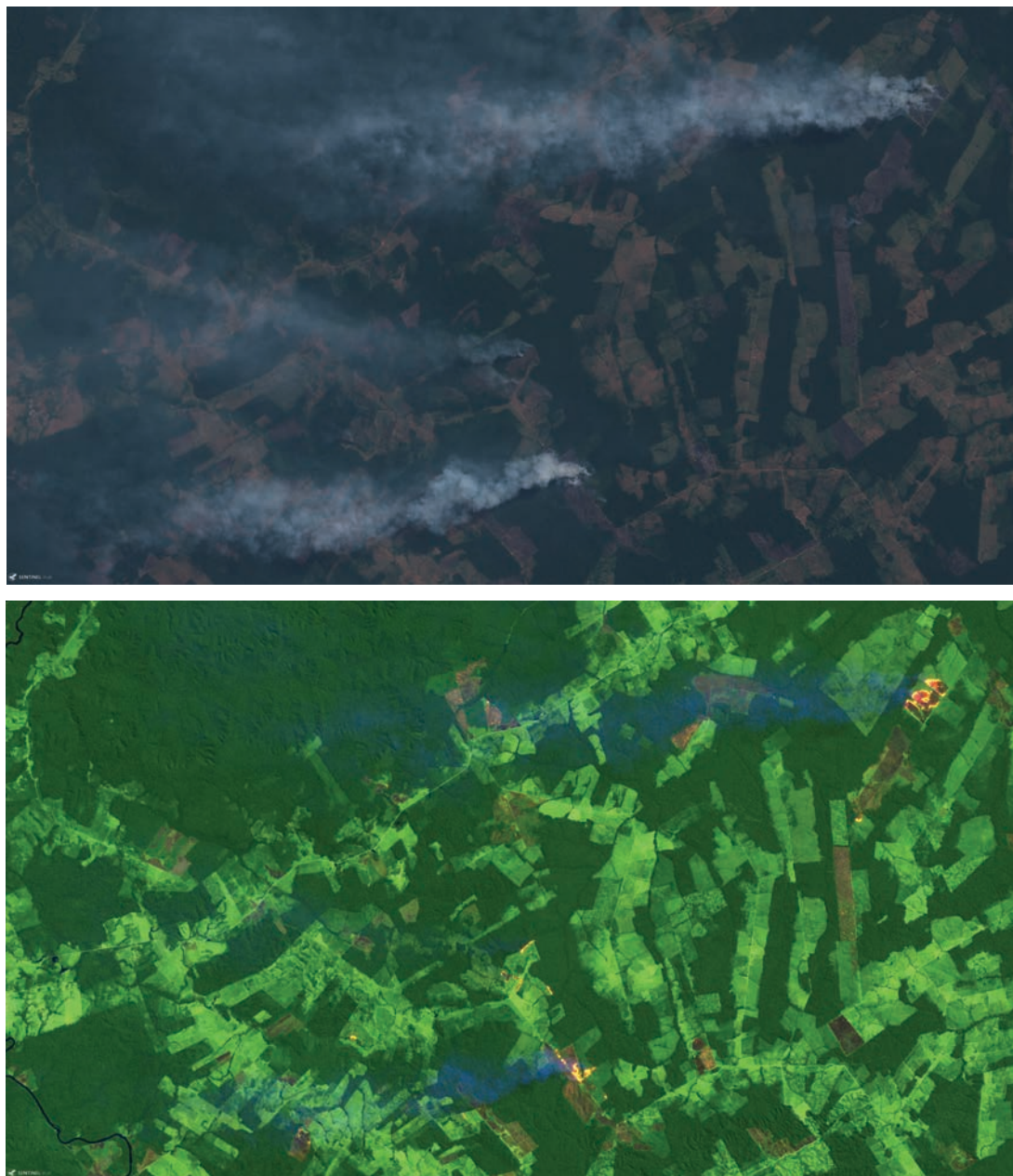
Tikslesnę informaciją apie gaisrų židinius ir jų intensyvumą galima gauti iš RGB vaizdų, sudarytų derinant kitų dažnių bangas. Pavyzdžiui, naudojant RGB vaizdus, sudarytus iš *Sentinel 2* 4, 11 ir 12 juostų, galima ryškiai pamatyti aktyvius gaisro židinius, jų intensyvumą ir išdegusią teritoriją (3.4.4. pav.). Derinant įvairių ilgių bangų informaciją galima suformuoti RGB vaizdus, kurie informatyvūs ne tik gaisrų atveju, bet padeda pavaizduoti ir kitų ekstremaliųjų įvykių poveikį.

RGB kompozicijų vaizdai leidžia vizualiai pateikti ir analizuoti ekstremaliuosius įvykius ar jų poveikį, tačiau tokią analizę apriboja tai, kad vaizdai gali būti sudaromi derinant ne daugiau kaip trijų ilgių bangų informaciją, o apie tai, koks atspindžio intensyvumas konkrečiame bangos ilgyje arba koks santykis tarp atspindžių intensyvumo naudojant skirtingus bangų ilgius, galima spręsti tik iš vaizdo atspalvių.

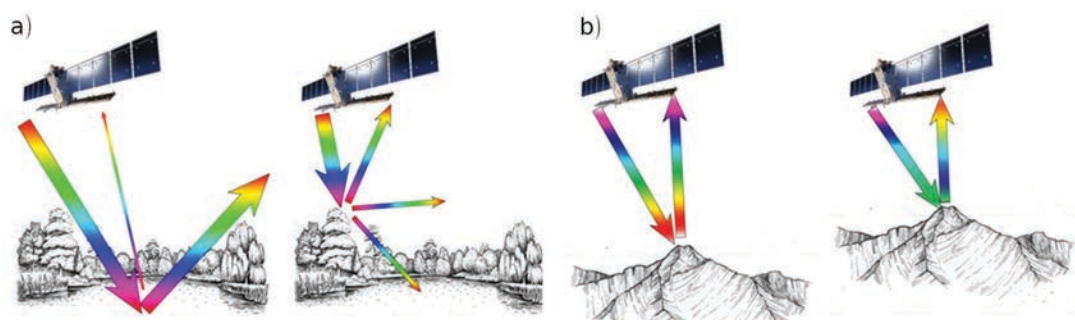
Daug didesnes galimybes nei RGB kompozicijos teikia pagal daugiaspektrinių ar hiperspektrinių prietaisų duomenis apskaičiuoti indeksai. Skaičiuojant indeksus galima atlikti bet kokius matematinius veiksmus su atspindžiais skirtinguose bangų dažniuose ir taip gana tiksliai įvertinti, koks yra atspindžio spektras tuose bangų dažniuose, kurie yra informatyviausi identifikuojant ekstremaliųjų įvykių ar jo poveikį. Pavyzdžiui, regimosios spinduliuotės atspindys nuo vandens paviršiaus yra didesnis nei artimosios infraraudonosios spinduliuotės, todėl skirtumas tarp atspindžio šiuose ruožuose gali būti naudojamas identifikuojant per potvynį vandeniui užlietą teritoriją.

Optinių daugiaspektrinių ar hiperspektrinių jutiklių duomenys leidžia nustatyti ekstremaliojo įvykio paveiktą teritoriją ir jos poveikio intensyvumą pagal Žemės paviršiaus atspindžio spektro pokyčius. SAR duomenys teikia informaciją apie Žemės paviršiaus savybes ir formą bet koku oru ir paros metu. Ekstremaliosioms situacijoms valdyti gali būti naudojama SAR poliarimetrija ir interferometrija.

SAR poliarimetrija. SAR poliarimetrija tiria Žemės paviršiaus ir ant jo esančių objektų skirtingos poliarizacijos elektromagnetinių bangų išsklaidymo savybes. SAR poliarimetrija dažnai taikoma vertinant per potvynius užlietas zonas, nes tarp atspindžio nuo ramaus vandens paviršiaus ir nuo sausumos paviršiaus yra gana ryškus skirtumas (3.4.5. pav.). Panašiu principu remiamasi naudojant SAR poliarimetriją naftos produktų išsiliejimui jūrose ar vandenyne nustatyti. SAR poliarimetriją galima naudoti identifikuojant ledą ir ledų sangrūdas, todėl informacija gali būti labai naudinga numatant potvynius ir jų išplitimo ribas. Jei ekstremalusis įvykis turi įtakos fiziniams paviršiams, pavyzdžiui, augalijos pokyčiams dėl sausros, ligų, gaisro ar vėjo išvartų (3.4.6. pav.), juos taip pat galima nustatyti naudojant SAR poliarimetriją.



3.4.4. pav. Sentinel 2 tikrų spalvų ir B 12, B 11 ir B 4 kanalų RGB kompozicija 2019-18-01 per gaisrą Brazilijos Amazono valstijoje (sudaryta naudojant EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>).

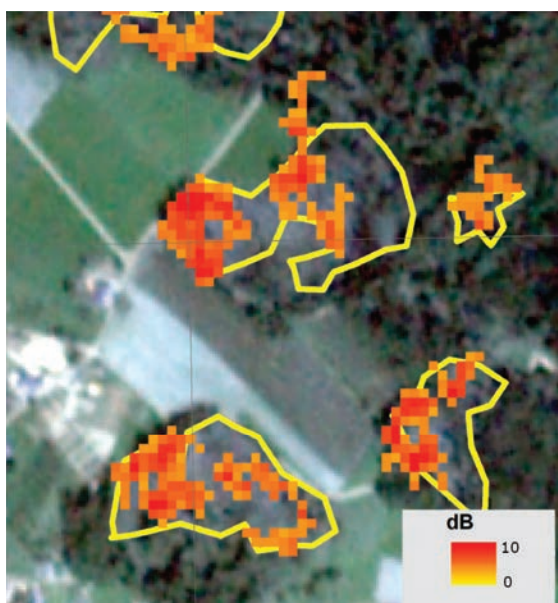


3.4.5. pav. SAR atspindžio bei fazės pokytis: a) lyginant atspindį nuo lygaus (vandens) ir šiurkštaus paviršiaus (miško); b) pasikeitus paklotinio paviršiaus aukščiui.

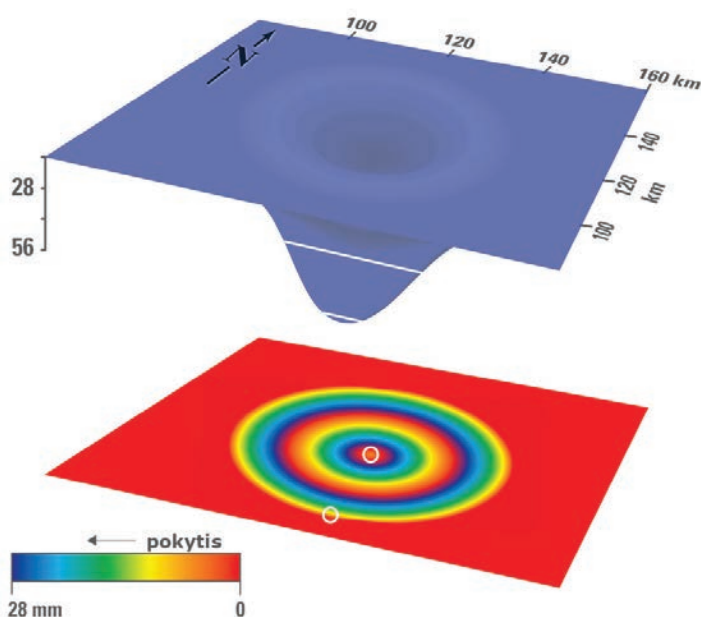
SAR interferometrija. SAR interferometrija padeda įvertinti Žemės paviršiaus aukščio ir formos pokyčius. SAR antenos siunčiamos elektromagnetinės bangos kelias iki Žemės paviršiaus ir atgal yra tam tikras pilnų bangų skaičius ir dalis nepilnos bangos, todėl išspinduliuotos ir grįžusios bangos fazė skiriasi. Jei virš to paties Žemės taško matuojant skirtingu laiku užfiksuojama kitokia bangos fazė, tikėtina, kad pasikeitė Žemės paviršiaus aukštis (3.4.6. pav.).

Jei Žemės paviršius pakilo ar nusileido per pusę bangos ilgio, SAR užfiksuos pusės fazės poslinkį. Kadangi fazės pokyčius galima užfiksuoti gana tiksliai, o Žemės stebėjimo palydovuose naudojamų SAR bangų ilgis yra nuo kelių iki keliolikos centimetrų, galima nustatyti milimetro dalių aukščio skirtumus (3.4.7. pav.). Tokie aukščio skirtumai leidžia įvertinti Žemės paviršiaus ir formos pokyčius, kurie dar prieš nutinkant ekstremaliajam įvykiui gali padėti numatyti nuošliaužų grėsmę (3.4.8. pav.), ugnikalnio išsiveržimą ar žemės drebėjimo tikimybę.

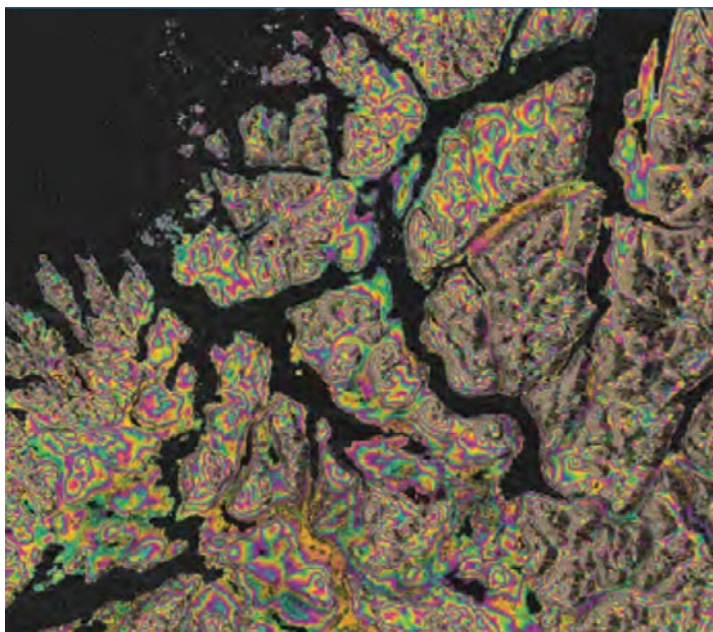
3.4.6. pav. Vėjo išvartos, nustatytos pagal *Sentinel 1* SAR vaizdų prieš viesulą ir po jo atspindžio skirtumą. Paveiklo pagrindui naudota tikrų spalvų RGB kompozicija leidžia įvertinti, kokioje teritorijoje išvartyti medžiai, kokie objektai yra šalia, ar pažeisti medžiai kelia grėsmę turtui ir žmonių sveikatai (Rüetschi ir kiti, 2019).



3.4.7. pav. SAR atspindžio toje pačioje teritorijoje, išmatuoto skirtingomis dienomis, fazės poslinkis leidžia nustatyti santykinę vietovės aukščio pokytį tarp dviejų matavimų. Šiame paveiksle SAR interferograma rodo 56 cm reljefo pokytį.



3.4.8. pav. SAR
interferometrijos taikymas
vertinant nuošliaužų riziką
Norvegijoje (Petiteville ir kiti,
2015).



Nutikus ekstremaliajam įvykiui pagal SAR interferometrijos duomenis galima įvertinti paveiktą teritoriją ir poveikio intensyvumą. Šie duomenys dažnai būna labai svarbūs šalinant poveikio padarinius ir priimant technologinius sprendimus.

3.4.3. Potvyniai ir poplūdžiai

Potvyniai ir poplūdžiai yra vieni iš dažniausiai Lietuvoje pasitaikančių ekstremaliųjų įvykių. Konkretaus potvynio paveiktą teritoriją galima identifikuoti remiantis palydoviniais duomenimis. Norint sudaryti užlietos teritorijos žemėlapius pagal antžeminius stebėjimus, gali prireikti daug laiko ir žmogiškųjų išteklių. Potvynis yra dinaminis reiškinys, užlietos teritorijos dydis gali gana greitai keistis, todėl palydoviniai duomenys, kas kelias dienas aprėpiantys dideles teritorijas ir didžiąją pasaulio dalį, yra labai svarbūs valdant potvynių sukeltas ekstremaliąsias situacijas. Svarbiausias tikslas potvynių metu – nustatyti užlietos teritorijos plotus. Tai galima padaryti išsiaiškinant, kuriuose palydovinio vaizdo taškuose yra vanduo, o kuriuose sausuma.

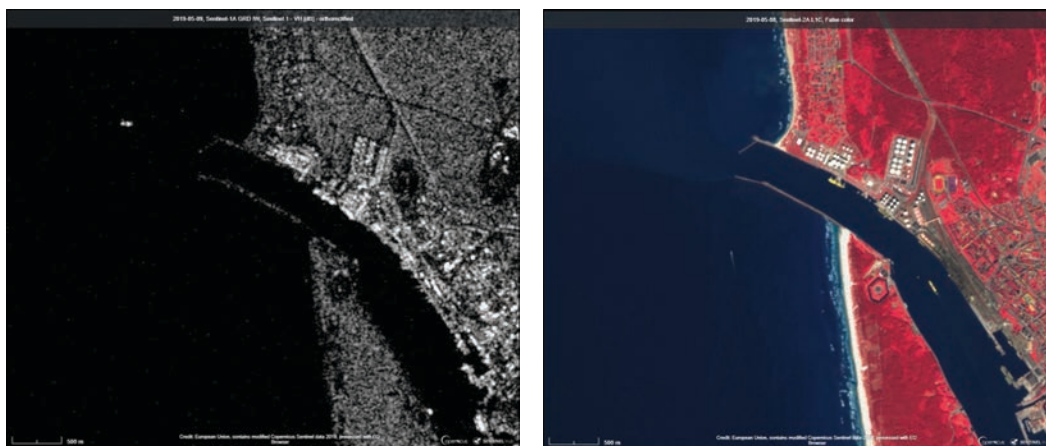
Kaip palydovų duomenyse matomas vanduo? Vandens plotų identifikavimas paremtas tuo, kad vandens paviršius ir sausumos paviršius aiškiai skiriasi tiek naudojant optinių jutiklių duomenis, tiek taikant SAR duomenis. Jei nėra stipraus bangavimo, vandens paviršius lyginant su sausumos paviršiumi yra gana lygus, todėl SAR signalo atgalinė sklaida nuo vandens paviršiaus yra mažesnė nei nuo sausumos (3.4.9. pav.). Māžos *Sentinel 1* SAR atspindžių reikšmės vaizduojamos juoda spalva, o didelės – šviesiais pilkos spalvos tonais. Šiame vaizde iš sausumos plotų aiškiai išsiskiria Baltijos jūra ir Klaipėdos kanalas.

Vanduo gana intensyviai sugeria saulės spinduliuotę. Paviršiniame 10 cm vandens sluoksnyje sugeriama beveik visa infraraudonoji spinduliuotė, o 1 m sluoksnyje šiluma virsta apie 53 % į vandenį krentančios saulės spinduliuotės. Dėl šios priežasties optiniais prietaisais matuojamos atspindžių reikšmės yra daug mažesnės nei nuo sausumos (3.4.9. pav.). Nuo vandens paviršiaus atspindima iki 10 % spinduliuotės, nuo augalijos iki 50 %, o nuo dirvos apie 40 % spinduliuotės.

Vandens paviršiaus atspindžių spektro profilis skiriasi nuo sausumos. Distiliuotame vandenyje intensyviausiai sugeriama infraraudonoji spinduliuotė ir raudonieji spinduliai, o atspindys nuo vandens paviršiaus yra intensyviausias mėlynos ir žalios spalvos bangų ruožuose.

Vandens paviršiaus atspindžių spektro profilį gali labai pakeisti vandenyje esantys ištirpę spalvoti organiniai junginiai, suspenduotos dalelės arba fitoplanktonas. Atspindžio spektrą gali paveikti ir per vandens sluoksnį prasišviečiantis vandens telkinio dugnas. Pavyzdžiui, *Sentinel 2* netikrų spalvų RGB kompozicijoje matosi, kad atspindžiai atviroje jūroje ir priekrantėje skiriasi dėl per vandenį matomų sėklių (3.4.9. pav.).

NDWI. Remiantis optinių jutiklių duomenimis vizualiai atskirti vandens paviršių plotus nuo kitų žemės dangų gali būti sudėtinga. Pavyzdžiui, atskiriant ežerus ir tvenkinius nuo tamsių spygliuočių miškų ir pelkių galima lengvai suklysti (3.4.10. pav.). Daug lengviau vandens plotus identifikuoti suskaičiuojant paviršiaus atspindžio spektro savybes apibūdinančius indeksus. Vienas iš dažnai vandeniui identifikuoti taikomų indeksų yra NDWI (McFeeters, 1996) (3.4.10. pav.).



3.4.9. pav. 2019 m. gegužės 9 d. *Sentinel 1* SAR VH poliarizacijos duomenys (kairėje) ir 2019 m. gegužės 9 d. *Sentinel 2* netikrų spalvų RGB kompozicija (dešinėje) (sudaryta naudojant EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>).



3.4.10. pav. Pagal 2018 m. rugpjūčio 23 d. *Sentinel 2* duomenis padaryta natūralių spalvų RGB kompozicija ir naudojant tuos pačius duomenis apskaičiuotos NDWI reikšmės (sudaryta naudojant EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>).

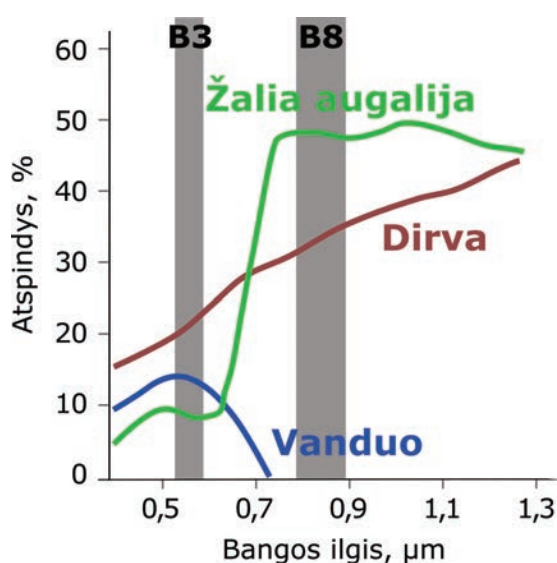
Atspindžio nuo vandens paviršiaus ir nuo augalijos ar dirvos spektras labai skiriasi. Vanduo intensyviai sugeria infraraudonąją spinduliuotę, o sausumos paviršius ją gerai atspindi (3.4.11. pav.). Žalios augalijos ir dirvos atspindžio intensyvumas mėlynoje ir žalioje spektro dalyje yra mažesnis lyginant su infraraudonųjų bangų atspindžiu, o nuo vandens paviršiaus la-

biausiai atspindima mėlynos ir žalios spalvos spinduliuotė. Remiantis šiais atspindžių spektro skirtumais NDWI yra nustatomas vanduo palydovinio vaizdo taškuose. NDWI skaičiuojamas naudojant atspindį žalios spalvos spektro dalyje ir artimos infraraudonosios (NIR) spinduliuotės dalyje:

$$NDWI = \frac{\text{žalia} - NIR}{\text{žalia} + NIR} \quad (3.4.1.)$$

Kai atspindys žalios spalvos spektro dalyje yra didesnis nei atspindys NIR spinduliuotės dalyje, NDWI reikšmės yra teigiamos, ir indikuoja, kad palydovinio vaizdo taške yra vandens paviršius. Jei NDWI reikšmės lygios 0 arba neigiamos, palydovo vaizdo taške yra sausumos paviršius. Šis indeksas gerai tinka vandens telkinio pokyčiams ir potvyniams nustatyti, tačiau yra ir kita NDWI versija, skirta įvertinti vandens kiekio pokyčius dirvožemyje ir augalijoje bei naudoja NIR ir SWIR spinduliuotės informaciją (žr. 3.2.3. skyrelį).

3.4.11. pav. Skirtingų Žemės paviršiaus tipų atspindžio spektras ir *Sentinel 2* žalios (B3) ir artimos infraraudonosios (B8) spektro dalies kanalai.



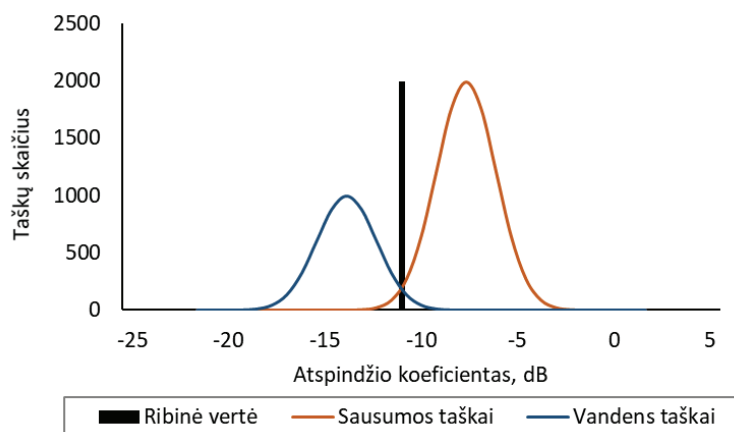
Skaičiuojant NDWI pagal *Sentinel 2* MSI duomenis naudojamos spektrinės juostos B 3 ir B 8. Vandens plotus galima identifikuoti ir pagal kitus indeksus, paremtus panašiu principu. Pavyzdžiui, pagal augalijos būklei skirtą NDVI reikšmes taip pat galima išskirti vandens plotus, tačiau jis skaičiuojamas pagal atspindį artimosios infraraudonosios (NIR) spinduliuotės spektro dalyje ir raudonos spalvos, kurioje atspindys nuo vandens paviršiaus yra silpnėnis.

SAR duomenų ribinės vertės. SAR atspindys nuo vandens paviršiaus yra mažesnis nei nuo sausumos paviršiaus, todėl identifikuojant vandens plotus pagal SAR duomenis gali būti naudojamas ribinės vertės metodas. Remiantis šiuo metodu pasirenkama atspindžio ribinė vertė, už kurią žemesnės atspindžio reikšmės rodo vandens paviršių. Ribinė vertė dažnai pasirenkama pagal statistinį atspindžio reikšmių pasiskirstymą. Jei tiriamoje teritorijoje yra vandens ir sausumos plotų, tikėtina, kad SAR atspindžio reikšmės turės bimodalinį skirstinį (3.4.12. pav.). Du skirstinio pikai siejami su atspindžiais nuo vandens ir sausumos paviršiaus. Pasirinkus ribinę vertę tarp šių dviejų pikų galima identifikuoti vandens plotus mažoms atspindžių reikšmėms priskiriant vandens kodą, o didelėms – sausumos. Šis reikšmių priskyrimas vadinamas binarizavimu. Riba tarp vandens ir sausumos pikselių reikšmių dažnai nėra ryški, todėl praktikoje geriau parinkti ribą patikrinus su keliomis ribinėmis reikšmėmis gaunamus rezultatus.

Jei pagal atspindžio reikšmių skirstinį nepavyksta nustatyti ribinės reikšmės, skiriančios sausumą nuo vandens, galima įvertinti atspindžio reikšmes virš nuolatinių vandens telkinių,

kur yra aišku, kad atspindys grįžo nuo vandens telkinio. Gavus vandens telkinių paviršiaus atspindžio reikšmes, pagal pasirinktą ribą, artimą didžiausioms reikšmėms (pavyzdžiui, pagal 90 % procentilį), galima išskirti vandens paviršiaus plotus.

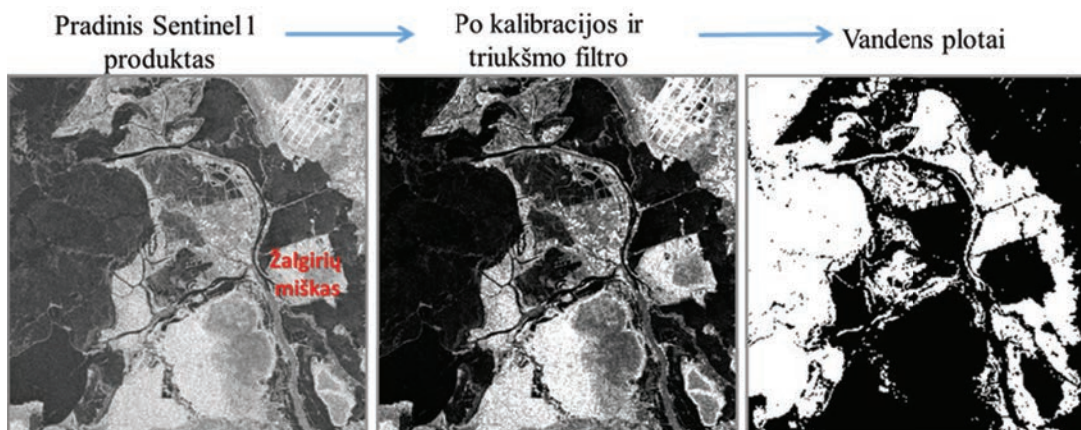
3.4.12. pav. Bimodalinis SAR vaizdo atspindžio koeficiento reikšmių pasiskirstymas sudarytas iš taškų, esančių sausumos ir vandens paviršiuje. Ribinė vertė, naudojama atskirti vandens ir sausumos plotus, nustatoma pagal skirstinio pikų padėtį.



Norint patikimiau išskirti vandens plotus, prieš ribinės atspindžio reikšmės nustatymą reikia parengti SAR duomenis. Pagrindiniai žingsniai:

- informacijos apie palydovo orbitą patikslinimas;
- SAR prietaiso šiluminės spinduliuotės poveikio pašalinimas;
- duomenų kalibravimas;
- SAR triukšmo, atsirandančio dėl gretimų taškų, atspindžio šalinimas;
- reljefo korekcija.

Vertinant vandens plotus pagal SAR duomenis gali būti netiksliai įvertinamas potvynio užlietos teritorijos plotas miškuose. Dėl miškų poveikio SAR signalas labiausiai išskaidomas medžių lajose, todėl nepasiekia Žemės paviršiaus. Net jei miške Žemės paviršius yra užlietas vandens, palydovinio vaizdo taškai nėra priskiriami užlietai teritorijai. Pavyzdžiui, pagal reljefo duomenis į rytus nuo Skirvytės ir Atmosos išsišakojimo esančiame Žalgirių miške yra žemesnės teritorijos nei šalia miško identifikuoti užlietai plotai, todėl labai tikėtina, kad potvynio vanduo bus išsiliejęs ir miško teritorijoje, tačiau nei 3.4.2. pav., nei 3.4.13. pav. tokie plotai nėra išskirti. Norint tikslai identifikuoti potvynio ribas, reikia pagal palydovinius duomenis identifikuotus užlietus plotus koreguoti naudojant vietovės aukščių duomenis.



3.4.13. pav. Vandens plotų identifikavimas taikant SAR duomenis. 2018-01-31 potvynio Nemuno deltoje pavyzdys. Paskutinėje paveikslėlyje vandens plotai vaizduojami balta spalva.

3.4.1. lentelė. Vandens plotų identifikavimo metodų palyginimas.

OPTINIAI PRIETAISAI	SAR
Didelė raiška – tinka mažiems vandens telkiniams arba pakrantėms.	Raiška dažnai mažesnė už optinių prietaisų.
Reikšmingos paklaidos sekliuose vandenyse arba kur yra gausi vandens ar priekrančių augalija.	Pasirinkus netinkamą ribą tarp radaro atspindžio iš sausumos ir vandens paviršiaus, gaunamas netikslus rezultatas.
Yra daug indeksų ir jų modifikacijų, todėl galima taikyti tuos indeksus ar jų kombinacijas, kurie konkrečioje vietovėje tiksliausi.	Tikslumą gali paveikti bangavimas ir vandens augalija, kuri padidina paviršiaus šiurkštumą ir atgalinės sklaidos intensyvumą.
Netinka, kai teritorija padengta debesimis.	

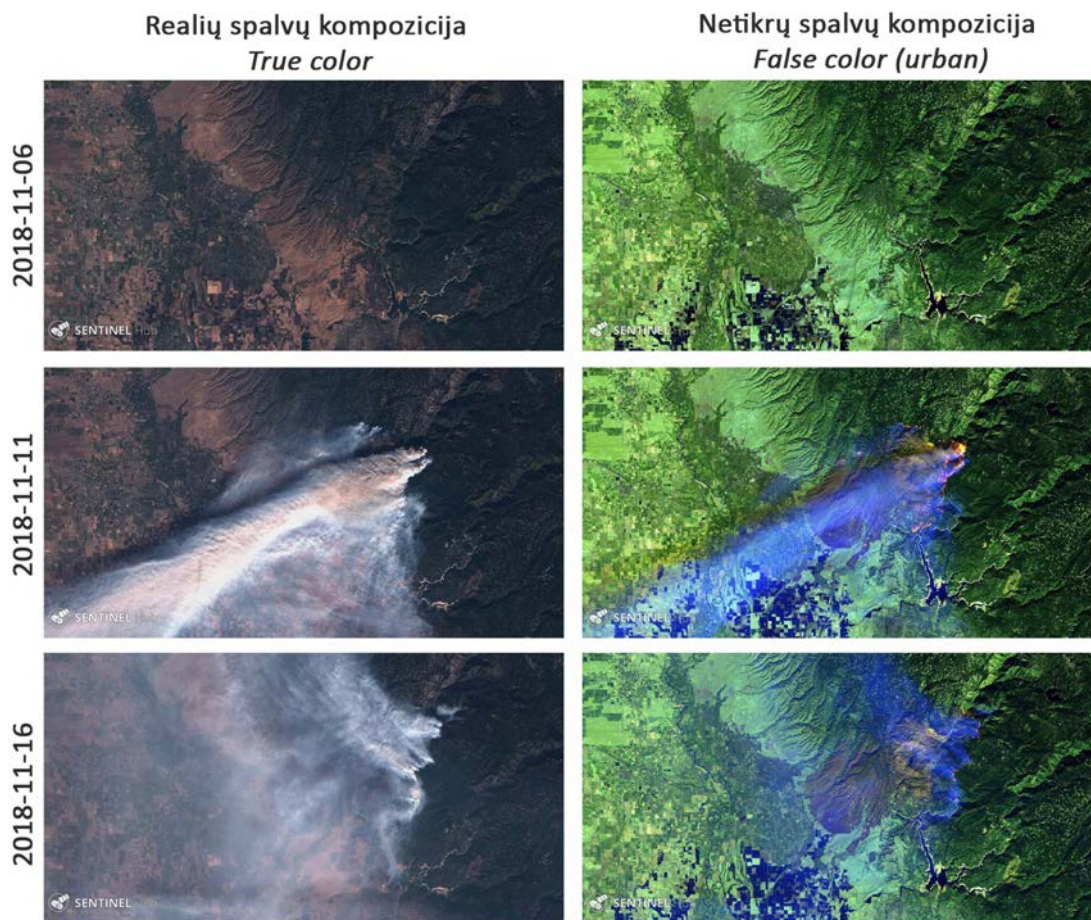
3.4.4. Gaisrai

Gaisrų sukelti ekstremalieji įvykiai yra dažni ir padaro didelių nuostolių. Jie gali visiškai sugadinti žmonių turtą, pažeisti ar sunaikinti augaliją. Gaisrai gali kilti staiga ir susidarius palankioms sąlygoms labai greitai plisti, todėl kelia didelį pavojų žmonių sveikatai ir gyvybei. Atstatymas po gaisrų yra brangus ir gali užtrukti daug laiko. Potvyniai dažniausiai paveikia šalia vandens telkinių arba žemesnėse reljefo formose esančią teritoriją, todėl prie potvynių visuomenė ir gamta yra prisitaikiusi. Didesnius nuostolius padaro tik dideli ir retai pasitaikantys potvyniai, tačiau ir jų riziką galima sumažinti, kai yra žinoma galimai jų paveikiama teritorija. Gaisrai gali kilti bet kur, todėl labai svarbu kuo greičiau pastebėti gaisrų židinius. Jei gaisras kyla žmonių gyvenamoje aplinkoje, jis dažnai pastebimas gana greitai ir galima pradėti jį gesinti, kol dar neišplito. Gamtoje kylančius gaisrus pastebėti galima tik vykdant jų monitoringą didelėje teritorijoje. Žemės stebėjimo palydovai nuolat renka duomenis apie dideles teritorijas, todėl palydoviniai duomenys labai intensyviai naudojami nustatant gaisrų židinius, koordinuojant veiksmus gaisrų metu ir vertinant gaisrų padarytą žalą (3.4.14. pav.).

Gaisrų židiniai. Naudojant palydovinius duomenis gaisrų židiniams nustatyti yra remiamasi tuo, kad juose temperatūra yra gerokai aukštesnė nei aplinkos. Kiekvienas kūnas, kurio temperatūra aukštesnė už absoliutųjį nulį, spinduliuoja elektromagnetines bangas, o spinduliavimo spektrą lemia kūno temperatūra. Žemės paviršiaus temperatūra yra artima 300 K ir jos paviršius intensyviausiai spinduliuoja šiluminės infraraudonosios spinduliuotės (TIR) dalyje (10,85 μm) (3.4.15. pav.). Degant augalijai (600–1400 K) intensyviau spinduliuojama viduriniojoje infraraudonojoje spektro dalyje (MIR) (3,74 μm).

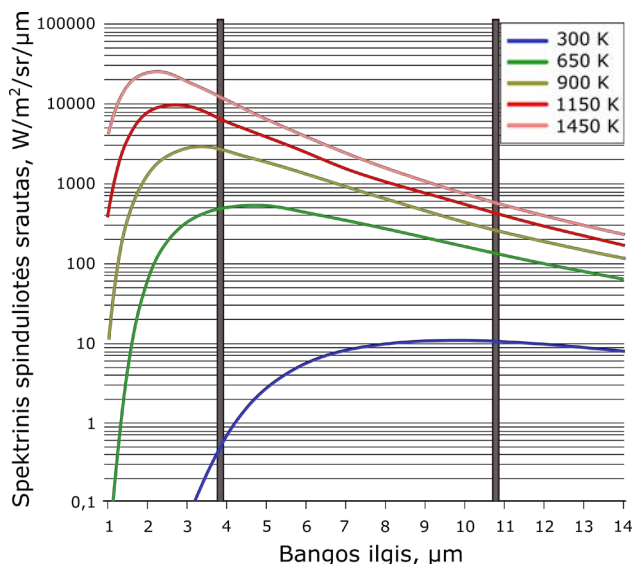
Gaisro židiniai nustatomi vertinant skirtumą tarp TIR ir MIR spinduliuotės intensyvumo kiekviename palydovinio vaizdo taške. Gaisro židiniai dažnai užima nedidelę teritoriją. Ji dažnai būna mažesnė nei palydovų jutiklių erdvinė raiška, tačiau spektro skirtumas tarp Žemės paviršiaus ir degančios augalijos yra toks didelis, kad net jei gaisras vyksta tik nedidelėje palydovo vaizdo taško užimamos teritorijos dalyje, jis gali būti nustatomas. Žinoma, tiksli gaisro židinio padėtis vaizdo taško teritorijoje nebus nustatoma, tačiau net jei palydoviniai duomenys yra vidutinės raiškos, pavyzdžiui, taško plotas atspindi 1 km² teritoriją, ekstremaliųjų situacijų valdymui ši informacija yra labai naudinga. Taikant mažą TIR ir MIR spinduliuotės intensyvumo ribą galima identifikuoti gaisrus, kurie apima 1/1000 palydovinių duomenų taško teritoriją.

