

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE



Dmitrijs Bezrukovs

**SAULES AKTĪVO APGABALU ĪPATNĪBU
PĒTĪJUMI, IZMANTOJOT NOVĒROJUMUS
MIKROVIĻŅU DIAPAZONĀ**

PROMOCIJAS DARBA – PUBLIKĀCIJU KOPAS – KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē
Apakšnozare: astrofizika un fundamentālā astronomija

Rīga, 2013

Promocijas darbs izstrādāts Ventspils Starptautiskajā radioastronomijas centrā un Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātē laika posmā no 2001. gada līdz 2012. gadam.

Darba forma: publikāciju kopa fizikas nozarē, astrofizikas un fundamentālās astronomijas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: *Dr. phys.* vadošais pētnieks **Boriss Rjabovs**

Darba recenzenti:

1. vadošais pētnieks *Ph. D.* **Anatolijs N. Koržavins**, Krievijas Zinātņu akadēmijas Speciālā astrofiziskā observatorija, Sanktpēterburgas filiāle, Krievija
2. docents *Dr. phys.* **Valerijs G. Nagnibeda**, Sanktpēterburgas Universitātes V. Soboļeva astronomijas institūts, Krievijas filiāle, Krievija
3. vadošais pētnieks *Dr. phys.* **Ivars Šmels**, Ventspils Augstskolas Inženierzinātņu institūts, Ventspils Starptautiskais radioastronomijas centrs, Latvija

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2013. gada ____ . _____ Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas nozares specializētās promocijas padomes atklātā sēdē LU Fizikas un matemātikas fakultātē Rīgā, Zeļļu ielā 8, 213. telpā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkas daudzozaru bibliotēkā: datorika, juridiskā zinātne, teoloģija Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas nozares specializētās promocijas padomes

priekšsēdētājs _____ / *Dr. phys.* Laimons Začs/

sekretāre _____ /Laureta Buševica/

© Dmitrijs Bezrukovs, 2013

© Latvijas Universitāte, 2013

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs fizikas doktora grāda iegūšanai (apakšnozare – astrofizika un fundamentālā astronomija) veltīts pētījumiem par lielo izolēto Saules plankumu atmosfēras un Saules bipolāro aktīvo apgabalu magnētisko lauku īpatnībām, balstoties uz to mikroviļņu starojuma analīzi un Saules mikroviļņu starojuma spektropolarimetriskā kompleksa izstrādi, kas aktuāla Saules fizikas uzdevumu risināšanai.

Patlaban, pamatojoties uz analogiju ar koronālajiem caurumiem, lielie izolētie Saules plankumi tiek uzskatīti par vienu no iespējamiem Saules vēja avotiem. Darbā analizētas vairākas lielo izolēto Saules plankumu mikroviļņu starojumam raksturīgas īpatnības. Balstoties uz termiskā starojuma mehānismu attiecību analīzi, pierādīts, ka izolēto plankumu starojuma īpatnību cēlonis ir pazeminātais plazmas blīvums virs tiem. Skaitliskā modelēšana ļāva tieši novērtēt atmosfēras parametrus virs izolētiem plankumiem un parādīt galvenās mikroviļņu starojuma sakarības pie pazemināta plazmas blīvuma tālākai izolēto plankumu novērojumu interpretācijai.

Precīza kvantitatīva koronālo magnētisko lauku mērīšana, kas nepieciešama, lai novērtētu enerģētiskās sakarības Saules aktīvajos apgabalos un prognozētu to uzliesmošanas aktivitāti, joprojām paliek līdz galam neatrisināta problēma. Darbā ir pilnveidota koronālo magnetogrammu veidošanas tehnika, pamatojoties uz mikroviļņu starojuma polarizācijas inversijas analīzi kvazišķērsvirziena izplatīšanās apstākļos. Izmantotā metode ļāva veidot divdimensiju un trīsdimensiju sadalījumu magnētiskajam laukam koronā virs vairākiem bipolāriem aktīvajiem Saules apgabaliem.

Promocijas darba ietvaros ar Ventspils Starptautiskā radioastronomijas centra radioteleskopu RT-32 tika īstenots un testēts spektropolarimetrisko novērojumu komplekss Saules mikroviļņu starojuma novērojumiem viļņu garumu diapazonā no 3,2 līdz 4,7 cm ar augstu spektrālo izšķirtspēju. Apspriesti un izšķirti vairāki aktuāli uzdevumi Saules fizikas nozarē, kuru risināšanai palīdzēs spektropolarimetriskā kompleksa novērojumi ar Ventspils Starptautiskā radioastronomijas centra radioteleskopu RT-32.

ABSTRACT

The cumulative doctoral thesis for the acquisition of Ph.D. in Physics degree (subsection – Astrophysics and Fundamental Astronomy) is devoted to the research of atmospheric features of large isolated sunspots and the magnetic field of bipolar active regions of the Sun on the bases of the analysis of their microwave emissions and the development of spectral polarimetric observations of microwave emissions of the Sun for solving the actual tasks of the solar physics.

The large isolated sunspots were supposed to be as one of the possible sources of the solar wind. This work contains the analysis of some distinguishing characteristics of microwave emissions of a number of large isolated sunspots. Based on the analysis of correlations of thermal emission mechanisms it is being proved that the reason of these unique features is the reduced plasma density above the large isolated sunspots. The numerical simulation allowed us to evaluate the atmosphere parameters above these sunspots and to provide the basic dependency of microwave emissions at a low plasma density for further interpretations of their observations.

A precise quantitative measurement of coronal magnetic fields needed for assessments of energy correlations in the active areas of the Sun and the prediction of their flare activity still remain an incompletely solved problem. The coronal magnetography drawing technique based on the analysis of the microwave emission polarization inversion during the quasi transverse propagation was refined in the work. The applied method allow us to build 2D and 3D distributions of the magnetic field in the corona above a number of bipolar active regions of the Sun.

A special set of hardware and software for the solar spectral polarimetric observations within the wavelength range of 3.2–4.7 cm with a high spectral resolution was implemented and tested on the RT-32 radio telescope of the Ventspils International Radio Astronomy Center. A number of important solar physics problems are expected to be solved by the spectral polarimetric observations of the Sun using the RT-32 radio telescope.