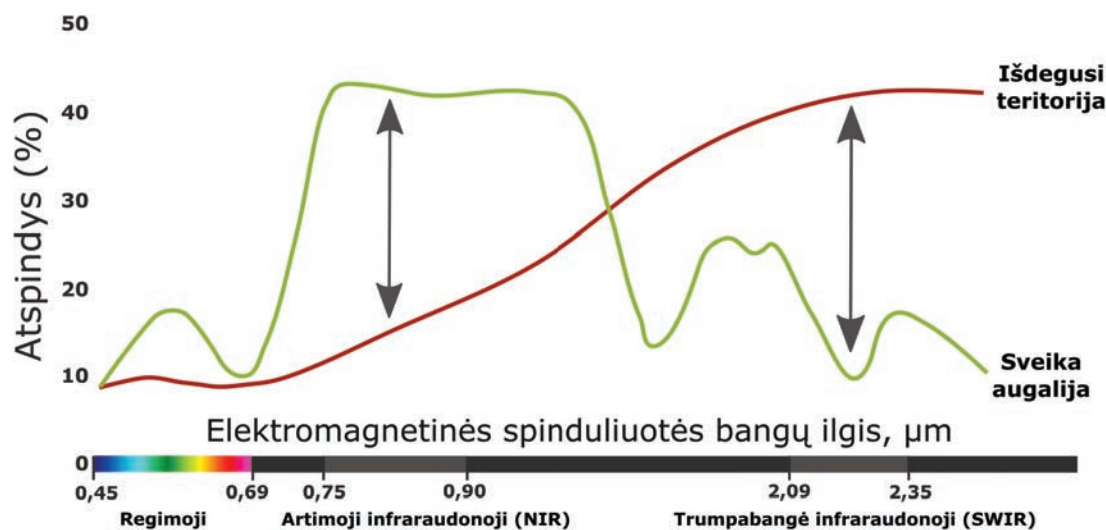
NBR indeksas. Vertinant gaisrų paveiktą teritoriją ir poveikio intensyvumą, naudojami specialūs indeksai. Indeksai apskaičiuojami pagal atspindžio reikšmes įvairiose spektro dalyse. Atspindžio spektro pokytis leidžia įvertinti gaisro paveiktą teritoriją ir poveikio intensyvumą. Nepažeistos augalijos atspindys NIR spektro dalyje yra intensyvus, o SWIR nedidelis, o išdegsių plotų atspindys intensyvesnis SWIR nei NIR spektro dalyje (3.4.16. pav.).



3.4.14. pav. *Sentinel 2* tikrų spalvų ir B12, B11 ir B4 spektro juostų netikrų spalvų RGB kompozicija prieš gaisrą (2018 m. lapkričio 6 d.), gaisro metu (lapkričio 11 d.) bei silpstant gaisrui (lapkričio 16 d.). Vaizdas prieš gaisrą suteikia informacijos apie objektus ir žemės dangą įvykio teritorijoje. Per gaisrą nustatomi gaisro židiniai ir frontai bei numatomos jų plitimo tendencijos. Po gaisro vertinami įvykio padariniai. Padarinius galima įvertinti lyginant su situacija, buvusia prieš gaisrą (sudaryta naudojant EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>).

3.4.15. pav. Spektrinės spinduliuotės srauto skirtinguose bangos ilgio ruožuose priklausomybė nuo kūno temperatūros. Identifikuojant gaisrų židinius naudojamas skirtumas tarp spinduliuotės srauto vertikalėmis linijomis pažymėtuose bangų ilgiuose. Žemės paviršiaus temperatūros kūnas (≈ 300 K) spinduliuoja intensyviau šiluminėje infraraudonojoje TIR (10,85 μm) nei vidurinėje infraraudonojoje spektro dalyje MIR (3,74 μm), o gaisro židiniuose (600–1400 K) spinduliuotės srautas didesnis MIR nei TIR ruože (pagal Wooster, Xu, 2012).





3.4.16. pav. Išdegusios ir sveikos augalijos atspindžio spektro profilis. Sveikos augalijos atspindys stipresnis artimojoje infraraudonojoje spinduliuotėje NIR, o gaisro pažeistos – trumpabangės infraraudonosios spinduliuotės SWIR spektro dalyje (Pagal UN-SPIDER, 2017).

Dažnai gaisrų poveikiui vertinti yra naudojamas normalizuotas išdegimo santykio rodiklis (angl. Normalized Burn Ratio, NBR), kuris skaičiuojamas pagal atspindį artimosios infraraudonosios (NIR) ir trumpabangės infraraudonosios (SWIR) spektro dalyse:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \tag{3.4.2.}$$

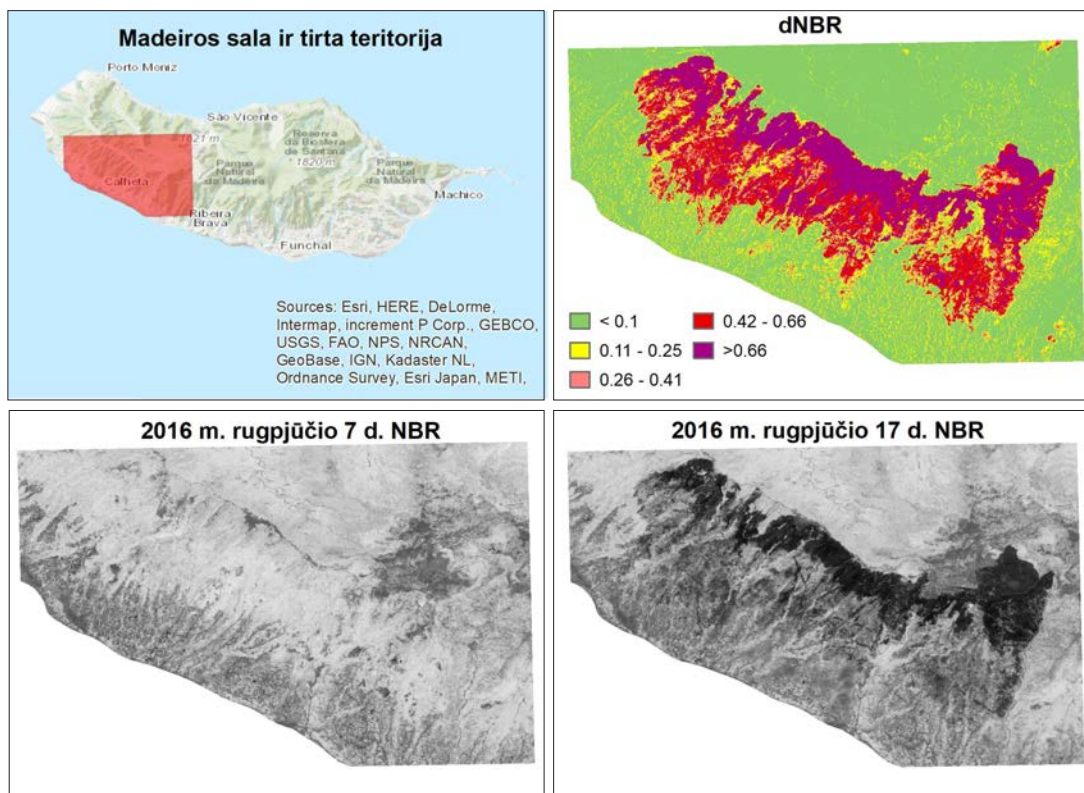
NBR kinta nuo 1 (nepažeista augalija) iki -1 (nepažeistos augalijos nėra) (3.4.2. lentelė). NBR gali būti naudojamas aktyviems gaisrams aptikti, gaisro poveikio mastui ir intensyvumui nustatyti bei stebėti atsistatymą po gaisro.

Skirtingų žemės dangos plotų palydovinio vaizdo taškuose apskaičiuotas NBR skirsis, net jei nebus gaisro. NBR reikšmė gali sumažėti ne tik dėl gaisro poveikio, bet ir esant skirtingai augalijos būklei, todėl vertinant gaisrų poveikį įprastai skaičiuojamas absoliutus ar santykinis NBR pokytis tarp jo verčių prieš gaisrą ir po jo (3.4.17. pav.).

Skirtumas tarp NBR reikšmių po gaisro ir prieš jį (dNBR) yra geras gaisro poveikio rodiklis. Key’us ir Bensonas (2005) pasiūlė naudoti dNBR reikšmių interpretaciją (3.4.2. lentelė), kuri gerai atitinka gaisro poveikį (Twele, 2004).

3.4.2. lentelė. NBR indekso skirtumo dNBR prieš gaisrą ir po jo reikšmių interpretacija (Key ir Benson, 2005).

DNBR	INTERPRETACIJA
Mažiau už 0,1	Neišdegę plotai arba gaisro poveikis labai mažas.
0,1–0,25	Mažas gaisro poveikis.
0,26–0,41	Vidutinis gaisro poveikis.
0,42–0,66	Didelis gaisro poveikis.
Daugiau už 0,66	Labai didelis gaisro poveikis.



3.4.17. pav. NBR reikšmės prieš 2016 m. rugpjūčio mėnesio gaisrą pietvakarinėje Madeiros salos dalyje (7 d.) ir po gaisro (17 d.). Gaisro paveikti plotai pavaizduoti juoda spalva. Kuo tamsesnė spalva, tuo labiau pažeista augalija. NBR verčių prieš ir po skirtumo dNBR žemėlapyje aiškiai išsiskiria gaisrų paveikta teritorija. Poveikio reikšmių interpretacija pateikta 3.4.2. lentelėje. NBR indeksas apskaičiuotas pagal *Sentinel 2* palydovo MSI jutiklio duomenis.

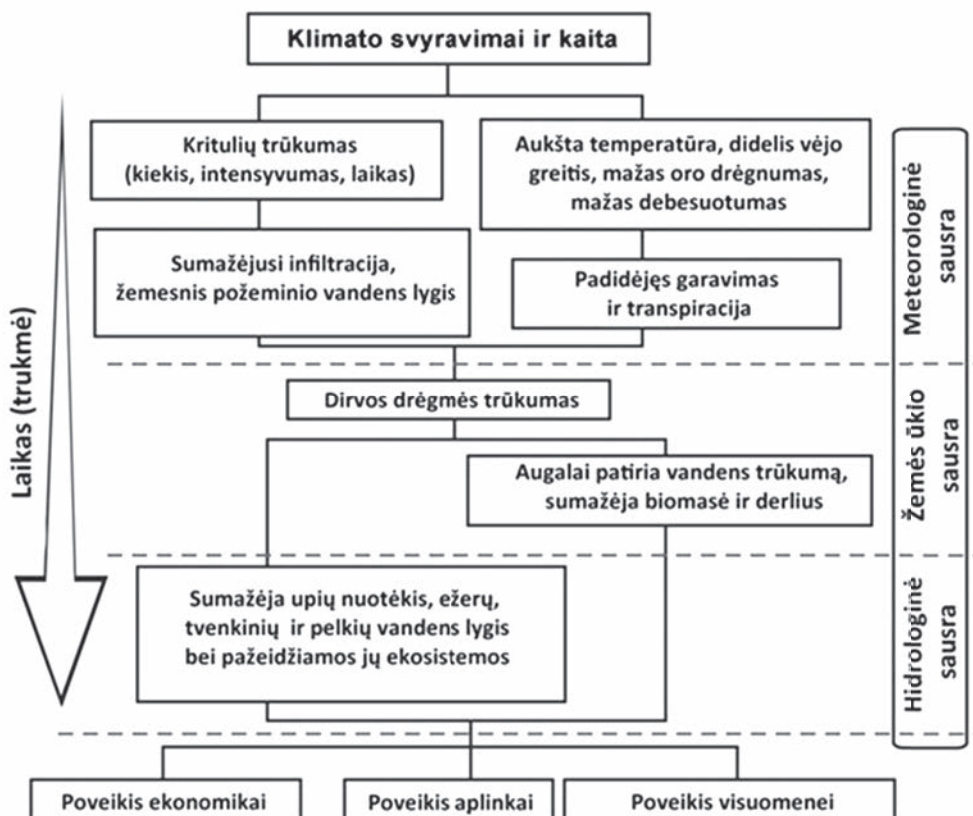
3.4.5. Sausros

Dėl sausrų Lietuvoje gana dažnai skelbiama ekstremali padėtis. Nuo kitų hidrometeorologinių reiškinių sausra skiriasi tuo, kad yra ilgai besivystantis reiškinys. Aridinio klimato zonose sausras gali trukti iki kelerių metų, o humidinio klimato sąlygomis, pavyzdžiui, Lietuvoje, sausras trunka kelis mėnesius.

Išskiriami trys pagrindiniai sausrų tipai: meteorologinė, žemės ūkio ir hidrologinė sausra (3.4.18. pav.). Ilgos ar labai intensyvios sąlygos gali lemti poveikį ekonomikai ir visuomenei, todėl kartais išskiriama socialinė-ekonominė sausra.

Sausroms identifikuoti yra naudojami indeksai. Meteorologinės sausras indeksai dažniausiai naudoja kritulių ir oro temperatūros parametrus. Šiuos rodiklius galima nustatyti iš palydovų, tačiau daugumoje pasaulio vietų šiuos meteorologinius rodiklius matuoja antžeminis stebėjimo tinklas, kurio duomenys yra daug tikslesni už gautus iš palydovų.

Hidrologinę sausrą galima identifikuoti pagal vandens telkinių vandens lygio ar ploto pokyčius. Vertinant sausumos vandens telkinių lygį galima taikyti panašius metodus kaip ir vertinant vandenynų vandens paviršiaus lygį (žr. 3.5 skyrių). Pritaikymą apriboja tai, kad didžiosios daugumos sausumos vandens telkinių plotas yra gana mažas lyginant su vandens lygio nustatymui naudojamų altimetrų raiška. Vandens lygį galima nustatyti pasitelkus papildomus reljefo ir vandens telkinių batimetrinius duomenis. Vandens telkinių plotą, identifikuotą remiantis optiniais arba SAR prietaisais, derinant su reljefo duomenimis galima apskaičiuoti vandens telkinių lygį.



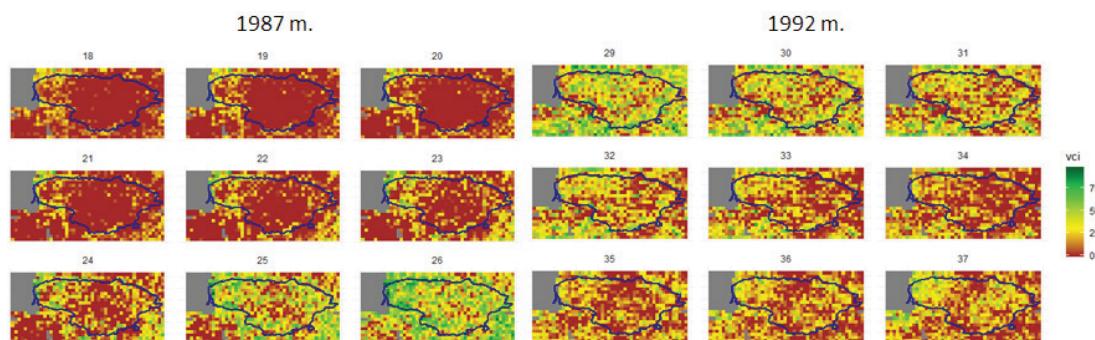
3.4.18. pav. Sausros vystymosi stadijos, tipai, juos apibūdinantys rodikliai ir procesai bei pasekmės (pagal NDMC, 2019).

Dažniausiai palydoviniai duomenys yra naudojami identifikuojant žemės ūkio sausras. Žemės ūkio sausras, priešingai nei meteorologinės, gali būti nustatomos pagal fizinių poveikį Žemės paviršiui. Žemės ūkio sausras yra būdingas dirvos drėgmės sumažėjimas ir poveikis augalų būklei. Abu šie rodikliai gali pasikeisti didelėje teritorijoje, todėl palydoviniai duomenys turi didelį potencialą vertinant sausras žemės ūkio sektoriuje.

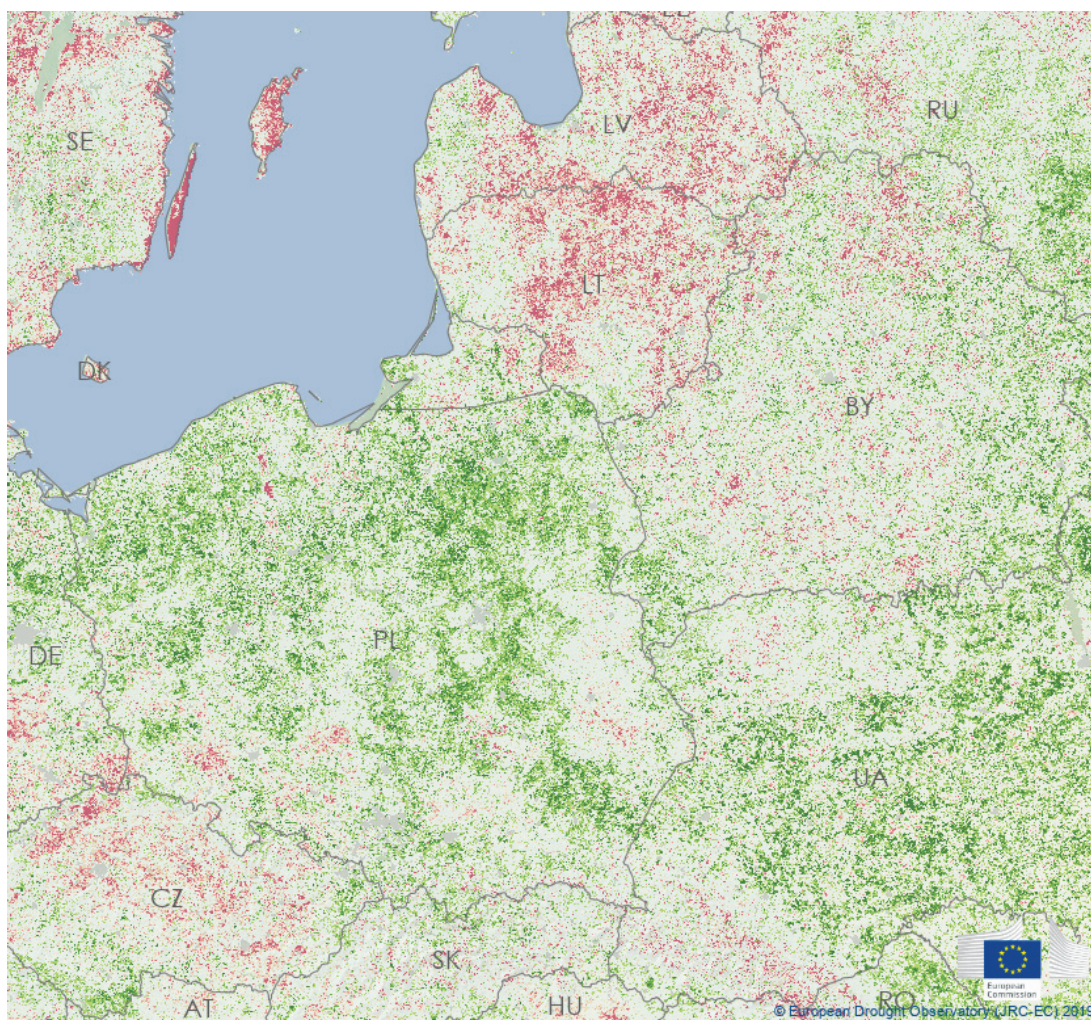
Augalijos būklės vertinimas dažniausiai paremtas tuo, kad sveikos ir pažeistos augalijos atspindžio spektras skiriasi (žr. 3.2 ir 3.3 skyrius). Augalijos būklė gali būti paveikta ne tik dėl sausras, bet ir kitų veiksnių: ūkininkavimo praktikos, per didelio drėgmės kiekio, ligų ar kitų pavojingų meteorologinių reiškinių.

Vegetacijos sezono pradžios sąlygos turi ypač didelį poveikį augalijos būklei. 1987 metais keliais laipsniais šaltesni nei įprastai balandžio ir gegužės mėnesiai nulėmė augalijos vegetacijos pradžios vėlavimą (3.4.19. pav.), dėl kurio pagal palydovinius duomenis įvertinta augalijos būklė buvo žymiai blogesnė nei įprastai tuo metų laiku, tačiau bloga būklė buvo ne dėl sausras, o dėl neįprastai žemos oro temperatūros vegetacijos sezono pradžioje. 1992 m. nuo liepos vidurio iki rugsėjo vidurio augalijos būklė buvo bloga dėl visą vegetacijos sezoną vyravusių ypač sausų ir karštesnių nei įprastai sąlygų. Abiem metais augalijos būklė buvo blogesnė nei įprastai tuo metų laiku, tačiau tik vienu atveju tai lėmė sausra.

Pagal palydovinius duomenis nustatyta augalijos būklė negali būti naudojama kaip vienintelis sausras indikatorius, tačiau gali būti naudojama kaip pagalbinis rodiklis vertinant sausras. Europos sausrų observatorijoje augalijos būklę apibūdinantis fotosintezėje aktyvios spinduliuotės dalies indeksas fAPAR (3.4.20. pav.) derinamas su kritulių anomalijas apibūdinančiu standartizuotu kritulių indeksu (angl. Standardized Precipitation Index, SPI) ir dirvos drėgme. Abu šie rodikliai apibūdina sausras būdingas sąlygas (3.4.18. pav.) ir, jei kritulių trūksta bei sumažėja dirvos drėgmė, augalijos būklės pokyčiai jau yra siejami su sausra.



3.4.19. pav. Augalijos būklę apibūdinančio vegetacijos būklės indekso (angl. Vegetation Condition Index, VCI) pasiskirstymas 1987 m. 18–26 savaitėmis ir 1992 m. 29–37 savaitėmis. VCI reikšmės mažesnės už 40 rodo silpną sausrą, o mažesnės už 20 – stiprią sausrą (Kogan, 2002). VCI apskaičiuotas pagal NDVI duomenis, gautus iš NOAA STAR NESDIS duomenų bazės.



3.4.20. pav. Fotosintezėje aktyvios spinduliuotės indekso fAPAR anomalija 2018 m. rugpjūčio viduryje. Tuo metu didžiojoje Europos dalyje ir Lietuvoje buvo kritulių ir dirvos drėgmės neigiamos anomalijos (European Drought Observatory, 2019).

Sausrų poveikį dirvožemio drėgmei galima įvertinti pagal pasyviųjų ar aktyviųjų mikrobangų jutiklių duomenis (žr. 2.3 ir 2.4 skyrius). Dirvožemio drėgmė tiesiogiai palydovų prietaisais nėra išmatuojama. Ji įvertinama atsižvelgiant į tai, koks yra žemės dangos tipas. Duomenys apie žemės dangos tipus atnaujinami retai, todėl dirvos drėgmės matavimuose gali atsirasti klaidų. Palydovų jutikliais galima įvertinti drėgmę tik paviršiniame kelių mm sluoksnyje. Žemės ūkio augalams svarbiausias drėgmės kiekis šaknų zonoje, kuri, priklausomai nuo augalų, yra $\approx 10\text{--}50$ cm dirvožemio sluoksnyje. Norint įvertinti šio sluoksnio dirvožemio drėgmę, reikia naudoti modelius. Tiksliesni modelio rezultatai galimi, tik jei žinoma, kokia yra granulimetrinė dirvožemio sudėtis, kitu atveju galima gauti dideles dirvos drėgmės paklaidas. Dėl šių priežasčių palydovais gauti duomenys patikimiausi gali būti iš tų vietų, kurių gerai žinoma dirvožemio granulimetrinė sudėtis ir naujausia informacija apie žemės dangos tipus. Kiti duomenys iš teritorijos apie dirvožemio drėgmę šaknų zonoje, gauti iš palydovų, gali būti labai neapibrėžti ir naudojami tik kaip pagalbiniė priemonė identifikuojant sausras ir vertinant jų paplitimą bei poveikį.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kas yra ekstremalioji situacija ir kas yra ekstremalusis įvykis?
- Koks Žemės stebėjimo vaidmuo valdant ekstremaliąsias situacijas?
- Kokie Žemės stebėjimo privalumai ir trūkumai valdant ekstremaliąsias situacijas?
- Kodėl dažnai naudojant radiometrinius indeksus galima gauti išsamesnę informaciją nei iš RGB kompozicinių vaizdų?
- Kuo skiriasi SAR poliarimetrija ir interferometrija bei jų taikymas?
- Kokie sausumos ir vandens plotų savybių skirtumai naudoji identifikuodami vandens paviršiaus plotus?
- Kaip optinių ir SAR duomenų vaizduose atrodo vandens paviršiaus plotai?
- Kuo remiantis skaičiuojamas NDWI?
- Kokie SAR ir optinių prietaisų privalumai ir trūkumai identifikuojant vandens plotus?
- Kokia palydovinė informacija naudojama identifikuojant gaisrų židinius?
- Kaip apskaičiuojamas dNBR indeksas?
- Kodėl dNBR indeksas gali teikti tikslesnę informaciją už NBR?
- Kokio tipo sausrai nustatyti ir jos poveikiui vertinti yra naudojami palydoviniai duomenys? Kodėl?
- Kodėl augalijos indeksai retai naudojami kaip sausrų indikatorius, tačiau teikia svarbią informaciją apie sausrų paplitimą ir poveikį?
- Kodėl dirvos drėgmės neapibrėžtumas mažesnis ten, kur yra tikslūs duomenys apie dirvožemį ir žemės dangos tipus?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Civilinė sauga (2019). *Ekstremalios situacijos* [žiūrėta 2019-08-26]. Prieiga internete: <https://www.civsauga.lt/ekstremaliuju-situaciju-valdymas/ekstremalioji-situacija/>
- European Drough Observatory (2019). *Mapping Drought* [žiūrėta 2019-08-29]. Prieiga internete: <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1111>
- GSI (2004). *How to understand the SAR interferogram* [žiūrėta 2019-08-29]. Prieiga internete: <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/interpretation-e.html>
- Humboldt State University (2019). *Normalized Burn Ratio* [žiūrėta 2019-08-26]. Prieiga internete: http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson5-1/NBR.html
- Key, C. H., Benson, N. C. (2005). Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD (pp. LA1–LA51). Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Kogan, F. N. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR–based Vegetation Health Indices, *Eos Transactions AGU*, 83, 557–563.
- NDMC (2019). *Types of Drought* [žiūrėta 2019-08-29]. Prieiga internete: <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx>
- McFeeters, S.K. (1996). The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432.
- Petiteville, I., Ward, S., Dyke, G., Steventon M., Harry J. (2015). Satellite Earth observation in support of disaster risk reduction. *Special 2015 WCDRR edition*, 1–84.
- Rüetschi, M., Small, D., Waser, L.T. (2019). Rapid Detection of Windthrows Using Sentinel-1 C-Band SAR Data. *Remote Sensing*, 11, 115.

Sneed M. (2018). *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)* [žiūrėta 2019-08-26]. Prieiga internete: <https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/interferometric-synthetic-aperture-radar-insar>

Twele, A. (2004). Post-fire vegetation regeneration: The case study of the Massif de l'Etoile Fire. *JRC Technical Report EUR 21010*, European Communities.

UN-SPIDER (2017). *Normalized Burn Ratio (NBR)* [žiūrėta 2020-04-06]. Prieiga internete: <http://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

Wooster, M. J., Xu, W. (2012). Sentinel-3 Active Fire: Fire Detection and Fire Radiative Power Assessment. ESA SLSTR ATBD FIRE PRODUCT. Kings college London.

3.5. VANDENS TELKINIŲ STEBĖSENA

Vandens paviršius užima beveik tris ketvirtadalius Žemės paviršiaus: vandenynai – apie 71 % Žemės paviršiaus ploto, o upės, ežerai, estuarijos kartu – dar 3,7 %. Iki šimto kilometrų atstumu nuo vandens telkinių gyvena apie pusę visų pasaulio gyventojų. Apie dešimtadalį visų žmonių gyvena pakrančių teritorijoje, kurios aukštis virš jūros lygio yra mažesnis nei 10 metrų.

Vandens telkiniai yra svarbus maisto ir energijos šaltinis. Apie penktadalį baltymų žmonija gauna vartodama žuvis ir jūros gėrybes. Vargingesnėse šalyse šis maisto šaltinis dar svarbesnis ir sudaro apie pusę visų suvartojamų baltymų. Žvejyba yra svarbus pajamų šaltinis, ypač neturtin-guose regionuose, kuriuose gyvena apie 97 % pasaulio žvejų (UN, 2017). Antrinis vandens telki-niuose sužvejotų žuvų ir jūros gėrybių apdorojimas yra svarbus moterų pajamų šaltinis. Žvejyba ir vandens organizmų auginimas sukuria apie 100 milijardų JAV dolerių vertę ir apie 260 mili-jonų darbo vietų (UN, 2017). Bendras vandenyno poveikis ekonomikai, įskaitant visuose sektoriuose sukuriamas darbo vietas ir vandens telkinių teikiamas ekosistemų paslaugas, vertinamas apie 3–6 trilijonų JAV dolerių per metus. Vandenynais gabenama apie 90 % pasaulio krovinių ir ši prekyba sudaro apie 5 % bendrojo globalaus produkto. Europos Sąjungos mėlynosios ekono-mikos (veiklos, susijusios su jūra ir vandenynu) apyvarta siekia 566 mlrd. eurų, ji sukuria 1,3 % viso ES bendrojo vidaus produkto, šiame sektoriuje dirba 3,5 mln. žmonių (Carvalho ir kt., 2018).

Kita vertus, žmonija taip pat daro didelį poveikį vandens telkiniams. Per metus į vandens telkinius patenka apie 8 milijonai tonų plastiko. Manoma, kad jei nebus imtasi veiksmų, ant-roje XXI a. pusėje plastiko masė vandens telkiniuose gali būti didesnė už vandens gyvūnijos. Apie keturis penktadalius visos vandens telkinių taršos susidaro sausumoje. Didelį pavojų vandens telkinių ekosistemoms kelia maistinių medžiagų, ypač azoto ir fosforo, prietaka į van-dens telkinius. Šios medžiagos būtinos gyviems organizmams, tačiau dėl intensyvios žemės ūkio ir pramonės plėtros ir žmonių skaičiaus didėjimo maistinių medžiagų kiekis, patenkantis į vandens telkinius, labai išaugo. Didelė maistinių medžiagų koncentracija lemia labai spartų vandens augalijos ir bakterijų augimą, kuris keičia ekosistemų struktūrą ir prisideda prie zonų su sumažėjusiu deguonies kiekiu susidarymo. Stabiliose ekosistemose vandenyne esantis fito-planktonas išskiria apie pusę Žemės deguonies kiekio.

Biologinei vandenynų ekosistemai yra labai svarbūs koralų rifai. Jie itin jautrūs vandens telkinių rūgštingumo didėjimui ir temperatūros kilimui. Manoma, kad šiuo metu pavojus gresia apie 60 % koralų rifų, o apie XXI a. vidurį pavojuje gali atsidurti beveik visi pasaulinio vandenyno koralų rifai (UN, 2017).

Vandens telkiniai yra svarbūs anglies ir su ja susijusios klimato kaitos reguliavimo procese. Manoma, kad vandens telkiniai sugeria apie trečdalį žmonijos per du pastaruosius amžius iš-skirto anglies dioksido kiekio. Klimato kaita ir vandens telkinių lygio kilimas labai veikia eko-sistemų sudėtį. Rūšys, kurios sunkiau prisitaiko prie aukštesnės temperatūros, išnyksta, o jų vietą gali užimti aukštą vandens temperatūrą geriau toleruojančios ir taip mažinti ekosistemų įvairovę. Su temperatūros pokyčiais bei antropogenine veikla susijusi ir invazinių rūšių plėtra.

Vandens telkinių šilimas veikia ne tik gyvus organizmus, bet ir lemia vandenyno lygio kilimą ir vandens telkinių ledo režimą. Šylant pasauliniam vandenynui, jo vanduo plečiasi, todėl didėja jo užimamas tūris ir vandens lygis. Papildomai vandens lygis kyla dėl sausumoje esančių ledynų tirpimo. Manoma, kad per XXI a. pasaulinio vandenyno lygis gali pakilti apie vieną metrą. Nors pakilimas atrodo nedidelis, vandens lygiui pakilus 1 m bus paveikta ne tik teritorija, kuri atsidurs po vandeniu, bet ir platesnė pakrantės zona, kuri bus dažniau užliejama per audras, pasikeis požeminio vandens cheminė sudėtis, suintensyvės erozijos procesai. Van-dens kilimo poveikį gali sustiprinti ir dažniau pasitaikantys tropiniai ciklonai ir audros. Šių reiškinų susidarymas labai priklauso nuo vandenyno paviršiaus temperatūros, todėl pakilus temperatūrai tikimasi dažnesnių arba intensyvesnių audrų.

3.5.1. Vandens telkinių savybės, nustatomos iš palydovų

Stebint Žemę iš palydovų siekiama nustatyti svarbiausius vandens telkinių rodiklius, kurie leistų suprasti procesus, vykstančius šiuose telkiniuose, įvertinti globalios kaitos ir antropogeninį poveikį vandens telkiniams ir jų ekosistemoms. Iš palydovų nustatomus vandens telkinių rodiklius galima suskirstyti į dvi grupes: fizinius rodiklius ir vandens telkinių būklės rodiklius (3.5.1. lentelė).

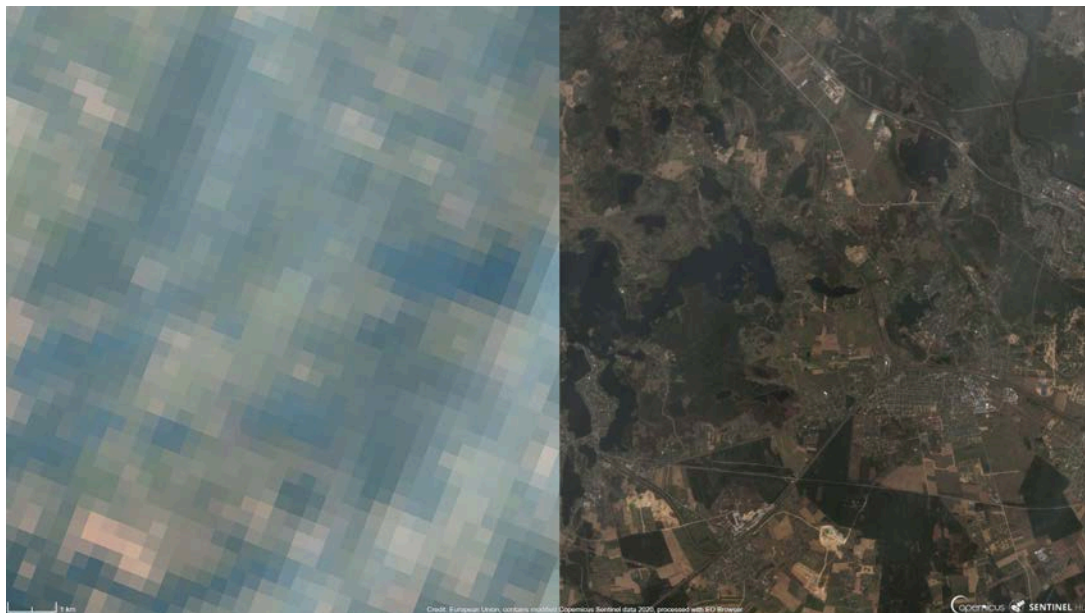
3.5.1. lentelė. Svarbiausios vandens telkinių savybės, nustatomos iš palydovais gautų duomenų.

FIZINIAI VANDENS TELKINIŲ RODIKLIAI:
<ul style="list-style-type: none"> • vandens temperatūra; • vandens lygis; • bangos, vėjo greitis ir srovės.
VANDENS TELKINIŲ BŪKLĖS RODIKLIAI:
<ul style="list-style-type: none"> • skaidrumas; • spalva; • organinių medžiagų kiekis; • mineralinių medžiagų kiekis; • chlorofilo koncentracija.

Fiziniai vandens rodikliai apibūdina vandens telkinio terminį ir hidrologinį režimą bei jo vandens masės dinamiką. Vandens temperatūros duomenys gali būti naudojami vertinant globalios klimato kaitos mastą ir poveikį visuomenei ir ekosistemoms. Vandens lygio, bangų srovių ir vėjo greičio duomenys leidžia įvertinti grėsmes vandens transportui ir pakrančių teritorijoms. Vandens būklės rodikliai suteikia informacijos apie vandens telkinių ekosistemų būklę, joms kylančias grėsmes ir leidžia įvertinti vandens telkinių išteklius.

Kokias vandens telkinių savybes galima nustatyti naudojant palydovinius Žemės stebėjimo duomenis priklauso nuo to, kokia yra naudojamų prietaisų erdvinė raiška, jaurumas ir pačių vandens telkinių savybės. Jūros ir vandenynai bei didelio ploto sausumoje esantys vandens telkiniai gali būti tiriami ir mažesnės raiškos jutikliais, todėl jiems galima nustatyti žymiai daugiau parametrų. Pavyzdžiui, vandens paviršiaus temperatūrai matuoti skirto *Sentinel 3* SLSTR jutiklio erdvinė raiška yra 500 m. Tokio dydžio vaizdo taškai yra tinkami tirti didelio ploto vandens telkinius, tačiau tokios raiškos duomenis pritaikyti galima tik keliems didžiausiems Lietuvos ežerams. Dideliuose atviro vandens telkinių plotuose nejaučiamas (arba silpniau jaučiamas) vandens telkinio pakrančių ar dugno poveikis. Mažesniuose vandens telkiniuose į vieną vaizdo tašką gali patekti ir atviro vandens plotas, ir greta esančios sausumos plotas, todėl duomenys bus netinkami naudoti arba jų patikimumas labai sumažės.

Vertinant vandens telkinių būklės rodiklius dažnai naudojami optiniai prietaisai. Jų erdvinė raiška gali būti nuo kelių dešimčių centimetrų iki kelių kilometrų. Didelės ir vidutinės raiškos optinių jutiklių duomenys gali būti pritaikomi vertinant ir santykinai nedidelių vandens telkinių arba pakrantės zonose esančios akvatorijos kokybės rodiklius (3.5.1. pav.). Tikslų vandens kokybės rodiklių nustatymą mažuose sausumos vandens telkiniuose ir vandenynų bei jūrų priekrantės zonose apriboja tai, kad šių vandens telkinių ir zonų vandenyje yra daug priemaišų, kurios visos kartu veikia vandens savybes. Išskirti konkrečios dedamosios poveikį yra sudėtinga. Atviro vandenyno ar jūros vandens masėje yra mažesnė priemaišų koncentracija, todėl tokioje akvatorijoje vandens telkinių būklės rodiklius nustatyti paprasčiau.



3.5.1. pav. Trakų apylinkių 2020 m. gegužės 1 d. *Sentinel 3* OLCI (kairėje) ir *Sentinel 2* MSI (dešinėje) natūralių spalvų kompozicija. *Sentinel 2* duomenų erdvinė raiška 10 m ir juose lengvai matomi net ir nedideli vandens telkiniai. *Sentinel 3* duomenų raiška 300 m, todėl juose galima įžvelgti tik neryškius net ir gana didelių ežerų, tokių kaip Akmena, kontūrus (sudaryta naudojant EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>).

3.5.2. Vandens paviršiaus temperatūra

Vandens temperatūra vienas iš svarbiausių rodiklių, lemiančių greitį daugumos biologinių ir cheminių procesų, veikiančių ekosistemų rūšinę sudėtį. Vandens šiluminis imlumas yra daug didesnis už oro, todėl pasauliniame vandenyne yra sukauptas didelis energijos kiekis. Dėl globalios vandenyno cirkuliacijos ši energija pernešama iš vieno regiono į kitus bei keliauja iš paviršinių sluoksnių į gilesnius arba iš gilesnių į paviršius.

Su vandenyno temperatūra ir jos pokyčiais yra susiję didžiausio masto atmosferos reiškiniai, tokie kaip El Niño. Dėl šiltosios Golfo srovės atnešamos energijos Vakarų Europoje oro temperatūra yra aukštesnė nei tose pačiose platumose Šiaurės Amerikoje. Vandens temperatūra yra svarbi sudarant orų prognozes, vertinant tropinių ciklonų susidarymą ir vystymąsi. Vandens vanduo sugeria labai daug energijos, todėl jo temperatūra yra vienas iš svarbių klimato kaitos indikatorių. Sekdami temperatūros pokyčius poliarinėse platumose galime numatyti ledo dangos kaitą Arktuje arba tiksliau įvertinti ledynų tirpimą Antarktyje.