CONTENTS

Anotācija	3
Abstract	4
1. Ievads	6
1.1. Darba tēmas aktualitāte un pamatojums	6
1.2. Darba mērķi un uzdevumi	7
1.3. Darba zinātniskā novitāte	8
1.4. Autora ieguldījums	9
1.5. Promocijas darba struktūra	10
2. Atmosfēras blīvuma pētījumi virs lieliem izolētiem Saules plankumiem	11
2.1. Hipotēze par pazeminātu atmosfēras blīvumu virs lieliem izolētiem Saules plankumiem	11
2.2. Lielu izolētu Saules plankumu īpatnības	12
2.3. Izolēto Saules plankumu mikroviļņu starojuma novērojumu analīze	13
2.4. Izolētā Saules plankuma mikroviļņu starojuma skaitliskā modelēšana	16
2.5. Izolētā Saules plankuma mikroviļņu starojuma modelēšana pazeminātā atmosfēras blīvumā	21
2.6. Starojuma novērojumu interpretācija viļņa garumam 1,76 cm NOAA 10735 un 10743	24
3. Bipolāro aktīvo apgabalu koronālā magnētiskā lauka mērīšana	27
3.1. Koronālās magnetogrāfijas metode, pamatota ar starojuma polarizācijas inversijas analīzi kvazišķērsvirziena izplatīšanas apstākļos	27
3.2. Cirkulārās polarizācijas pakāpju karšu normalizācijas metode	29
3.3. Trīsdimensiju koronālā magnetogrāfija	32
4. Saules mikroviļņu starojuma spektropolarimetriskie novērojumi ar VSRC radioteleskopu RT-32	34
4.1. Saules mikroviļņu starojuma spektropolarimetrisko novērojumu nepieciešamības pamatojums	34
4.2. Pašreizējais Saules spektropolarimetrisko novērojumu stāvoklis	35
4.2. Daudzkanālu spektropolarimetriskais komplekss Saules mikroviļņu novērojumiem, kas realizēts ar VSRC radioteleskopu RT-32	37
4.3. Saules mikroviļņu starojuma spožuma temperatūras karšu atjaunošana un „tīrīšana”	40
4.4. Saules fizikas uzdevumi, uz kuriem var orientēt Saules spektropolarimetriskos novērojumus ar VSRC radioteleskopu RT-32	45
5. Rezultātu kopsavilkums	46
6. Promocijas darbā iekļautās autora publikācijas	47
7. Autora publikācijas par citām tēmām	48
8. Ziņojumi un stenda referāti zinātniskajās konferencēs	49
9. Literatūra	50

1. IEVADS

1.1. Darba tēmas aktualitāte un pamatojums

Saules aktivitātes parādības un Saules–Zemes saites mūsdienās ietekmē praktiski visas iespējamās cilvēces darbības sfēras. Visas zinātnes par Zemi – meteoroloģija, klimatoloģija, ģeofizika, ģeoloģija, tektonika, bioloģija, ekoloģija u. c. – pēta Saules–Zemes saites ietekmi. Saules vējš un elektromagnētiskais starojums veido Zemes magnetosfēru un jonosfēru, tieši ietekmē klimata izmaiņas un biosfēru. Saules uzliesmojumi un to radītās korpuskulārās plūsmas izraisa magnētiskās vētras, tādējādi traucējot īsviļņu radiosakarus, navigācijas sistēmu darbību, rada traucējumus elektroenerģētisko sistēmu darbībā, ietekmē kosmisko aparātu izturību un daudzas citas jomas. Ir pierādīts, ka Saules aktivitātes parādības aktivizē daudzus ģeofiziskus un tektoniskus procesus, pat ja tos tieši neietekmē.

Vēl daudzas desmitgades būs aktuāli pētīt Saules aktivitātes mehānismus un likumsakarības, prognozēt Saules parādības un to ietekmi uz Zemi. Promocijas darbā, pamatojoties uz Saules mikroviļņu starojuma novērojumu analīzi, izpētītas atmosfēras un tai raksturīgo aktīvo apgabalu magnētiskā lauka īpatnības un ar radioteleskopu RT-32 Ventspils Starptautiskajā radioastronomijas centrā (VSRC) novēroti Saules mikroviļņi, lai efektīvi risinātu aktuālus Saules fizikas uzdevumus un prognozētu Saules aktivitāti.

Galvenā nozīme Saules aktivitātes parādībās ir magnētiskā lauka un Saules atmosfēras aktīvo procesu mijiedarbībai. Šīs mijiedarbības izpēte ir viens no Saules fizikas pamatvirzieniem. Pagaidām vēl nav pietiekami izpētīta magnētiskā lauka un Saules atmosfēras mijiedarbība hromosfērā, pārejas slānī un apakšējā koronā. Šiem apgabaliem ir raksturīgi lieli telpiski kinētiskās temperatūras un plazmas blīvuma gradienti un būtiskas atšķirības atmosfēras parametros virs mierīgas Saules un aktīvajiem apgabaliem. Aktīvo apgabalu magnētiskā lauka struktūra ir ievērojami komplicētāka nekā augšējā koronā, arī magnētiskajam laukam ir lieli telpiski gradienti. Hromosfērā, pārejas slānī un apakšējā koronā rodas un attīstās strāvas slāņi, kā arī veidojas plazmas plūsmas un uzliesmojumu parādības.

Pēdējā laikā ir parādījusies interese par lieliem izolētiem Saules plankumiem kā Saulei raksturīgām struktūrām, kurās notiek plazmas paātrināšanās un veidojas plūsma, kas rada Saules vēju. Promocijas darbā pētīts starojuma mehānismu samērs atmosfērā virs lieliem izolētiem Saules plankumiem un pierādīts pazemināts plazmas blīvums virs tiem. Skaitliski modelējot vienpolāru aktīvo apgabalu, kam ir pazemināta plazmas blīvuma mikroviļņu starojums, iegūti rezultāti, kas nepieciešami turpmākai izolēto plankumu pētījumu interpretācijai.

Koronālās magnetogrāfijas metožu precizēšana ir svarīga, lai varētu novērtēt enerģijas uzkrāšanos un atbrīvošanos Saules aktīvajos apgabalos un prognozēt uzliesmojumu aktivitāti. Saules augšējā koronā magnētiskā lauka un Saules atmosfēras mijiedarbību pārsvarā nosaka magnētiskā lauka „iesaldēšanās” pilnībā jonizētā plazmā. Augšējā korona magnētisko lauku ģeometriju un morfoloģiju var labi novērot ultravioletajā un optiskajā diapazonā, un tās ir pietiekami labi izpētītas. Savukārt magnētisko lauku indukcijas mērīšana visā apjomā virs aktīvajiem apgabaliem ir līdz galam neatrisināta problēma. Darbā aplūkots, kā veidotas divdimensiju un trīsdimensiju koronālās magnetogrammas virs bipolārajiem aktīvajiem apgabaliem, un koronālās magnetogrāfijas metodes praktiskās izmantošanas attīstības pamatā ir starojuma polarizācijas inversijas analīze kvazišķērsvirziena izplatījuma magnētiskajā laukā.

Saules virszemes radioastronomiskie novērojumi Zemes atmosfēras radio-caurspīdīguma logā joprojām ir galvenais tiešās kvantitatīvās informācijas avots par magnētiskā lauka un Saules atmosfēras plazmas mijiedarbību un vienīgā magnētiskā lauka tiešās mērīšanas iespēja. Augšējās hromosfēras, pārejas slāņa un apakšējās koronas īpatnību dēļ, plazmai mijiedarbojoties ar magnētisko lauku, tās starojums notiek samērā šaurā mikroviļņu starojuma diapazonā. Pilnas informācijas iegūšanai par starojumu visa interesējošā apgabala augstumā nepieciešams spektrāli (spektropolarimetriski) novērot Saules mikroviļņu starojumu ar augstu spektrālo izšķirtspēju. Šajā darbā īstenotais daudzkanālu spektropolarimetriskais komplekss 3,2–4,7 cm viļņu garuma diapazonam ar VSRC radioteleskopu RT-32 turpmāk nodrošinās Saules novērojumus, līdz ar to tiks atrisināti vairāki aktuāli uzdevumi saistībā ar magnētiskā lauka un plazmas mijiedarbību augšējā hromosfērā, pārejas slānī un apakšējā koronā un VSRC varēs atrasties mūsdienu Saules fizikas priekšgalā.

1.2. Darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir:

- 1) pētīt atmosfēras blīvuma sadalījumu virs lieliem izolētiem Saules plankumiem un tā īpatnības, balstoties uz Saules mikroviļņu starojuma un aktīvo apgabalu termiskā starojuma skaitliskās modelēšanas analīzi;
- 2) precizēt koronālo magnētisko lauku, kas atrodas virs bipolārajiem aktīvajiem apgabaliem, mērīšanas metodi, balstoties uz kvazišķērsvirziena izplatījuma aktīvo apgabalu magnētiskajā laukā, kas noteikts mikroviļņu starojuma polarizācijas inversijas analīzē;
- 3) ar VSRC radioteleskopu RT-32, kuram ir augsta spektrālā izšķirtspēja, īstenot un testēt Saules starojuma spektropolarimetrisko novērojumu daudzkanālu kompleksu 3,2–4,7 cm viļņu garuma diapazonā.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti vairāki uzdevumi.

- Izvēlēties novērojumu virkni par lieliem izolētiem Saules plankumiem ar raksturīgām atkārtotām īpatnībām. Izanalizēt izolēto plankumu

mikroviļņu starojuma novērojumus, aplūkot starojuma mehānismu korelāciju un novērtēt atmosfēras blīvumu virs tā. Parādīt, ka šāda veida aktīvajiem apgabaliem salīdzinājumā ar bipolārajiem aktīvajiem apgabaliem ir raksturīgs pazemināts atmosfēras blīvums.

- Sagatavot un testēt programmnodrošinājumu aktīvo apgabalu mikroviļņu starojuma skaitliskajai modelēšanai. Veikt izolēta plankuma starojuma skaitlisko modelēšanu atmosfēras parametru iespējamās vērtības noteikšanai, lai salīdzinātu ar izolēto Saules plankumu mikroviļņu starojuma novērojumiem. Izpētīt izolēto plankumu starojuma spožuma temperatūru atkarībā no pazemināta atmosfēras blīvuma.
- Izanalizēt atlasītu bipolāro aktīvo apgabalu virknes starojuma polarizācijas inversijas īpatnības, lai noteiktu apstākļus, kuros polarizācijas inversija rodas starojuma kvazišķērsvirziena izplatījumā, un veiktu koronālo magnētisko lauku indukcijas mērījumus. Sastādīt divdimensiju un trīsdimensiju koronālo magnētisko lauku sadalījumu virs atlasītajiem bipolārajiem aktīvajiem apgabaliem.
- Pamatot Saules mikroviļņu starojuma augstas telpiskās un spektrālās izšķirtspējas novērojumu nepieciešamību viļņu garuma centimetru diapazonā, apskatot vairākus Saules fizikas aktuālos uzdevumus, kurus varētu efektīvi atrisināt, pamatojoties uz Saules spektropolarimetriskiem novērojumiem ar VSRC radioteleskopu RT-32.
- Veikt tehniskos darbus daudzkanālu spektropolarimetra uzstādīšanai uz VSRC radioteleskopa RT-32, sagatavot Saules starojuma spektropolarimetrisko novērojumu 3,2–4,7 cm viļņu garuma diapazonā kompleksa programmnodrošinājumu un to testēt. Veikt Saules novērojumus un iegūt Stoksa I un V parametru divdimensiju karšu secenci vairākiem viļņu garumiem, kas piepilda Saules radionovērojumu lakūnu šajā diapazonā un novērošanas laikā.
- Analizēt divdimensiju karšu atjaunošanas un „tīrīšanas” metodes, lai novērtētu, cik atbilstoša un efektīva ir zināma un modificēto atjaunošanas metožu piemērošana Saules mikroviļņu starojuma divdimensiju kartēm, kas iegūtas ar VSRC radioteleskopu RT-32.

1.3. Darba zinātniskā novitāte

Pirmo reizi, balstoties uz mikroviļņu starojuma analīzi, ir pierādīts, ka plazmas blīvums virs lieliem izolētiem Saules plankumiem pazeminās salīdzinājumā ar bipolāri aktīviem apgabaliem, un ir iegūts tās plazmas blīvuma novērtējums, kas atrodas virs bipolāri aktīvajiem apgabaliem pārejas apgabala augstumā.

Skaitliskās modelēšanas rezultātā iegūts aktīvā apgabala, kas asociējas ar lielu izolētu Saules plankumu, mikroviļņu starojuma spožuma temperatūru novērtējums pazemināta plazmas blīvuma apstākļos, lai turpmāk varētu interpretēt izolēto plankumu novērojumus.

Ir īstenota un precizēta praktiskā metodika koronālā magnētiskā lauka trīsdimensiju izplatības noteikšanai, pamatojoties uz analīzi par Saules mikroviļņu starojuma polarizācijas divdimensiju normalizēto karšu savietošanu un starojuma polarizācijas inversijas kvazišķērsvirzienu izplatījuma apstākļos. Ir iegūtas koronālā magnētiskā lauka, kas atrodas virs bipolārajiem aktivajiem apgabaliem, izplatīšanās divdimensiju un trīsdimensiju kartes.

Viens no pirmajiem starp modernizējamiem un projektējamiem Saules radioteleskopiem īstenots un testēts programmaparatūras komplekss ar augstu spektrālo izšķirtspēju Saules mikroviļņu starojuma spektropolarimetrisko novērojumu 3,2–4,7 cm viļņu garuma diapazonā. Ir iegūtas Saules starojuma Stoksa I un V parametru divdimensiju karšu sekvences vairākiem viļņu garumiem 3,2–4,7 cm diapazonā ar spektrālo izšķirtspēju līdz 0,1 cm.

1.4. Autora ieguldījums

Promocijas darbā autors ir veicis vairākus uzdevumus.

- Pilnveidojis aktīvo apgabalu atmosfēras mikroviļņu starojuma skaitliskās modelēšanas algoritmu un sagatavojis tās programmnodrošinājumu. Veicis aktīvo apgabalu mikroviļņu starojuma skaitlisko simulāciju, lai pārbaudītu izolēto Saules plankumu starojuma novērojumu interpretācijas atbilstību. Ieguvis datus par izolēta plankuma starojuma spožuma temperatūru galvenajām izmaiņām atkarībā no iespējamiem atmosfēras parametriem, lai varētu interpretēt lielu izolētu plankumu turpmākos novērojumus. Uz spožuma temperatūru modeļu novērtējumu pamata veicis aktīvo apgabalu NOAA 10735, 10743 novērojumu interpretāciju 1,76 cm viļņa garumā un ieguvis novērtējumu par atmosfēras blīvumu pārejas slāņa augstumā.
- Precizējis koronālā magnētiskā lauka noteikšanas metodiku, kas balstīta uz polarizācijas inversijas analīzi mikroviļņu starojuma kvazišķērsvirziena izplatījuma apstākļos. Sastādījis bipolāro aktīvo apgabalu NOAA 9068, 9097, 9339, 9415 precizētas divdimensiju un trīsdimensiju koronālās magnetogrammas, pamatojoties uz novērojumu analīzi 5,2 cm viļņa garumā.
- Pilnveidojis uz VSRC radioteleskopa RT-32 uzstādītā daudzkanālu spektropolarimetra datu nolasišanas sistēmu 3,2–4,7 cm viļņu garuma diapazonam. Sagatavojis un testējis programmnodrošinājumu automatizēto Saules novērojumu nodrošināšanai un to apstrādei. Veicis vairākas Saules novērošanas sesijas, kuru laikā testējis spektropolarimetrisko novērojumu daudzkanālu kompleksu un ieguvis Saules mikroviļņu starojuma Stoksa I un V parametru divdimensiju karšu sekvences vairākiem viļņu garumiem ar spektrālo izšķirtspēju līdz 0,1 cm.