Vandens temperatūra lemia daugelio vandens organizmų gyvenimo sąlygas. Kiekvienas organizmas turi palankiausių vandens temperatūros intervalą, todėl žinodami vandens temperatūros reikšmes ir kaitą laike bei erdvėje galime numatyti ekosistemos būklę, įvertinti pavojus atsідurusias ekosistemas ar individualias rūšis. Pavyzdžiui, šylant vandens temperatūrai kyla pavojus koralų rifams.

Aukštesnėje temperatūroje intensyviau vyksta eutrofikacija, dėl kurios labai padidėja vandens telkinių bioproductyvumas. Perteklinis organinės medžiagos kiekis lemia, kad jai yrant naudojamas vandenyje ištirpęs deguonis. Aukštesnės temperatūros vandenyje gali ištirpti mažesnis kiekis dujų, taip pat ir deguonies, todėl vandens temperatūra tampa labai svarbiu veiksniu susidarant deguonies stygiui vandenyje. Ypač svarbus eutrofikacijos poveikis sausumos vandens telkiniams, uždaroams jūroms ir įlankoms.

Vandens temperatūros stebėjimo būdai. Vandens temperatūra gali būti matuojama tiesiogiai įvairios konstrukcijos termometrais. Šis būdas yra tikslus, leidžia išmatuoti vandens temperatūrą skirtingame gylyje. Automatiniai temperatūros matavimo prietaisai gali matuoti labai dažnai, todėl gali būti naudojami įvertinant net ir trumpalaikius vandens temperatūros pokyčius. Didžiausias tokių matavimų trūkumas tas, kad gaunama informacija apie viename vandens telkinio taške esančią vandens temperatūrą. Jei tiriama nedidelio ežero ar įlankos vandens temperatūra, erdvinį vandens temperatūros pasiskirstymą galima įvertinti atlikus daug koordinuotų matavimų. Pakrantėse vandens temperatūrą galima matuoti stacionariuose postuose. Matavimus vandens telkinio akvatorijoje galima atlikti naudojant dreifuojančias ir stacionarias bujas (3.5.2. pav.) arba iš laivų. Šie matavimai duomenis apie vandens temperatūrą leidžia gauti stacionarių bujų taškuose arba išilgai dreifuojančių bujų ar laivų trajektorijose. Žinant, kad pasaulinis vandenynas užima apie 71 % planetos paviršiaus, tokio informacijos kiekio apie vandens temperatūros erdvinį pasiskirstymą vandenyne yra mažai. Panaši situacija ir su kitais vandens telkiniais. Daugumoje ežerų matavimai arba neatliekami, arba atliekami keliuose pakrantėje įrengtuose postuose. Net jei vandens temperatūra ežeruose matuojama, tai dažniausiai daroma pakrantėse, o temperatūros pasiskirstymas įvairiuose gyliuose vertinamas retai.



3.5.2. pav. Stacionari vandens telkinio rodiklių stebėjimo buja, naudojama NOAA (NOAA, 2008).

Iš palydovinių Žemės stebėjimų galima gauti informacijos apie paviršiaus temperatūrą dideliame plote tam tikru dažnumu. Toks informacijos srautas leidžia įvertinti temperatūros erdvinį pasiskirstymą ir jo kaitą per laiką. Palydoviniai stebėjimai leidžia įvertinti tik labai plono paviršinio vandens sluoksnio temperatūrą, norint įvertinti temperatūros pasiskirstymą vandens tūryje, palydoviniai duomenys asimiliuojami su matavimų *in situ* duomenimis ir modeliavimo rezultatais.

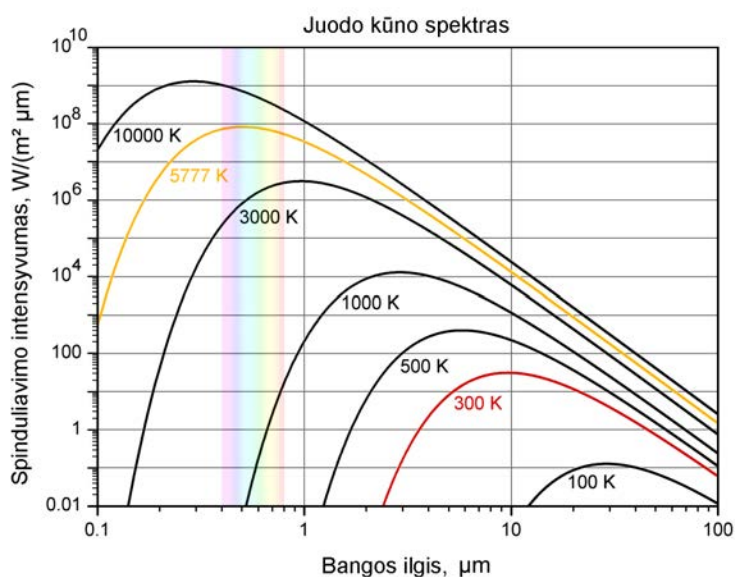
Vandens paviršiaus temperatūros vertinimas naudojant palydovų duomenis. Vandens paviršiaus temperatūros nustatymo pagal palydovinius duomenis principas paremtas Planko spinduliuotės dėsnio, nusakanti ryšį tarp kūno temperatūros ir jo spinduliuojamos energijos pasiskirstymo esant skirtingiems elektromagnetinių bangų ilgiams:

$$B_{\lambda}(T) = 2hc^2\lambda^{-5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (3.5.1.)$$

kur B – juodojo kūno energinis skaitis; T – absoliutinė temperatūra; h – Planko konstanta; c – šviesos greitis vakuume; k – Bolcmano konstanta; λ – bangos ilgis.

Remiantis Planko spinduliuotės dėsnio ir pasirinktame bangos ilgyje išmatuotu spinduliavimo intensyvumu galima įvertinti objekto temperatūrą (3.5.3. pav.). Planko spinduliuotės dėsnis yra pritaikytas juodajam kūnui, tačiau visi realūs objektai turi mažesnę energinį skaitį nei juodasis kūnas. Skirtumą tarp juodojo kūno ir realaus objekto energinio skaisčio nusako objekto spinduliavimo geba. Pagal palydovinių radiometrų matavimo duomenis įvertinama ryškio temperatūra, kuri atsižvelgiant į kūno spinduliuojamąją gebą perskaičiuojama į objekto paviršiaus energiją apibūdinančią kinetinę temperatūrą. Konkrečiu jautikliu nustatoma temperatūra apskaičiuojama pagal tiesinį ryšį tarp užregistruotos spinduliuotės intensyvumo ir matavimų *in situ*. Esant nepalankioms sąlygoms taikomi sudėtingesni matematiniai modeliai atsižvelgiant į vandens paviršiaus šiurkštumą.

3.5.3. pav. Juodojo kūno spinduliavimo intensyvumo pasiskirstymo pagal bangos ilgį priklausomybė nuo kūno temperatūros. 300 K (26,85 °C) temperatūra yra artima Žemės paviršiaus temperatūrai (pagal Sch, 2016).



Iš palydovų stebint Žemę vandens temperatūra nustatoma naudojant pasyviųjų infraraudonųjų spindulių (IR) arba mikrobangų radiometrų duomenis. Pagrindinis skirtumas tarp šių vandens paviršiaus temperatūros vertinimo metodų yra tas, kad naudojamos skirtingos elektromagnetinių bangų spektro dalys. Abu metodai turi privalumų ir trūkumų (3.5.2. lentelė).

Paviršiaus temperatūrą vertinant pagal infraraudonąsias elektromagnetines bangas naudojamos 3,7 μm arba 10 μm ilgio elektromagnetinės bangos. Pagal palydovų jautiklių duomenis įvertinama ryškio temperatūra atspindi ne tik Žemės paviršiaus temperatūrą, bet ir triukšmą, atsirandantį dėl atmosferos poveikio ir Saulės spinduliuotės atspindžio. Kai kuriose elektromagnetinių bangų spektro dalyse atmosferos poveikis spinduliuotei yra mažesnis nei kitose. Temperatūrai nustatyti naudojami tokio ilgio bangos, kad patektų į spektro juostas, mažiau veikiamas atmosferos. Nepaisant to, naudojant IR radiometrus atmosferoje esančių dujų, vandens garų ir aerozolių

poveikis išlieka didelis. Prieš naudojant šiuos duomenis reikia atlikti atmosferos korekciją, kuri taikant įvairius empirinius duomenimis ar matematiniais atmosferos skaidrumo modeliais paremtus metodus siekia pašalinti atmosferos poveikį iš užfiksuotų duomenų.

3.5.2. lentelė. Vandens paviršiaus temperatūros IR ir mikrobangų radiometrais gautų produktų savybės.

IR RADIOMETRAI	MIKROBANGŲ RADIOMETRAI
<ul style="list-style-type: none"> • Gylis $\approx 20 \mu\text{m}$ • Dažniausiai naudojami $\sim 3,7 \mu\text{m}$ ir $\sim 12 \mu\text{m}$ ilgio bangos. • Rezultatų tikslumą veikia atmosferoje esantys aerosoliai ir vandens garai, todėl būtina atlikti atmosferos korekciją. • Debesų dangą sumažina tinkamų duomenų kiekį. • Didelė raiška ir didelis tikslumas (gali siekti 0,3 K). • Ilgesnės duomenų sekos (apie 30 metų). 	<ul style="list-style-type: none"> • Gylis $\approx 1 \text{ mm}$ • Temperatūrai nustatyti naudojamas 4–11 GHz dažnių intervalas (atitinka $\approx 27 \cdot 10^3 - 75 \cdot 10^3 \mu\text{m}$ bangos ilgį). • Debesų dangą ir atmosferos aerosoliai mažai veikia mikrobangų sklaidimą, tačiau signalas gali būti paveiktas vandens garų ir paviršiaus šiurkštumo (bangų). • Raiška mažesnė nei naudojant IR bangas (apie 25 km), o nustatytos temperatūros tikslumas mažesnis. • Stebėjimai pradėti 1997 metais.

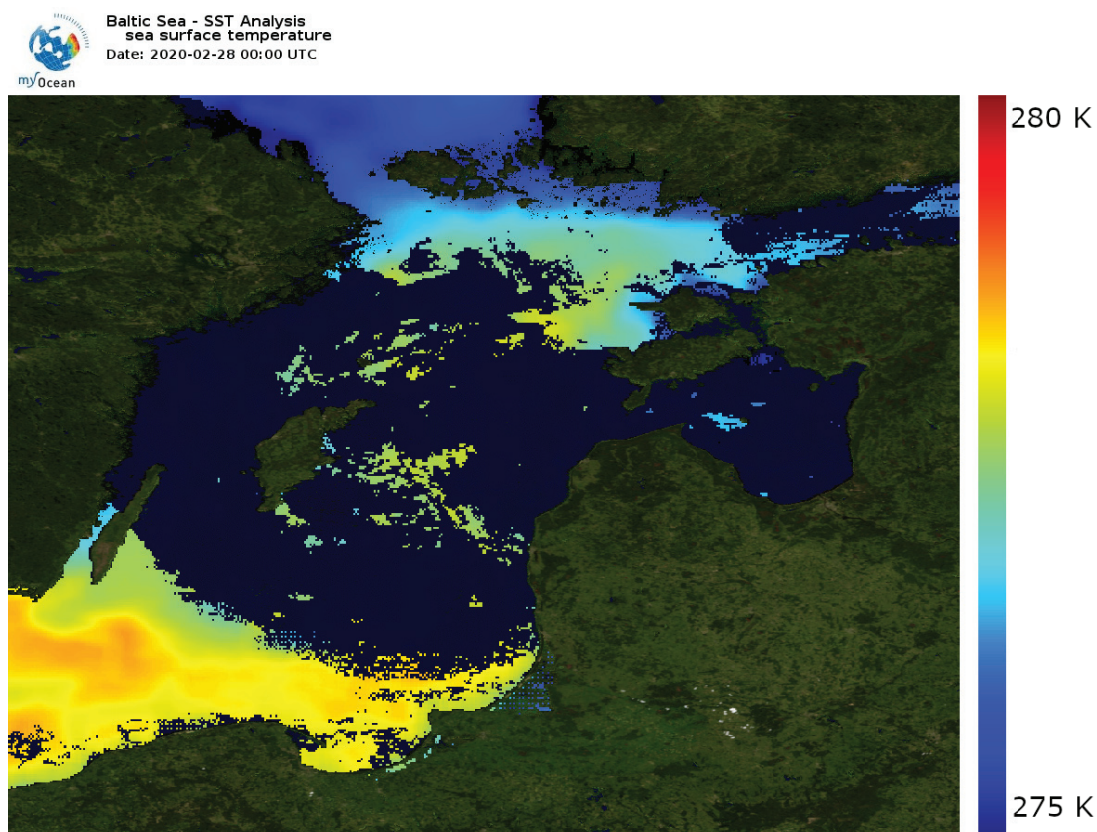
Vandens paviršiaus temperatūros ir spinduliavimo intensyvumo tarpusavio priklausomybė labiau kinta trumpų $3,7 \mu\text{m}$ ilgio bangų srityje nei ilgesnių $12 \mu\text{m}$ bangų, todėl jas naudojant galima tiksliau nustatyti vandens paviršiaus temperatūrą. Duomenys, gauti naudojant $3,7 \mu\text{m}$ ilgio bangas, dažniausiai naudojami stebint naktį, nes šioje dalyje saulės spinduliuotė intensyviai atsispindi nuo vandens paviršiaus, todėl dieną tikėtinos didesnės paklaidos.

IR radiometrais gautus duomenis labai veikia debesys, todėl juos galima gauti tik kai dangus giedras. Poliarinėse, vidutinėse ir tropinėse platumose kai kuriais sezonais būna didelis debesuotumas. Tokiomis sąlygomis vandens paviršiaus temperatūros nustatyti naudojant infraraudonąsias bangas negalima (3.5.4. pav.).

Mikrobangų diapazone spinduliuojamos energijos kiekis mažiau kinta pasikeitus paviršiaus temperatūrai nei infraraudonųjų bangų spektro dalyje, todėl naudojant mikrobangų radiometrų duomenis nustatomos temperatūros preciziškumas taip pat yra mažesnis. Tai, kad temperatūrą galima nustatyti ne taip preciziškai, nebūtinai reiškia, jog mikrobangų radiometrais gauti duomenys bus mažiau tikslūs nei gauti naudojant IR radiometrų duomenis. Mikrobangų radiometrais gauti duomenys yra mažiau veikiami atmosferos, įvertinti atmosferos poveikį mikrobangomis galima tiksliau, todėl dažnai mikrobangų radiometrais gauti rezultatai gali tiksliau atspindėti vandens paviršiaus temperatūrą nei naudojant IR radiometrus.

Vandens paviršiaus spinduliuojamų mikrobangų signalas priklauso ne tik nuo vandens paviršiaus temperatūros, bet ir nuo bangų nulemtos paviršiaus šiurkštumo ir kritulių. Šių veiksmų poveikį galima pašalinti naudojant kelis mikrobangų dažnius. Pavyzdžiui, 7 GHz dažnis gali būti naudojamas vertinti temperatūrą, o 11, 18, ir 37 GHz dažniai – surinkti papildomą informaciją apie rezultatus iškreipiančių paviršiaus šiurkštumo ar kritulių poveikį.

Vandens paviršiaus temperatūros apibrėžimas. Tradiciškai jūrų ir vandenynų vandens paviršiaus temperatūra laikoma vandens sluoksnio iki 10 m gylio temperatūra. Ši riba tapatinama su sluoksniu, kuriame vyksta temperatūros pokyčiai dėl trumpalaikių saulės spinduliuotės, vėjo, oro temperatūros svyravimų. Ši zona patiria didžiausią poveikį, todėl joje vandens temperatūra skirtinguose gyliuose gali žymiai skirtis, o šie skirtumai gali labai keistis per laiką.



3.5.4. pav. Vandens paviršiaus temperatūros pasiskirstymas Baltijos jūroje 2020 m. vasario 18 d. Paveikslas vaizduoja SST_BAL_SST_L3S_NRT_OBSERVATIONS_010_032 produkto duomenis. Šis produktas sudarytas naudojant infraraudonųjų bangų radiometrų NOAA AVHRR 7, 9, 11, 14, 16, 17, 18, *Envisat* ATSR1, ATSR2 ir AATSR stebėjimų duomenis. Centrinėje Baltijos jūros dalyje dėl debesų poveikio duomenų nėra. Paveikslui parengti naudotas „Copernicus“ *Marine Service* vizualizavimo įrankis (<https://marine.copernicus.eu>).

Vandens paviršiaus temperatūros matavimai *in situ* gali būti atliekami įvairiuose gyliuose – nuo keliasdešimt centimetrų iki kelių metrų. Stacionarių ir dreifuojančių bujų jutikliai dažnai fiksuoja 1 m gylio temperatūrą. Mažesniuose vandens telkiniuose, pavyzdžiui, vidutinio dydžio ir mažuose ežeruose, paviršinė temperatūra vadinama sluoksnio, esančio iki 10–20 cm, temperatūra.

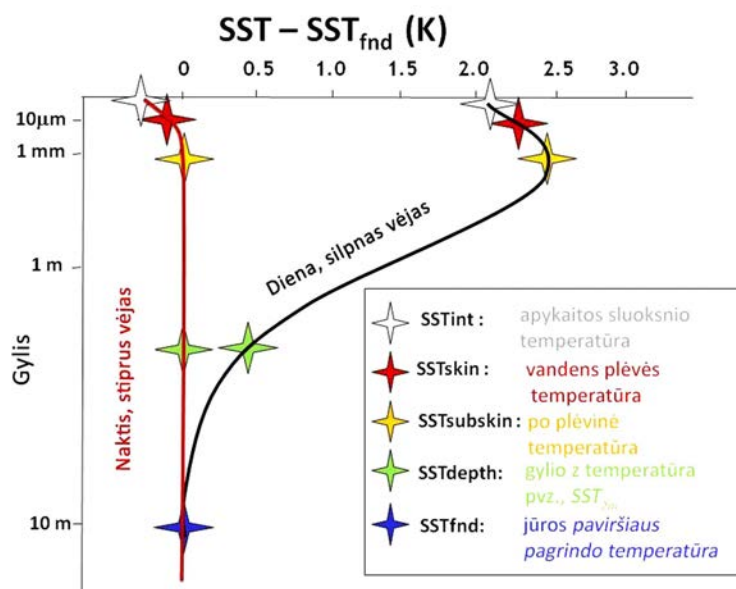
Palydoviniais duomenimis įvertinama tik plono paviršinio sluoksnio temperatūra. Infraraudonųjų spindulių radiometrais galima išmatuoti apie 20 μm vandens sluoksnio temperatūrą. Mikrobangų radiometrais išmatuojama storesnio vandens sluoksnio – 1 milimetro – temperatūra. Šie temperatūros matavimai tik iš dalies atspindi gilesniuose sluoksniuose esančią temperatūrą.

Dėl skirtingo vandens paviršiaus temperatūros apibrėžimo palydovais gautus vandens temperatūros duomenis yra sudėtinga susieti su matavimų *in situ* metu gautais vandens paviršiaus temperatūros duomenimis. Siekiant išvengti netikslumų, susijusių su daugialypių vandens paviršiaus temperatūros pavadinimu, Aukštos skiriamosios gebos jūros paviršiaus temperatūros grupė (angl. Group for High-Resolution Sea-Surface Temperature, GHRSST) pasiūlė naudoti penkis terminus, leidžiančius identifikuoti, kokio sluoksnio paviršiaus temperatūrą atspindi konkretūs duomenys (3.5.5. pav.).

Pačiame vandens paviršiuje yra labai plonas apykaitos sluoksnis, kuriame vyksta atmosferos ir vandens energijos apykaita molekulių lygmeniu. Šio sluoksnio temperatūra (SST_{int})

praktiškai nėra išmatuojama. Žemiau apykaitos sluoksnio apie 10–20 μm gylyje nuo vandens paviršiaus yra vandens paviršiaus plėvės sluoksnis. Šio sluoksnio temperatūrą (SST_{skin}) stebime IR radiometrais, kurie fiksuoja 3,7–12 μm ilgio bangas. Žemiau išskiriamas poplėvinis sluoksnis, kurio riba yra kelių milimetrų gylyje ($SST_{subskin}$) ir sutampa su temperatūra, matuojama trumpųjų bangų radiometrais, veikiančiais 6–11 GHz dažniu.

3.5.5. pav. Vandens paviršiaus temperatūros apibrėžimai, pasiūlyti GHRSSST (pagal Minnett ir kt. 2012).

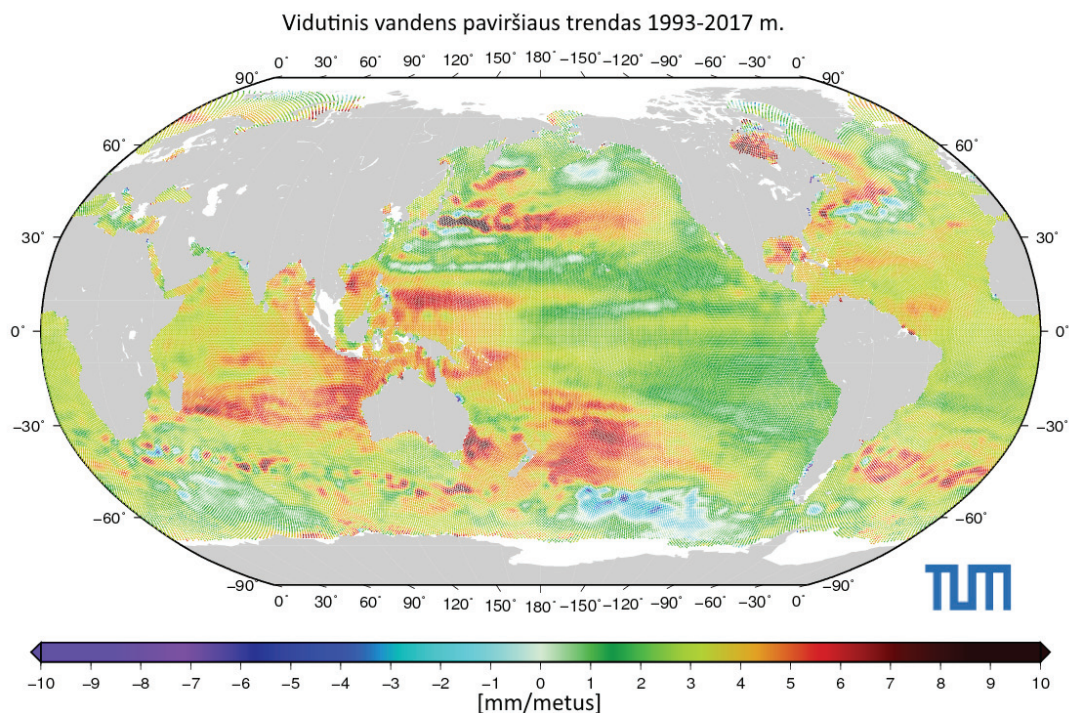


Giliau temperatūrą galima išmatuoti tik matavimų *in situ* metu. Giliausiai matuojama vandens paviršiaus pagrindo temperatūra (SST_{fnd}). Tai temperatūra sluoksnio, kuriame jau nebėra paros temperatūros svyravimų, nulėtų saulės spinduliuotės prietakos. Giliau esantys sluoksniai nebepriskiriami vandenyno paviršiui.

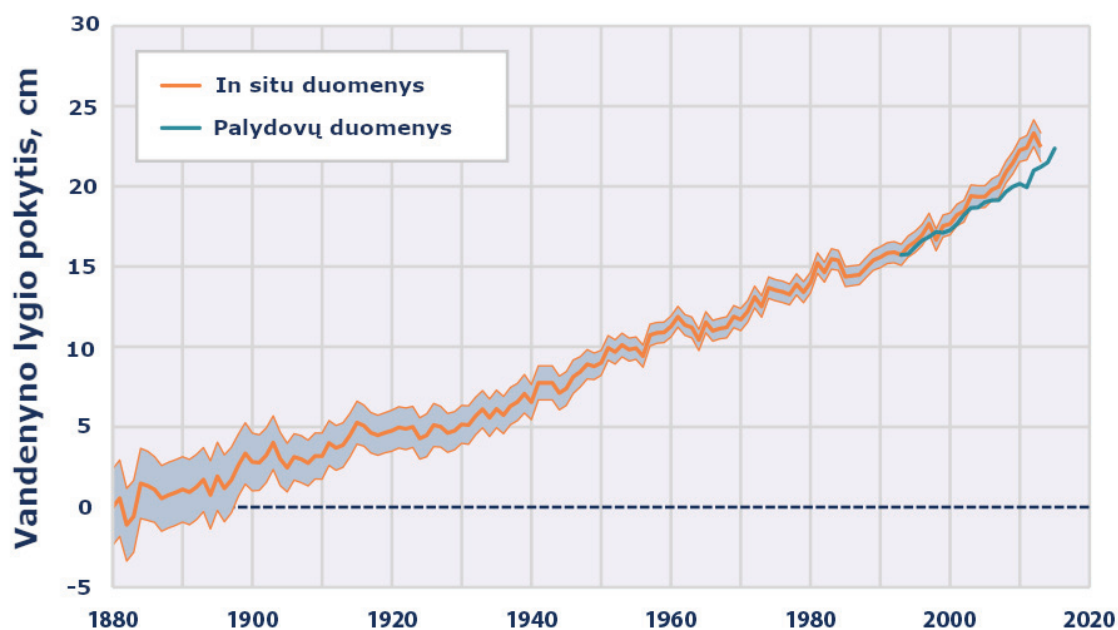
3.5.3. Vandens lygis ir bangų režimas

Vandens telkinių vandens lygis yra vienas iš svarbiausių fizinių jo parametrų. Nuo vandens lygio priklauso vandens telkinio plotas, todėl kylant vandens telkinio lygiui gali būti užliejamos jo pakrantėje esančios teritorijos.

Nuolatinis vandens lygio stebėjimas svarbus vertinant ilgalaikius vandens pokyčius. Šie pokyčiai pastaraisiais dešimtmečiais labiausiai susiję su klimato kaita. Pasaulinio vandenyno lygio kilimas gali būti vienas iš didžiausių ekonominius nuostolius ir socialinius iššūkius keliančių klimato kaitos aspektų. Vandens lygio kaita gali žymiai skirtis įvairiose vandenyno akvatorijose (3.5.6. pav.), todėl stebėjimai, apimantys visą pasaulinio vandenyno plotą, yra labai svarbūs norint tiksliai įvertinti globalius pokyčius ir regioninius skirtumus. Globalūs vandens lygio duomenys padeda suprasti abipusius procesus, siejančius atmosferą su vandenynais ir jūromis, įvertinti galimą klimato kaitos poveikį bei suprasti vandenynų cirkuliaciją ir jos kaitą. Remiantis vien stebėjimais *in situ*, kurie dažniausiai vykdomi pakrantėse, tiksliai įvertinti globalių pokyčių negalima (3.5.7. pav.). Atsiradus palydoviniams prietaisams, kurie kas gana trumpą laiką gali išmatuoti vandens lygio erdvinį pasiskirstimą dideliame plote, galima mažiau neapibrėžtai įvertinti, kaip kinta pasaulinis vandens lygis (3.5.7. pav.). Stebėjimų *in situ* skaičius yra nevienodai pasiskirstęs, todėl pagal juos vertinant pasaulinį vandens lygį gaunamas didelis neapibrėžtumas.



3.5.6. pav. Vidutinis vandens paviršiaus pokytis 1993–2017 m., įvertintas naudojant palydovų duomenis (pagal OpenADB, 2017a).



3.5.7. pav. Pasaulinio vandenyno vandens lygio pokytis nuo 1880 m., įvertintas pagal palydovų duomenis ir duomenis *in situ*. Pilka juosta rodo labiausiai tikėtiną stebėjimais *in situ* paremtos kreivės padėtį. Kuo juosta platesnė, tuo mažesnis apskaičiuoto vidutinio lygio pokyčio tikslumas tais metais. Stebėjimo *in situ* duomenimis paremtas vidutinio vandens lygio tikslumas labiausiai priklauso nuo matavimo stočių skaičiaus (pagal EPA, 2016).

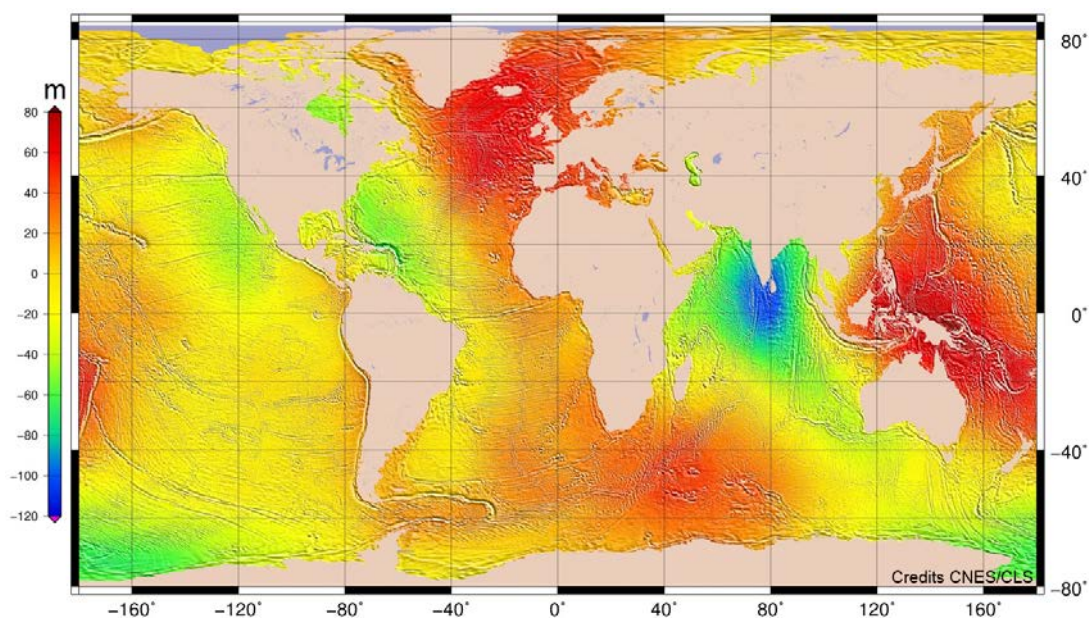
Net ir vertinant atskirų vandenyno dalių, jūrų ar įlankų vandens lygį palydovais gaunama informacija yra labai svarbi. Stebėjimų *in situ* tinklas daugelyje pasaulio šalių yra retas, todėl palydovais gaunama informacija gali būti vienintelis informacijos šaltinis, leidžiantis įvertinti vandens lygį ir jo erdvinį pasiskirstymą.

Palydovų jutikliais išmatuotas vandens lygis gali būti svarbus vertinant sausumos vandens telkinių: upių ir ežerų, vandens lygį. Dėl mažos šių duomenų raiškos gali būti įvertinamas tik didelių ežerų arba plačių upių vandens lygis. Upių ir ežerų lygio informacija naudojama vertinant vandens išteklius ir jų kaitą, sudarant nuotėkio prognozes, vertinant potvynių grėsmę ir riziką.

Vandens lygį stebint palydoviniais prietaisais gaunama papildoma informacija apie vandens paviršiaus šiurkštumą, susijusį su vėjo sukeltų bangų parametrais. Pagal bangų parametrus galima apskaičiuoti vėjo greitį ir kryptį virš vandens plotų. Šie duomenys svarbūs užtikrinant saugią laivybą, tikslinant orų prognozes, vertinant ir valdant krantų erozijos riziką.

Vandens lygio ir bangų stebėjimo būdai. Vandens lygis – vienas iš seniausiai matuojamų vandens telkinių rodiklių. Matavimams atlikti nereikia sudėtingų prietaisų. Paprasčiausi ir tiksliausi matavimai atliekami sugraduota matuokle matuojant vandens paviršiaus pakilimą nuo žinomo aukščio taško. Tokius vandens lygio matavimus galima atlikti pakrantėse įrengtuose postuose. Vandens lygio matavimus *in situ* nebūtinai turi atlikti stebėtojas. Lygiui matuoti dažnai naudojami automatiniai lygio matuokliai, kurie pasirinktu intervalu fiksuoja vandens paviršiaus lygį ir šią informaciją išsaugo arba siunčia vartotojams. Bangų parametrai taip pat fiksuojami pagal vandens lygio pokyčius.

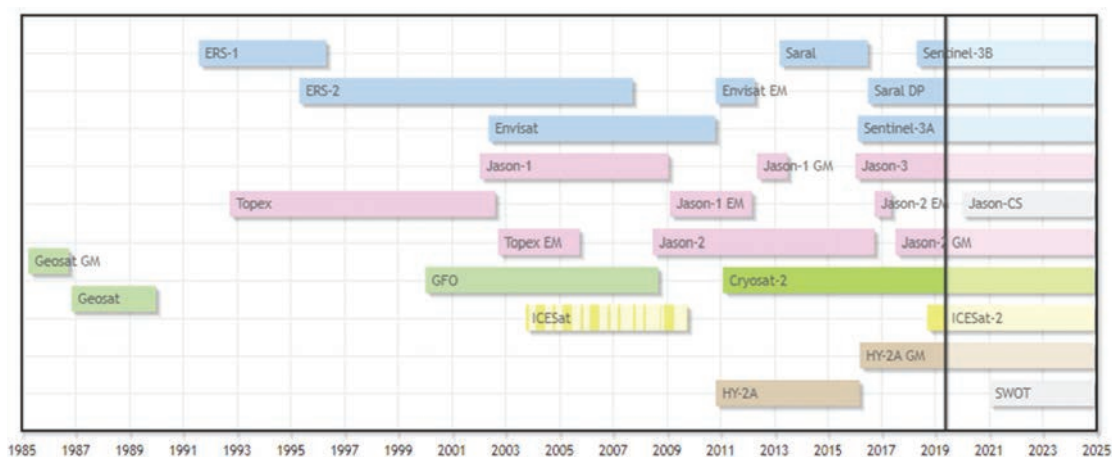
Stacionariai įrengti vandens lygio matavimo prietaisai matuoja vandens lygį tik konkrečiame taške, todėl visiškai vandens lygio pasiskirstymo telkinyje gali neatspindėti (3.5.8. pav.). Vandens lygis gali skirtis net ir santykinai nedidelio vandens telkinio dalyse. Pavyzdžiui, dėl vėjo poveikio vienoje ežero dalyje formuojasi patvanka ir vandens lygis pakyla, o priešingoje dalyje jis sumažėja. Vertinant erdvinį vandens lygio pasiskirstymą vandens telkinio akvatorijoje naudojami nuotolinių Žemės stebėjimų duomenys.



3.5.8. pav. Vidutinis 1993–2012 m. vandens lygis virš referencinio elipsoido. Paveikslas sukurtas naudojant CNES/CLS įvairių palydovų misijų radiometrų duomenų asimiliacijos MSS_CNES_CLS_15 produktą (AVISO, 2016).

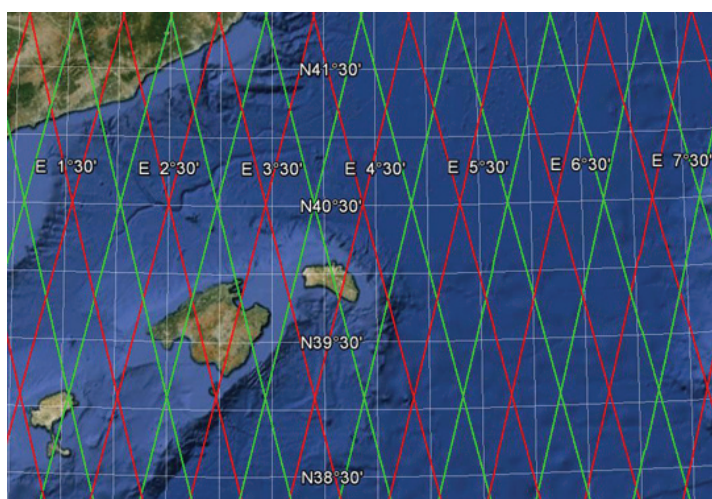
Iš palydovų vandens lygis ir bangų parametrai nustatomi pagal altimetrų duomenis arba taikant SAR *Delay-Doppler* altimetrijos metodą. Altimetrijos matavimai palydovų gabenamais jutikliais atliekami nuo 1985 m. Nuo 2010 metų *Delay-Doppler* (SAR) altimetrija pradėta naudoti *CryoSat 2* misijoje ir, tikriausiai, bus naudojama daugumoje misijų ateityje (3.5.9. pav.). Pagrindinis privalumas lyginant su tradicine altimetrija yra galimybė stebėti mažesnio ploto pėdsaką, todėl gaunami didesnės raiškos duomenys.

Altimetrų matavimai atliekami tik išilgai palydovo orbitos (3.5.10. pav.), todėl norint gauti tikslių vandens telkinių ir ypač vandens lygio vertinimą, svarbu turėti daug palydovų, vienu metu atliekančių stebėjimus. Didelis vandens lygį stebinčių palydovų skaičius lemia tai, kad tarpai tarp palydovų orbitų, o kartu ir matavimo juostų yra mažesni, todėl sujungus jų duomenis gaunamas tikslesnis erdvinis lygio ir bangų parametų pasiskirstymas.



3.5.9. pav. Praeities ir ateities altimetrijos misijos. Open Altimeter Database (OpenADB, 2017b).

3.5.10. pav. *Sentinel 3 A* ir *B* palydovų altimetru SRAL matuojama Viduržemio jūros šiaurės vakarų dalis. *A* ir *B* palydovų orbitos vaizduojamos skirtingomis spalvomis. Kylančiomis orbitomis palydovai skrenda iš PR į ŠV, o besileidžiančiomis iš ŠR į PV (ESA, 2013b).



Palydovinės altimetrijos principas. Žemės stebėjimo palydovuose įmontuoti altimetrai spinduliuoja aukšto dažnio elektromagnetinių bangų impulsus (daugiau kaip 1700 per sekundę) ir itin tiksliai fiksuoja signalo grįžimo laiką bei atspindžio formą. Pagal signalo grįžimo laiką ir šviesos (elektromagnetinių bangų) sklaidimo greitį nustatomas atstumas nuo jutiklio iki paviršiaus. Dėl vandens garų atmosferoje poveikio ir jonizacijos elektromagnetinių bangų sklaidimo greitis gali būti mažesnis, todėl apdorojant radiometrų duomenis būtina atsižvelgti į šį efektą.

Altimetrijos tikslas yra sužinoti vietovės aukštį. Šiuo atveju aukštis – konkretaus taško atstumas nuo pasirinkto referencinio paviršiaus ar taško, pavyzdžiui, Žemės referencinio elipso ar Žemės centro. Norint apskaičiuoti Žemės paviršiaus aukštį konkrečiame taške reikia labai tiksliai žinoti palydovo aukštį virš pasirinktos atskaitos, nuo kurio skaičiuojamas aukštis.

Palydovo aukštis priklauso nuo orbitos parametrų, referencinio paviršiaus formos konkrečioje vietovėje, išorinės atmosferos trinties ir gravitacinių jėgų poveikio. Siekiant tiksliai (1–2 cm tikslumu) įvertinti palydovų aukštį, gali būti naudojamos kelios skirtingos padėties nustatymo sistemos (Rosmorduc ir kt., 2016):

- 1) Doplerio poslinkio dėsnio efektu paremtas palydovo greičio vertinimas ir juo paremtas padėties orbitoje nustatymas;
- 2) globali padėties nustatymo sistema (GPS ar analogiškos sistemos);
- 3) atstumo matavimai lazeriu.