Darba autors ir līdzautors sešām publikācijām par promocijas darba tēmu, kā arī vēl divu publikāciju autors. Piedalījies daudzās starptautiskās konferencēs, kā arī Latvijas Universitātes konferencēs ar mutiskiem un stenda ziņojumiem.

1.5. Promocijas darba struktūra

Promocijas darbā ir apkopoti materiāli no 8 publikācijām citētajos avotos un 12 uzstāšanās reizēm un stenda referātiem starptautiskajās un LU konferencēs.

Pamatā darbs izstrādāts Ventspils Starptautiskajā radioastronomijas centrā un Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātē laika posmā no 2001. gada līdz 2012. gadam.

2. ATMOSFĒRAS BLĪVUMA PĒTĪJUMI VIRS LIELIEM IZOLĒTIEM SAULES PLANKUMIEM

2.1. Hipotēze par pazeminātu atmosfēras blīvumu virs lieliem izolētiem Saules plankumiem

Plazmas plūsmas veidošanās un paātrinājums Saules koronā, ko veido Saules vējš, ir viena no galvenajām problēmām mūsdienu Saules fizikā. Patlaban pierādīts, ka viens no šāda Saules vēja avotiem ir koronālie caurumi (e. g. Krieger et al. 1975, 1977, Zirker 1977, Altschuler et al. 1992, Cranmer 2002, 2009). Taču pēdējos gados pieaugusi interese par lielu izolētu Saules plankumu struktūras pētījumiem kā par iespējamu plazmas paātrinājuma un Saules vēja avotu (Tu & Zhou et al. 2005, Koutchimi & Le Piouffle 2008). Kaut arī izolēto plankumu struktūra šķietami ir salīdzinoši vienkārša, pēdējā laikā parādījusies tendence aplūkot tos kā īpašus struktūru un atsevišķu Saules aktivitātes izpausmju veidus.

Vairākkārt ir norādīts uz analogiju starp koronāriem caurumiem un lieliem izolētiem Saules plankumiem (e.g. Obridko & Shelting 1999, Bilenko 2005, Wang 2009). Koronāro caurumu un lielu izolētu Saules plankumu kopējās īpašības ir pārsvarā radiāli atvērtais magnētiskais lauks un pazeminātais plazmas blīvums salīdzinājumā ar biopolāri aktīviem apgabaliem. Pieņēmumi par pazeminātu plazmas blīvumu virs izolētiem Saules plankumiem ir izteikti arī agrāk (Grebinskij et al. 1998, Wilhelm 2006). Par pamatojumu šādiem pieņēmumiem kalpoja vairākkārt parādītais lielu izolētu Saules plankumu mikroviļņu ordinārās modas starojuma trūkums (depresija) uz viļņa garumiem, zemākiem par 2,4–2,5 cm salīdzinājumā ar ekstraordinārās modas starojuma un ar mierīgas Saules spožuma temperatūrām (Zlotnik 1968, Gelfreikh & Nefed'ev 1975, Nindos & Kundu et al. 2000). Starojuma ordinārās modas spožuma temperatūras, pēc novērojumiem ar *Nobeyama Radio Heliograph* (NoRH) uz viļņa garumu 1,76 cm, var sasniegt $3\text{--}4\cdot 10^3$ K, ja šajā viļņa garumā ir mierīgas Saules spožuma temperatūra $10\cdot 10^3$ K.

Mikroviļņu novērojumi ar augstu telpisko izšķirtspēju agrāk parādīja raksturīgu „gredzena” un „pakava” formu starojuma ekstraordinārajai modai, bet sarežģītu neregulāru formu ordinārajai (Kundu & Alissandrakis 1984, Vourlidis & Bastian 1996, Vourlidis et al. 1996, White 2004). Pazemināts ordinārās modas starojums šiem novērojumiem tika interpretēts vai nu kā žirrezonanses avota optiskā biezuma izmaiņas, ja mainās novērošanas leņķis (Gelfreikh & Lubyshev 1979, Vourlidis et al. 1997), vai kā aukstas un blīvas plazmas joslas pastāvēšana pārejas slānī vai koronā (Foukal 1976, Strong et al. 1984, Brosius & White 2004). Vairākos rakstos (Zlotnik et al. 1996, 1997) par novērojumiem ar augstu telpisko izšķirtspēju uz VLA parādīts, ka aukstas un blīvas plazmas iecirknim

jābūt lokalizētam plankuma centrā. Acīmredzami šīs interpretācijas neizskaidro starojuma ordinārās modas spēcīgai depresijai uz īsajiem viļņiem.

Parādīts arī, ka izolēto plankumu mikroviļņu starojuma ordinārās modas depresijas iecirkņi telpiski korelē ar pazemināta spožuma iecirkņus mīkstajā rentgena starojumā un paaugstinātas infrasarkanās He I absorbcijas līnijas spožuma hromosfērā (Brajša & Pohjolainen et al. 1994, MacQueen et al. 1998), kas arī ir raksturīgi plazmas hromosfēras un apakšējā korona pazeminātam blīvumam. Šis pašas starojuma īpašības raksturīgas koronas caurumiem un ir pamatojums analoģu procesu noteikšanai, kādi norisinās koronāros caurumos un lielos izolētos Saules plankumos. Šādas analogijas izveide pieļauj, ka lielos izolētos plankumos tāpat arī notiek plazmas paātrināšanās un tās izplūšana izplatījumā (Bilenko 2005).

2.2. Lielu izolētu Saules plankumu īpatnības

Turpmāk ar lieliem izolētiem Saules plankumiem sapratīsim un aplūkosim Saules plankumus, kuriem ir šādas īpatnības:

- blakus plankumam nav citu Saules plankumu tuvāk par 2 heliogrāfiskiem grādiem, plankuma ēna un pusēna ir simetriskas (alfa plankuma tips pēc *Mount Wilson* klasifikācijas), plankumu ietver flokulas ar pretēju magnētiskā lauka polaritāti;
- plankuma laukums nav mazāks par 250–300 m. d. p.;
- fotosfēras magnētiskā lauka maksimālā indukcija plankuma centrā nav mazāka par 2400–2500 Gs;
- plankums ir stabils un saglabājas divu un vairāku Saules apgriezīnu laikā. Uzliesmojumu aktivitātes praktiski nav visā novērojumu laikā.

Turpmākai aplūkošanai un analīzei izvēlēti raksturīgākie aktīvie apgabali:

- NOAA 10325 un 10735 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2003-04-03 un 2003-05-07 nākamajā apgriezīnā) (Bezrukov et al. 2011);
- NOAA 10351 un 10743 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2005-02-15 un 2005-03-14 nākamajā apgriezīnā) (Bakunina et al. 2008);
- NOAA 11289 un 11312 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2011-09-12 un 2011-10-11 nākamajā apgriezīnā) (Bezrukov et al. 2012).