Vandens paviršiaus aukštis yra nulemtas kelių veiksnių. Jei neveiktų kiti veiksniai, vandenynų ir jūrų paviršius atkartotų Žemės gravitacijos nulemtą geoido formą. Dėl nevienodo masės ir pasiskirstymo Žemėje geoido aukštis yra labai nelygus. Kiti vandens paviršiaus aukštį lemiantys veiksniai kinta daug greičiau, todėl geoido formą galima tapatinti su ilgalaikiu vandens paviršiaus aukščio vidurkiu (3.5.8. pav.). Skirtumai tarp vandens paviršiaus aukščio įvairiose vandenyno akvatorijos vietose siekia keliasdešimt metrų. Mažesnę poveikį vandenynų aukščiui daro globali vandenyno cirkuliacija. Dėl jos vandens lygis svyruoja iki 1 metro. Žymiai didesni trumpalaikiai vandens lygio pokyčiai susiję su vėjo sukeltomis bangomis ir sampūtomis. Altimetrais išmatuojamas suminis visų šių komponentų poveikis.

Pagal grįžusio signalo intensyvumą ir formą galima įvertinti paviršiaus savybes (virš vandenyno – bangų parametrus). Altimetrais įvertintas vandens lygio tikslumas priklauso nuo naudojamos sistemos techninio tikslumo ir sukurto produkto paskirties. Pavyzdžiui, operatyviam darbui naudojami NRT (angl. Near Real Time) vandens lygio produktai yra iki 10 cm tikslumo, o vėliau jie patikslinami iki 3–5 cm.

Vandens paviršiaus aukščio ir bangų parametrų nustatymo metodika. Pagrindinis altimetrijos principas yra lengvai suvokiamas, tačiau jį įgyvendinant praktiškai naudojama gana sudėtinga sistema, leidžianti efektyviai gauti tikslią ir išsamią informaciją.

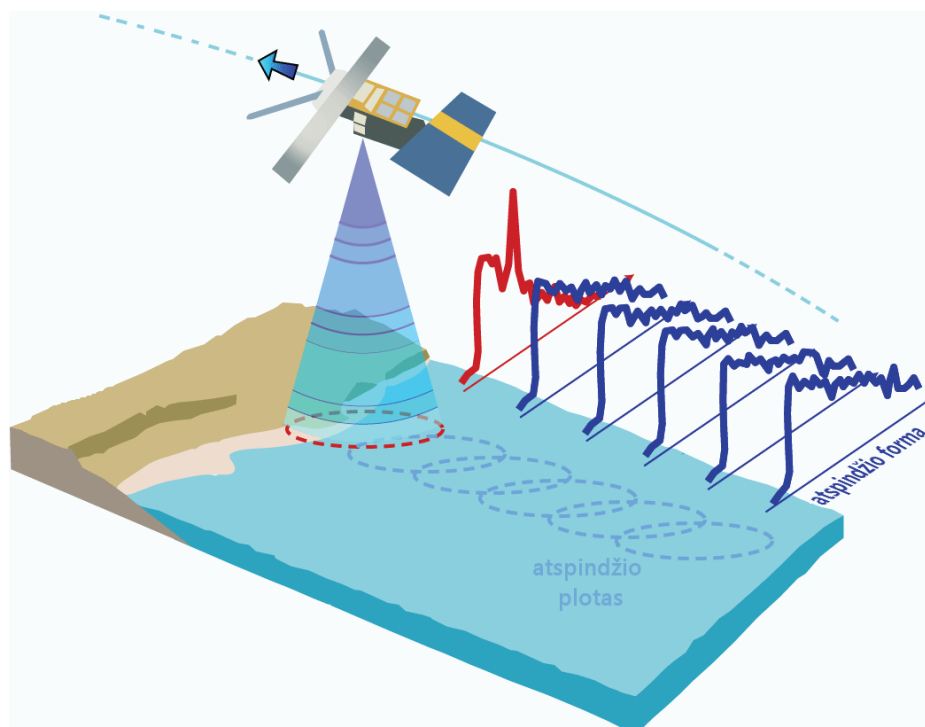
Altimetro antena spinduliuoja vieno ar dviejų dažnių elektromagnetinių bangų impulsus. Pavyzdžiui, *Envisat* altimetras naudoja elektromagnetinės spinduliuotės impulsus 13,575 GHz Ku bangų ruože ir 3,2 GHz S bangų ruože. Impulsų aprėptis didėja didėjant atstumui nuo antenos, todėl Žemės paviršius pasiekia didelio ploto signalas (3.5.11. pav.). Iš kokio ploto atsispindėjęs signalas bus užfiksuotas, priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo. Kai išspinduliuotas signalas atsispindi nuo lygaus vandens paviršiaus, atspindžio plotas būna apie 2 km skersmens. Nuo banguoto vandenyno ar nelygaus sausumos paviršiaus atsispindėjęs ir jutiklio užfiksuotas signalas apibūdina didesnę teritoriją (≈ 10 km). Manoma, kad reikšmingas signalas gali pasiekti ir iš 18 km skersmens atspindžio ploto (Rosmorduc ir kt., 2016).

Prietaiso fiksuotą atspindžio formą lemia suminis visų atspindžio plote esančių elementų poveikis, todėl tikslesni ir lengviau interpretuojami altimetrijos rezultatai gaunami virš vandens paviršiaus, kurio paviršiaus savybės dideliame plote panašios, nei virš sausumos, kurios paviršius gali labai pasikeisti net ir nedideliame plote.

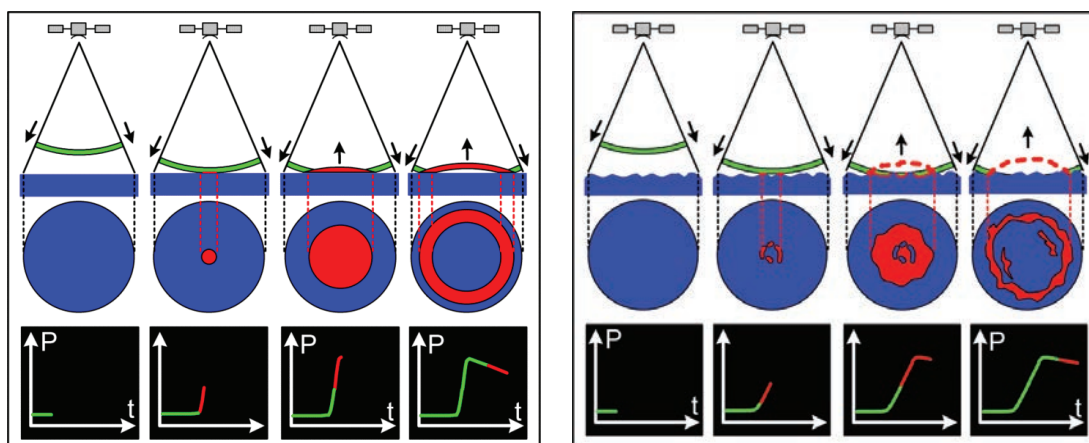
Prietaiso užfiksuotą atspindžio signalą suskaidžius į trumpus laiko tarpus (≈ 50 ms) suformuojamos atspindžio priklausomybės nuo laiko kreivės, kurios vadinamos atspindžio bangos forma (3.5.12. pav.). Remiantis jomis vertinamas Žemės paviršiaus, nuo kurio atsispindėjo signalas, aukštis ir šiurkštumas.

Kai elektromagnetinių bangų signalas pasiekia lygų paviršius (3.5.12. pav.), jo atspindžio formą sudaro iš visomis kryptimis vienodai besiplečiančio ploto grįžtantis signalas. Atspindžio formoje toks signalas fiksuojamas kaip staigus intensyvumo padidėjimas. Jei paviršius šiurkš-

tus, tada paviršius, nuo kurio kiekvienu metu atsispindi signalas, atspindžio plote pasiskirsto netolygiai, o susumavus viso ploto atspindžius gaunamas tolygesnis atspindžio intensyvumo kilimas.



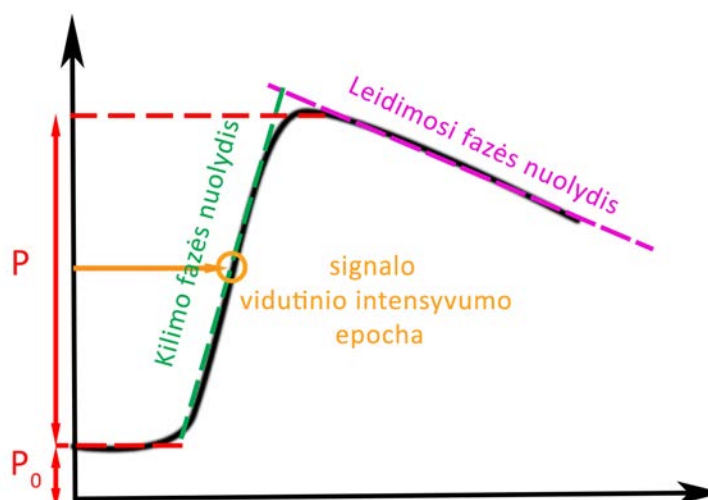
3.5.11. pav. Altimetro atspindžio plotas ir forma pakrantės zonoje ir virš atviro vandens paviršiaus (pagal ESA, 2013a).



3.5.12. pav. Atspindžio formos susidarymas esant lygiam ir labai šiurkščiam paviršiui (AVISO, 2020).

Brown atspindžio formos modelis (angl. backscatter return waveform). Pagal užfiksuotus atspindžio formos duomenis vertinamas paviršiaus aukštis ir jo savybės. Virš vandens paviršiaus tipinė (teorinė) atspindžio forma gali būti apibūdinama keliais parametrais, kurie siejasi su geofiziniais rodikliais. Vieną iš dažniausiai naudojamų teorinių atspindžio formos modelių (3.5.13. pav.) pasiūlė Brownas ir kt. (1977).

3.5.13. pav. Atspindžio forma, rodanti signalo intensyvumo kaitą per laiką, ir jos parametrai naudojami vertinant geofizinius rodiklius (pagal Brown ir kt., 1977).



Remiantis šiuo modeliu nustatomi atspindžio formos parametrai, pagal kuriuos įvertinamas paviršiaus aukštis, bangų rodikliai ir vėjo greitis. Pirmas atspindžio formos parametras P_0 parodo jutiklio užfiksuotą atspindžio intensyvumo reikšmę, kol signalas dar negrįžo. P_0 dydis apibūdina aplinkos triukšmą, kuris gali būti susijęs ir su paties prietaiso veikimu. Norint įvertinti grįžtančio signalo intensyvumą, iš prietaiso užfiksuotos reikšmės reikia atimti P_0 . Iš didžiausios užfiksuotos atspindžio formos intensyvumo reikšmės atėmus P_0 gaunama grįžusio signalo intensyvumo amplitudė P . Atspindžio formos amplitudė naudojama nustatant paviršiaus atgalinę sklaidą. Jei vertinamas atspindys nuo vandens paviršiaus, amplitudė naudojama vertinant vėjo greitį.

Svarbiausias aukščiui nustatyti atspindžio formos rodiklis yra signalo vidutinio intensyvumo epocha (3.5.13. pav.). Tai laiko tarpas nuo tikėtino signalo sugrįžimo iki laiko, kada užfiksuojama pusė signalo intensyvumo. Pagal šį rodiklį įvertinamas palydovo atstumas iki tiriamo paviršiaus. Grįžusio signalo intensyvumo kaitos greitis priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo, todėl tiriant vandens paviršių kilimo fazės nuolydis naudojamas apskaičiuoti reikšmingą bangų aukštį. Reikšmingu bangos aukščiu tradiciškai laikomas trečdalis aukščiausių bangų vidutinis aukštis arba dydis, 4 kartus didesnis už vandens lygio svyravimų standartinį nuokrypį.

3.5.4. Vandens telkinių būklė

Visoms Žemės gyvybės formoms yra būtinas vanduo. Vandenyje ištirpusios medžiagos pasisavinamos gyvų organizmų ir naudojamos jų gyvybei palaikyti. Žmonių gyvybei palaikyti vanduo yra itin svarbus. Be vandens galima išgyventi tik kelias dienas, todėl vienas iš svarbiausių žmonijos iššūkių yra visiems planetos gyventojams užtikrinti galimybę gauti geros kokybės geriamą vandenį. Netiesiogiai vandens telkinių būklė taip pat labai svarbi, nes vandens ekosistemos teikia daug būtinų paslaugų: vandens telkinių ekosistemos yra svarbus maisto šaltinis; vanduo tiesiogiai naudojamas žemės ūkyje ir pramonėje; vandens telkiniai didina kraštovaizdžio vertę, plečia rekreacijos galimybes.

Vandens telkinių būklė veikia ir sausumos ekosistemas. Vanduo Žemės paviršiuje ir paviršiniuose grunto sluoksniuose yra judriausia terpė, per kurią vyksta intensyviausia medžiagų ir energijos apykaita. Su krituliais į Žemės paviršių atnešamos medžiagos, išplautos iš atmosferos. Iškritęs ant Žemės paviršiaus vanduo teka juo arba geriasi į gruntą ir tekėdamas nuolydžio kryptimi ankščiau ar vėliau pasiekia vandens telkinius. Šiame kelyje į vandenį patenka natūralios ir antropogeninės kilmės medžiagos, kurios ištirpsta vandenyje arba nešamos kaip

suspenduotos dalelės. Vandenyje vykstant cheminiams, biologiniams ir fiziniams procesams ištirpusių medžiagų kiekis keičiasi, jos jungiasi į organinius ir neorganinius junginius. Šie pokyčiai vyksta tekant vandeniui per sausumos ekosistemas ir vandens telkiniuose. Vandens telkinių vandens kokybė yra integruotas visų šių procesų rezultatas, todėl stebint ją galima įvertinti ne tik juose vykstančius procesus, bet ir spręsti apie vandens telkinių baseinų (teritorijų, iš kurių į vandens telkinį atiteka vanduo) ekosistemų būklę ir baseine daromą antropogeninį poveikį. Galima teigti, kad vandens telkinių būklė atspindi visos teritorijos, iš kurios į ją atiteka vanduo, būklę ir problemas. Dėl šių priežasčių vandens telkinių vandens kokybės vertinimas yra labai svarbus siekiant užtikrinti gerą vandens ir sausumos ekosistemų būklę, jų teikiamų paslaugų kokybę ir geros kokybės geriamojo vandens išteklius.

Vandens telkinių būklės stebėjimo būdai. Vandens telkinių būklė nustatoma pagal vandens cheminius, biologinius ir fizinius rodiklius. Šie rodikliai matuojami tiesiogiai vandens telkinyje, pavyzdžiui, vandens skaidrumas, arba imamas vandens mėginys ir rodiklio reikšmė nustatoma laboratorijoje, pavyzdžiui, chlorofilo koncentracija.

Tyrimai dažnai atliekami ne vienoje vandens telkinio vietoje. Siekiama, kad jie atspindėtų skirtingas vandens telkinio akvatorijos dalis, todėl stebėjimai dažnai atliekami iš valčių ar laivų. Vandens telkinių būklės rodikliai kinta keičiantis gyliui, todėl norint įvertinti rodiklių kaitą visame vandens telkinio tūryje reikia atlikti matavimus ar paimti mėginius iš skirtingų vandens telkinio sluoksnių. Dėl šių priežasčių vandens telkinių būklės matavimai *in situ* yra brangūs ir reikalauja daug žmogiškųjų išteklių. Mažinant kaštus ir laiko sąnaudas būklės stebėjimai daugumoje vandens telkinių atliekami ilgais laiko intervalais arba keliuose stebėjimo taškuose. Pavyzdžiui, vykdant nacionalinį vandens telkinių būklės monitoringą stebima vienoje – giliausioje – vandens telkinio vietoje kelis kartus per metus. Tokie duomenys leidžia įvertinti vandens telkinių būklę, tačiau neapibrėžtumas išlieka didelis. Reti stebėjimai ir maža erdvinė stebėjimų aprėptis neleidžia įvertinti rodiklių kaitos per laiką ir erdvėje.

Vandens telkinių būklės rodiklių stebėjimas *in situ* taip pat yra apribotas ir stebėjimo metodikos. Pavyzdžiui, vandens skaidrumas vertinamas Sekio (Secchi) disku, o vandens spalva pagal Forelio-Ulės spalvų skalę (3.5.14. pav.). Šiais prietaisais skaidrumo ir spalvos įvertinimas atliekamas vizualiai: vandens skaidrumas nustatomas išmatuojant ribos, ties kuria Sekio disko nebegalima įžiūrėti, gylį. Pakėlus Sekio diską į pusę skaidrumo gylio, lyginant stebėtojo matomą spalvą su standartine spalvų skale nustatoma vandens spalva. Abiejų metodų tikslumas labai priklauso nuo apšvietimo stebėjimo metu ir nuo stebėtojo regos bei gebėjimo atskirti skirtingus spalvos atspalvius. Rodiklių, nustatomų laboratorijose pagal paimtus vandens mėginius, tikslumas labai priklauso nuo to, kaip mėginys buvo paimtas, gabentas ir kokiomis sąlygomis saugotas.

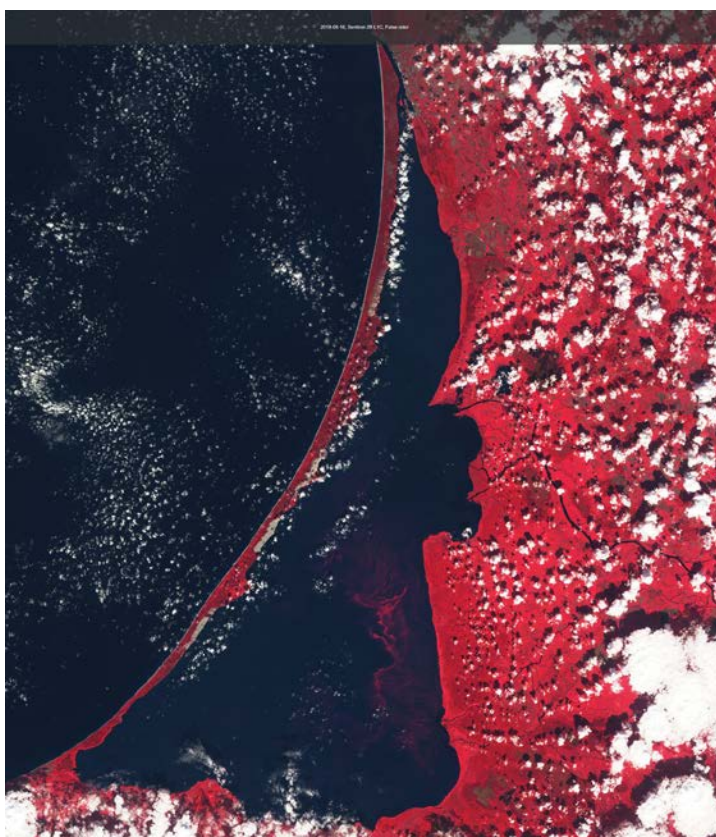
Optimizuojant vandens telkinių būklės rodiklių monitoringą naudojami ir automatiniai prietaisai. Dauguma jų matuoja atspindžio nuo vandens paviršiaus vertes konkrečiuose bangų dažniuose, o vėliau ši informacija naudojama įvertinti vandens kokybės rodiklius. Vertinant vandens telkinių būklės rodiklius pagal palydovų jutiklių duomenis remiamasi tuo pačiu principu. Žinoma, nuotoliniais metodais išmatuotų vandens telkinių būklės rodiklių tikslumas dažnai būna mažesnis nei stebėjimų *in situ*, tačiau jie teikia daug privalumų. Svarbiausias privalumas yra informacijos apie vandens telkinį kiekis.

Palydovai vienu metu stebi didelį plotą, todėl informacija gali būti gaunama apie visą mažo ir vidutinio telkinio vandens plotą arba apie dalį didelių vandens telkinių akvatorijos (3.5.15. pav.). Skirtingos raiškos palydovų jutikliai gali būti taikomi vertinant mažų ir didelių telkinių vandens kokybės rodiklius. Pavyzdžiui, *Sentinel 2* MSI jutiklio kanalų erdvinė raiška yra nuo 10 iki 60 m, todėl naudojant vieno šio jutiklio vaizdo duomenis galima įvertinti 100 km² teritorijoje esančių ežerų būklės rodiklius. *Sentinel 3* OLCI erdvinė raiška mažesnė, tačiau vienas palydovinis vaizdas yra didesnis, pagal juos galima įvertinti kokybės rodiklius visoje Baltijos jūroje.

3.5.14. pav. Vandens skaidrumui ir spalvai nustatyti naudojamas Sekio diskas ir Forelio-Ulės spalvų skalė.



3.5.15. pav. Kuršių marių 2018 m. rugpjūčio 16 d. *Sentinel 2* MSI netikrų spalvų RGB kompozicijoje matosi tikėtina fitoplanktono žydėjimo paveikta akvatorija pietrytinėje marių dalyje. (sudaryta naudojant EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>).



Kitas palydovinių duomenų privalumas yra dažnai atliekami stebėjimai. To paties vandens telkinio būklę galima stebėti kelias ar keliolika dienų. Palydovo duomenų apie konkretų vandens telkinį dažnumas priklauso nuo vandens telkinio geografinės padėties, palydovo orbitos parametrų ir jo stebimo ploto dydžio.

Palydovų jutikliai matuoja atspindį nuo vandens paviršiaus platesniame elektromagnetinių bangų diapazone, nei mato žmogaus akis. Lyginant su vizualiniais stebėjimais palydoviniai duomenys išplečia gaunamos informacijos kiekį ir galimybes nustatyti rodiklius, kurių remiantis žmonių atliekamais stebėjimais įvertinti negalima.

Dar vienas palydovinių duomenų privalumas yra jų kaina. Palydovų sistemos pradinė įrangos kaina ir veiklos kaštai yra labai dideli, tačiau jų teikiamas informacijos kiekis taip pat didelis. Svarbu paminėti, kad nekomercinių, pavyzdžiui, ES programos „Copernicus“ palydovų duomenys vartotojams pasiekiami nemokamai, todėl jie turi galimybę be didelių papildomų sąnaudų papildyti žinias apie vandens telkinių būklę Žemės stebėjimo iš palydovų duomenimis.

Tikėtina, kad valdant vandens telkinius ir priimant sprendimus palydovais gauti duomenys nepakeis stebėjimų *in situ*, tačiau jie gali būti naudojami kaip papildomi duomenys, leidžiantys suprasti vandens telkiniuose vykstančius procesus arba optimizuoti monitoringo *in situ* sistemą.

Vandens telkinių būklės rodiklių vertinimas naudojant palydovų duomenis. Žvelgiant į nedidelį gėlo vandens tūrį, jis atrodo bespalvis. Jei žvelgtume į storą vandens sluoksnį, gėlas vanduo atrodytų mėlynas. Tokios spalvos vandenį matome, nes regimojo spektro srityje vanduo labiausiai sugeria raudoną spalvą (ilgesnes bangas), o mažiausiai – mėlyną (trumpas regimojo spektro bangas). Natūralių vandens telkinių, esančių gamtoje, vanduo nėra gėlas, tad dėl priemaišų jo spalva gali būti labai įvairi (3.5.16. pav.). Dažniausiai pasitaikančių vandens spalvų įvairovę atspindi Forelio-Ulės spalvų skalė (3.5.14. pav.).



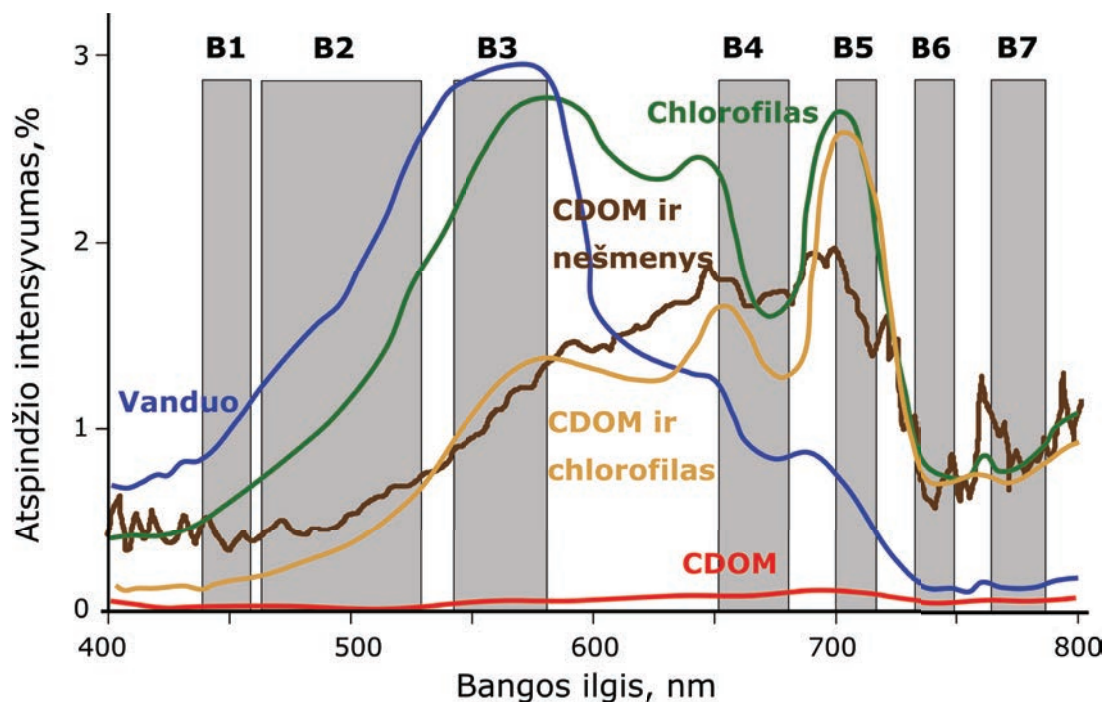
3.5.16. pav. Skirtinga vandens telkinių spalva (EyeOnWater, 2016).

Vandens telkinių spalvą lemia jame ištirpusios medžiagos, suspenduotos dalelės ir vandenyje esantis planktonas. Svarbiausi gamtoje vandens spalvą lemiantys komponentai yra:

- ištirpę spalvoti organiniai junginiai (angl. Colored Dissolved Organic Matters, CDOM);
- suspenduotos dalelės (angl. Total Suspended Matters, TSM);
- fitoplanktonas (jo kiekis įvertinamas pagal chlorofilo kiekį).

Palydovų optiniai jutikliai fiksuoja vandens paviršinio sluoksnio atspindį naudodami skirtingo ilgio bangas – kanalus ir taip leidžia įvertinti vandens telkinių spalvą ir ją lemiančius vandenyje esančius komponentus. Apie vandens kokybės rodiklius sprendžiame tik iš kanaluose užfiksuotų atspindžio reikšmių (3.5.17. pav.), todėl tolygaus atspindžio reikšmių visoje norimoje spektro da-

lyje neturime. Skirtingų prietaisų skaičius ir apibūdinama spektro dalis skiriasi (3.5.3. lentelė.), tačiau jutiklių kanalai orientuojami taip, kad būtų galima įvertinti Žemės paviršiaus atspindį svarbiausiose elektromagnetinių bangų spektro juostose. Kanaluose užfiksuotas atspindys apibūdina ne konkretų vandenyje esančio komponento kiekį, bet suminį visų vandenyje ištirpusių medžiagų, suspenduotų dalelių, planktono ir paties vandens atspindį.



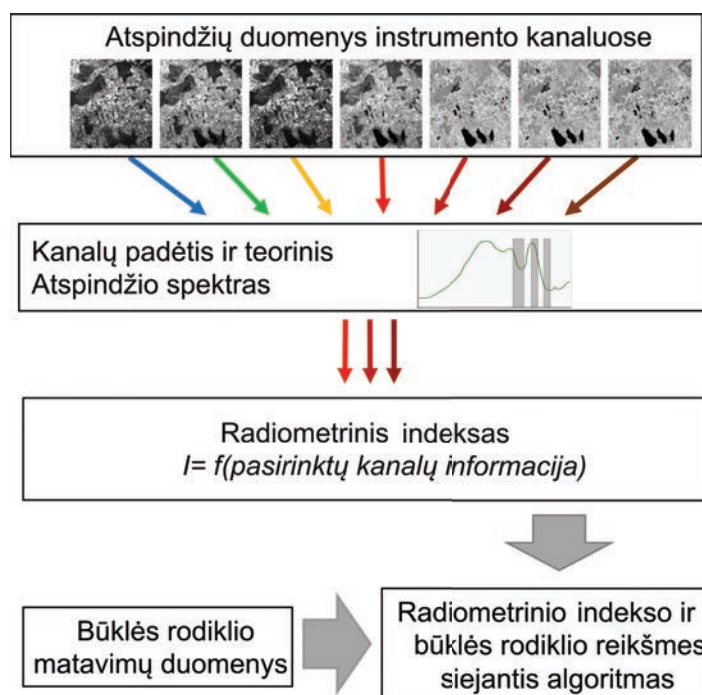
3.5.17. pav. Vandens spalvą lemiančių komponentų poveikis atspindžiui skirtinguose spektro dalyse ir Sentinel 2 MSI jutiklio kanalų padėtis bei jų plotis. Prietaisas išmatuoja bendrą visų vandens spalvą lemiančių komponentų atspindį, užfiksuotą visame kanalo plote (pagal University of Minnesota, 2019).

3.5.3. lentelė. Vandens kokybei vertinti dažniausiai naudojami palydovų jutikliai.

PALYDOVAS, JUTIKLIS	PRADŽIA	KANALŲ SKAIČIUS IR DIAPAZONAS, nm	ERDVINĖ RAIŠKA, m
Sentinel 2 MSI	2015	13 (442–2202)	10–60
Sentinel 3 OLCI	2016	21 (400–1 020)	300–1000
Landsat 8 OLI	2013	9 (433–1390)	15–100
DigitalGlobe WorldView 2	2009	8 (400–1040)	1,85
NOAA WorldView 3	2014	16 (400–2365)	1,24
EO-1 ALI	2000	10 (433–2350)	10–30
EO-1 Hyperion	2000	242 (350–2570)	30
Terra / Aqua MODIS	1999	36 (405–2155)	250–1000
Envisat 1 MERIS	2002	15 (390–1040)	300–1200
OrbView 2 SeaWiFS	1997	8 (402–885)	1130

Nustatant konkretaus komponento indėlį į bendrą atspindį naudojamos teorinės ir empirinės žinios apie tai, kaip kiekviena medžiaga veikia atspindžio spektrą. Žinant, kuriame iš kanalų norimo komponento atspindžiai didžiausi ar mažiausi, sudaromi radiometriniai indeksai, leidžiantys sujungti kelių kanalų informaciją į vieną vertę.

Radiometriniai indeksai sudaromi pagal teorines žinias apie komponento poveikį atspindžiui, biooptinius modelius, empirinius matavimus vietovėje arba siejant skirtinguose palydovų jutiklio kanaluose užfiksuotas atspindžio reikšmes su norimu nustatyti elemento koncentracijos vandens telkinyje duomenimis (3.5.18. pav.).



3.5.18. pav. Vandens telkinių būklės rodiklių vertinimo pagal palydovų jutiklių duomenis algoritmų sudarymo schema.

Suradus tinkamą kanalų derinį sudaromas ryšys, siejantis radiometrinį indeksą su norimu vandens telkinio būklės rodikliu. Ryšiai tarp radiometrinių indeksų ir vandens telkinių būklės rodiklių sudaromi pagal matavimų duomenis. Dažnai taikomas tiesinis ryšys, siejantis indekso reikšmes su būklės rodiklio reikšmėmis. Naudojant tiesinį ryšį gaunami pakankamai tikslūs rezultatai, o skaičiuoti būna paprasta. Prireikus galima taikyti sudėtingesnę radiometrinius indeksus ir būklės rodiklius siejančio ryšio matematinę išraišką arba naudoti mašininio mokymosi algoritmus (angl. machine learning).

Radiometriniai indeksai pritaikomi konkrečiam palydovo jutikliui, tačiau žinant jo kanalų padėtį galima radiometrinius indeksus pritaikyti kitų jutiklių, kurių kanalai apibūdina panašias elektromagnetinių bangų spektro dalis, duomenims. Radiometriniai indeksai ir jų ryšys su vandens telkinių būklės rodikliais gali būti pritaikytas specifinių savybių vandens telkiniams. Pavyzdžiui, net ir naudojant tą patį radiometrinį indeksą būklės rodiklių įvertinimo tikslumas skaidraus ir drumsto vandens telkiniuose gali labai skirtis.

Tradiciskai vertinant vandens telkinių būklę nuotoliniais metodais yra išskiriami du vandens telkinių tipai: 1 ir 2 tipas (*case 1 water and 2 water*) (Morel ir Prieur, 1977). Pagal šią dviejų kategorijų klasifikaciją:

- 1 tipo vandens telkiniai yra tokie, kuriuose vandens optines savybes labiausiai lemia fitoplanktono kiekis ir su jo gyvybine veikla bei žuvusių individų irimu susijusių tirpiųjų medžiagų kiekis vandenyje;

- 2 tipo vandens telkiniams priskiriami visi vandens telkiniai, neatitinkantys 1 tipo vandens telkinių kriterijaus. Šiuose telkiniuose optines vandens savybes lemia daugelio komponentų poveikis ir jų kilmė, optinių savybių kaita erdvėje ir laike nėra susijusi su fitoplanktono gyvybine veikla. Tokiuose vandens telkiniuose gali būti daug spalvą lemiančių tirpių junginių ir suspenduotų dalelių.

Skirstymas į du tipus nėra tobulas, nes 1 vandens telkinių tipui būtų galima priskirti tik atviro vandens plotus vandenynuose ir kai kuriose jūrose. Vandenynų įlankose ir priekrantės zonoje vandens optinės savybės retai priklauso tik nuo fitoplanktono veiklos. Šiose akvatorijose vandens optinės savybės gali būti nulemtos su upių vandeniu atnešamų vandenyje ištirpusių medžiagų arba vandenyje suspenduotų dalelių. Pakrantėse vandens optines savybes gali lemti bangų mūšos pakeltos salelės arba pakrantėse bei negiliose zonose augančių augalų poveikis.

2 vandens telkinių tipui priklausančių vandens telkinių įvairovė labai didelė. Todėl vertinat šių vandens telkinių būklės rodiklius tikslinga juos papildomai suskirstyti pagal:

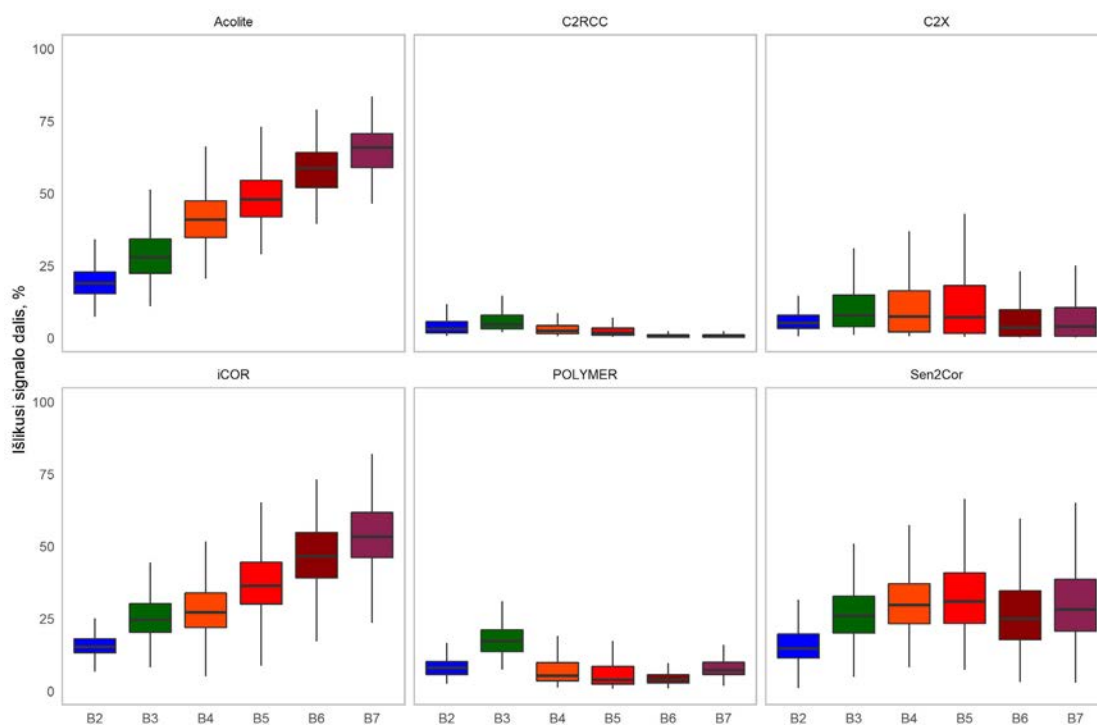
- optines vandens savybes,
- vandens telkinyje vyraujančius procesus,
- cheminę vandens sudėtį,
- trofinį vandens telkinio lygmenį;
- morfometrinius rodiklius,
- hidrologinį režimą.

Atmosferos poveikis. Žemės stebėjimo palydovai skrieja virš atmosferos, todėl juose esančių optinių jutiklių išmatuotas Žemės paviršiaus atspindžio intensyvumas yra paveiktas atmosferos. Per atmosferą sklindantį atspindį nuo vandens paviršiaus veikia atmosferos dujos, vandens garai ir įvairaus dydžio aerosoliai. Palydovo prietaisas užfiksuoja ir pačios atmosferos atspindį bei išsklaidytą saulės spinduliuotę. Norint pašalinti atmosferos poveikį, būtina atlikti duomenų atmosferos poveikio korekciją.

Atspindžio dydis nuo vandens paviršiaus yra mažas (< 10 %), todėl jam atmosferos poveikis santykinai didesnis nei atspindžiui nuo sausumos paviršiaus. Dėl šios priežasties vertinant vandens telkinių būklės rodiklius būtina atlikti tikslią atmosferos korekciją. Kadangi atmosferos korekcija vertinant vandens telkinių paviršiaus atspindį yra labai svarbi, šiam tikslui kuriami specifikuoti atmosferos korekcijos algoritmai, pavyzdžiui, *Acolite*, *iCOR*, *C2RCC*, *C2X*, *POLYMER*.

Atmosferos korekcijos algoritmus galima suskirstyti į kelis tipus. Patys paprasčiausi yra algoritmai, paremti atspindžio reikšmių pasiskirstymu palydovinio vaizdo taškuose. Šie algoritmai paremti prielaida, kad pikseliuose su pačiais tamsiausiais objektais jutiklis užfiksuoja atspindį, kuris apibūdina ne paties objekto savybes, o atmosferos poveikio dydį. Šis atmosferos poveikio dydis atimamas iš visų vaizdo taškų reikšmių.

Sudėtingesniais metodais atmosferos poveikis koreguojamas keliais etapais, atsižvelgiant į jį lemiančius komponentus. Regimųjų ir infraraudonųjų elektromagnetinių bangų spektro dalyje atmosfera labiausiai išsklaido trumpąsias bangas. Šalinant šį atmosferos poveikį labiausiai sumažinamas jutiklio užfiksuotas atspindys trumposiose bangose. Tai galima aiškiai pamatyti lyginant po atmosferos korekcijos likusio užfiksuoto atspindžio dalį skirtingo ilgio bangose (3.5.19. pav. *Acolite* ir *iCOR* algoritmai). Tikslus kiekvieno dažnio bangos išsklaidymas priklauso nuo atmosferos sudėties, todėl dažnai atliekant atmosferos korekciją taikomi apibendrinti standartinės atmosferos tipai (pavyzdžiui, tropinė, vidutinių platumų ar Arkties atmosfera). Sudėtingesniuose algoritmuose atmosferos sudėtis apibūdinama pagal matavimų ir dinaminių modelių duomenis. Kai kurių komponentų, pavyzdžiui, vandens garų kiekį galima įvertinti ir pagal paties palydovinio duomenų produkto duomenis. Pavyzdžiui, *SenzCor* algoritmas vandens garų kiekį vertina pagal *Sentinel 2* MSI jutiklio B8A ir B9 juostose užfiksuoto atspindžio santykį.



3.5.19. pav. *Acolite*, *iCOR*, *C2RCC*, *C2X*, *POLYMER* ir *Sen2Cor* atmosferos korekcijos algoritmų atliekama atspindžio reikšmių transformacija *Sentinel 2* B2–B7 kanaluose. Jei po atmosferos korekcijos išlieka 100 % pradinio signalo, metodas numato, kad atmosferos poveikio nėra. Jei visas atspindžio dydis būtų pašalinamas (išliktų 0 %), atmosferos korekcijos metodas traktuotų visą jutiklio išmatuotą atspindžio dydį kaip susidariusį dėl atmosferos poveikio. Paveikslas parengtas apibendrinus 136 ežerų, esančių Rytų Lietuvoje, duomenis.

Aerozolių poveikis pašalinamas pagal atspindžio intensyvumą trumpų elektromagnetinių bangų (430–460 nm) kanaluose, pagal stebėjimų ar modelių duomenis arba taikant tamsios ir tankios augalijos (angl. Dark Dense Vegetation, DDV) metodą. Tamsios ir tankios augalijos aerolių poveikio vertinimo metodas paremtas tuo, kad sveikos augalijos atspindžio santykis trumpų ir ilgų bangų ruožuose yra pastovus. Pagal santykio pokytį įvertinamas atmosferos poveikis užfiksuotam signalui.

Pastaruoju metu vis dažniau vandens telkinių tyrimams kuriami ir naudojami atmosferos korekcijos algoritmai, paremti dirbtiniais neuroniniais tinklais, ir biooptiniai modeliai (*C2RCC*, *C2X*, *POLYMER*).

Atmosferos korekcijos algoritmai yra gana netobuli. Net ir naudojant tuos pačius pradinius duomenis bei taikant įvairius atmosferos korekcijos algoritmus galima gauti visiškai skirtingą rezultatą. Dėl taikomų skirtingų atmosferos korekcijos metodų ir papildomų duomenų įvairovės, algoritmai labai nevienodai transformuoja pradinį atspindžio signalą (3.5.19. pav.) Atlikus kelių vandens telkinių tyrimams skirtų atmosferos korekcijos algoritmų (*Acolite*, *C2RCC*, *iCOR*, *l2gen*, *Polymer* ir *Sen2Cor*) vertinimą nustatyta, kad šių algoritmų neapibrėžtumas raudonojoje spektro dalyje gali siekti 100 %, o artimųjų infraraudonųjų bangų net 1000 % (Warren ir kt., 2019).

Atmosferos korekcijos algoritmų neapibrėžtumas yra viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl palydoviniai duomenys naudojami tik kaip informacija, papildanti duomenis *in situ*.

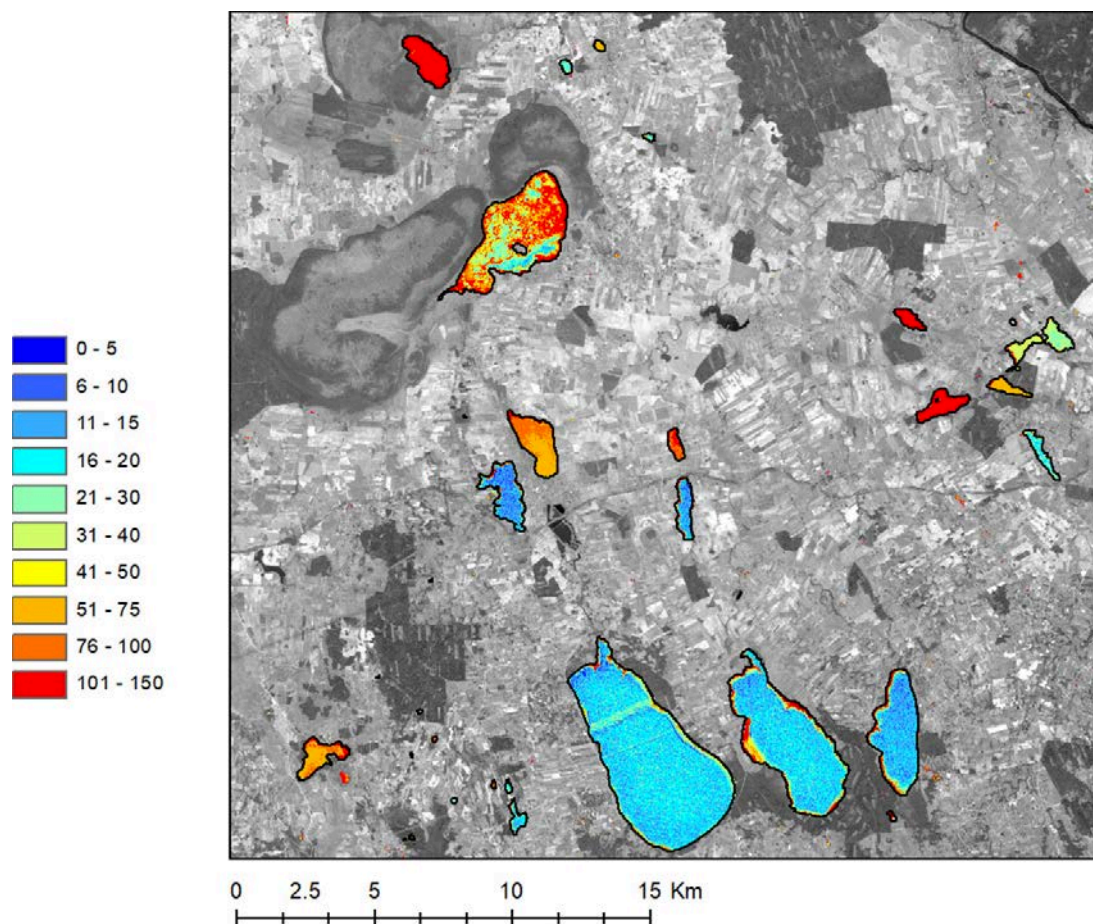
Vandens telkinių būklės rodiklių nustatymo algoritmai. *Chlorofilas α*. Chlorofilas yra daugumos fitoplanktono rūšių ląstelėse, todėl egzistuoja glaudus ryšys tarp chlorofilo α koncentracijos ir fitoplanktono biomasės. Fitoplanktono biomasė yra vienas iš svarbiausių rodiklių

vertinant vandens telkinio eutrofikaciją ir jo ekologinę būklę. Atviroje vandenyno ar jūros akvatorijoje vandens spalvą labiausiai lemia fitoplanktono koncentracija (1 vandens telkinių tipas), todėl ją nustatyti galima pakankamai tiksliai. Chlorofilo α koncentracijos pagal palydovinius duomenis tyrimai pradėti 8-ajame XX a. dešimtmetyje ir skatino palydovų misijų, naudojančių optinius jutiklius, plėtrą.

3.5.4. lentelė. Chlorofilo koncentracijos vertinimo pagal *Sentinel 2* duomenis radiometrinių indeksų ir algoritmų pavyzdžiai.

ŠALTINIS	RADIOMETRINIS INDEKSAS	SEN-TINEL-2 KANALAI	ALGORITMAS SIEJANTIS RADIOMETRINĮ INDEKSĄ SU CHLOROFILO- α KONCENTRACIJA
Toming ir kt. (2016)	$P_1 = R_{703.9} - \frac{R_{664.5} + R_{740.2}}{2}$	B5, B4, B6	L1C : $Chla = 169 \times P_1 + 19.5$ L2A : $Chla = 2231 \times P_1 + 12.7$
Duan ir kt. (2007)	$P_2 = \frac{R_{710}}{R_{670}}, P_2 = \frac{R_{700}}{R_{670}}$	B5, B4	$Chla = 78.018 \times P_2 - 65.88$ $Chla = 93.67 \times P_2 - 90.4$
Hunter ir kt. (2008)	$P_3 = \frac{R_{710}}{R_{670}}$	B5, B4	$\log_{10} Chla = 1.33 + 2.44 \times \log_{10} P_3$
Jiao ir kt. (2006)	$P_4 = \frac{R_{719}}{R_{667}}$	B5, B4	$Chla = 0.0282 \times P_4^{3.0769}$ $Chla = 0.0298 \times R_{719}^{4.03}$
Kutser ir kt. (2016)	$P_5 = R_{700-720} - \frac{R_{646} + R_{770}}{2}$	B5, B4, B6	$Chla = 0.0071 \times P_5 + 0.11$
Moses ir kt. (2009)	$P_6 = (R_{665}^{-1} - R_{708}^{-1}) \times R_{753}$	B4, B5, B6	$Chla = 232.29 \times P_6 + 23.174$
Matthews ir kt. (2012)	$P_8 = R_{max} - R_{664} - ((R_{885} - R_{664}) \times (\lambda_{max} - 664) / (885 - 664))$	B5, B8A, B4	$Chla = 6903.13 \times P_8 + 2.72$
Bresciani ir kt. (2014)	$P_9 = \frac{R_{708}}{R_{664}}$	B5, B4	$Chla = 86.96 \times P_9 - 67.8$

Pakrantės vandenyse, ežeruose ir upėse chlorofilo koncentraciją nuotoliniais metodais įvertinti sunkiau dėl didesnio ištirpusių ir suspenduotų medžiagų, veikiančių vandens spalvą, kiekio. Chlorofilas α intensyviai sugeria 450–475 nm (mėlyną) ir 670 nm (raudoną) spinduliuotę, o intensyviausiai atspindi 550 nm (žalią) ir 700 nm (artimąją infraraudonąją) (3.5.20. pav.). Atspindžio pikas ties 700 nm yra labai dažnai naudojamas sudarant radiometrinius indeksus, skirtus įvertinti chlorofilo α koncentraciją (3.5.4. lentelė). Absoliutinės atspindžio nuo vandens paviršiaus vertės visame elektromagnetinių bangų spektre gali būti įvairaus dydžio, todėl norint įvertinti ≈ 700 nm atspindžio padidėjimą jo vertė lyginama su išmatuotu atspindžiu gretimose spektro dalyse. Lyginama skaičiuojant atspindžio intensyvumo ≈ 700 nm bangose santykį su trumpesnių ar ilgesnių bangų atspindžio verte arba jų vidurkiu. Kiti algoritmai paremti skirtumu tarp atspindžio reikšmės ≈ 700 nm ir gretimose bangose.



3.5.20. pav. Chlorofilo a koncentracijos įvertinimo Pietų Lietuvos ežeruose pagal *Sentinel 2* MSI B4 ir B5 kanalų duomenis pavyzdys. Chlorofilo a koncentracija apskaičiuota naudojant skirtumą tarp atspindžio B5 ir B4 kalnuose: $Chla = 16,9 + 2054*B5 - 2154*B4$ (Grendaitė ir kt., 2018).

Ištirpusių spalvotų organinių junginių nustatymas. Vandens telkiniuose ištirpę spalvoti organiniai junginiai (CDOM) suteikia vandeniui geltoną ir rudą atspalvį ir lemia vandens spalvingumą (Kilkus, 2005). CDOM intensyviausiai sugeria trumpabangę spinduliuotę, o didėjant bangos ilgiui sugėrimas mažėja eksponentiškai. Didėjant CDOM koncentracijai labai padidėja spinduliuotės sugertis mėlynoje ir žalioje spektro dalyje, todėl atspindys šiose bangose sumažėja. Remiantis šiuo poveikiu pagal atspindį regimos šviesos spektre nustatoma ištirpusių spalvotų organinių junginių koncentracija. CDOM koncentracija vandens telkiniuose vertinama pagal:

- atspindį mėlynoje (400–500 nm) spektro dalyje;
- atspindžio santykį tarp mėlynos (400–500 nm) ir žalios (500–600 nm) spektro dalių;
- atspindžio santykį tarp žalios (500–600 nm) ir raudonos (600–700 nm) spektro dalių.

Vandenyje suspenduotos dalelės. Chlorofilas a ir ištirpę spalvoti organiniai junginiai spinduliuotę sugeria, o vandenyje suspenduotos dalelės į vandens telkinį patenkančią spinduliuotę išsklaido ir tik nedidelę dalį sugeria. Suspenduotos dalelės panašiu intensyvumu sugeria saulės spinduliuotę visame regimųjų bangų ruože. Didesnės nei 1,2 mikrono dalelės elektromagnetinę spinduliuotę skaido taip pat kaip ir sugeria – vienodai visame regimajame spektre, todėl suspenduotų dalelių koncentracija vandens telkiniuose dažnai vertinama pagal vieno pasirinktos bangos ilgio atspindžio duomenis (Gholizadeh, 2016). Nors šviesa dažniausiai sklaidoma visose spektro dalyse vienodu intensyvumu, didėjant suspenduotų dalelių kiekiui yra

pastebėtas vandens telkinių atspindžio piko poslinkis iš žalios spektro dalies raudonos spektro dalies link.

Vandenyje suspenduotų dalelių koncentracija vandens telkiniuose vertinama pagal:

- atspindžio intensyvumą žalioje (500–600 nm), raudonoje (600–700 nm) ir artimojoje infraraudonojoje (750–900 nm) spektro dalyse;
- atspindžio santykį tarp žalios (500–600 nm) ir raudonos (600–700 nm) spektro dalių;
- atspindžio santykį tarp mėlynos (400–500 nm) ir raudonos (600–700 nm) spektro dalių;
- atspindžio santykį tarp artimosios infraraudonosios (750–900 nm) ir raudonos (600–700 nm) spektro dalių.

Vandens skaidrumas (Sekio disko gylis). Vandens skaidrumas apibūdina bendrą suspenduotos medžiagos, fitoplanktono ir tirpių organinių junginių poveikį ir yra vienas iš svarbiausių rodiklių, apibūdinančių ekologinę vandens telkinio būklę. Pagal palydovinius duomenis vandens skaidrumą galima pakankamai tiksliai nustatyti tuose ežeruose, kur jis svyruoja nuo ~4 iki ~15 metrų. Skaidrumas vertinamas pagal:

- atspindžio intensyvumą vienoje iš mėlynos (400–500 nm), žalios (500–600 nm) ar raudonos (600–700 nm) spektro dalių;
- atspindžio santykį tarp mėlynos (400–500 nm) ir žalios (500–600 nm) arba raudonos spektro dalių (600–700 nm);
- atspindžio santykį tarp žalios (500–600 nm) ir raudonos (600–700 nm) spektro dalių.

Visų vandens telkinių būklės rodiklių nustatymo algoritmai dažniausiai yra paremti duomenimis, išmatuotais regimosios ir infraraudonosios spinduliuotės spektro dalyse. Tie patys jutiklių kanalai naudojami nustatyti ištirpusių organinių junginių ir vandenyje pakibusių dalelių koncentraciją, todėl atskirti šiuos komponentus pagal plačių kanalų duomenis yra sudėtinga. Siauresni jutiklių kanalai gali būti panaudoti atskiriant įvairių vandens telkinių būklės rodiklių poveikį. Ne visų optinių palydovų jutiklių kanalai orientuoti į vandens telkinių tyrimams optimaliausių ilgių bangas, todėl misijos, naudojančios daugiaspektrius ar hiperspektrinius prietaisus, gali būti labai naudingos vandens telkinių tyrimuose.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kokios fizinės ir ekologinės vandens telkinių savybės gali būti nustatytos nuotoliniais metodais?
- Kokia palydovinių instrumentų savybė apriboja nedidelių vandens telkinių tyrimus?
- Kodėl vandenynų vandens kokybės rodiklius įvertinti paprasčiau nei pakrančių, įlankų ar ežerų?
- Kodėl svarbu žinoti vandens telkinių temperatūrą?
- Koks palydovais atliekamų stebėjimų privalumas lyginant su *in situ* monitoringu?
- Koku principu paremtas vandens paviršiaus temperatūros nustatymas naudojant palydovinius instrumentus?
- Kokie elektromagnetinių bangų ruožai naudojamos vandens paviršiaus temperatūros vertinimui?
- Kokius penkis vandenyno paviršiaus temperatūros tipus išskiria GHRSSST?
- Kokiais nuotoliniais jutikliais išmatuojama vandens paviršiaus plėvės temperatūra?
- Kodėl vandenyno vandens paviršiaus temperatūra yra tapatinama su paviršinio 10 m sluoksnio temperatūra?
- Kodėl svarbu žinoti vandens lygį ir bangų aukštį?
- Kodėl palydoviniai Žemės stebėjimų duomenys naudojami vandens lygio matavimuose.
- Koku principu remiantis pagal palydovinius instrumentus nustatomas Žemės paviršiaus aukštis?
- Kuo skiriasi lygaus ir nelygaus paviršiaus atspindžio forma? Kodėl susidaro šie skirtumai?
- Koks atspindžio formos rodiklis naudojamas vandens lygiui nustatyti?
- Koks atspindžio formos rodiklis naudojamas reikšmingam bangų aukščiui nustatyti?
- Kokie yra pagrindiniai vandens spalvą lemiantys komponentai?
- Kas yra radiometriniai indeksai?
- Kodėl vertinant vandens telkinių būklės rodiklius svarbi tiksli atmosferos poveikio korekcija?
- Remiantis kokios spektro dalies duomenimis vertinama chlorofilo koncentracija?
- Kuo skiriasi 1 ir 2 tipo vandens telkiniai?

NAUDOTA LITERATŪRA

- AVISO (2016). *Mean Water Level 1993-2012* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/images/data/Products/auxiliaires/mss_cnes_cls2015_height.png
- AVISO (2020). *Pulses and Waveforms* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: <https://www.aviso.altimetry.fr/es/techniques/altimetry/principle/pulses-and-waveforms.html>
- Bresciani, M., Giardino, C., Stroppiana, D., Pilkaitytė R., Zilius M., Bartoli M., Razinkovas, A. (2012). Retrospective analysis of spatial and temporal variability of chlorophyll-a in the Curonian Lagoon. *Journal of Coastal Conservation*, 16, 4, 511–519.
- Brown, G. S. (1977). The Average Impulse Response of a rough surface and its applications. *Transactions on Antennas and Propagation*, 25, 1, 67-74.

- Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., Wang, Z. (2007). Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129, 1–3, 295–308.
- EyeOnWater (2016). *Color of Sea* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: https://www.eyeonwater.org/media/eyeonwater_org/wysiwyg_800_800/000004_fig1_6xcolourofsea.jpg
- EPA (2016). *Laboratory for Satellite Altimetry: Sea level rise* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-level>
- ESA (2013a). *Coastal Zones* [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga internete: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/applications/coastal-zones>
- ESA (2013b). *Sentinel-3 Altimetry. Coverage* [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga internete: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/coverage>
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16, 8, 1298.
- Grendaitė, D., Stonevičius, E., Karosienė, J., Savadova-Ratkus, K., Kasperovičienė, J. (2018). Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. *Geologija. Geografija*, 4, 1, 15-28.
- Hunter, P., Tyler, A., Willby, N., Gilvear, D. (2008). The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 53, 6, 2391–2406.
- JRC (2018). *The 2018 Annual Economic Report on EU Blue Economy*. Report Nr. KL-AR-18-001-EN-C.
- Kilkus, K. (2005). *Ežerotyra*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.
- Kutser, T., Paavel, B., Verpoorter, C., Ligi, M., Soomets, T., Toming, K., Casal, G. (2016). Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters. *Remote Sensing*, 8, 6, 497.
- Matthews, M. W., Bernard, S., Robertson, L. (2012). An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 124, 637–652.
- Minnett, P., Kaiser-Weiss, A. (2012). Near-surface oceanic temperature gradients. *GHRSSST Discussion document* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: <https://www.ghrsst.org/wp-content/uploads/2016/10/SSTDefinitionsDiscussion.pdf>
- Morel, A., Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22, 4, 709-722.
- Moses, W. J., Gitelson, A. A., Berdnikov, S., Povazhnyy, V. (2009). Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS – The Azov sea case study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6, 4, 845–849.
- NOAA (2008). NOAA „Smart buoy“ with experimental nutrient sensor, Patapsco River [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NOAA-smartbuoy2.jpg>
- OpenADB (2017a). *Global Mean Sea Level (GMSL)* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: https://openadb.dgfi.tum.de/en/mean_sea_level/
- OpenADB (2017b). *Missions* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: <https://openadb.dgfi.tum.de/en/missions/>
- Rosmorduc, V., Benveniste, J., Bronner, E., Dinardo, S., Lauret, O., Maheu, C., Milagro, M., Picot, N., Ambrozio, A., Escolà, R., Garcia-Mondejar, A., Restano, M., Schrama E., Terra-Homem, M. (2016). *Radar Altimetry Tutorial* [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga internete: <http://www.altimetry.info/radar-altimetry-tutorial/>
- Sch (2016). *Black-body spectrum for temperatures between 300 K and 10,000 K in a log-log diagram* [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga internete: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., Nõges, T. (2016). First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, 8, 8, 640.
- University of Minnesota (2019). *Metrics of Surface Water Quality: Introduction* [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga internete: <https://water.rs.umn.edu/lwc>
- Warren, M. A., Simis, S. G. H., Martinez-Vicente, V., Poser, K., Bresciani, M., Alikas, K., Spyarakos, E., Giardino, C., Anspér, A. (2019). Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 225, 267-289.

3.6. SNIEGO IR LEDO DANGOS STEBĖJIMAS

Didelės teritorijos šiaurės ir pietų platumose arba kalnuose yra nuolat arba sezoniskai padengtos sniegu, ledu arba žemė yra išalusi. Visos užšalusio vandens formos apibendrintai vadinamos kriosfera. Sniego ir ledo formų ir savybių yra labai įvairių – šios medžiagos gali būti kietos ir minkštos, lygios ir šiurkščios, šviesios ir tamsios. Dažniausiai sniegas ir ledas siejasi su šalčiu, tačiau jie pasižymi geromis šilumos izoliacinėmis savybėmis ir padeda Žemei bei vandenynams išlaikyti šilumą. Nors ledas yra kietasis kūnas, tačiau esant dideliame slėgiui jis „teka“ ir judėdamas keičia Žemės paviršių. Šiame skyrelyje apžvelgsime, kaip sniegas ir ledas sąveikauja su elektromagnetine spinduliuote ir kaip tai galima panaudoti nustatant šių kūnų savybes ir kaitą.

3.6.1. Sniego dangos nustatymas regimajame ir infraraudonajame spektre

Sniego dangą buvo lengva nustatyti jau pirmojo orų palydovo TIROS-1 nuotraukose (1960 m.), nes aukštos sniego albedo reikšmės sudaro ryškų kontrastą kitiems natūraliems paviršiams. Sniegas yra labai svarbus Žemės energijos balansui, nes atspindi didžiąją dalį Saulės spinduliuotės atgal į kosmosą. Sezoninė sniego danga padeda papildyti gėlo vandens išteklius – sniego tirpimo vandenys maitina kalnų upes ir užtikrina vandens tiekimą milijonams žmonių. Nuotoliniai stebėjimai yra plačiai naudojami sezoninio sniego stebėsenai vidutinėse ir aukštose platumose.

Sniego dangos nustatymui dažniausiai naudojami regimojo (angl. Visible spectrum, VIS) ir artimojo infraraudonojo spektro (NIR) bei pasyviųjų mikrobangų jutiklių duomenys. Sniegas regimajame spektre atspindi didžiąją dalį spinduliuotės, o NIR spektro dalyje didžiąją dalis spinduliuotės sugeria. Tačiau kiekvienu atveju spektrinis sniego dangos signalas priklauso nuo sniego tankio, sniego dalelių dydžio, vandens atsargų sniege bei įvairių priemaišų (pvz.: dulkių, suodžių, dumblių). Dažniausiai kuo senesnė sniego danga, tuo prastesnės jos atspindžio savybės (mažėja albedas). Iš dalies taip yra dėl sniego kristalų metamorfozės ir iš dalies dėl didesnės priemaišų koncentracijos. Ledo spektrinės atspindžio savybės kinta dar labiau. Ledo dangos vaizdas iš palydovinių jutiklių priklauso nuo jos amžiaus, šiurkštumo, storio (o esant plonam ledui – ir nuo žemiau esančio kūno savybių), oro burbuliukų kiekio ir daugelio kitų veiksnių. Kai dangos paviršius lygus, sniegas ir ledas veikia kaip veidrodinis atšvaitas, kai paviršius šiurkštus, šviesa gali būti atspindima visomis kryptimis. Šiluminės infraraudonosios spinduliuotės (TIR) spektre sniego ir ledo spinduliavimo galia yra didelė: sniego 0,85–0,90 ir ledo 0,97–0,98.

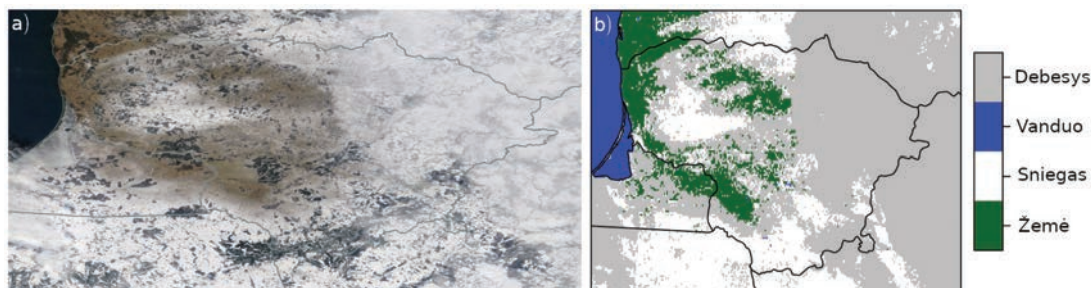
Nuotolinis sniego dangos stebėjimas didelėse teritorijose dažniausiai atliekamas naudojant vidutinės skiriamosios gebos regimojo spektro jutiklius (AVHRR, MODIS, VIIRS ir kt.), tačiau specifiniams tyrimams taikomi ir didesnės skiriamosios gebos prietaisai. Didžiausios paklaidos susidaro nustatant sniego dangą miškingose vietovėse, o atvirose vietovėse patvirtinama tiksliau. Sniego dangai nustatyti dažnai naudojami indeksai, sudaryti ir kelių stebėjimo kanalų duomenų.

Dažniausiai sniego danga nustatoma naudojant normalizuotą sniego skirtumo indeksą (angl. Normalized-Difference Snow Index, NDSI), kuris remiasi regimojo spektro ir artimojo infraraudonojo spektro informacija. Sniegas regimajame spektre didžiąją dalį spinduliuotės atspindi, bet artimojo infraraudonojo spektro bangas beveik visas sugeria. O debesys atspindi bemaž visą šių abiejų spektrų spinduliuotę ir tai leidžia juos atskirti nuo sniego dangos. Normalizuotas sniego skirtumo indeksas apskaičiuojamas:

$$NDSI = \frac{VIS-NIR}{VIS+NIR} \quad (3.6.1.)$$

kur NDSI – normalizuotas sniego skirtumo indeksas; VIS – atspindžio reikšmės regimajame spektre (0,53–0,61 μm); NIR – atspindžio reikšmės artimajame infraraudonajame spektre (1,55–1,75 μm).

Sniegas ir ledas regimajame spektre yra labai šviesūs paviršiai, o artimojo infraraudonojo spektro dalyje tamsūs. Konkretus bangos ilgis naudojamas apskaičiuoti NDSI šiek tiek skiriasi priklausomai nuo palydovinio jutiklio, tačiau VIS naudojamas 0,53–0,61 μm ruožas, o NIR 1,55–1,75 μm ruožas. NDSI reikšmės svyruoja nuo -1 iki 1. Jei $\text{NDSI} > 0,0$, laikoma, kad pikselyje yra sniego, jei $\text{NDSI} \leq 0,0$, pikselis laikomas be sniego (3.6.1. pav.). Kuo indekso reikšmė aukštesnė, tuo užtikrinčiau galima teigti, kad visa vietovė yra padengta sniegu.



3.6.1. pav. 2017 m. vasario 10 d. jutikliu MODIS gautas vaizdas virš Lietuvos: a) realių spalvų RGB vaizdas; b) MODIS pikselių kategorijų žemėlapis remiantis NDSI reikšmėmis ir duomenų kokybės indikatoriais.

Norint atskirti sniegą nuo kitų paviršių kartu su NDSI galima naudoti ir papildomus kriterijus sniegui nustatyti. Pavyzdžiui, vanduo kaip ir sniegas pasižymi didelėmis NDSI reikšmėmis, tačiau jį galima lengvai atskirti regimojo spektro vaizduose, nes vanduo bus tamsus, o sniegas šviesus. Miškingose teritorijose kartu su NDSI naudojamas ir NDVI – normalizuotas augalijos skirtumo indeksas. Sniegas miške paprastai sumažina vegetacijos būklės indekso reikšmes, todėl fiksuojant NDSI ir NDVI reikšmių pokyčius galima daug tiksliau įvertinti, kada miškingose teritorijose susiformuoja sniego danga.

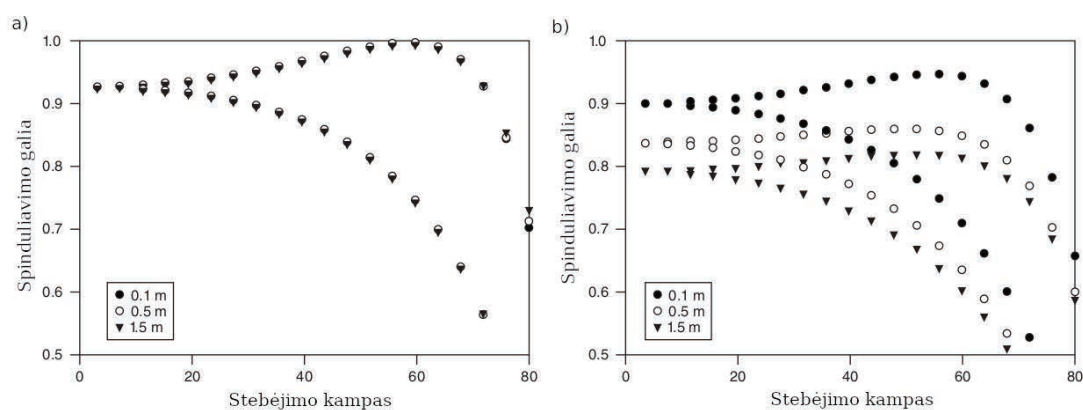
3.6.2. Pasyviųjų mikrobangų jutiklių ir jungtiniai sniego dangos duomenų rinkiniai

Pirmieji vandens atsargų sniege duomenų rinkiniai, paremti pasyviųjų mikrobangų jutiklių informacija, pradėti teikti XX a. 8-ojo dešimtmečio pabaigoje. Mikrobangų jutikliai gali atlikti stebėjimus bet koku oru, tačiau jų gana maža skiriamoji geba (apie 25 km). Pasyvieji mikrobangų jutikliai, lyginant su regimojo ir infraraudonojo spektro jutikliais, labai smarkiai nepatobulėjo, nes fiziškai neįmanoma į kosmosą iškelti didelių mikrobangų antenų, kurios leistų pagerinti skiriamąją gebą. Kol nėra galimybių padidinti pasyviųjų mikrobangų jutiklių skiriamąją gebą, vandens atsargų sniege duomenų rinkiniai išliks tinkamesni globaliems ir kontinentiniams tyrimams.

Natūralią mikrobangų spinduliuotę, kurią skleidžia Žemės paviršius, sniego danga išsklaido, todėl susiformavus sniego dangai mikrobangų signalas susilpnėja. Sniego kristalų dydis beveik atitinka mikrobangų ilgį, todėl jos sniege yra efektyviai išsklaidomos. Mikrobangų išsklaidymas sniege ir lede labai priklauso nuo mikrobangų dažnio, todėl naudojant kelis skirtingų dažnių ruožus galima gauti informaciją apie vandens atsargas sniege. Vandens atsargoms sniege nustatyti dažniausiai naudojami pasyviųjų mikrobangų jutiklių dažniai ties 19 GHz ir 37 GHz. Kai kurie jutikliai (pvz.: AMSR-E) taip pat atlieka matavimus ir ties 10 GHz dažniu, tai gali padėti esant labai storai sniego dangai.

Dažniausiai manoma, kad pasyviaisiais mikrobangų jutikliais užfiksuotas signalas ateina iš Žemės paviršiaus, padengto homogenišku sniego sluoksniu (realiai sniego dangą dažnai sudaro

keli skirtingo tankio sluoksniai). Šviežias sausas sniegas pasyviaisiais mikrobangų radiometrais nėra užfiksuojamas, nes jo spinduliavimo geba labai maža. Vykstant metamorfozei ir didėjant sauso sniego kristalams, dėl sniego dangos tūryje vykstančio mikrobangų išsklaidymo signalas yra vis labiau susilpninamas. Signalo silpnėjimas stebimas ir didėjant bangos dažniui. Naudojant 10 GHz dažnį dominuoja signalas, ateinantis iš dirvožemio, ir jautrumas sniego dangos storiui yra mažas (3.6.2. pav.). Ties 37 GHz dažniu atvirkščiai – stora sniego danga labai susilpnina signalą. Modeliuojant nustatyta, kad esant 0,1 m sniego storiui sniego spinduliavimo geba yra apie 0,9, o esant 1,5 m sniego storiui spinduliavimo geba sumažėja iki 0,8 (3.6.2. pav. b). Spinduliavimo gebos mažėjimo priklausomybė nuo sniego dangos storio nėra tiesinė – egzistuoja prisotinimo lygis, kurį pasiekus spinduliavimo geba nebekinta, nors sniego danga ir storėja. Taip yra todėl, kad esant gana storai (arba labai tankiai) sniego dangai mikrobangos nebeprasiskverbia pro sniegą ir pasyvusis mikrobangų jutiklis nebefiksuoja jokio pokyčio. Prisotinimo lygis yra atvirkščiai proporcingas dažniui bei priklauso nuo sniego dangos savybių (dalelių dydžio, tankio ir pan.). Naudojant 37 GHz dažnį prisotinimo lygis pasiekiamas, kai sniego dangos storis 60–80 cm, tačiau jei sniego dalelės labai didelės, prisotinimas gali būti pasiektas net ir esant 20–40 cm sniego dangai.



3.6.2. pav. Modeliuojant gauta spinduliavimo geba pasirinkus skirtingus stebėjimo kampus ir skirtingą sniego storį (0,1; 0,5; 1,5 m): a) 10 GHz; b) 37 GHz. Modeliuojant laikyta, kad sniego ir paklotinio paviršiaus temperatūra buvo 271 K, sniego dalelių skersmuo 0,5 mm, o sniego tankis 0,3 g/cm³. Juodi simboliai rodo vertikalią poliarizaciją, o balti – horizontalią (pagal Tedesco, 2003).

Pasyvieji mikrobangų jutikliai fiksuoja stebimo paviršiaus ryškio temperatūrą, tačiau norint ją paversti į vandens atsargas sniege reikalinga duomenų inversija. Pradžioje duomenų inversijai naudoti empiriniai ryšiai. Vienas seniausių metodų, pasiūlytas Chang ir kt. (1987), yra ryškio temperatūros stebėjimų 19 GHz ir 37 GHz ruože skirtumo nustatymas siekiant apskaičiuoti sniego dangos storį:

$$SD = R_c (Tb_{19} - Tb_{37}) \quad (3.6.2.)$$

kur SD – sniego storis (cm); R_c – empirinis koeficientas (1,59 cm/K, jei skaičiuojamas sniego storis, ir 4,8 mm/K, jei skaičiuojamos vandens atsargos sniege); Tb_{19} ir Tb_{37} – atitinkamai 19 ir 37 GHz ruožuose užfiksuota ryškio temperatūra. Vėliau R_c apibrėžimas buvo patobulintas, kad būtų atsižvelgta į miškų poveikį ryškio temperatūrai (Foster ir kt., 1997):

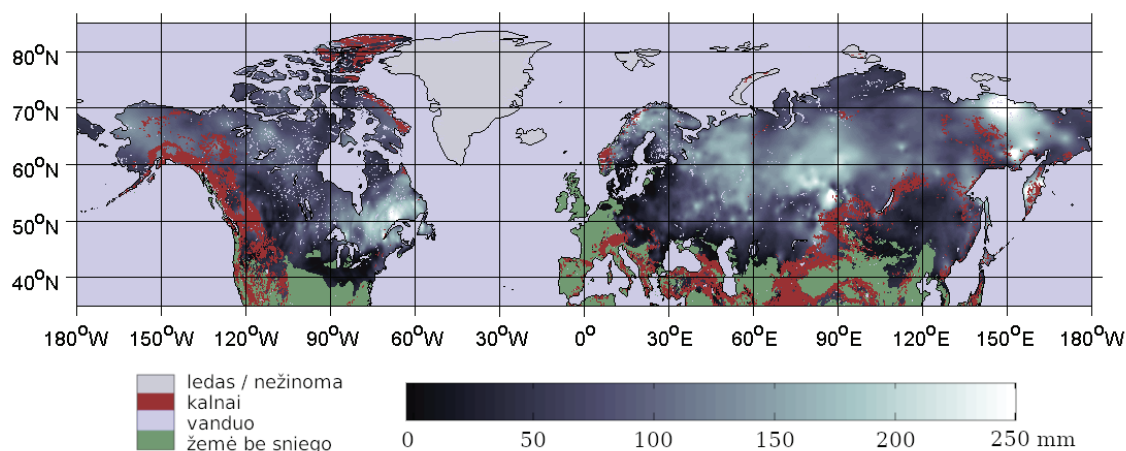
$$R_c = 1.59 / (1 - f) \quad (3.6.3.)$$

kur R_c – empirinis koeficientas, naudojamas 3.6.3. formulėje; f – miškų dalis palydovo jutiklio vaizdo pikselėje (nuo 0 iki 1).

Vėliau buvo pasiūlyta ir kitų empirinių metodų, tačiau visi jie remiasi ryškio temperatūros, užfiksuotos ties 19 ir 37 GHz, palyginimu. Empirinių metodų privalumas yra tas, kad jie nereikalauja didelių skaičiavimo pajėgumų ir galima greitai apskaičiuoti reikšmes globaliu mastu. Tačiau empiriniai koeficientai yra apskaičiuojami lauko matavimų metu ir neatspindi visų įmanomų sniego dangos sąlygų bei gali tikti tik tam konkrečiam regionui. Taikant tuos pačius koeficientus visam regionui ar net pusrutuliui, galimos paklaidos. Algoritmų rezultatų neapibrėžtumas taip pat didėja, kai empiriniai koeficientai taikomi visai kitomis meteorologinėmis sąlygomis, nei jie buvo nustatyti.

Dažniausiai paklaidos nustatant sniego dangos storį arba vandens atsargas sniege iš palydovinių pasyviųjų mikrobangų jutiklių atsiranda dėl sniego dangos metamorfozės. Iškritus sniegui prasideda sniego kristalų pokytis dėl tirpimo bei užšalimo ciklų bei ir sąveikos su vandens garais sniego storumėje. Yra sukurti sukurta įvairūs įvairių teorinių modelių, kurie modeliuoja sniego dangos susidarymą, sniego kristalų pokyčius. Šiais elektromagnetiniais modeliais sniego dangos storis ar vandens atsargos sniege yra apskaičiuojamais ryškio temperatūrą susiejant su skirtingomis sniego dangos savybėmis (skirtingu dalelių dydžiu, sluoksnių skaičiumi, jų tankiu ir pan.). Inversija taip pat gali būti atliekama naudojant dirbtinius neuroninius tinklus, kurie sudaromi ir išbandomi panaudojant skaitmeninių sniego dangos modelių išvesties duomenis.