Izvēlētajiem aktīvajiem apgabaliem raksturīgas neizmainītas fotosfēras magnētiskā lauka indukcijas, kuras norāda uz stabiliem starojuma apstākļiem un ļoti mazām plankumu izmēru un formas variācijām novērojumu perioda laikā.

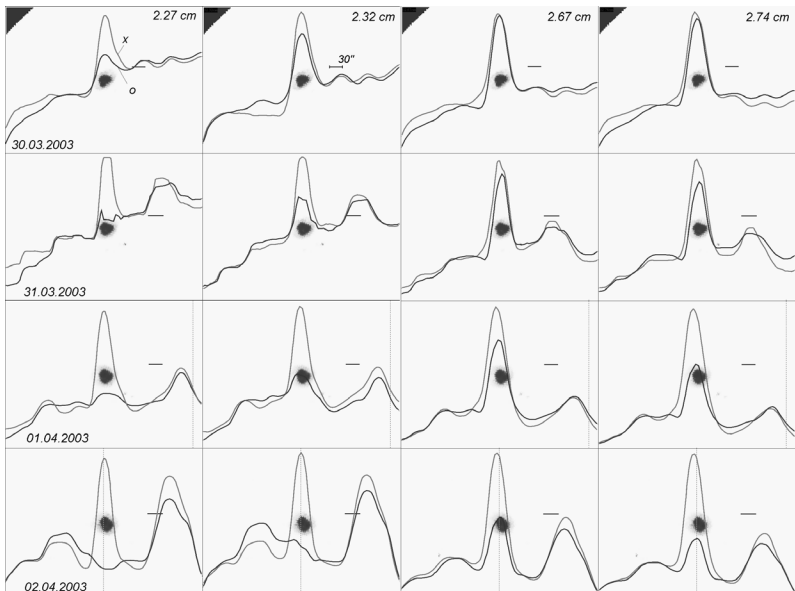
2.3. Izolēto Saules plankumu mikroviļņu starojuma novērojumu analīze

Analīzei izvēlētie aktīvie apgabali atklāj vairākas kopīgas mikroviļņu starojumam raksturīgas īpašības, kas norāda uz neparastiem starojuma apstākļiem atmosfērā virs tiem.

Aktīvo apgabalu NOAA10325 uz RATAN-600 spektrālie novērojumi parāda šādas īpatnības (2.1. att.):

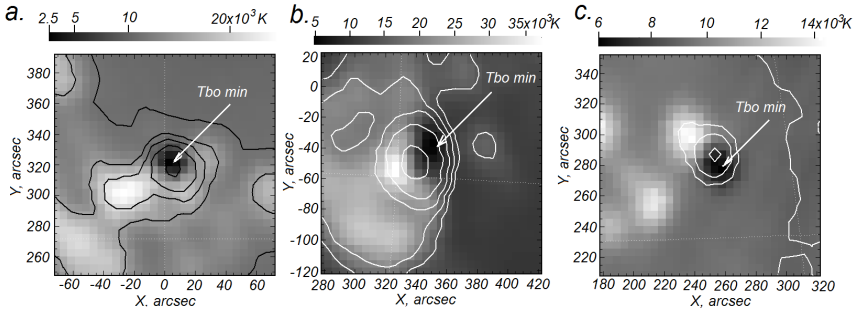
- neparasti zema ordinārās modas lokālā avota starojuma spožuma temperatūra par $2,4 \div 2,6$ cm zemākos viļņu garumos, kad lokālais avots ir tuvu centrālajam Saules meridiānam;
- lokālā avota ordinārās modas starojuma spožuma temperatūras strauja paaugstināšanās par $2,4 \div 2,6$ cm lielākos viļņu garumos;
- ordinārās modas starojuma spožumu temperatūras, tās novērojot uz heliogrāfiskiem garumiem vairāk nekā par 50 grādiem, palielinās līdz ekstrordinārās modas starojuma līmenim visos viļņu garumos.

NOAA 10351 un NOAA 11289 novērojumi ar RATAN-600 parāda analogiskas īpatnības.



2.1. att. 1D skenējums NOAA10325 uz RATAN-600 ekstrordināra moda (gaiša linija) un ekstrordināra moda (tumša linija) četriem viļņu garumiem 2,24, 2,32, 2,67, 2,76 cm un heliogrāfiskiem garumiem $\Theta = -49,5^\circ$ (30-03-2003), $-36,7^\circ$ (31-03-2003), $-23,8^\circ$ (01-04-2003), $-10,5^\circ$ (02-04-2003). Skenējumi savienoti ar plankuma attēlu baltā krāsā pēc SOHO novērojumiem (Bezrukov et al. 2011)

Novērojumi uz viļņa garumu 1,76 cm NoRH izvēlētajos aktīvajos apgabalos pie centrālā meridiāna plankuma robežās demonstrē raksturīgākās vietas ar pazeminātu starojumu ordinārai modai („dark patch”) (2.2. att.). Minimālā ordināras modas starojuma spožuma temperatūra šo apgabalu centros var sasniegt $3\div 4\cdot 10^3$ K. Maksimālajā spožuma temperatūrā ekstrordinārai modai ir vismaz divas reizes augstākas un mierīgas Saules spožuma temperatūras šajā viļņa garumā – $10\cdot 10^3$ K.

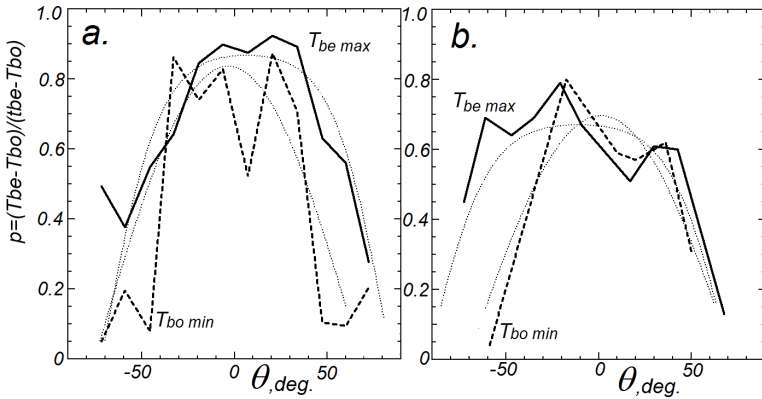


2.2. att. Savienotie ordinārās modas spilgtuma temperatūru telpiskie sadalījumi uz viļņa garumu 1,76 cm un ekstrordināras (kontūra) pēc novērojumiem ar NoRH NOAA 10325 (a), 10735 (b), un 11312 (c). Ar bultiņām norādīti starojuma ordinārās modas minimumi („dark patch”)

Minimālās spožuma temperatūras ordināras modas starojuma telpiskā lokalizācija vispārīgā gadījumā nesakrīt ar maksimālo spožuma temperatūru ekstrordināras modas starojumam un ar plankuma ģeometrisko centru. Tas ļauj noteikt plankuma robežas vismaz diviem tuvu esošiem apgabaliem ar dažādiem starojuma mehānismu samēriem.