Manoma, kad teoriniai elektromagnetinės spinduliuotės sniego dangos modeliai yra tikslesni, tačiau ir jų paklaidos gali būti didelės. Skirtingos sandaros sniego storumės ryškio temperatūra gali būti tokia pati. Pavyzdžiui, plona sniego danga iš santykinai didelių sniego dalelių gali būti panašios ryškio temperatūros kaip ir stora sniego danga iš santykinai mažų sniego dalelių. O jei stebimoje teritorijoje auga miškas, jis susilpnina signalą, sklindantį iš sniego dangos, ir sumažina duomenų algoritmo tikslumą. Vandens telkiniai taip pat apsunkina vandens atsargų nustatymą, nes tarp skysto ir užšalusio vandens yra didelis ryškio temperatūros skirtumas, tačiau pasyviųjų mikrobangų jutiklių skiriamosios gebos gali nepakakti vandens telkinio ribai nustatyti. Sniego dangos rodiklius nustatyti sudėtinga kalnuotose teritorijose, kur sniego dangos storis labai kaitus, o dėl sudėtingos topografijos paviršiaus stebėjimo kampas gali būti labai įvairus. Tokiu atveju modeliui itin sunku pasirinkti teisingą sprendinį, o neteisingai pasirinkus sniego storio ar vandens atsargų sniege rezultatų paklaidos gali būti labai didelės. Siekiant sumažinti tokias klaidas, į inversijos modelį yra asimiliuojami antžeminių stebėjimų duomenys. Toks principas taikytas ESA projekte „GlobSnow“ ir „Copernicus“ *Global Land Service* sudarant vandens atsargų sniege duomenų rinkinius (3.6.3. pav.).



3.6.3. pav. Programos „Copernicus“ *Global Land Service* vandens atsargų sniege produktas (2017 m. vasario 10 d.). Šis duomenų rinkinys sudarytas sujungus SSMIS (mikrobangų spektro), VIIRS (VIS / NIR spektro) jutiklių duomenis ir IMS (angl. Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System) informaciją (pagal Luojus ir kt. 2017).

Pasyvieji mikrobangų jutikliai Žemės paviršių gali fiksuoti net ir nakties metu bei debesuotu oru, tačiau jie pasižymi labai maža skiriamąja geba. Sujungiant regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro bei pasyviųjų mikrobangų jutiklių duomenis galima sudaryti sniego dangos žemėlapius išnaudojant šių skirtingų stebėjimo būdų privalumus. Apjungtų duomenų rinkinių skiriamoji geba paprastai būna 5–25 km, nes juos apriboja pasyviųjų mikrobangų jutiklių skiriamoji geba. Pavyzdžiui, bendras NASA / AFWA sniego algoritmas ANSA sujungia AMSR-E (mikrobangų spektro) ir MODIS (VIS / NIR spektro) jutiklių duomenis. Giedrą dieną MODIS duomenys gali būti panaudoti patikslinti AMSR-E sniego dangos ploto žemėlapius ir taip pasiekiami 5 km skiriamoji geba, tačiau vandens atsargų sniege duomenų skiriamoji geba išlieka 25 km. Panašus produktas sudarytas ir projekte „Globsnow“ bei pateikiamas Europos Sąjungos programos „Copernicus“ *Global Land Service* duomenų platformoje (3.6.3. pav.).

Naudojant pasyviuosius mikrobangų jutiklius sniego dangos storį ir vandens atsargas sniege galima apskaičiuoti kasdien ir globaliu mastu. Sniego dangos plotas, vandens atsargos sniege, sniego tirpsmo pradžia yra svarbūs rodikliai, naudojami klimato ir orų modeliuose. Sniego tirpsmo duomenys naudojami hidrologiniuose modeliuose siekiant pagerinti hidrologines prognozes tiek upių baseinų, tiek regiono ar žemyno mastu. Pasyviuosius mikrobangų jutiklius naudoti patrauklu ir dėl to, kad jie naudojami jau daugiau nei 30 metų ir galima sudaryti ilgalaikes klimato duomenų eilutes.

3.6.3. Sniego dangos savybių nustatymas naudojant lidarų ir matuojant gravitacinį lauką

Lidarai yra aktyvieji prietaisai, kurie kartu su globalia padėties nustatymo sistema (GPS) padeda sudaryti didelės skiriamosios gebos ir itin tikslus Žemės paviršiaus aukščio žemėlapius. Lidaro sistemą sudaro lazerinio skenavimo sistema, GPS ir prietaiso orientacijos nustatymo sistema (angl. Inertial Measuring Unit, IMU). Stebėjimai remiasi išsiųsto ir nuo Žemės paviršiaus objektų atsispindėjusio lazerio signalo laiko skirtumu. Žinant laiką yra apskaičiuojamas atstumas iki objekto:

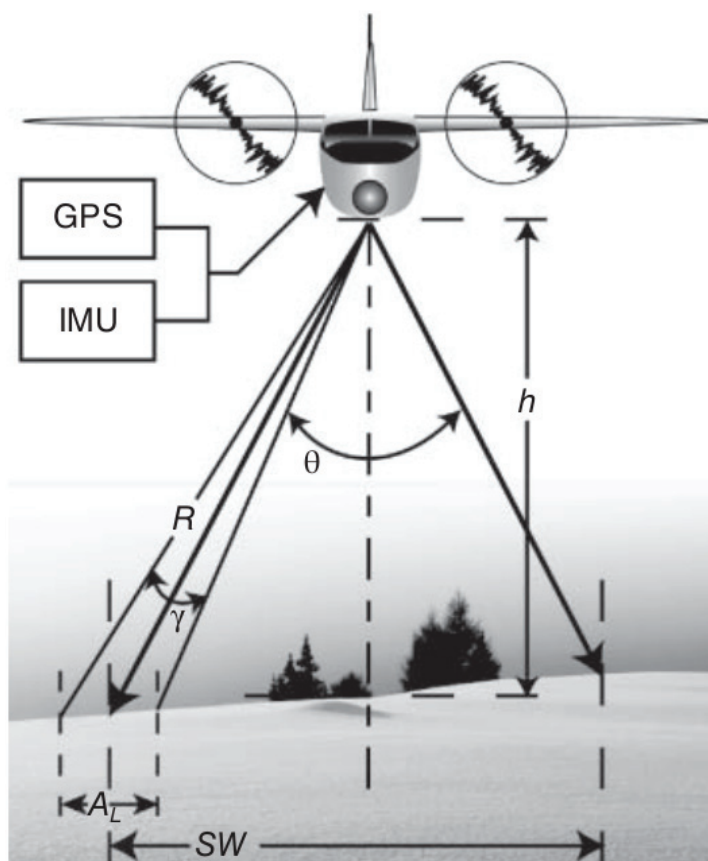
$$R = c \frac{t}{2} \quad (3.6.4.)$$

kur R – atstumas iki objekto; c – šviesos greitis; t – laiko skirtumas tarp išsiųsto ir grįžtančio signalo.

Lidaro veikimo principas ir stebėjimo geometrija pateikta 3.6.4. pav. R yra matavimo nuotolis, θ – skenavimo kampas, h – orlaivio ar palydovo aukštis virš Žemės paviršiaus, γ – lidaro signalo divergencija, A_L – signalo skersmuo ant stebimo paviršiaus, o SW – žvalgos juostos plotis. GPS ir IMU yra įrengti nuotolinių stebėjimų platformoje, o jų veikimo laikas yra sinchronizuotas su lazerio sistemos laiku.

Lidaro signalas, keliaudamas paviršiaus link, plėtėja, o plėtimosi kampas yra nulemtas signalo divergencijos rodiklio. Didėjant atstumui iki objekto didėja ir signalo skersmuo. Dėl signalo išsiplėtimo kiekvienas lidaro pulsas gali būti atspindėtas nuo įvairių objektų, patenkančių į signalo zoną. Tai leidžia gauti atspindį nuo Žemės paviršiaus net ir miškingose teritorijose. Daugelis nuotolinių sistemų naudoja diskretines fiksavimo sistemas, kai grįžtantis signalas yra fiksuojamas analoginiais detektoriais, kurie grįžtantį signalą sugrupuoja pagal jo energijos dydį. Šios sistemos paprastai gali užfiksuoti 4–6 to paties grįžtančio pulso energijos lygius. Jei stebimas objektas ar paviršius yra labai įvairus, galimos lidaro matavimo paklaidos dėl sugrįžtančio signalo energijos bangos formų iškraipymų. Yra kuriamos lidarų sistemos, kurios registruoja visą sugrįžtančio signalo energijos bangos formą. Šios sistemos suskaido grįžtančią energiją į labai smulkius laiko žingsnius, o vėliau apdorojant tokius duomenis galima gauti informaciją net ir apie labai kompleksiškus paviršius.

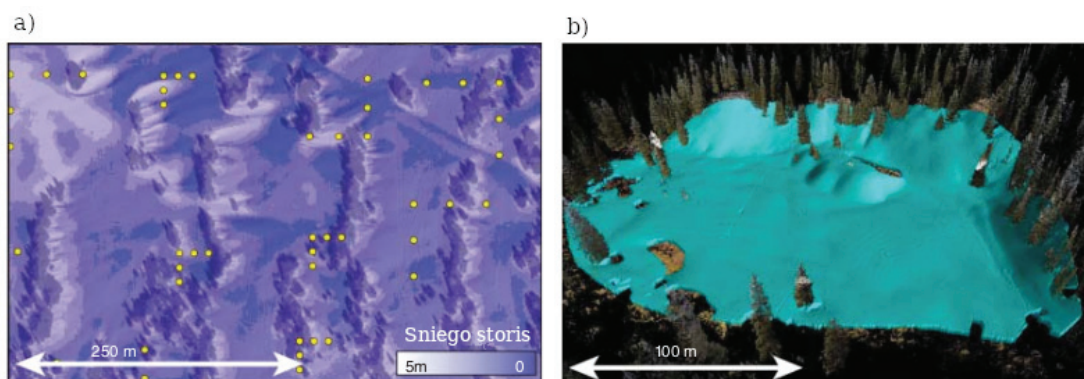
3.6.4. pav. Lidaro veikimo geometrija. GPS – globali padėties nustatymo sistema; IMU – jutiklio orientacijos nustatymo sistema; R – matavimo nuotolis, θ – skenavimo kampas, h – orlaivio ar palydovo aukštis virš Žemės paviršiaus, γ – lidaro signalo divergencija, A_L – signalo skersmuo ant stebimo paviršiaus, o SW – žvalgos juostos plotis (Deems ir kt., 2013).



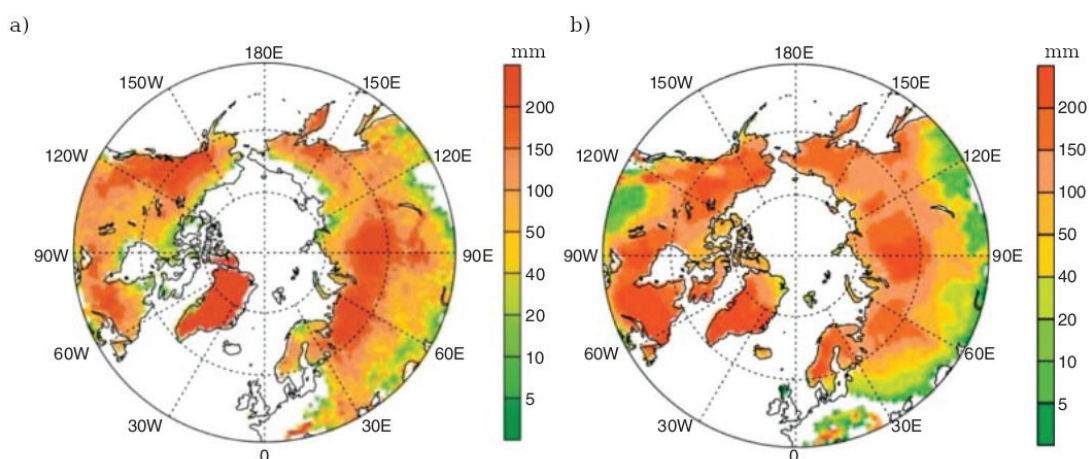
Lidaro tikslumas, kurį galima prilyginti skiriamajai gebai, priklauso nuo taškų tankio (atstumo tarp matavimo taškų). Kuo didesnis taškų tankis, tuo tiksliau galima sumodeliuoti paviršių. Tai ypač aktualu kalnuotose arba miškingose teritorijose. Siekiant gauti optimalų taškų tankį yra keičiami lidaro sistemos arba skrydžio parametrai: siunčiamo pulso dažnumas, skenavimo dažnis, skenavimo kampas, platformos aukštis virš Žemės paviršiaus, žvalgos juostų sutapimas, skrydžio trajektorija.

Sniego dangos storis iš lidaro duomenų gali būti apskaičiuotas naudojant du lidaro vaizdus – vieną be sniego, o kitą su sniegu. Turint du geografiškai sutampančius vaizdus apskaičiuojamas lidaro aukščių matavimo skirtumas. Skirtumas gali būti skaičiuojamas arba naudojant pirminius skenavimo taškus, arba interpoliuotus erdvinius paviršius, arba naudojant abu minėtus metodus. Metodo pasirinkimas priklauso nuo uždavinio ir skiriamosios gebos reikalavimų.

Lidaro matavimų paklaidas galima suskirstyti į horizontalias (geolokacijos) ir vertikalias (altitudės). Horizontalios paklaidos paprastai būna iki 10 kartų didesnės nei vertikalios. Paklaidos atsiranda dėl GPS vietos nustatymo, IMU aukščio nustatymo, laiko ir skenavimo kampo matavimų netikslumų bei svyravimų. GPS matavimai veikia tiek horizontalų, tiek vertikalų tikslumą ir dažniausiai lemia apie 10 cm paklaidą. Horizontalias paklaidas daugiausia lemia IMU ir matavimo kampo netikslumai, kurie labai glaudžiai susiję su matavimo atstumu. Esant nedideliam matavimo platformos aukščiui vertikalios paklaidas daugiausia lemia laiko matavimo netikslumai. Didėjant aukščiui daugiau klaidų atsiranda dėl IMU ir skenavimo sistemos variacijų. Gera prietaisų kalibracija, tikslus GPS duomenų apdorojimas ir didelio tikslumo IMU prietaisų naudojimas gali sumažinti lidarų paklaidas atliekant sniego dangos storio matavimus. Sniego dangos storio nustatymas naudojant lidaro sistemą pateiktas 3.6.5. pav.



3.6.5. pav. Lidaro taikymas sniego dangos storiui nustatyti šiaurinėje Kolorado valstijos dalyje, JAV: a) 1 m skiriamosios gebos sniego storio žemėlapis, sudarytas pagal lidaro duomenis: geltoni taškai rodo antžeminių sniego storio matavimų vietas; b) sniego dangos tūris, apskaičiuotas remiantis lidaro matavimais *in situ* (pagal Deems ir kt., 2013).



3.6.6. pav. a) vandens atsargos sniege Šiaurės pusrutulyje 2004 m. kovą pagal GRACE duomenis; b) vandens atsargų sniege daugiametis vidurkis, paremtas antžeminiiais matavimais (pagal Niu ir kt., 2007).

Vandens atsargas didelėse teritorijose galima nustatyti naudojant gravitacinio lauko informaciją. Tokius matavimus atlieka GRACE (angl. Gravity Recovery and Climate Experiment) palydovai. GRACE duomenys naudojami nustatyti vandens masės pokyčius sausumoje, todėl techniškai įmanoma nustatyti ir vandens atsargas sniege. GRACE išmatuoja masės pokyčius, tačiau šie pokyčiai nebūtinai yra susiję su vandens atsargomis sniege. Apdorojant duomenis būtina atskirti sniego dangos poveikį nuo kitų galimų masės svyravimo priežasčių. Tam GRACE duomenys yra asimiliuojami į paviršiaus modelius arba analizuojami kartu su paviršiaus modelių išvesties duomenimis. Tyrimai parodė, kad vandens atsargos, nustatytos naudojant GRACE duomenis, yra tikslūs aukštose platumose, kur susikaupia daug sniego. 3.6.6. pav. parodytas pavyzdys iš 2004 m. kovo, kur vandens atsargos sniege apskaičiuotos remiantis GRACE duomenimis palyginamos su daugiametėmis Šiaurės pusrutulio vandens atsargų sniege reikšmėmis, apskaičiuotomis USAF ETAC (US Air Force Environmental Technical Application Center).

3.6.4. Radaro duomenų panaudojimas sniego dangos tyrimams

Radaro signalo sąveika su sniegu ir ledu yra sudėtingesnė nei regimosios ar infraraudonosios spinduliuotės atveju. Taip yra dėl sniego dangos savybių ir sandaros įvairovės ir todėl, kad dielektrinė konstanta šiuose kūnuose labai keičiasi priklausomai nuo tankio ir skysto vandens kiekio. Ledo dielektrinė konstanta yra apie 3,2, oro apie 1,0, o sauso sniego svyruoja tarp šių dviejų reikšmių priklausomai nuo sniego dangos tankio. Šlapio sniego dielektrinės konstantos reikšmės yra labai veikiamos vandens, kurio konstantos reikšmė siekia 80.

Sintetinės apertūros radarų (SAR) siunčiamo signalo atgalinės sklaidos nuo sniegu padengtos teritorijos intensyvumas priklauso nuo signalo išsklaidymo ties paklotiniu paviršiumi ir išsklaidymo tūryje. SAR siunčiamas signalas sniego dangos paviršiuje yra iš dalies atspindimas ir iš dalies perduodamas gilyn. Atgalinė sklaida priklauso nuo sniego dangos, paklotinio paviršiaus savybių ir stebėjimo kampo. Radaro signalo išsklaidymą lemia sniego dangos storumė ir jos skirtingų sluoksnių dielektrinės skvarbos rodikliai. Sniego dangoje signalas susilpnėja dėl: 1) sniego kristalų išsklaidomos spinduliuotės; 2) išsklaidymo ties sniego ir dirvožemio riba ir 3) išsklaidymo skirtingo tankio sniego sluoksniuose. SAR signalo atgalinę sklaidą sniege σ_{tot}^0 galima išreikšti taip:

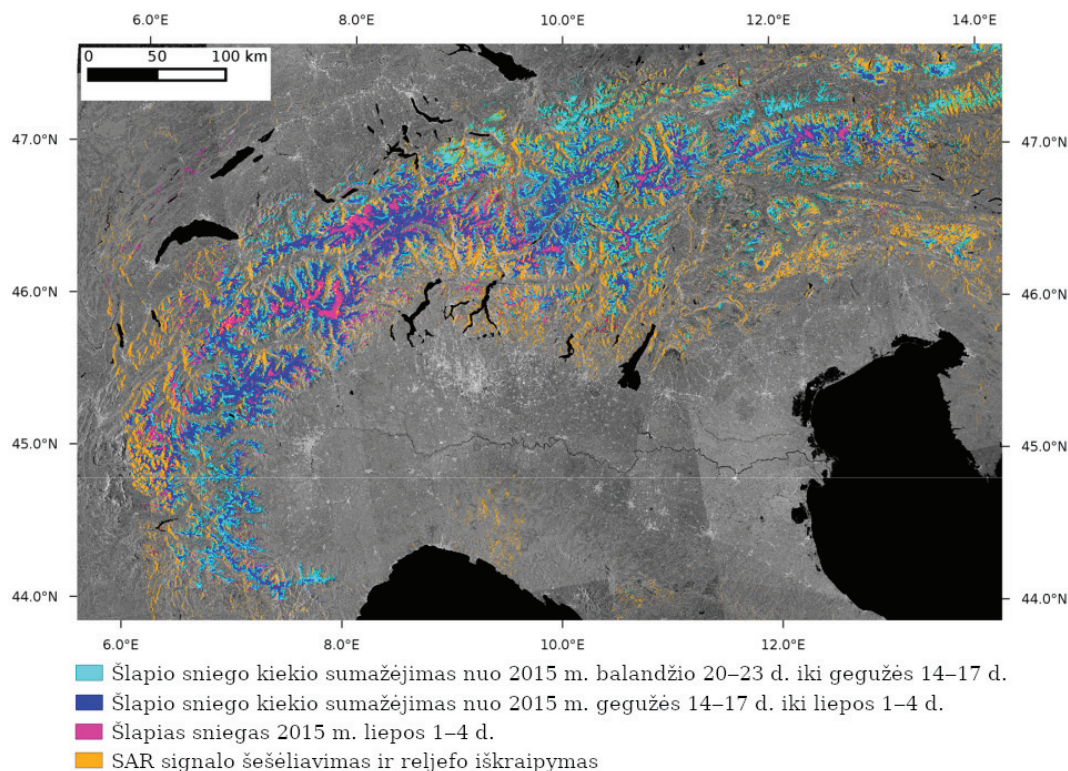
$$\sigma_{tot}^0 = \sigma_{(air-snow)}^0 + \sigma_{vol}^0 + \sigma_{(snow-ground)}^0 \times f(\sigma_i, d, \tau_{as}, \tau_{sg}) \quad (3.6.5.)$$

σ_i – SAR signalo kritimo kampas, d – sniego dangos storis (cm), τ_{as} ir τ_{sg} – atitinkamai Frenelio (Fresnel) energijos atspindėjimo ir perdavimo koeficientai ties oro-sniego ir sniego-dirvožemio riba.

Kai sniegas sausas, radaro signalo išsklaidymas sniego dangos paviršiuje yra minimalus. Taip yra, nes skirtumas tarp oro ir sauso sniego dielektrinės skvarbos yra labai nedidelis, o žemo dažnio bangos nėra jautrios ir paviršiaus šiurkštumo svyravimams. Jei sniegas šlapias arba sniego dangoje dėl tirpimo yra skysto vandens, iškart pasikeičia SAR signalo atgalinė sklaida ir galima lengvai nustatyti tirpstančio sniego plotus (3.6.7. pav.)

Didelė dalis SAR jutiklių veikia C ir X juostose, tačiau jos nėra optimaliausios siekiant nustatyti sniego dangos storį. Sniego dangos storiui nustatyti geriau tinka Ku juostoje veikiančios jutikliai (pvz., QuickSAT). Tyrimai Suomijoje (Hallikainen ir kt., 2003) parodė, kad esant sausam sniegui, naudojant Ku juostos radarą su pastoviu stebėjimo kampu, galima pakankamai tiksliai nustatyti vandens atsargas sniege. Kartu su šiais duomenimis naudojant ir pasyviųjų mikrobangų jutiklių (SSM/I) duomenis galima pasiekti dar geresnę tikslumą. Panašūs tyrimai taip pat parodė, kad sujungus pasyviųjų ir aktyviųjų jutiklių duomenis galima tiksliau nustatyti sniego dangos storį.

Sniego dangos parametrai taip pat gali būti apskaičiuoti naudojant C juostos SAR duomenų interferometriją. Didėjant sniego dangos storiui ir tankiui, šie pokyčiai gali būti fiksuojami panašiai kaip ir Žemės paviršiaus poslinkiai. Tačiau radaro signalo išsklaidymas ir atspindėjimas labai priklauso nuo sniego savybių, todėl C juostos SAR vaizdų koherencija sniego dangos atveju yra labai maža ir radaro signalo fazė greitai keičiasi. L juostos SAR koherencija išlieka aukštesnė net ir iškritus naujam sniegui.



3.6.7. pav. Tirpstančio sniego žemėlapis remiantis *Sentinel 1* SAR stebėjimų duomenimis 2015 m. balandžio 20–23 d. (1 data), gegužės 14–17 d. (2 data) ir liepos 1–4 d. (3 data). Šviesiai mėlyna spalva parodo, kur sniego danga sumažėjo tarp 1 ir 2 datos, tamsiai mėlyna – sniego sumažėjimas tarp 2 ir 3 datos, violetinė – tirpstantis sniegas 3 datą, juoda – vandens telkiniai, oranžinė – regionai, kur SAR signalas yra užstojamas kalnų ir pasireiškia kiti signalo iškraipymai dėl reljefo. Fone – SAR atgalinės sklaidos amplitudės vaizdas VV poliarizacijoje (pagal Nagler ir kt., 2016).

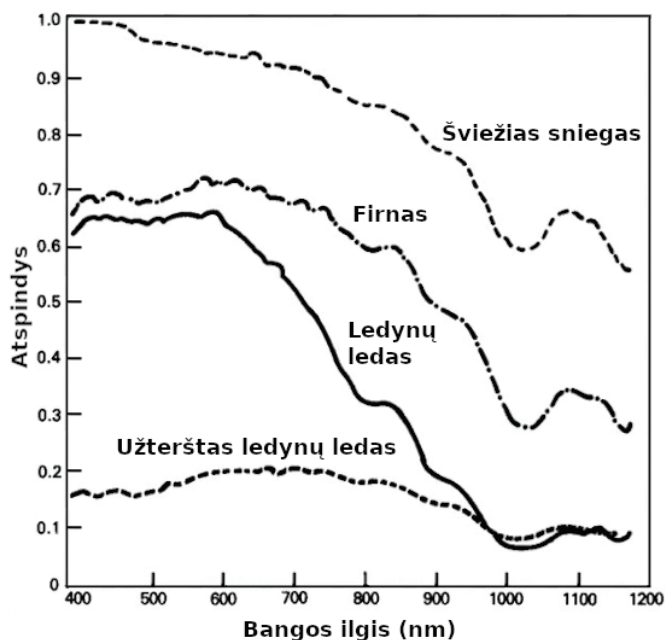
3.6.5. Ledynų stebėsenos fizikinis pagrindas

Ledynai yra kriosferos dalis, kuri labiausiai reaguoja į klimato pokyčius. Ypač sparčiai tirpsta kalnų ledynai. Nuotoliniai stebėjimai padeda nustatyti įvairius ledynų parametrus ir jų pokyčius, o tai leidžia geriau suvokti vykstančius procesus ir jų įtaką klimatui. Instrumentiniai antžeminiai lauko matavimai suteikia labai tikslūs duomenis, tačiau jie yra sudėtingi, brangūs ir atliekami tik labai nedidelėje dalyje ledynų. Palydoviniai jutikliai leidžia greitai surinkti ir pateikti duomenis apie visus ledynus ir jų kaitą daug dažniau ir su mažesniais kaštais. Sisteminiai antžeminiai ledynų matavimai pradėti jau nuo 1894 m., tačiau tik pastaruoju metu dėl nuotolinių stebėjimų tapo įmanoma apibendrinti duomenis iš viso pasaulio. Tarptautinės iniciatyvos, pvz.: Visuotiniai sausumos ledo matavimai iš kosmoso (angl. Global Land Ice Measurements from Space, GLIMS), padėjo sujungti nacionalinius antžeminius stebėjimus ir palydovinius duomenis bei inventorizuoti beveik visus pasaulio ledynus. Palydoviniai duomenys suteikia informacijos apie ledynų vietą, plotą, masę, tūrį, judėjimo greitį, geomorfologinių darinių pasiskirstymą.

Kiekvienas kūnas ir medžiaga pasižymi savitais spektriniais požymiais ir daugelis algoritmų, kurie automatiškai nustato ledynų plotą, remiasi šių spektrinių požymių nustatymu. Jei ledas yra skaidrus, algoritmai ledynus lengvai atskiria nuo kitų paviršių ir medžiagų. Tačiau ledynų ledas nėra vienalytis, be to, dažnai ledynų paviršius būna apneštas įvairiais akmenimis

ar kitomis nuogulomis, o tai keičia ledyno spektrines savybes (3.6.8. pav.). Tokiu atveju algoritmuose naudojama papildoma aplinkos informacija – paviršiaus reljefo modelis ar paklotinio paviršiaus temperatūra. Jei ledyno, apnešto įvairia medžiaga, spektriniai požymiai labai panašūs į aplinkinių paviršių, gali būti naudojama papildoma tekstūros analizė arba remiamasi tyrėjo interpretacija ir patirtimi.

3.6.8. pav. Ledo ir sniego atspindžio reikšmių priklausomybė nuo bangos ilgio regimajame (VIS) ir artimajame infraraudonajame spektre (NIR) (pagal Hall ir Martinec, 1985).



Ledynams stebėti dažniausiai naudojami daugiaspektriai jutikliai, bet svarbu atlikti šių duomenų ortorektifikaciją. Vaizdo ortorektifikacija reiškia, kad vaizdo pikselių vieta yra patikslinama atsižvelgiant į reljefą. Pavyzdžiui, aukšto kalno viršūnė kairėje palydovinio vaizdo pusėje bus arčiau kairiojo vaizdo krašto, nei turėtų būti iš tikrųjų (paralaksas). Ortorektifikuojant pataisomi šie iškreipimai ir sukuriamas vaizdas, kuris būtų gautas, jei į visas vaizdo dalis būtų žiūrima tiesiai iš viršaus.

Daug ledynų tyrimų atlikta naudojant palydovus *Landsat*, *SPOT*, *IRS*, *Sentinel* ir didelės skiriamosios gebos komercinius palydovus *QuickBird* ir *WorldView*. Taip pat buvo palydovų misijų, skirtų daugiausiai ledo ir ledynų stebėsenai: *ICESat* (angl. Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) ir jo lazerinis altimetras *GLAS* (angl. Geoscience Laser Altimetry System) bei palydovas *CryoSat 2*. SAR jutikliai gali stebėti ledynus bet koku oru ir esant bet kokiam Saulės apšvietimui. SAR signalo atgalinės sklaidos dydis priklauso nuo paviršiaus savybių ir tai leidžia atskirti ledą ir sniegą nuo kitų paviršių. Tačiau SAR jutikliai veikia tik labai siauroje spektro juostoje ir tai gerokai apriboja galimybes nustatyti ledyno ledą. Ledyno paviršiaus šiurkštumas labai kinta, lede yra daug įtrūkimų, ledas pasižymi skirtingomis facijomis, dalis ledyno gali būti padengta uolienu nuogulomis. Visoms šioms savybėms nustatyti reikėtų naudoti skirtingo ilgio bangas, o tai neįmanoma naudojant vieną SAR jutiklį.

Nors SAR nėra plačiai naudojamas ledynams kartografuoti, tačiau SAR duomenys ledo facijoms nustatyti tinka geriau nei optinio spektro jutiklių duomenys. Taip pat SAR gali tiksliai užfiksuoti ledynų pokyčius per tam tikrą laiką dėl besikeičiančių atgalinės sklaidos reikšmių. C ir X juostos SAR jutiklių duomenys geriausiai tinka fiksuoti ledynų ploto pokyčius per laiką. Santykis tarp SAR vaizdo vasarą ir žiemą gali padėti nustatyti ledo ir sniego plotus vasaros metu. Žiemos SAR vaizdai labai tinka nustatyti ledynų pusiausvyros liniją, nes radaro signalas gali į sniego dangą įsiskverbti kelis metrus ir aptikti ribą tarp ledo ir firno (suspausto sniego).

Daugiametė ledynų pusiausvyros linija nustatoma suvidurkinant konkrečių metų nustatytą ribą tarp ledo ir firno.

Dar vienas iš SAR panaudojimo būdų ledynų kaitai tirti – tai skirtingų vaizdų koherentiškumo palyginimas. Stabilios ledyno dalys skirtinguose SAR vaizduose bus koherentiškos, o dalys, kurios keičiasi (dėl ledyno slinkimo ar tirpimo), SAR vaizduose pasižymės maža koreliacija. Panaudojant SAR signalo fazės informaciją galima atlikti skirtingų SAR vaizdų interferometrinę analizę ir sudaryti detalius ledyno paviršiaus topografijos žemėlapius. SAR interferometrija užfiksuoja ledyno judėjimą (ar paviršiaus pokyčius) net ir tuo atveju, jei ledas padengtas nuogulomis.

Žinant ledyno paviršiaus topografiją ir turint reljefo skaitmeninį modelį galima apskaičiuoti ledyno paviršiaus nuolydį, orientaciją, vidutinį, minimalų ir maksimalų storį. Tai pagrindiniai ledynų inventorizacijos rodikliai ir jie yra saugomi „Pasaulio ledynų apraše“ (angl. World Glacier Inventory, WGI) ir GLIMS „Glacier“ duomenų bazėse.

3.6.6. Paviršiaus klasifikacija ir ledynų ribų nustatymas

Vienas iš būdų nustatyti ledynus yra palydovinių vaizdų klasifikavimas. Vaizdo elementų (ledynų, ežerų, miškų, akmenų ir pan.) klasifikavimas yra labai svarbus žingsnis norint kartografuoti ledynus, tačiau tai nėra taip paprasta. Dažnai ledynai yra padengti įvairiomis nuogulomis ar akmenų nuolaužomis, ledyno kraštai gali būti po morenomis. Kartais nuogulų yra užtektinai, kad ant jų imtų augti augalai, nors apačioje ir yra neištirpęs ledynas. Klasifikuojant palydovinį vaizdą ledynui gali būti priskirta ir uolienų, ir augalijos, ir ledo kategorija.

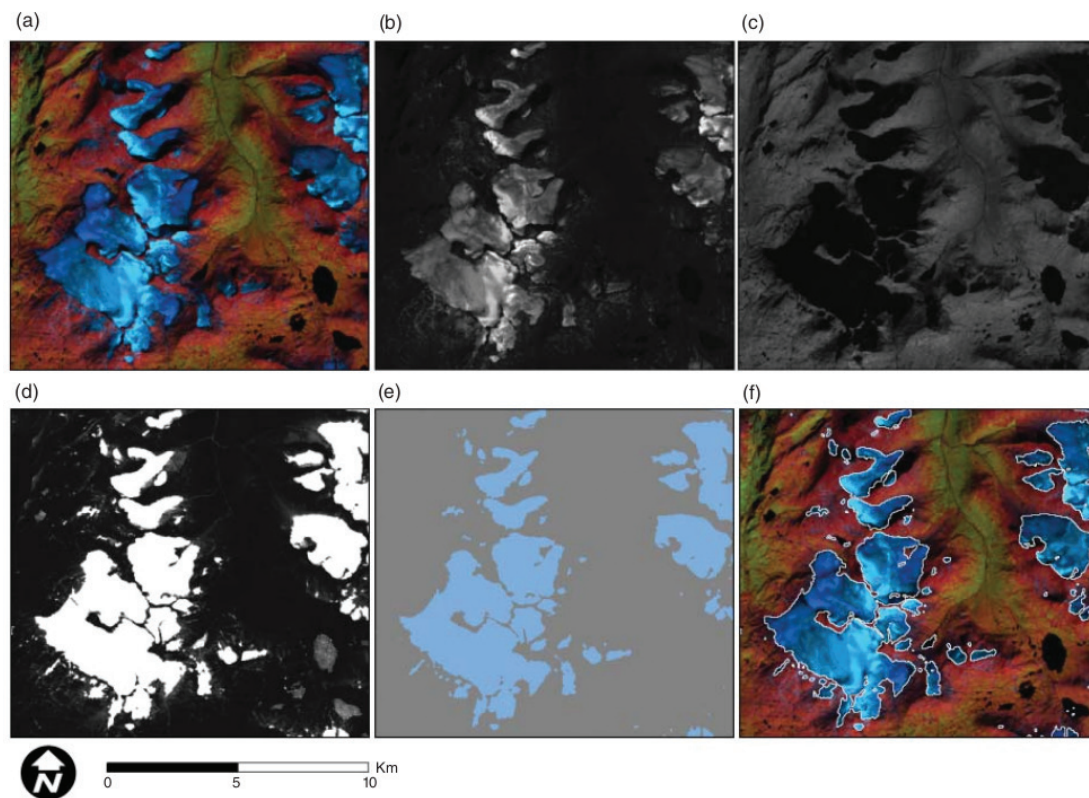
Kontroliuojamojo klasifikavimo atveju analitikas kiekvienai paviršiaus tipo klasei (augalija, sniegas, ledas, uolienos ir t. t.) iš palydovinio vaizdo parenka reprezentatyvius pikselius. Vėliau visi likę pikseliai suskirstomi į kategorijas pagal panašumą į analitiko pasirinktų ir suklasifikuotų pikselių kategorijų spektrines savybes. Netroliuojamasis klasifikavimas veikia panašiai, tik klasės yra nustatomos automatiškai atliekant pikselių klasterizaciją.

Gali būti atliekamas ir rankinis ledynų ribų nustatymas iš palydovinių vaizdų. Jis yra tikslesnis už automatinį klasifikavimą, ypač kai ledas padengtas nuogulomis, tačiau užima daug laiko. Rankinis nustatymas atliekamas tik mažiems ledynams ir yra neįmanomas arba labai neefektyvus regioniniuose, pusrutulio ar globaliuose tyrimuose. Moksliniai ir praktiniai tyrimai rodo, kad geriausi rezultatai dėl laiko ir skaičiavimo sąnaudų gaunami tuomet, kai naudojami atitinkami skenavimo ruožų santykiai arba indeksai. Ledynų ledui nustatyti dažniausiai naudojami NIR / SWIR arba red / SWIR dydžiai, nes sniegas ir ledas šiose elektromagnetinių bangų spektro juostose pasižymi skirtingomis spektrinėmis savybėmis nei kitos medžiagos (3.6.9. pav.). Sniego ir ledo šių santykių reikšmės didelės, o augalijos ir uolienų – mažos. Kai kurie tyrimai parodė, kad red / SWIR santykis šiek tiek tikslesnis, kai nustatoma ledo danga, esanti kalno šešėlyje. Jei ant ledo yra daug nuogulų, ledyno spektrinis signalas tampa labai panašus į atvirų uolienų ir spektro juostų santykis nebepadeda tiksliai suklasifikuoti vaizdo elementų. Pasirinkus kritinę santykio ribą galima sudaryti binarinį žemėlapi, kuriame pateikiami regionai su ledo danga ir be jos. Turint tokius binarinius žemėlapius labai nesunku nustatyti ledynų ribas ir plotus.

Ledynų ribas galima nustatyti ir naudojant normalizuotą sniego skirtumo indeksą (NDSI), kurio reikšmės yra aukštos esant sniego ir ledo dangai, o žemos, kai dominuoja atviros nuogulos ar augalija. Nors NDSI ir tinka ledynams kartografuoti, tačiau paviršiui klasifikuoti dažniau vis dėlto naudojami spektro juostų santykiai. Šie aptarti metodai lengvai automatizuojami, tačiau norint išvengti klaidų, kai ledynas padengtas nuogulomis arba yra kalno šešėlyje, reikalingas papildomas rankinis žemėlapių koregavimas.

Siekiant tiksliai nustatyti ledynų ribas arba ledą po uolienų nuogulomis, papildomai naudojama šiluminė informacija, geomorfologinės ypatybės, analizuojama tekstūra, judėjimo

greitis, SAR vaizdų koherentiškumas ir pan. Pusiau automatiniai metodai remiasi skaitmeninių reljefo modelių (DEM) duomenimis ir identifikuoja ledynų ribas pagal reljefo požymius. Tačiau pasitaiko klaidų, jei ledynas yra stacionarus ir ant jo pradeda formuotis augalija, jei labai kinta ledyno pasvyrimo kampas arba jei vyksta termokarstiniai procesai.



3.6.9. pav. Automatinė Jutulheimo ledyno pietų Norvegijoje ledo ir sniego klasifikacija naudojant *Landsat* TM vaizdą 2003 m. rugpjūčio 9 d.: a) RGB vaizdas naudojant 5, 4 ir 3 TM skenavimo juostas; b) vaizdas naudojant tik 3 TM juostą (0,63–0,69 μm); c) vaizdas naudojant tik 5 TM juostą (1,55–1,75 μm); d) 3 ir 5 TM juostų santykis (TM3/TM5); e) binarinis vaizdas pasirinkus kritinę reikšmę $\text{TM3/TM5} > 2$ bei panaudojus medianos filtrą (3*3 langas); f) RGB vaizdas (a) su uždėtomis ledynų ribomis (e) (pagal Andreassen ir kt., 2008).

Šiluminis kartografavimas remiasi ledo, nuogulų ant ledyno ir aplinkinių uolienuų temperatūros skirtumu. Jei nuogulos ant ledyno yra gana plonos, ledas jas atvėsina labiau nei aplinkines uolienas ir morenas. Jeigu ploname nuogulų sluoksnyje ant ledyno pasitaiko atviro ledo, jis turi labai didelę įtaką pikselio spektrinėms savybėms. Abu šie procesai padeda atskirti ledą nuo kitų paviršių, tačiau šiluminės informacijos panaudojimas veikia tik tuomet, jei nuogulų sluoksnis yra plonesnis nei 0,5 m. Storas nuogulų sluoksnis veikia kaip apsauginis skydas ir nepraleidžia spinduliuotės, ateinančios iš apačioje esančio ledo. Šiluminės spinduliuotės duomenų panaudojimą apsunkina tai, kad šių duomenų skiriamoji geba paprastai yra mažesnė nei regimojo (VIS) ar artimojo infraraudonojo spektro (NIR) duomenų. Dėl mažesnės skiriamosios gebos šiluminės spinduliuotės jautiklių duomenų negalima pritaikyti mažesnių ledynų stebėsenai.