Ordinārās modas starojuma spožuma temperatūra uz viļņa garumu 1,76 cm palielinās ar izolētā plankuma novērošanas leņķa palielinājumu. Polarizācijas pakāpes izmaiņas atkarībā no novērojuma leņķiem ļauj spriest par starojuma mehānismu samēru (2.3. att.) (e.g. Borovik et al. 1975, Bakunina et al. 2008, Stupishin et al. 2012). Zināmie bremzes (*bremsstrahlung*, *free-free*) starojuma polarizācijas pakāpes novērtējumi optiski plānos un biezos slāņos paredz kosinusoidālu atkarību no novērojuma leņķa (Gelfreikh & Shibasaki 1999). Magnetobremzes (*gyro*) starojuma (Zheleznyakov 1970, Lubyshev 1977, Vourlidas et al. 2006, White & Kundu 1997) polarizācijas pakāpes izmaiņām atkarībā no novērojuma leņķa ir daudz sarežģītāks veids („izstiepts kosinuss”). Saskaņā ar šiem novērojumiem un analizējamo aktīvo apgabalu polarizācijas pakāpes izmaiņām atkarībā no novērojuma leņķa var secināt, ka starojuma mehānisms ordinārās modas starojuma minimuma apgabalā ir pārsvarā bremzes starojums,

bet mehānisms ekstrordinārās modas starojuma maksimuma apgabalā ir kombinēts ar puscaurspīdīgu trešo žirolīmeni.



2.3. att. Polarizācijas pakāpes atkarībā no novērojumu leņķiem pēc novērojumiem uz viļņa garumu 1,76 cm NOAA 10325 (a) un NOAA 11312 (b). Nepārtrauktā līnija – ekstrordinārās modas starojuma maksimuma polarizācijas pakāpe, svītrotā – ordinārās modas starojuma minimumi, punktētās līnijas – polarizācijas pakāpes novērtējums tikai bremzes starojumam („kosinuss”) un tikai magnetobremzes starojumam („izstieptais kosinuss”)

Apkopojot novērojumu interpretācijas uz viļņa garumu 1,76 cm izvēlētajiem aktīvajiem apgabaliem, var pamatoti apgalvot, ka tiem ordinārās modas starojuma mehānisms pārsvarā ir bremzes starojums ar nelieliem novērojuma leņķiem, un tas strauji izpaužas kā magnetobremzes pietuvošanās Saules limbiem. Garajos viļņos, augstākos par 2,6 cm, galvenais ordinārās modas starojums ir magnetobremzes mehānisms. 2,6 cm robežu acīmredzot nosaka otrā žirolīmeņa pacēlums pietiekami karstā koronā, lai tas vismaz kļūtu puscaurspīdīgs ordinārās modas starojumam. Ordinārās modas starojuma trūkums (depresija) viļņu garumos, zemākos par 2,6 cm, var būt retinātās plazmas pastāvēšanas rezultāts augšējos hromosfēras slāņos un pārejas slānī, un tas var būt pietiekams caurspīdīgam ordinārās modas starojumam gar visu redzes staru no novērotāja – tas ļauj šajos viļņu garumos novērot hromosfēras temperatūru minimumu.

Turpmākā depresijas apgabalu savienošana aktīvos NOAA 10325 un NOAA 11312 apgabalos, ja ordinārās modas starojuma viļņa garums ir 1,76 cm, parāda to telpisko sakritību ar daudz spožākiem hromosfēras absorbcijas He I infrasarkanās līnijas apgabaliem, ko novēro ar CHIP (*Chromospheric Helium-I Imaging Photometer*) MLSO (*Mauna Loa Solar Observatory*). Tas norāda uz He I viļņa garuma pazeminātu absorbciju, un to var interpretēt kā pazeminātu plazmas blīvumu hromosfēras līmenī.

Karšu NOAA 11289 un NOAA 11312 (viļņa garums 1,76 cm, savienojums ar mīkstu rentgena starojumu) novērojumi ar XRT SOLAR-B atklāj ordinārās modas starojuma depresijas apgabalu sakritību ar pazeminātu rentgena starojumu („*dark coronal corridor*”), ja Saules centrālais meridiāns pāriešanas pāri tam. To arī var interpretēt kā pazeminātu plazmas blīvumu hromosfēras līmenī.

2.4. Izolētā Saules plankuma mikroviļņu starojuma skaitliskā modelēšana

Lai novērtētu izolēto Saules plankumu mikroviļņu novērojumu interpretācijas atbilstību, pārbaudītu hipotēzes pamatojumu par pazeminātu plazmas blīvumu virs tiem un iespējamo atmosfēras blīvumu virs tiem, tika veikta izolēto Saules plankumu starojuma skaitliskā modelēšana. Šim nolūkam izmantotā aktīvā apgabala modelis ir analogs modelim, kāds aprakstīts „Zlotnik 1968a” pētījumā un kāds izmantots aktīvo apgabalu termisko mehānismu starojuma analīzei. Kaut arī pastāv daudz sarežģītāki aktīvo apgabalu starojuma modeļi, konkrētais modelis ir pietiekami precīzs principiālam novērtējumam.

Daudzkārt parādīts, ka Saules plankumu magnētiskais lauks augšējā hromosfērā, pārejas slānī un apakšējā koronā labi saskaņojas ar potenciālo magnētisko lauku aproksimāciju (e.g. Zhugzhda 1967, Newkirk 1971, Dulc & McLean 1978, Wang 1992). Tas ļauj modelēt aktīvā apgabala magnētisko lauku ar dipoliem, kuri ir iegremdēti zem fotosfēras un kuru magnētiskie momenti vērsti vertikāli (Ryabov et al. 1992). Izolēto Saules plankumu atklātā magnētiskā lauka modelēšanai pietika ar vienu dipolu (2.4. att.).

2.1. tabula

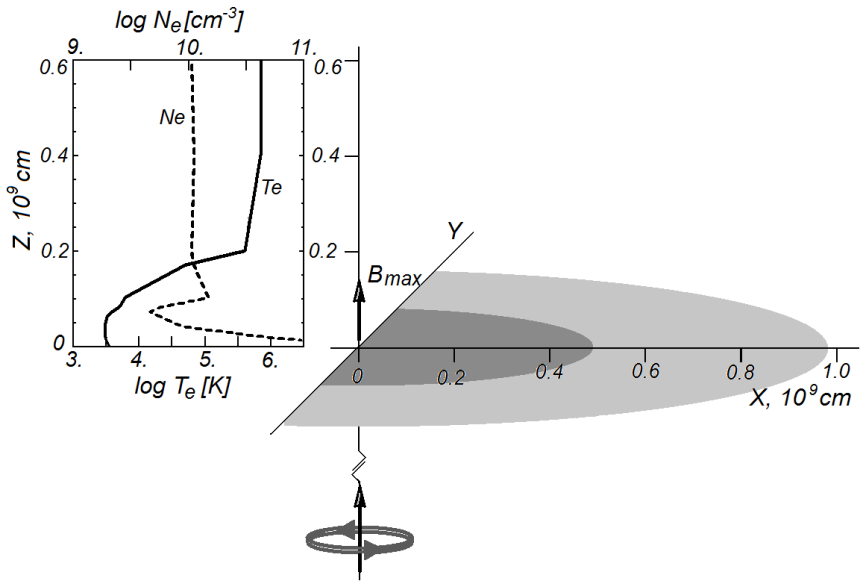
Plankumu ēnas laukums un plankumu ēnas diametrs, fotosfēras maksimālā izmērītā un aprēķinātā indukcija vairākiem izolētiem Saules plankumiem