3.6.7. Ledynų slinkimo ir jų masės pokyčių stebėseną

Regimojo spektro jutikliai, o anksčiau ir aerofotografinės nuotraukos naudojami sausumos ledynų bei ledo skydų judėjimui, jų daugiamečiams pokyčiams nustatyti. Šie vaizdai leidžia apskaičiuoti masės balanso pokytį, stebėti, ar jie traukiasi, ar didėja. Naudojant regimojo spektro jutiklius ir radarus bei sekant ledo paviršiaus objektus ar išskirtines formas galima apskaičiuoti ledynų slinkimo greitį. Ledynų storio pokyčiai gali būti įvertinti naudojant radarų altimetriją, radarų interferometriją arba lidaro duomenis. Palydoviniai jutikliai gali užfiksuoti ne tik ledynus ir jų pokyčių greitį, bet ir reljefo formas, susijusias su ledynų veikla: morenas, eskerus, zandrus.

Pirmasis žingsnis analizuojant skirtingus palydovinius vaizdus yra šių vaizdų koregistracija, kuri atliekama pagal kontrolinius taškus. Kontroliniai taškai yra žinomi ir nekintami taškai ant paklotinio paviršiaus, tačiau gali būti naudojamos ir paviršiaus struktūros, kurios matomos visuose palydoviniuose vaizduose, tačiau jų padėtis varijuoja. Vaizdų koregistracija yra labai svarbi – jos neatlikus galima užfiksuoti daug netikrų paviršiaus pokyčių, jei palydoviniai vaizdai yra nors truputį pasislinkę vienas kito atžvilgiu. Klaidinga koregistracija lemia ne tik ledynų ribų nustatymo, bet ir viso ploto ledyno storio apskaičiavimo klaidas.

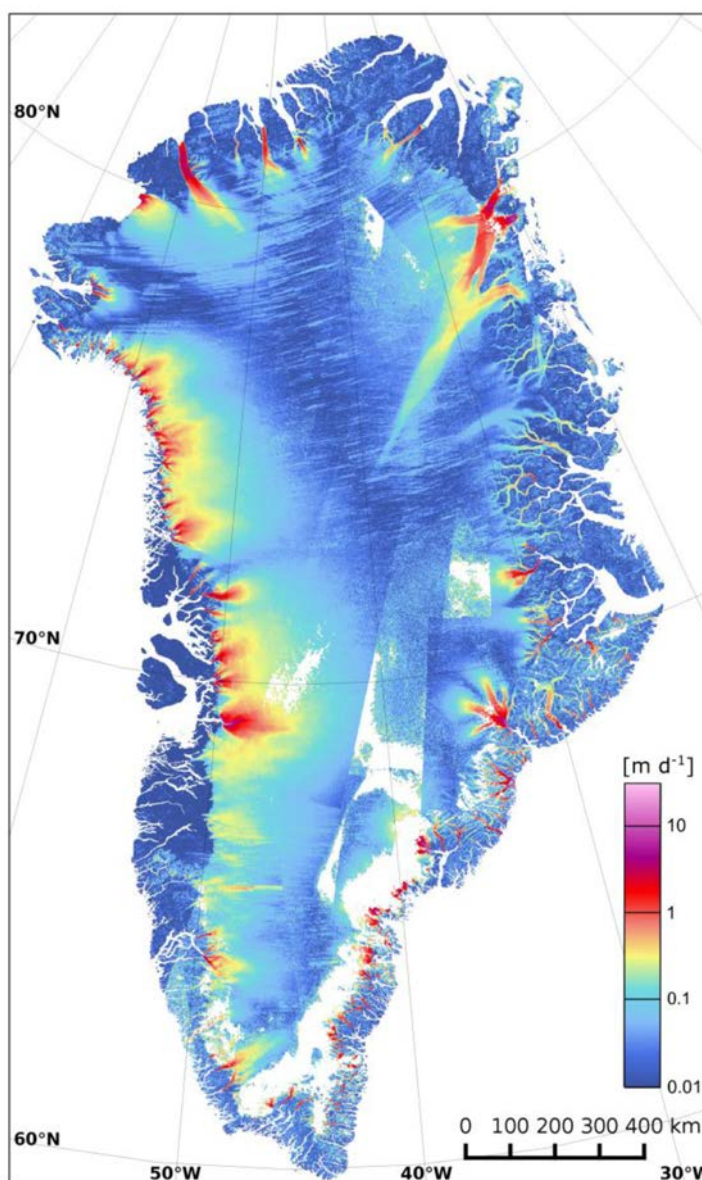
Iš palydovinių duomenų galima tiesiogiai nustatyti ledyno ploto ir ilgio pokyčius. Paprasčiausias būdas yra iš palydovinio vaizdo atimti anksčiau darytą palydovinį vaizdą su identiška arba labai panašia stebėjimo geometrija. Kiekvieno skenavimo ruožo skirtumai paprastai skaičiuojami atskirai ir ten, kur nebuvo jokių pokyčių, gaunamas o arba jam artimos reikšmės. Ten, kur yra įvykę pokyčiai, skirtumai bus didesni ir gali būti tiek teigiami, tiek neigiami. Norint skirtumų žemėlapi padaryti aiškesnį, skalė yra pakeičiama į teigiamą ir tuomet (jei naudojama balta ir juoda spalvų skalė) vietos, kur nebuvo fiksuota pokyčių, atrodo pilkos, regionai, kur atspindys padidėjo (padaugėjo sniego ar ledo), būna šviesūs, kur atspindys sumažėjo (sniegas ar ledas ištirpo), vaizdas būna tamsus. Panaudojus skirtingus skenavimo ruožus galima sudaryti RGB vaizdus, kurie parodo ne tik ledo ar sniego pokyčius, bet ir kitus paviršiaus pasikeitimus, pvz.: nuogulų, morenų persikirstymą, augalijos formavimąsi ir pan.

Nagrinėjant ledynų judėjimą yra sudėtinga nustatyti, kur ledyno masės judėjimo srautai išsiskiria. Ledyno judėjimo divergencija dažnai žymi ribą tarp skirtingų ledynų. Jei norima palyginti skirtingų, bet besijungiančių ledynų pokyčius, reikia užtikrinti, kad šių ledynų riba yra nustatyta tiksliai. Jei ledynų ribos tarp skirtingų palydovinių vaizdų nesutampa, galima gauti klaidingus rezultatus, kad vienas ledynas sumažėjo, o kitas padidėjo, nors iš tikrųjų ledo plotas nepakito. To galima išvengti, jei vienos kalnų grandinės ar ledo skydo ledynai nagrinėjami kaip visuma, o ne atskirai. Ribas tarp ledynų taip pat gali padėti nustatyti skaitmeninis reljefo modelis.

Grenlandijos ir Antarktidos ledyninių skydų ploto pokyčiams nustatyti naudojami regimojo spektro ir SAR duomenys. Jie ypač tinka stebėti ilgalaikius ledynų pakraščius, nuo kurių atskykla ledkalniai, pokyčius. Kai kurie regimojo spektro jutikliai, pvz. MODIS, gali suteikti kasdienes duomenis apie ledo frontą, o tai leidžia nustatyti sezoninius ciklus ir daugiamečius pokyčius. Žinoma, šiaurinėse platumose regimojo spektro jutikliai negali stebėti Žemės paviršiaus poliarinės nakties metu. Naudojant SAR jutiklius duomenys gaunami visada. Sudarant SAR mozaikas kiekvienais metais galima patikslinti ledyninių skydų žemėlapi. Tokie žemėlapiai sudaromi nuo 1992 m. ir leidžia apskaičiuoti ledo pakraščius traukimosi greitį, palyginti šį greitį ledyno liežuvių, esančių sausumoje, ir tų, kurie nusileidžia į vandenyną.

Ledyno judėjimo greitis iš palydovinių duomenų nustatomas sekant ledo paviršiaus objektų (pvz.: didelių uolienu, ledo įtrūkių ar ledo smailių) padėtį skirtinguose optiniuose arba radaro vaizduose arba naudojant SAR duomenų interferometriją. Norint nustatyti ledyno judėjimo greitį pagal paviršiaus objektų sekimą, labai svarbi tiksli vaizdų koregistracija. Objektai

aptinkami automatiškai, o algoritmai (pvz.: IMCORR arba Cosi-corr) pagal jų padėties pokyčius apskaičiuoja judėjimo vektorių ir pateikia šiuos duomenis gardelėmis. Radarais objektai identifikuojami ir sekami naudojant atgalinės sklaidos intensyvumo vaizdus (3.6.10. pav.). Šiuose vaizduose pasirenkami dideli objektai, kurie juda kartu su ledu, arba nedidelės ledyno dalys, kur mažos ir didelės atgalinės sklaidos intensyvumo reikšmės yra viena šalia kitos. Paprastai kintanti mažo ir didelio intensyvumo struktūra tarp skirtingų palydovinių vaizdų išlaiko didelį fazės koherentiškumą. Šis būdas dar vadinamas grūdėtumo sekimu.

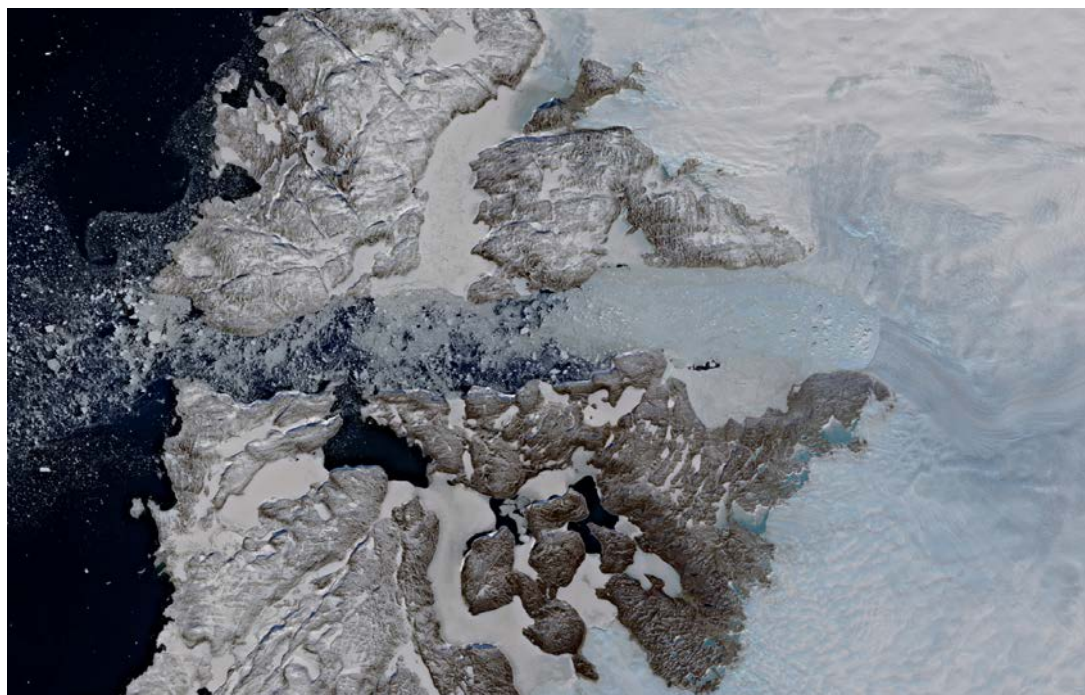


3.6.10. pav. Grenlandijos ledyno judėjimo greitis (metrai per dieną, skalė logaritminė), nustatytas naudojant 2015 m. sausio-kovo mėn *Sentinel 1A* SAR duomenis (Nagler ir kt., 2015).

Vienas svarbiausių ledynų būklės rodiklių yra jo masės balansas. Ledyno masės balansą lemia skirtumas tarp sniego akumuliacijos ant ledyno bei jo tirpimo, o ledo skydų – dar ir ledkalnių atskilimo intensyvumo. Masės balansas (tūrio pokyčiai) gali būti apskaičiuotas atimant ledynų paviršiaus aukščio informaciją iš Žemės paklotinio paviršiaus aukščio. Kasmetiniai masės pokyčiai paprastai išreiškiami vandens atsargomis metrais, kurie buvo prarasti arba gauti. Vienas iš būdų apskaičiuoti ledyno tūrį yra palydovinių duomenų apie ledyno ilgį ar plotą susiejimas su storium. Tačiau tokie ryšiai remiasi skirtingu masteliu ir padeda nustatyti

tik vidutinį, o ne atskirų ledyno dalių tūrį. Naudojant skaitmeninius ledyno paviršiaus modelius galima šiuos ryšius patikslinti įvertinant topografiją ir ledyno dalių judėjimą.

3.6.11. pav. pateiktas jutiklio *Sentinel 2* MSI užfiksuotas Jakobshavn ledynas Grenlandijoje. Šis ledynas pastaraisiais metais prarasdavo daugiau ledo nei bet kuris kitas Grenlandijos ledynas. Intensyviausias ledyno tirpimas ir slinkimas užfiksuotas 2012–2013 m., tuo laikotarpiu kai kuriose dalyse ledo storis per metus sumažėjo 10 metrų. Tačiau vėlesniais metais, tarp 2013 ir 2017 m., ledyno tirpimas sulėtėjo ir kai kur jo storis net pradėjo didėti. Šiuo metu Jakobshavn ledynas juda lėčiau, truputį storėja ir artėja prie vandenyno (anksčiau traukėsi gilyn į sausumą).



3.6.11. pav. Jakobshavn ledynas Vakarų Grenlandijoje 2019 m. balandžio 29 d. iš palydovo *Sentinel 2* (ESA). Centre matyti, kaip nuo ledyno liežuvio atskilę ledkalniai išnešami į vandenyną.

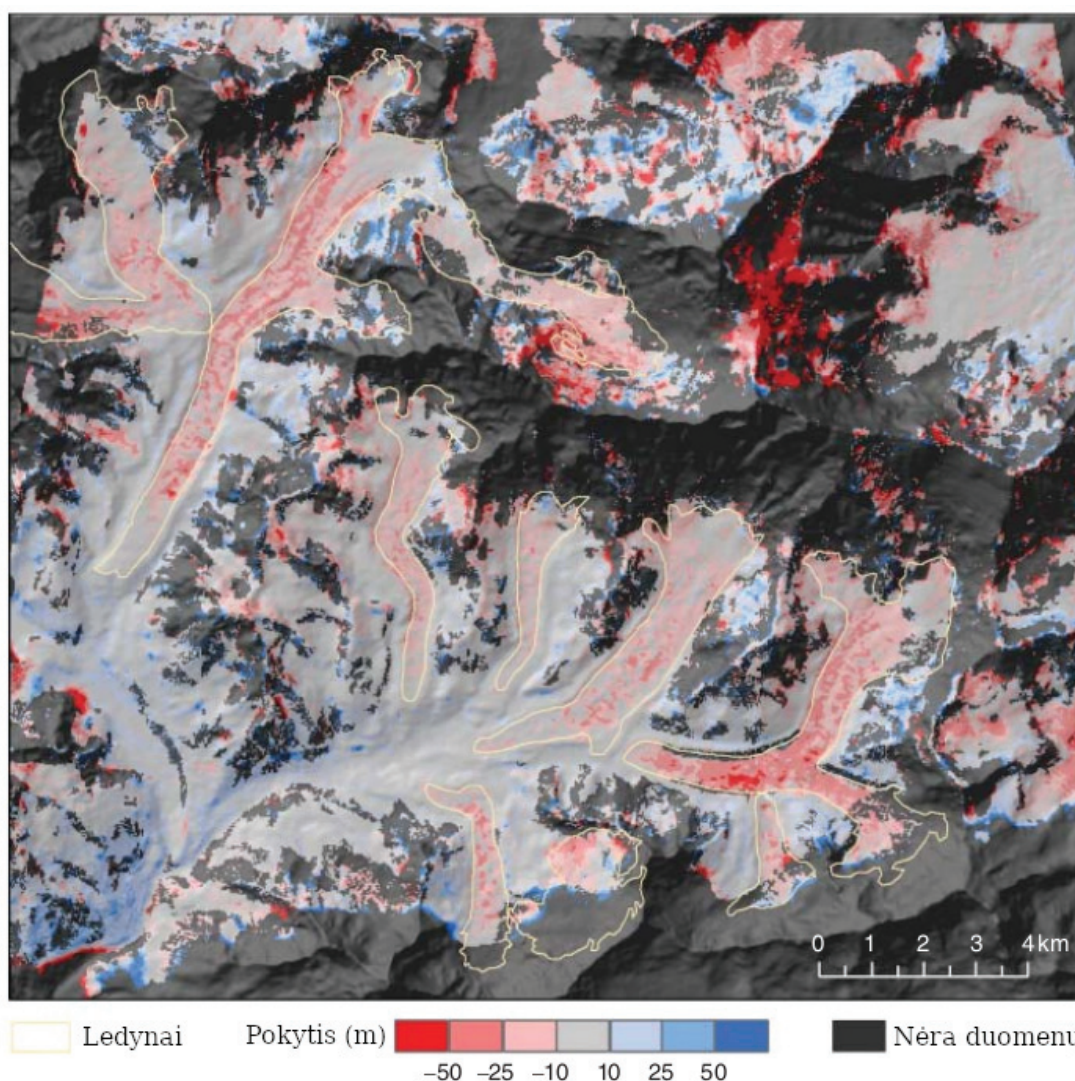
Norint nustatyti ledynų tūrio pokyčius, reikia turėti Žemės ir ledyno paviršiaus skaitmeninius reljefo modelius (DEM). Ledyno paviršiaus aukščio modeliai gali būti sudaryti naudojantis optiniais stereoduomenimis, SAR interferometrija, lazerine altimetrija arba ekspediciniais matavimais. Šiuo metu yra trys globalūs, pakankamai didelės skiriamosios gebos Žemės paviršiaus skaitmeniniai aukščio modeliai, kurie gali būti naudojami ledynų tūrio pokyčiams apskaičiuoti:

1. 2000 m. vykdytos SRTM (angl. Shuttle Radar Topography Mission) misijos duomenys;
2. ASTER jutiklio globalūs duomenys (GDEM), kurie remiasi stereovaizdais, gaunamais nuo 2000 m. iki šiol;
3. Lazerinės altimetrijos duomenys, surinkti ICESat misijos metu, 2003–2009 m.

Visi šie skaitmeniniai Žemės reljefo modeliai turi privalumų ir trūkumų. SRTM duomenų skiriamoji geba yra didelė ir duomenys dengia teritoriją tarp 59° pietų platumos ir 60° šiaurės platumos, tačiau yra duomenų trūkių kalnuotose vietovėse. Laikoma, kad ICESat (ir kitų lidarų altimetrijos) misijos metu nustatytas reljefo aukštis tiksliausias, tačiau duomenis yra taškiniai ir neapėmia visos Žemės. Išilgai šio palydovo trajektorijos matavimai buvo atliekami kas 170 m, o atstumas tarp skirtingų trajektorijų, priklausomai nuo platumos, siekia šimtus arba net tūkstančius metrų.

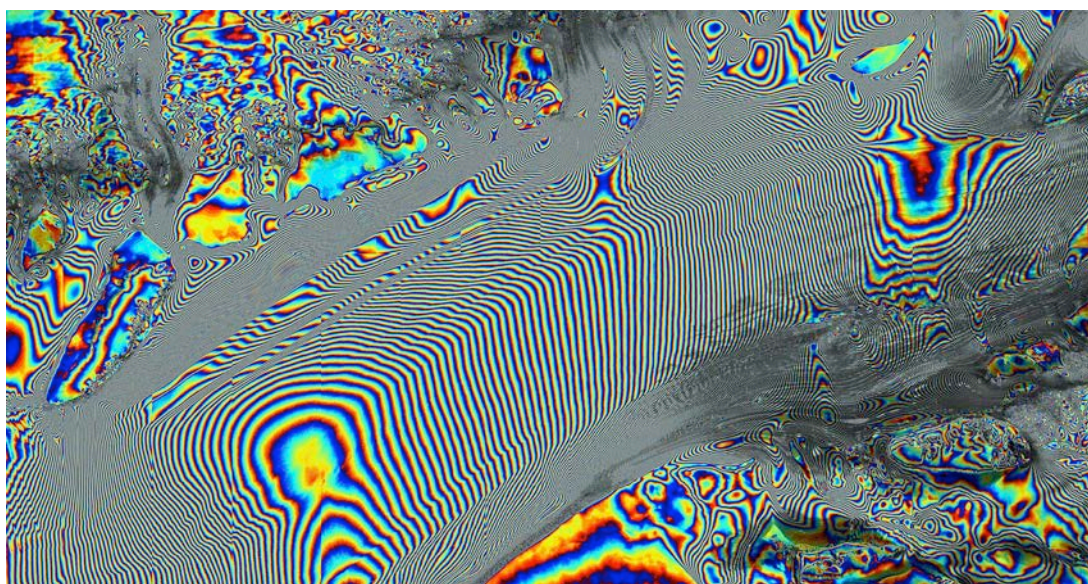
Ledyno aukščio pokyčiai yra nustatomi lyginant ledyno aukščio modelius, sudarytus skirtingų palydovų skrydžių metu (3.6.12. pav.). Ledyno aukščio pokyčiai į ledyno masės pokyčius yra paverčiami naudojant apskaičiuotas arba išmatuotas ledo tankio reikšmes.

Ledyno masės pokyčius taip pat galima nustatyti naudojant gravitacinio lauko pokyčius (pvz.: misija GRACE). Misiją GRACE sudaro du tandemu skriejantys palydovai. Atliekant stebėjimus labai svarbu tiksliai nustatyti atstumą tarp palydovų (tam naudojama lazerinė interferometrija), nes tik tada galima apskaičiuoti Žemės gravitacinio lauko pokyčius. Šių duomenų skiriamoji geba yra maža (apie 100 km), kai kuriuose regionuose (pvz., Himalajuose) duomenys itin neapibrėžti, nes gravitacija priklauso nuo daugelio veiksnių, kurie nebūtinai susiję su ledynais (pvz.: gruntinių vandenų svyravimų, erozijos sukeltų pokyčių). Tačiau gravitacinio lauko matavimams nereikia jokių kitų papildomų stebėjimų ir ateityje tokie jutikliai gali tapti vienu iš svarbiausių ledynų stebėjimo įrankių.



3.6.12. pav. Vieno iš Nepalo ledynų (netoli Everesto) aukščio pokyčiai nustatyti palyginus du skaitmeninius ledyno paviršiaus aukščio modelius (DEM), gautus iš CORONA žvalgybinio palydovo 1970 m. ir iš palydovo *CartoSat* 2007 m. Ledyno ribos pažymėtos gelsva spalva (pagal Bolch ir kt., 2011).

Geometriniam ledyno paviršiaus pokyčiams nustatyti naudojama ir SAR vaizdų interferometrija. Priklausomai nuo interferometrijai naudojamų SAR vaizdų gavimo laiko skirtumo galima pasiekti centimetrų ar net milimetrų tikslumą. Interferometrija remiasi principu, kad nuo paviršiaus atsispindėjusio radaro signalo fazė tarp skirtingų palydovo skrydžių išlieka tokia pati, nebent įvyksta pokyčiai. Atėmus du to paties jutiklio atgalinio radaro signalo fazės vaizdus gaunama interferograma, kuri parodo, kaip pasikeitė signalo fazės reikšmės tarp skirtingų skrydžių. Interferograma parodo, kur įvyko Žemės paviršiaus pokyčiai arba kur pasikeitė dielektrinės paviršiaus savybės (3.6.13. pav.). Interferogramoje gali atsispindėti ir palydovo orbitos pokyčiai, tačiau palydovų orbitos parametrai yra nuolat sekami ir jų poveikis interferogramai gali būti sumodeliuotas ir pašalintas. Norint iš interferogramos apskaičiuoti ledynų judėjimo greitį, turi būti pašalinta paviršiaus topografija. Tam naudojamas jau turimas skaitmeninis reljefo modelis (DEM) arba jis gali būti sudarytas iš tų pačių radaro vaizdų, kurie naudojami ir interferometrijai. Tokiu atveju reikalingi trijų palydovo skrydžių duomenys: iš dviejų sudaromas reljefo modelis, o trečias panaudojamas interferogramai sudaryti. Sujungiant DEM ir interferogramą galima apskaičiuoti ledo judėjimo greitį ir kryptį. Šio metodo trūkumas tas, kad nėra lengva gauti SAR vaizdus, pasižyminčius pakankama fazės koherencija, be to, radaro signalas nepasiekia slėnių ir regionų, kurie radaro stebėjimo kryptimi atsiduria kalnų šešėlyje.



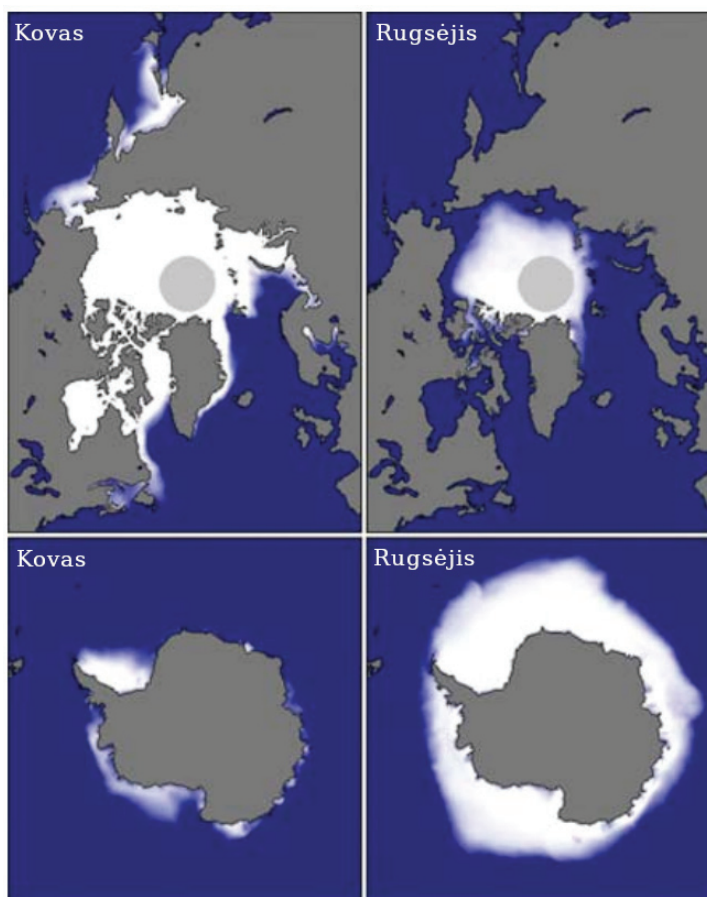
3.6.13. pav. Vieno iš Antarktidos ledynų *Sentinel 1* interferograma. Viena vaivorykštės spalvų juostelė parodo maždaug 2,5 cm paviršiaus pokytį. Kuo juostelės tankesnės, tuo didesni ledyno paviršiaus reljefo pokyčiai (Delfto technologijos universitetas, 2020).

SAR interferometrija taip pat gali padėti nustatyti skirtingu greičiu judančias ledyno dalis ir identifikuoti ledyno dalis, kurios išoriškai nesiskiria nuo aplinkos. Pvz.: ledyno dalys, kurios yra po storu nuogulų sluoksniu, gali atrodyti taip pat kaip aplinkinės uolienos, tačiau jos juda kartu su ledynu, o aplinkinės uolienos lieka stabilios. Taip pat SAR interferogramos Grenlandijoje ir Antarktidoje gali padėti identifikuoti ribą, kur ledynas yra vis dar sausumoje, o kur jau plūduriuoja vandenyne. Sausumos ribą SAR interferometrijoje parodo ledyno paviršiaus išlinkimas dėl vandenynų potvynių ir atoslūgių poveikio. Tokie stebėjimai leido nustatyti, kad po ledu vanduo skverbiasi gilyn į sausumą ir taip prisideda prie spartesnio ledyno pakraščių tirpimo.

3.6.8. Jūros ledo plotų ir koncentracijos nustatymas

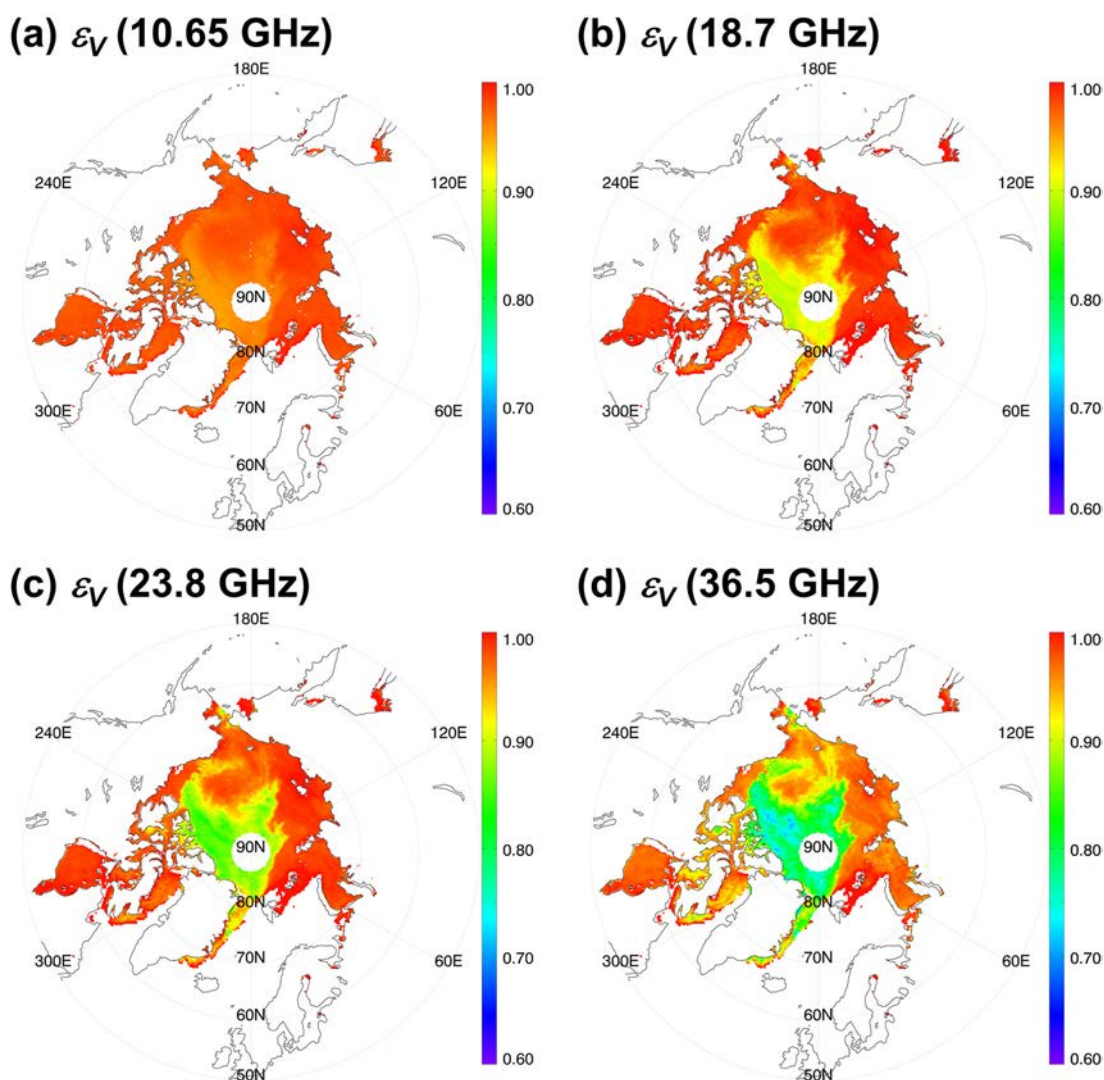
Daugiausia jūros ledo yra vandenynuose, esančiuose prie Žemės ašigalių, tačiau jis formuojasi ir vidutinių platumų jūrose, o Geltonosios jūros Bohajaus įlankoje stebimas net ties 40° šiaurės platumu. Jūros ledas pasižymi aiškiu sezoniniu ciklu: Arkyje mažiausias jūros ledo plotas būna rugsėjo mėn., o didžiausias – vasario pabaigoje arba kovo pradžioje. Antarktidoje minimumas ir maksimumas būna priešingu metu (3.6.14. pav.). Jūros ledas vaidina labai svarbų vaidmenį Žemės energiniame balanse: vasarą jis atspindi Saulės spinduliuotę atgal į kosmosą, o žiemą apsaugo vandenynus nuo šilumos atidavimo į atmosferą. Jūros ledas taip pat labai svarbus šiaurės ir pietų polių ekosistemoms bei apriboja laivininkystę žiemą. Jūros ledą iš kosmoso galima nuolatos stebėti naudojant regimojo spektro, pasyviuosius mikrobangų jutiklius ir radarus.

Kasdieninių jūros ledo ploto ir jo koncentracijos stebėjimų naudojant palydovinius duomenis rezultatai prieinami nuo 1979 m. Antžeminiai stebėjimai Žemės ašigaliuose yra labai sudėtingi dėl sunkiai pasiekiamų regionų ir sudėtingų oro sąlygų, o palydoviniai jutikliai gali atlikti nuolatinius stebėjimus net ir nepasiekiamuose regionuose. Daugiausia naudojami pasyvieji mikrobangų radiometrai, nes jiems netrukdo debesys ir Saulės spinduliuotės trūkumas aukštose platumose. Dažniausiai poliams stebėti naudojami poliarinės orbitos palydovai, kurie leidžia sudaryti jūros ledo žemėlapius kasdien, išskyrus nedidelį plotą visai šalia ašigalių (3.6.14. pav.). Pasyviųjų mikrobangų jutiklių duomenys leidžia atskirti vienmetį ir daugiametį jūros ledą, nes skiriasi šio ledo druskingumas ir kiti rodikliai, veikiantys mikrobangų spinduliuotės intensyvumą. Mikrobangų spektre vandens spinduliavimo galia daug labiau priklauso nuo jo fazinės būklės nei nuo temperatūros. Tai leidžia lengvai nustatyti ribą tarp vandenyno ir ledo.



3.6.14. pav. Vidutinis jūros ledo plotas kovo ir rugsėjo mėn. Šiaurės (viršuje) ir Pietų (apačioje) pusrutuliuose, remiantis 1979–2000 m. duomenimis. Balti atspalviai parodo ledo koncentracijos svyravimus nuo 15 iki 100 %. Pilkas apskritimas Šiaurės poliuje parodo regioną, kurio neaprepia kai kurie palydoviniai jutikliai (Tedesco, 2015).

Jūros ledui nustatyti dažniausiai naudojami matavimai ties 19 GHz ir 37 GHz. Ties šiais dažniais susidaro aiškus spinduliuotės intensyvumo (ryškio temperatūros) kontrastas tarp ledo ir atviro vandens. Ledas ir vanduo taip pat veikia ir mikrobangų signalo poliarizaciją. Signalas nuo vandens dažniausiai yra daug labiau poliarizuotas nei nuo ledo ir tai leidžia dar tiksliau nustatyti ledo dangos ribą. Mikrobangų spinduliavimo geba priklauso ir nuo ledo druskingumo. Kai ledas pradeda formuotis, didžioji dalis druskos yra išstumama į vandenyno paviršių, tačiau dalis druskos lieka lede ir suformuoja labai druskingo sūrymo kišenes. Druska iš šių kišenių pamažu nuteka, tačiau didžiausias pokytis įvyksta vasarą, kai ledo tirpsmo vanduo išplauna šias sūrymo ertmes. Tuomet ledo druskingumas staigiai sumažėja. Šis natūralus procesas leidžia atskirti sezoninį ledą nuo daugiamečio – sezoninis ledas daug druskingesnis už daugiametį. Skirtingo amžiaus ledą galima nustatyti daug tiksliau, jei naudojami ryškio temperatūros skirtumai tarp skirtingų mikrobangų dažnių (3.6.15. pav.). Antarktidoje daugiamečio ledo nėra daug, be to, ledas dėl susidariusios sniego dangos svorio kartais panyra į druskingą vandenyno vandenį, todėl nustatyti ledo amžių neįmanoma.



3.6.15. pav. 2010 m. sausio 1 d. virš Arkties vandenyno AMSR-E jutiklio užfiksuota spinduliavimo geba vertikalioje poliarizacijoje (ϵ_v) mikrobangų ruože: a) 10,65 GHz; b) 18,7 GHz; c) 23,8 GHz; d) 36,5 GHz. Sezoninis ledas pasižymi didesne (rausva spalva), o daugiametis – mažesne spinduliavimo geba (žalia, mėlsva). Kuo didesnis dažnis, tuo ryškesnė riba tarp skirtingo amžiaus ledo (Lee ir kt., 2017).

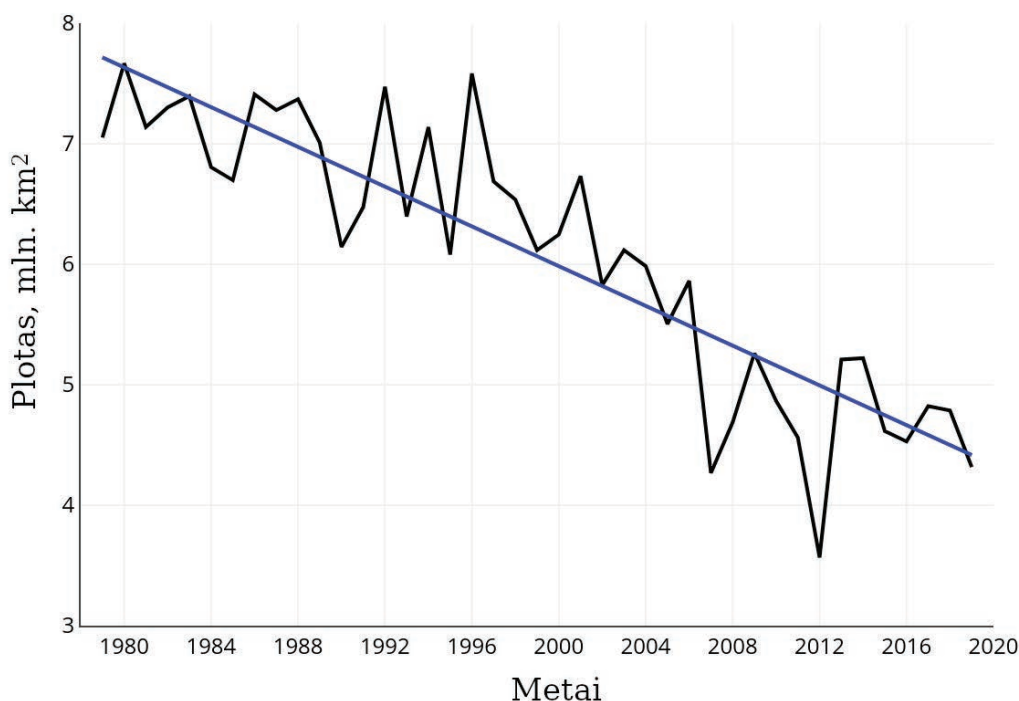
Yra sukurta įvairių algoritmų, kurie ledo koncentracijai gardelėje nustatyti naudoja skirtingus mikrobangų dažnius ar poliarizacijas. Dažniausiai jie visi remiasi empiriškai nustatytu ryšiu tarp ryškio temperatūros ir atviro vandens ir ledo santykio gardelėje:

$$TB = (1 - C) \cdot T_{Bwater} - C \cdot T_{Bice} \quad (3.6.6.)$$

kur T_B – gardelės ryškio temperatūra; C – ledo koncentracija (vieneto dalimis); T_{Bwater} ir T_{Bice} – koeficientai, priklausantys nuo ryškio temperatūros reikšmių, kai gardelė yra 100 % vandens arba 100 % ledo. Teoriškai ledo koncentraciją būtų galima apskaičiuoti ir naudojant vieno jutiklio stebėjimo ruožo informaciją, tačiau dažniausiai naudojami keli ruožai. Naudojant skirtingų dažnių kanalų informaciją galima iš karto nustatyti skirtingo amžiaus ledo koncentraciją.

Jūros ledo dangos ir koncentracijos nustatymą apsunkina sniego danga. Priklausomai nuo sniego dangos storio, jo dalelių dydžio ir vandens atsargų, sniegas gali gerokai pakeisti mikrobangų signalą. Vasarą tirpstant sniegui ant ledo gali sudaryti vandens ir tuomet palydoviniai jutikliai tuos plotus laikys atviru vandeniu ir gauta ledo koncentracija bus mažesnė nei reali. Dėl mažos pasyviųjų mikrobangų jutiklių skiriamosios gebos ledo ploto ribos gali būti nustatytos tik 25–75 km tikslumu. Taip pat pasitaiko klaidų ties sausumos krantais, kai jutiklis surenka signalą tiek iš sausumos, tiek iš vandenyno ir suminės reikšmės gali būti panašios į ledo. Šios klaidos nėra reikšmingos, kai nagrinėjamas ledo paplitimas visame pusrutulyje, tačiau duomenys nėra tinkami lokalaus masto procesų tyrimams ar taikymui jūrų navigacijoje.

Nuo palydovinių stebėjimų pradžios Arktyje stebimas ledo dangos ploto mažėjimas. Labai ryškiai ledo plotas pradėjo mažėti maždaug nuo 2000 m., o rekordiškai mažas ledo plotas Arktyje buvo fiksuotas 2007 ir 2012 m. rugsėjį (3.6.16. pav.). Ledo ploto mažėjimas stebimas ir kitais mėnesiais visuose Arkties regionuose. Nuo palydovinių matavimų pradžios jūros ledo plotas Arktyje sumažėjo maždaug 40 %. Antarktidoje jūros ledo ploto mažėjimas stebimas tik kai kuriuose regionuose, o ledo paplitimas aplink Antarktidą skirtingais metais labai svyruoja.



3.6.16. pav. Vidutinis jūros ledo plotas (mln. km²) rugsėjo mėn. Arktyje 1979–2019 m. laikotarpiu. Juoda linija – ledo ploto kasmetinės reikšmės rugsėjo mėn., mėlyna – tiesinė tendencija. Ledo ploto reikšmės apskaičiuotos naudojant pasyviuosius mikrobangų jutiklius (NSIDC, 2019).

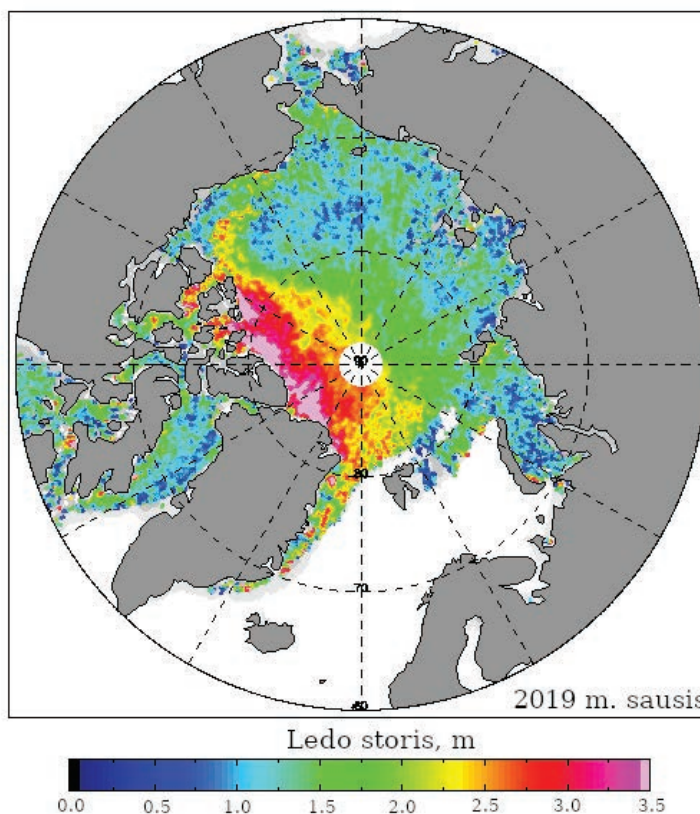
Smulkūs jūros ledo dariniai gali būti nustatyti SAR jutikliais. Radaro signalo atgalinė sklaida labai priklauso nuo vandens ir ledo savybių bei druskingumo. Jūros ledo atgalinė sklaida yra daug didesnė nei vandenyno. SAR rezultatams taip pat turi įtakos vėjas, nes didėjant vandens paviršiaus šiurkštumui atgalinė sklaida didėja ir darosi sudėtinga tiksliai nustatyti ledo ribą. Vasarą dėl sniego tirpsmo vandens ant ledo taip pat padidėja nustatymo neapibrėžtumas, nes šis vanduo sumažina ledo atgalinės sklaidos koeficientą. SAR jutiklių informacija (kartu su VIS / NIR, jei nedebesuota) dėl didelės skiriamosios gebos yra naudojama laivų navigacijai šiaurės jūrose.

3.6.9. Jūros ledo storio nustatymas

Jūros ledo storis nuotoliniu būdu pradėtas matuoti tik paskutiniame XX a. dešimtmetyje, kai atsirado radaro altimetrai. Tačiau šie jutikliai neapėmė centrinės Arkties dalies. Duomenys apie jūros ledo storį gali būti gauti ir naudojant infraraudonųjų spindulių jutiklius, kurių algoritmai remiasi vandenyno šiluminės energijos perdavimu per ledą. Tačiau šis metodas veikia tik kai ledas plonas. Detalus duomenys apie jūros ledo storį visuose regionuose pradėti gauti 2003 m. NASA paleidus palydovą ICESat su lazeriniu altimetru. Tačiau skirtingai nei ledo pločio ar ledo koncentracijos šie duomenys yra lokalus ir neapėmė didelių teritorijų.

Palydoviniai radarų altimetrai matuoja Žemės paviršiaus aukštį ir ten, kur atvirą vandenį keičia ledas susidarius aukščio skirtumams. Atėmus ledo dangos aukštį iš išmatuoto vandens paviršiaus lygio gaunamas ledo dangos storis (3.6.17. pav.). Tačiau šis apskaičiuotas storis atspindi tik ledo dalį virš vandens – po vandeniu panirusi ledo dalis nėra įvertinama. Bendras ledo storis gali būti apskaičiuojamas naudojant išmatuotą ledo storį virš vandens bei ledo tankio duomenis. Tačiau ledo storio apskaičiavimas iš tankio duomenų labai netikslus, nes tankis kinta priklausomai nuo ledo druskingumo. Ir nors radaro signalas prasiskverbia pro sniegą, susidariusį ant ledo, tačiau sniego masė prisideda prie ledo storio paklaidų. Didelis svoris lemia, kad daugiau ledo bus panirę, nei teoriškai apskaičiuojama iš ledo tankio. Šios paklaidos yra reikšmingos, nes laikoma, kad virš vandens išnirę tik 10–15 % ledo.

3.6.17. pav. Vidutinis jūros ledo storis Arktyje 2019 m. sausio mėn. remiantis palydovo *CryoSat* duomenimis. SAR altimetru duomenys naudojami apskaičiuoti aukščio skirtumą tarp vandens ir ledo paviršiaus. Siekiant gauti tikslesnį ledo storį iš gauto aukščio atimama vidutinė daugiametė sniego dangos storio reikšmė (CPOM, 2019).



Lazerinių altimetrų signalas neprasiskverbia pro sniegą ir išmatuoja aukščių skirtumą tarp vandens ir sniego ant ledo. Norint apskaičiuoti tik ledo storį, reikėtų iš matavimų atimti sniego dangos storį, tačiau dažniausiai duomenų apie sniego storį nėra. Sniego dangos storiui ant ledo apskaičiuoti kartais naudojami pasyvieji mikrobangų jutikliai, tačiau jų skiriamoji geba labai maža, be to, sniego storį galima apskaičiuoti tik ant pirmamečio ledo. Lazerinių altimetrų panaudojimą taip pat ap sunkina jūros paviršiaus svyravimai.

Radaro ir lazerinių altimetrų duomenų sujungimas yra vienas tiksliausių būdų nustatyti ledo dangos storį, tačiau šių jutiklių stebėjimai turi būti atlikti panašiu metu. Taip pat išlieka iššūkis, kaip nustatyti sniego dangos storį ant ledo.

Radaro ir lazerinių altimetrų duomenis gali papildyti šiluminės infraraudonosios spinduliuotės (TIR) jutiklių matavimai. Vandenyne spinduliuoja šilumą ir storėjant ledo dangai šios šilumos perdavimas iš vandenyno mažėja. Sumažėjimas priklauso nuo ledo storio, tačiau yra tam tikra riba, kada jutiklis tolesnio mažėjimo nebegali užfiksuoti. Ši riba priklauso nuo naudojamo bangos ilgio, tačiau dažniausiai jutikliai geba fiksuoti šilumos sumažėjimą iki 1 m storio ledo. Esant storesniam ledui šiluminė spinduliuotė iš vandenyno nebesikeičia, todėl šis metodas tinka tik plonam ledui. Sujungus palydovinių šiluminės spinduliuotės jutiklių matavimų duomenis su ledo dangos termodinaminiais modeliais galima apskaičiuoti ledo storio augimą iki maždaug 2,8 m storio.

Siekiant užtikrinti ledo dangos stebėjimų tęstinumą svarbu, kad naujos planuojamos palydovų misijos būtų tęstinės ir palydovai bent kurį laiką orbitoje būtų kartu – taip būtų galima užtikrinti skirtingų jutiklių duomenų palyginimą ir kalibravimą.

✓ KLAUSIMAI IR UŽDUOTYS

- Kaip apskaičiuojamas normalizuotas sniego skirtumo indeksas (NDSI) ir ką jis parodo?
- Kodėl vandens atsargoms sniege nustatyti dažniausiai naudojamas pasyviųjų mikrobangų jutiklių 19 GHz ir 37 GHz signalo dažnių skirtumas?
- Kaip naudojant lidaro duomenis galima apskaičiuoti sniego dangos storį?
- Kas lemia sintetinės apertūros radarų (SAR) siunčiamo signalo išsklaidymą sniego dangoje?
- Kodėl ledą su priemaišomis nustatyti iš dirbtinių Žemės palydovų yra sunkiau nei švarų?
- Kokiai kriosferos daliai stebėti naudojamas NIR / SWIR signalo santykis?
- Kodėl norint nustatyti ledynų tūrio pokyčius reikalingi Žemės paviršiaus skaitmeniniai reljefo modeliai (DEM)?
- Ką parodo SAR interferogramos juostelių tankumas ledynuose?
- Kokia ledo savybė leidžia atskirti sezoninį jūros ledą nuo daugiamečio 37 GHz dažnio pasyviųjų mikrobangų radiometrų signalo vaizduose?

NAUDOTA LITERATŪRA

- Andreassen, L.M., Paul, F., Kääb, A. & Hausberg, J.E. (2008). LANDSAT-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier since the 1930s. *The Cryosphere*, 2, 131–145.
- Bolch, T., Pieczonka, T., Benn, D.I. (2011). Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *The Cryosphere*, 5, 349–358.
- Chang, A.T.C., Foster, J.L., Hall, D.K. (1987). Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters. *Annals of Glaciology*, 9, 39–44.
- CPOM (2019). *Arctic Sea ice thickness maps* [žiūrėta 2019-12-20]. Prieiga internete: <http://www.cpom.ucl.ac.uk/csopr/science.html>
- Deems, J.S., Painter, T.H., Finnegan, D.H. (2013). LiDAR measurements of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59, 215, 467–479.
- Delfto technologijos universitetas (2020). *Synthetic aperture radar interferometry* [žiūrėta 2020-06-23]. Prieiga internete: <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/geoscience-remote-sensing/research/remote-sensing/synthetic-aperture-radar-interferometry/>
- Foster, J., Chang, A.T.C., Hall, D. (1997). Comparison of snow mass estimates from a prototype passive microwave snow algorithm, a revised algorithm and a snow depth climatology. *Remote Sensing of Environment*, 62, 2, 132–142.
- Hall, D. K., Martinec, J. (1985). *Remote Sensing of Ice and Snow*. London, New York: Chapman & Hall.
- Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 54, 127–140.
- Hallikainen, M., Halme, P., Lahtinen, P., Pulliainen, J. (2003). Combined active and passive microwave remote sensing of snow in Finland. 2003 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, 2, 830–832.
- Lee, S. M., Sohn, B. J., Kim, S. J. (2017). Differentiating between first year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave retrieved ice emissivities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 5097–5112.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation. (7th edition)*. USA: Wiley.

- Luojus, K., Pulliainen, J., Takala, M., Moisander, M., Cohen, J., Ikonen, J., Lemmetyinen, J. (2017). *Algorithm theoretical basis document snow water equivalent collection 5km northern hemisphere (version 1)* [žiūrėta 2019-12-20]. Prieiga internete: https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS2_ATBD_SWE-NH-5km-V1_I1.01.pdf
- Nagler T., Rott, H., Hetzenecker, M., Wuite, J., Potin, P. (2015). The Sentinel-1 mission: new opportunities for ice sheet observations. *Remote Sensing*, 7, 9371–9389.
- Nagler T., Rott H., Ripper E., Bippus G., Hetzenecker M. (2016). Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8, 348.
- NSIDC (2019). *Overview of ice condition in Arctic sea on September 2019* [žiūrėta 2019-12-20]. Prieiga internete: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2019/10/>
- Niu, G.-Y., Seo, K.-W., Yang, Z.-L. et al. (2007). Retrieving snow mass from GRACE terrestrial water storage change with a land surface model. *Geophysical Research Letters*, 34, L15704.
- Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J.-P., Koskinen, J., Bojkov, B. (2011). Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115, 12, 3517–3529.
- Tedesco, M. (2003). *Microwave remote sensing of snow*. PhD Thesis, Institute of Applied Physics Carrara, Firenze, Italy.
- Tedesco, M. (2015). *Remote Sensing of the Cryosphere*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated.

TERMINŲ ŽODYNAS

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS
Artimoji infraraudonoji spinduliuotė (angl. <i>NIR – near infrared</i>)	Elektromagnetinė spinduliuotė, kurios bangos ilgis šiek tiek didesnis nei regimosios šviesos ir svyruoja maždaug nuo 0,7 iki 2 μm .
Atgalinė sklaida (angl. <i>backscatter</i>)	1) procesas kurio metu iki 25 % Saulės spinduliuotės debesų yra atspindima arba išsklaidoma atgal į kosmosą. 2) radaro signalo dalis kuri nuo objekto atsispindi tiesiai į radaro anteną. Atgalinio atspindžio intensyvumas parodo kokios yra objekto atspindžio savybės.
Atspindys (angl. <i>reflection</i>)	Nuo objekto ar paviršiaus sugrįžtančios šviesos ar garso bangos. Jei paviršius yra plokščias, tuomet atspindys yra veidrodinis – šviesos atspindžio kampas yra toks pat kaip ir kritimo kampas tik priešinga kryptimi. Jei paviršius yra šiurkštus tuomet atspindys yra difuzinis – šviesa atspindima skirtingais kampais visomis kryptimis.
Atspindžio bangos forma (angl. <i>waveform</i>)	Grįžtančio radaro (arba lidaro) signalo grafiko forma, kuri parodo kaip grįžtanti energija kinta laike.
Augalijos lapų ploto indeksas (LAI) (angl. <i>leaf area index, LAI</i>)	Nuotoliniais būdų nustatomas indeksas, kuris parodo kokį plotą ant Žemės paviršiaus vieneto užima augalijos lapai. Tai santykis tarp viršutinės lapų dalies ploto ant medžių lajos, bei ploto tarp Žemės paviršiaus po laja.
Azimutas (angl. <i>azimuth</i>)	Kryptis, išreikšta laipsniais pagal tikrąją šiaurę, kur turėtų būti nukreipta antena norint priimti palydovo signalą (kompaso kryptis). Azimutas matuojamas pagal laikrodžio rodyklę.
Banga (angl. <i>wave</i>)	Fizikoje, tai serija impulsų kurie sklinda oru ar kita terpe ir perneša šilumą, šviesą, garsą ir pan.
Bangos ilgis (angl. <i>wavelength</i>)	Vienos bangos periodo atstumas (ilgis tarp bangos pasikartojimo taškų).
Bendrosios saulės spinduliuotės prietaka (angl. <i>total solar irradiance</i>)	Visų bangų ilgių Saulės energijos prietaka į ploto vienetą Žemės atmosferos viršuje. Matuojama statmenai Saulės spinduliams. Saulės konstanta yra vidutinis bendrosios Saulės spinduliuotės prietakos dydis vieno astronominio vieneto (AU) nuotoliu nuo Žemės.
Besileidžiančios orbitos mazgas (angl. <i>descending node</i>)	Taškas, kuriame palydovas judėdamas iš šiaurės į pietus, kerta Žemės pusiaujo plokštumą.
Dažnis (angl. <i>frequency</i>)	Ciklų (arba jo dalių) skaičius per sekundę. $F=1/T$, kur T yra vieno ciklo trukmė išreikšta sekundėmis.
Deklinacija (angl. <i>declination</i>)	Kampas tarp Žemės pusiaujo ir palydovo. Šiaurėje kampas teigiamas, pietuose – neigiamas.

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS
Elektromagnetinė banga (angl. <i>electromagnetic wave</i>)	Spinduliuotės (kuri gali būti ir fotonai, ir bangos) perdavimo būdas. Elektromagnetinės bangos susidaro kai elektros krūvis pakeičia savo kryptį. Visos elektromagnetinės bangos keliauja šviesos greičiu nepriklausomai nuo bangos dažnio.
Elektromagnetinė spinduliuotė (angl. <i>electromagnetic radiation</i>)	Tai energija sklindanti besikeičiančiame elektromagnetiniame lauke bangų pavidalu. Elektromagnetinė spinduliuotės savybės priklauso nuo bangos ilgio (arba dažnio), pavyzdžiui: Saulės šviesa ir radijo bangos.
Elektromagnetinis spektras (angl. <i>electromagnetic spectrum</i>)	Visų elektromagnetinių bangų diapazonas, kuriame spinduliuojama energija (arba dažnis) yra pateikiama nuo ilgiausių iki trumpiausių bangų. Palydoviniai prietaisai fiksuoja šią energiją, tačiau jie gali išmatuoti tik maža dalį viso elektromagnetinių spektro. Elektromagnetinis spektras dažniausiai skaidomas į 7 dalis: radijo bangas, mikrobangas, infraraudonąją spinduliuotę, regimąją šviesą, ultravioletinę spinduliuotę, Rentgeno spinduliuotę ir gama spinduliuotę.
Geostacionari (geosinchroninė) orbita (angl. <i>geostationary</i> arba <i>geosynchronous</i>)	Taip vadinama orbita, kurioje palydovas visą laiką yra beveik toje pačioje vietoje (stacionarus) lyginant su besisukančiu Žemės rutuliu. Palydovas skrieja aplink Žemę maždaug 35,790 km atstumu. Esant tokiam atstumui, palydovas apskrieja savo orbitą beveik tokiu pačiu greičiu, koku sukasi žemė (23 val. 56 min 04 s).
Hiperspektrinis (angl. <i>hyperspectral</i>)	Taip vadinamas prietaisas, kuris gali stebėti šimtus ar tūkstančius elektromagnetinių bangų ruožų. Vaizdas gaunamas iš tokių prietaisų taip pat vadinamas hiperspektriniu.
Ilgabangė spinduliuotė (angl. <i>longwave radiation</i>)	Šiluminė spinduliuotė, kurios bangos ilgis didesnis nei 4 μm ir kurią natūraliai skleidžia nuo Saulės spinduliuotės išilęs Žemės paviršius bei atmosfera.
Infraraudonoji spinduliuotė (angl. <i>infrared radiation</i>)	Elektromagnetinio spektro dalis, kurios bangos ilgesnės nei regimosios spinduliuotės ir trumpesnės nei mikrobangų. Infraraudonoji (IR) spinduliuotė svyruoja tarp 0,7 ir 1000 μm. Palydoviniai IR prietaisai fiksuoja Žemės paviršiaus ar atmosferos natūraliai skleidžiamą ir atspindėti spinduliuotę. Tolimoji IR spektro dalis naudojama Žemės atmosferos ir paviršiaus temperatūrai nustatyti, bei vandens garų ir kitų atmosferos sudedamųjų dujų stebėsenai. Kadangi IR spektre informacija yra susijusi su kūnų temperatūra, naudojant šį spektrą galima gauti informaciją tiek dienos, tiek nakties metu.
Jutiklis (angl. <i>sensor</i>)	Prietaisas kuris pakeičia krintančią spinduliuotę į išvesties (dažniausiai elektrinį) signalą. Palydovuose jutikliai surenka skirtingose elektromagnetinio spektro dalyse iš Žemės sklindančią ar atspindėtą spinduliuotę ir paverčia ją į skaitmeninę informaciją.
Kylančios orbitos mazgas (angl. <i>ascending node</i>)	Taškas, kuriame palydovas judėdamas iš pietų į šiaurę, kerta Žemės pusiaujo plokštumą.

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS
Lazeris (angl. <i>laser – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)	Tai aktyvus prietaisas kuris sukuria šviesos pulsus, kurie yra koherentiški (t. y. to paties bangos ilgio, fazės ir poliarizacijos).
Lidas (angl. <i>lidar – Light Detection and Ranging</i>)	Aktyvus nuotolinio matavimo prietaisas, kuris susideda iš lazerio (siųstuvo), optinio teleskopo (imtuvo) ir elektroninės duomenų dorojimo įrangos. Lidaro veikimas grindžiamas optine lazerio spinduliuotės ir tiriamo objekto (terpės) sąveika. Šviesos pulsai kartu su kita surinkta nuotoline informacija leidžia sugeneruoti tikslią trimatę informaciją apie Žemės paviršiaus formas bei kitas paviršiaus ir atmosferos savybes.
Matymo laukas (angl. <i>FOV - field of view</i>)	Prietaiso skanavimo arba fiksavimo intervalas išreikštas geometriniais laipsniais.
Mikrobangos (angl. <i>microwave</i>)	Elektromagnetinės spinduliuotės dalis, kurios bangos ilgis svyruoja tarp 1 cm ir 1 m.
Nadyras (angl. <i>nadir</i>)	Taškas ant Žemės paviršiaus tiesiai po palydovo skrydžio linija (priešingas taškas zenitui).
Nuotoliniai matavimai (angl. <i>remote sensing</i>)	Technologija, kai informacija apie objektą ar reiškinį yra gaunama neturint jokio tiesioginio fizinio kontakto su juo. Nuotoliniais metodais informacija apie Žemę ir aplinką yra surenkama per atstumą. Nuotoliniai matavimai nėra vien tik matavimai iš dirbtinių Žemės palydovų, tai ir fotografija, video kameros, bepiločiai orlaiviai ir pan.
Optinis storis (angl. <i>optical thickness</i> arba <i>optical depth</i>)	Vertikalaus medžiagos ar terpės stulpelio masė sugerianti arba spinduliuojanti energiją. Optinis gylis dar dažnai naudojama apibūdinti lygi, kuriuo debesys blokuoja šviesą. Optinis gylis priklauso nuo fizinės struktūros (kristalų, lašelių ir jų dydžio, formos ir koncentracijos), bei vertikalaus debesų storio.
Orbitos periodo mažėjimas (angl. <i>period decay</i>)	Palydovo greičio orbitoje mažėjimas dėl atmosferos trinties ir gravitacijos poveikio. Dėl orbitos periodo mažėjimo palydovas galiausiai nukrenta ant Žemės paviršiaus arba sudega atmosferoje. Šis parametras tiesiogiai veikia palydovo vidutinį judėjimo greitį.
Orbitos plokštuma (angl. <i>orbital plane</i>)	Įsivaizduojama plokštuma kurioje telpa dirbtinio Žemės palydovo orbita. Orbitos plokštuma kerta Žemės centrą.
Orbitos polinkis (angl. <i>inclination</i>)	Palydovas orbitos, kuri tiksliai atitinka Žemės pusiaujo plokštumą, polinkio kampas yra 0°. Kai palydovo orbita kerta Žemės polių, jos polinkio kampas yra 90°. Kampas matuojamas prieš laikrodžio rodyklę, todėl visai įmanoma, kad orbitos polinkio kampas būtų didesnis nei 90°. 180° polinkio kampas reikštų, kad palydovas juda pusiaujo plokštuma, tačiau priešinga kryptimi nei sukasi Žemė. Kai kurie palydovai Saulei sinchroninėje orbitoje turi 98° polinkio kampą. Palydovai skirti Saulės stebėjimams skrieja arčiau pusiaujo, dažnai maždaug 28° polinkio kampu. Daugelis meteorologinių palydovų skrieja dideliu polinkio kampu, kad būtų galima gauti informaciją apie orus iš viso pasaulio.

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS
Pasyvieji mikrobangų prietaisai (angl. <i>passive microwave</i>)	Prietaisai kurie fiksuoja natūraliai Žemės paviršiaus skleidžiamą ar atspindėjusią mikrobangų spinduliuotę. Žemės paviršius skleidžia labai nedidelius kiekius mikrobangų, o objektų mikrobangų spindulinė geba priklauso ne tiek nuo temperatūros, kiek nuo fizinių savybių (dalelių dydžio, dielektrinės konstantos).
Poliarinė orbita (angl. <i>polar orbit</i>)	Orbita, kurios polinkio kampas artimas 90 laipsnių, ir kiekvienos orbitos metu palydovas praskrenda virš abiejų polių. Poliarinės orbitos palydovai skrenda maždaug 650–950 km aukštyje.
Progradinė orbita (angl. <i>prograde orbit</i>)	Orbita kurioje dirbtiniai Žemės palydovai sukasi ta pačia kryptimi kaip ir Žemė (iš vakarų į rytus).
Radaro interferometrija (angl. <i>radar interferometry</i>)	Metodas, kuris naudoja fazės skirtumus tarp dviejų radaro signalų, užfiksuotų skirtingu laiku, ir padeda nustatyti Žemės paviršiaus pokyčius. Naudojant interferometriją galima nustatyti Žemės paviršiaus poslinkius po Žemės drebbėjimų, nuošliaužas, ledynų judėjimą.
Radiometras (angl. <i>radiometer</i>)	Prietaisas kuris gali kiekybiškai išmatuoti elektromagnetinę spinduliuotę. Dirbtiniai Žemės palydovai gali turėti radiometrus kurie fiksuoja spinduliuotę sklindančią nuo įvairių Žemės paviršių: dirvos, augalijos, sniego, ledo, vandens.
Regimasis spektras (angl. <i>visible</i>)	Elektromagnetinė spinduliuotė, kurią gali užfiksuoti žmogaus akis, bangos ilgis svyruoja maždaug tarp 0.4 ir 0.7 μm .
Rentgeno spinduliuotė (angl. <i>x-ray</i>)	Trumpos elektromagnetinės bangos kurių bangos ilgis svyruoja nuo 0.01 – 10 nm (nanometrų).
Retrogradinė orbita (angl. <i>retrograde orbit</i>)	Orbita kurioje dirbtiniai Žemės palydovai sukasi iš rytų į vakarus, t. y. priešinga kryptimi nei Žemė.
Ryšio temperatūra (angl. <i>brightness temperature</i>)	Kūno šiluminės energijos spinduliuotės intensyvumo matas. Jis išreikštas kaip temperatūra nes spinduliuotės intensyvumas yra tiesiogiai susijęs su spinduliuojančio kūno paviršiaus temperatūra.
Saulės atspindys (angl. <i>sunlint</i>)	Tai Saulės atspindys nuo lygaus vandens paviršiaus palydoviniuose vaizduose. Jei vandenynai būtų lygūs kaip veidrodžiai, tai Saulės atspindys būtų nuolat matomas išilgai palydovo trajektorijos. Tačiau vandenynai niekada nėra visiškai lygūs ir Saulės atspindys gaunamas tarsi išsiliejęs ar išblukęs.
Saulės energinė apšvieta (angl. <i>insolation</i>)	Saulės spinduliuotės prietaka į horizontalaus paviršiaus vienetą, ant Žemės paviršiaus arba virš jo.
Saulei sinchroninė orbita (angl. <i>sun-synchronous</i>)	Orbita, kurioje palydovas visada turi pakankamai Saulės šviesos. Šioje orbitoje palydovas kerta pusiaują ir kitas platumas tokiu pačiu paros laiku. Pvz.: palydovas Saulei sinchroninėje orbitoje gali kirsti pusiaują dvylika kartų per dieną, tačiau visada 15:00 val. vietos laiku. Saulei sinchroninės orbitos plokštuma kiekvieną dieną turi pasisukti apie vieną laipsnį į rytus, kad atitiktų Žemės judėjimo aplink Saulę greitį.

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS																											
Saulės spinduliuotė (angl. <i>solar radiation</i>)	Energija gaunama iš Saulės vadinama saulės spinduliuote. Ši energija ateina skirtingomis formomis, tai ir regimoji šviesa, ir radijo bangos ir infraraudonoji, ultravioletinė bei rentgeno spinduliuotė.																											
Signalų susilpnėjimas (angl. <i>attenuation</i>)	Signalų stiprumo susilpnėjimas. Elektromagnetinių bangų signalų susilpnėjimą gali lemti signalų sugėrimas ir išsklaidymas atmosferoje (pvz.: dėl debesų, lietaus ar aerozolių).																											
Sintetinės apertūros radaras (SAR) (angl. <i>synthetic aperture radar, SAR</i>)	Matavimo technologija, kai panaudojant į judantį radarą jutikli nuo to pačio objekto grįžtantys signalai sugeneruojami aukštos skiriamosios gebos duomenys. Šis metodas tarsi sukuria ilgesnę priimančią anteną (sintetinę apertūrą), o tai padidina duomenų skiriamąją gebą. Grįžtančios radaro signalo fazė lemia skersinę skiriamąją gebą, o laiko skirtumas tarp išsiųsto ir priimto signalo lemia skiriamąją gebą išilgai orbitos trajektorijos.																											
SAR spektrinės juostos (angl. <i>SAR bands</i>)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>SAR SPEKTRINĖS JUOSTOS</th> <th>DAŽNIO INTERVALAS (GHz)</th> <th>BANGOS ILGIO λ INTERVALAS (cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P</td> <td>0,230–1</td> <td>130–30</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>1–2</td> <td>30–15</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>2–4</td> <td>15–7,5</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>4–8</td> <td>7,5–3,75</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>8–12,5</td> <td>3,75–2,40</td> </tr> <tr> <td>Ku</td> <td>12,5–18</td> <td>2,40–1,67</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>18–26,5</td> <td>1,67–1,13</td> </tr> <tr> <td>Ka</td> <td>26,5–40</td> <td>1,13–0,75</td> </tr> </tbody> </table>	SAR SPEKTRINĖS JUOSTOS	DAŽNIO INTERVALAS (GHz)	BANGOS ILGIO λ INTERVALAS (cm)	P	0,230–1	130–30	L	1–2	30–15	S	2–4	15–7,5	C	4–8	7,5–3,75	X	8–12,5	3,75–2,40	Ku	12,5–18	2,40–1,67	K	18–26,5	1,67–1,13	Ka	26,5–40	1,13–0,75
SAR SPEKTRINĖS JUOSTOS	DAŽNIO INTERVALAS (GHz)	BANGOS ILGIO λ INTERVALAS (cm)																										
P	0,230–1	130–30																										
L	1–2	30–15																										
S	2–4	15–7,5																										
C	4–8	7,5–3,75																										
X	8–12,5	3,75–2,40																										
Ku	12,5–18	2,40–1,67																										
K	18–26,5	1,67–1,13																										
Ka	26,5–40	1,13–0,75																										
Skaterometrai (angl. <i>scatterometer</i>)	Aukšto dažnio aktyvūs mikrobangų prietaisai, kurie siunčia energijos pulsus link vandens paviršiaus ir matuoja atgalinį atspindį. Šių prietaisų informacija naudojama nustatyti vėjo greitį ir kryptį virš vandenynų. Atgalinis signalas priklauso nuo vėjo sukeltų vandens paviršiaus šiurkštumo pokyčių.																											
Skenavimas (angl. <i>sampling</i>)	Procesas kurio metu duomenys (signalas) gaunami nenutrūkstamų, nuoseklių eilučių pavidalu.																											
Skenavimas skersai kelio (angl. <i>cross-track</i> arba <i>whisk broom scanning</i>)	Jutiklio skenavimo būdai, kai informacija renkama skersai palydovo judėjimo kryptčiai.																											
Skenavimas išilgai kelio (angl. <i>along-track</i> arba <i>pushbroom scanning</i>)	Jutiklio skenavimo būdai, kai informacija renkama išilgai palydovo judėjimo kryptties.																											
Skenuojantis radiometras (angl. <i>scanning radiometer</i>)	Sistema, kurią sudaro lęšiai, veidrodžiai bei jutikliai ir kuri skirta stebėti Žemę ar atmosferą. Skenuojantys radiometrai yra stabiliai ir ilgai veikiančios prietaisai.																											

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS
Skiriamoji geba (angl. <i>resolution</i>)	Dydis kuris nusako kokio dydžio objektai gali būti išskiriami. Palydoviniame vaizduose skiriamoji geba nusako kokio dydžio plotą apibūdina vienas pikselis. Kuo mažesnę plotą apibūdina pikselis tuo detalesnis gaunamas vaizdas.
Spektriniai požymiai (angl. <i>spectral signature</i>)	Kiekybinis objekto spektrinių savybių apibūdinimas esant tam tikram bangos ilgiui ar bangos ilgių intervalui.
Spektrinis ruožas (juosta) (angl. <i>band</i>)	1) Radiometrijoje tai apibrėžtas elektromagnetinio spektro intervalas, kuriame veikia prietaisai. Daugiaspektriuose prietaisuose matavimai atliekami keliose spektrinėse juostose. 2) Spektroskopijoje tai spektrinis intervalas, kuriame atmosferinės dujas sugeria (arba skleidžia) spinduliuotę. 3) Radaro matavimuose tai tam tikru bangos ilgių rinkinys arba intervalas.
Spektrinės juostos plotis (angl. <i>bandwidth</i>)	Visi prietaiso signalo dažniai arba dažniai kuriuos praleidžia sistema. Spektrinės juostos plotis yra vienas svarbiausių nuotolinių stebėjimo prietaiso parametrų ir jis lemia prietaiso skiriamąją gebą.
Spindulys (pluoštas) (angl. <i>beam</i>)	Koncentruotas energijos pulsas. Dėl palydovo judėjimo kiekvienas objekto elementas yra spindulio pasiekiamas tik tam tikra laiko tarpą, kuris vadinamas integracijos laiku.
Spindulio plotis (angl. <i>beamwidth</i>)	Antenos signalo priėmimo plotis matuojamas geometriniais laipsniais. Dažniausiai nekryptinės antenos pasižymi dideliu spindulio pločiu ir gali priimti signalus iš įvairių krypčių.
Spinduliuotė (angl. <i>radiation</i>)	Energijos perdavimas terpėje elektromagnetinėmis bangomis arba dalelėmis.
Spinduliuotės perdavimas (angl. <i>radiative transfer</i>)	Fizinis procesas kurio metu energija yra pernešama kaip elektromagnetinė spinduliuotė.
Spinduliavimo geba (angl. <i>emissivity</i>)	Santykis tarp kūno skleidžiamos spinduliuotės ir tokios pat temperatūros juodo kūno skleidžiamos spinduliuotės.
Srautas (angl. <i>flux</i>)	Medžiagos ar jėgos kiekis pereinantis per tam tikrą plotą per laiko vienetą.
Šiluminė infraraudonoji spinduliuotė (angl. <i>thermal infrared</i>)	Elektromagnetinė spinduliuotė, kurios bangos ilgis svyruoja maždaug tarp 3 iki 25 μm .
Taškas po palydovu (angl. <i>subsattellite point</i>)	Taškas po palydovu ant Žemės paviršiaus, kuris gaunamas nubrėžus tiesę nuo palydovo iki Žemės centro. Priklausomai nuo palydovo orbitos savybių taškas gali sutapti su nadyru arba ne.
Tolimoji infraraudonoji spinduliuotė (angl. <i>far infrared</i>)	Elektromagnetinė spinduliuotė, kurios bangos ilgesnės už šiluminę infraraudonąją spinduliuotę. Bangos ilgis 25-100 μm (mikrometrų).

TERMINAS	PAAIŠKINIMAS
Trumpabangė spinduliuotė (angl. <i>shortwave radiation</i>)	Tai spinduliuotė, kurios bangos ilgis mažesnis nei 4 μm. Tokio tipo spinduliuotė Žemę pagrinde pasiekia iš Saulės. Ji perneša energiją ir išildo Žemės paviršių.
Ultravioletinė spinduliuotė (angl. <i>ultraviolet radiation</i>)	Tai elektromagnetinio spektro dalis tarp 10 ir 400 nm. Nors ultravioletinė spinduliuotė sudaro tik apie 5 % visos energijos, kurią spinduliuoja Saulė, ji yra pagrindinis energijos šaltinis stratosferoje ir mezosferoje, bei vaidina svarbų vaidmenį šių atmosferos sluoksnių energijos balanse ir cheminės sudėties pokyčiuose.
Vaizdų priėmimo įrenginys (angl. <i>imager</i>)	Palydovinis prietaisas kuris stebi ir kartografuoja Žemės paviršių ir atmosferą. Jo duomenis galima paversti į vaizdus.
Vidurinioji infraraudonoji spinduliuotė (angl. <i>MIR – middle infrared</i>)	Elektromagnetinės spinduliuotės dalis tarp artimosios IR (NIR) ir šiluminės IR (TIR) sričių, atitinkanti maždaug 2 – 5 μm.
Zonduojantis radiometras (angl. <i>sounder</i>)	Radiometras kuris gali išmatuoti atmosferos temperatūros, vandens garų ir įvairių cheminių elementų pokyčius skirtinguose aukščiuose.
Žvalgos juosta (angl. <i>swath</i>)	Žemės ploto juosta, kurią skenuoja palydovo jutiklis skriedamas savo orbita tam tikrais laiko intervalais.
Žemės spinduliuotė (angl. <i>terrestrial radiation</i>)	Bendra ilgabangė (infraraudonoji) spinduliuotė, kurią skleidžia Žemė ir jos atmosfera.



Aplink Žemės planetą skrieja apie 150 dirbtinių palydovų, kurių pagrindinis tikslas yra Žemės paviršiaus ir joje vykstančių procesų stebėseną. Palydoviniai duomenys yra naudojami žemės ūkyje, miškininkystėje, aplinkosaugoje, teritorijų planavime ir daugelyje kitų sričių. Šis vadovėlis skirtas supažindinti su palydovinių stebėjimų pagrindais ir atsako į klausimus: Kokie būna Žemės stebėjimo palydovai? Ką matuoja palydovų jutikliai? Kaip palydoviniai duomenys paverčiami į žmonėms naudingą informaciją? Didelis dėmesys vadovėlyje skiriamas praktiniam palydovinių duomenų taikymui – tai leidžia geriau suprasti tiek palydovinių jutiklių veikimo principus, tiek natūralius procesus vykstančius Žemėje.

ISBN 978-609-07-0574-2 (skaitmeninis PDF)

Dailininkė Jurga Tėvelienė
Kalbos redagavimą atliko UAB „Kalbos kodas“
Maketuotoja Vida Vaidakavičienė

Vilniaus universiteto leidykla
Saulėtekio al. 9, LT-10222 Vilnius
info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
Knygos internete knygnas.vu.lt
Mokslo periodikos žurnalai zurnalai.vu.lt