NOAA	S, m.d.p.	d, 10 ⁹ cm (Ahmedov & Ryabov 1980)	B _{max} , Gs CrAO	B _{max} , Gs (Ihsanov 1967)
10325	330	1.8	–	2855
10351	220	1.4	2700	2527
10735	370	1.9	2600	2954
10743	250	1.6	2800	2626
11289	450	2.1	2700	3133
11312	200	1.4	2400	2456

Rakstā (Ahmedov & Ryabov 1980) pierādīts, ka Saules plankuma magnētiskais lauks visatbilstošāk, visprecīzāk aproksimējas ar potenciālo dipola magnētisko lauku, kas iegremdēts 0,8–1,2 plankuma diametra dziļumā. Turpat

norādīts, ka pastāv korelācija starp plankuma ēnas diametru un maksimālo fotosfēras magnētiskā lauka indukciju. No otras puses, parādīta korelācija starp Saules plankuma ēnas diametru un fotosfēras magnētiskā lauka maksimālo indukciju plankuma ēnas centrā (Ihsanov 1966, 1967).

Saskaņā ar CrAO (*Crimea Astrophysical Observatory*) datiem virknei aplūkoto izolēto plankumu ēnas diametru pēc formulām (Ihsanov 1967) aprēķinātie un izmērītie fotosfēras indukciju lielumi ir tuvi (2.1. tabula). Turpmākajā modelēšanā ņemti vērā fotosfēras magnētiskā lauka indukcijas lielumi 2500÷3000 Gs un tiem atbilstošais plankuma ēnas diametrs. Dipola iegrimšanas dziļums zem fotosfēras tiek pieņemts kā vienāds ar plankuma ēnas diametru. Ņemot vērā to un arī tamlīdzīgus dipolu magnētiskos laukus, izolēta Saules plankuma modeļa magnētisko lauku augšējās hromosfēras augstumos, pārejas slānī un apakšējā koronā pietiekami precīzi var noteikt ar vienu parametru – fotosfēras indukciju plankuma centrā B_{max} .



2.4. att. Atmosfēras standarta modeļa galvenā komponenta kinētiskās temperatūras un plazmas elektroniskā blīvuma sadale pēc augstuma virs aktīvā apgabala (Obridko & Staude 1988) un aktīvā apgabala magnētiskā lauka modelis

Aplūkojamā modeli tika noteiktas magnētiskā lauka asu simetriskās indukcijas sastāvdaļas virs fotosfēras cilindriskajā koordinātu sistēmā ar centru plankuma ēnas centrā (Oster 1964):

$$\begin{aligned}
B_z &= B_{\max} \frac{d^3 [2(d+z)^2 - r^2]}{2[(d+z)^2 + r^2]^{5/2}} \\
B_r &= B_{\max} \frac{3d^3 (d+z)^2 r^2}{2[(d+z)^2 + r^2]^{7/2}},
\end{aligned} \tag{2.1}$$

kur:

z, r – punkta koordinātas cilindriskajā koordinātu sistēmā ar centru plankuma ēnas centrā,

d – plankuma ēnas diametrs ir vienāds ar dipola iegremdēšanas dziļumu zem fotosfēras,

B_{\max} – maksimālā fotosfēras magnētiskā lauka indukcija plankuma centrā.

Tika pieņemts, ka aplūkojamā aktīvā apgabala modeļa atmosfēra ir slāņaina ar viendimensijas plazmas kinētiskās temperatūras un elektronisko blīvumu sadalījumu pēc augstuma un līdzīga Saules atmosfēras standarta modeļa galvenajam komponentam virs aktīvajiem apgabaliem (Obridko & Staude 1988).

Aplūkojamo atmosfēras parametru sadale pēc augstuma modelī tika noteikta šādi:

$$\begin{aligned}
T_e(z) &= T^* T_e^{ob-st}(z), \\
N_e(z) &= N^* N_e^{ob-st}(z),
\end{aligned} \tag{2.2}$$

kur:

$T_e(z), N_e(z)$ – plazmas kinētiskās temperatūras un elektroniskā blīvuma sadalījums modelējamās atmosfēras augstumā z ,

T^*, N^* – mērogu koeficienti (līdzību kritēriji),

$T_e^{ob-st}(z), N_e^{ob-st}(z)$ – plazmas parametru sadalījums pēc augstuma standarta atmosfēras galvenās komponentes (pēc Obridko & Staude 1988).

Tādā veidā iespējamais atmosfēras parametru sadalījums pēc augstuma tiek noteikts ar diviem mēroga koeficientiem.

Kopumā skaitliskās modelēšanas rezultātā starojuma aktīvajā apgabalā tika noteiktas novērojamā punkta spožuma temperatūras atkarībā no trīs parametriem, kas viennozīmīgi apraksta aktīvā apgabala doto modeli, novērojamā punkta koordinātas attiecībā pret plankuma ēnas centru un novērošanas leņķi:

$$T_b^{x,o}(x, y) = T_b^{x,o}(B_{\max}, T^*, N^*, x, y, \theta, \lambda), \tag{2.3}$$

kur:

$T_b^{x,o}$ – novērojamā punkta ekstraordinārās un ordinārās modas starojuma spožuma temperatūras,

x, y – novērojamā punkta koordinātas attiecībā pret plankuma ēnas centru,

- B_{max} – maksimālā fotosfēras indukcija plankuma ēnas centrā,
 T^*, N^* – atmosfēras mērogu koeficienti,
 Θ – leņķis starp redzes staru un perpendikulu pret novērojumu punkta
 fotosfēru (novērojumu leņķis),
 λ – viļņa garums.

Izolēta plankuma mikroviļņu starojuma spožuma temperatūru aprēķins iekļauj sevī divu termiskās starošanas mehānismu aplūkošanu – bremzes un magnetobremzes tās kvazigareniskā pietuvinājumā (Zheleznyakov 1970, 1977, Zlotnik 1968, Gelfreikh et al. 1987). Simulējamā starojuma (Zheleznyakov 1977) kvazigareniskā izplatījuma kritēriju analīze, sevišķi hromosfēras augstumos un pārejas slānī, kur notiek galvenais starojums, parādīja, ka kvazigareniskā izplatījuma starojuma noteikumi piemērojami plašā atmosfēras parametru diapazonā un ka novērošanas leņķos līdz 80 grādiem refrakciju var neņemt vērā.

Aplūkojamā modeli bremzēšanas starojuma laušanas un absorbcijas koeficienti ekstraordinārās un ordinārās modas starojuma atspoguļojuma robežās jebkurā redzes stara punktā tiek aprēķināti pēc (Zlotniki 1968) formulām. Bremzes starojuma optiskais blīvums redzes stara galējā iecirknī tika aprēķināts šādi:

$$\begin{aligned}
 v &= 9.028 * 10^{-5} \lambda^2 N_e, \\
 u &= 8.778 * 10^{-9} \lambda^2 B^2, \\
 f &= \sqrt{u^2 \sin^4 \alpha + 4u(1-v)^2 \cos^2 \alpha}, \\
 g &= 2(1-v)^2 + u \sin^2 \alpha, \\
 n_{x,o}^2 &= 1 - \frac{2v(1-v)}{g \mp f}, \\
 \mu_{x,o} &= 1.041 \frac{Q \lambda^2 N_e^2 \{ \mp fg - u^2 \sin^4 \alpha \}}{T_e^{3/2} n_{x,o} \{ \mp f [2(1-v)^2 - u \sin^2 \alpha \mp f]^2 \}} \\
 Q &= \begin{cases} \ln \frac{220 T_e}{N_e^{1/3}}, T_e < 3 * 10^5 K \\ \ln \frac{10^3 T_e^{2/3}}{N_e^{1/3}}, T_e > 3 * 10^5 K \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

kur:

- $n_{x,o}$ – laušanas koeficients ekstraordinārās un ordinārās modas starojumam,
 $m_{x,o}$ – absorbcijas koeficients ekstraordinārās un ordinārās modas starojumam (augšējā zīme izteiksmēs attiecas uz ekstraordināro modu),
 u, v – plazmas parametri, attiecīgi plazmas Langmīra frekvences un žiro-
 frekvences attiecību kvadrāti pret starojuma frekvenci,
 λ – viļņa garums, cm,

B – magnētiskā lauka indukcijas modulis, Gs,

α – leņķis starp magnētiskā lauka indukcijas vektoru un starojuma izplatības virzienu,

T_e , N_e – plazmas kinētiskā temperatūra, 10^3 K, un elektroniskais blīvums, 10^9 cm.

Magnetobremzes starojuma optiskais biežums pirmajai harmonikai ordinārajai modai un $2+4$ harmonikām abām modām uz atbilstošajiem žirolīmeņiem noteikts šādi:

$$\begin{aligned}\tau_{1o} &= 0.2985 N_e T_e \lambda L_H \frac{\sin^4 \alpha (1 + 2 \cos^2 \alpha)^2}{(1 + \cos^2 \alpha)^2}, \\ \tau_{2x,o} &= 0.2985 N_e T_e \lambda L_H \frac{\sin^2 \alpha (\sin^2 \alpha + 4 \cos^2 \alpha \pm \sqrt{\sin^4 \alpha + 16 \cos^2 \alpha})^2}{\sin^4 \alpha + 16 \cos^2 \alpha \pm \sin^2 \alpha \sqrt{\sin^4 \alpha + 16 \cos^2 \alpha}}, \\ \tau_{3x,o} &= 0.3829 * 10^{-6} N_e T_e^3 \lambda L_H \frac{\sin^4 \alpha (\sin^2 \alpha + 6 \cos^2 \alpha \pm \sqrt{\sin^4 \alpha + 36 \cos^2 \alpha})^2}{\sin^4 \alpha + 36 \cos^2 \alpha \pm \sin^2 \alpha \sqrt{\sin^4 \alpha + 36 \cos^2 \alpha}}, \\ \tau_{4x,o} &= 0.7244 * 10^{-12} N_e T_e^3 \lambda L_H \frac{\sin^6 \alpha (\sin^2 \alpha + 8 \cos^2 \alpha \pm \sqrt{\sin^4 \alpha + 64 \cos^2 \alpha})^2}{\sin^4 \alpha + 64 \cos^2 \alpha \pm \sin^2 \alpha \sqrt{\sin^4 \alpha + 64 \cos^2 \alpha}} \quad (2.5)\end{aligned}$$

kur:

$L_H = B(dB/dl)^{-1}$ – magnētiskā lauka indukcijas izmaiņu raksturīgais lielums gar redzes staru (10^9 cm).

Piektajā līmenī un augstākajos žirolīmeņos aplūkojamā izolētā plankuma modelim optiskā biežuma aprēķinā nav jēgas.

Novērotajā punkta spožuma temperatūru aprēķins tiek veikts ar zināmā starojuma pārnesšanas vienādojuma skaitlisko integrēšanu gar redzes staru no atbilstošās modas atspoguļošanas robežām līdz novērotājam, ņemot vērā abu starojuma mehānismu radītā starojuma optisko dziļumu.

Izmantotais aktīvā apgabala starojuma skaitliskās modelēšanas algoritms ir analogs programmu nodrošinājuma algoritmam POLAR2 (Ryabov & Nagelis 1992). Programmu nodrošinājums realizēts IDL valodā un ir kā utilitū kompleks interaktīvam uzdevumam aktīvo apgabalu brīvām konfigurācijām, divdimensiju starojuma simulācijai un rezultātu uzrādīšanai karšu formā helio-grāfiskās koordinātās un attēlu plakņu koordinātās.

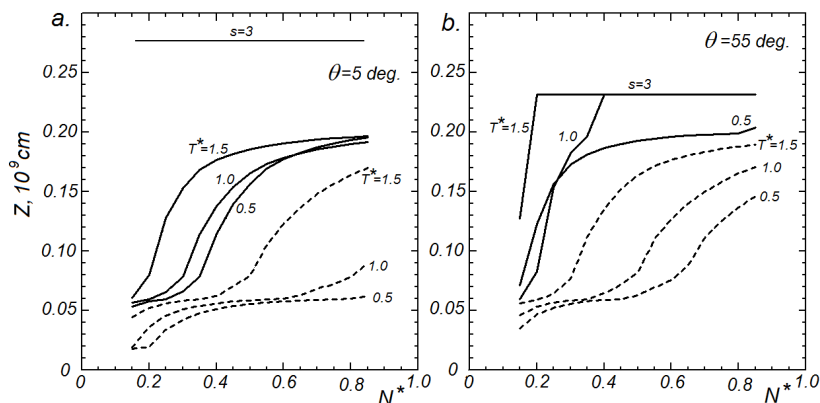
Aplūkojamam modelim tika veiktas vairākas izolēto plankumu mikroviļņu starojuma simulācijas (Bezrukovs et al. 2011), analogas novērotājam, kā arī atmosfēras viendimensijas slāņainā sadalījuma un ass simetriskā sadalījuma simulācijas ar daudz blīvāku un aukstāku plazmu uz perifērijas plankuma, kas

imitē plazmas ietecēšanu no „sunplumes” (Strong et al. 1984, Brosius & White 2004). Tika iegūti konsekventi abu modu divdimensiju starojuma spožuma temperatūru sadalījumi heliogrāfiskās koordinātās un attēlu plaknes ar dažādiem novērojumu datiem un to viendimensijas konvolūcijas ar aprēķinu diagrammu RATAN-600. Izolēta plankuma mikroviļņu starojuma modeļa simulācija kopumā apstiprināja hipotēzes pamatojumu par pazeminātu atmosfēras blīvumu virs izolētas Saules plankuma daļas.

2.5. Izolētā Saules plankuma mikroviļņu starojuma modelēšana pazeminātā atmosfēras blīvumā

Lai turpmāk interpretētu izolētu plankumu mikroviļņu novērojumus ar NoRH, tika modelēts plankuma centra starojums pazeminātā atmosfēras blīvumā un dažādos novērošanas leņķos ar viļņa garumu 1,76 cm.

Rezultāti par plankuma centru ar pietiekamu precizitāti izmantojami arī citiem plankuma punktiem, jo magnētiskais lauks plankuma robežās hromosfēras augstumos un pārejas slānī, kur notiek galvenais starojums, praktiski ir radiāls, un ar pietiekamu precizitāti var nolikt līdzenu novērošanas leņķi un leņķi starp magnētiskās indukcijas vektoru un redzes staru.

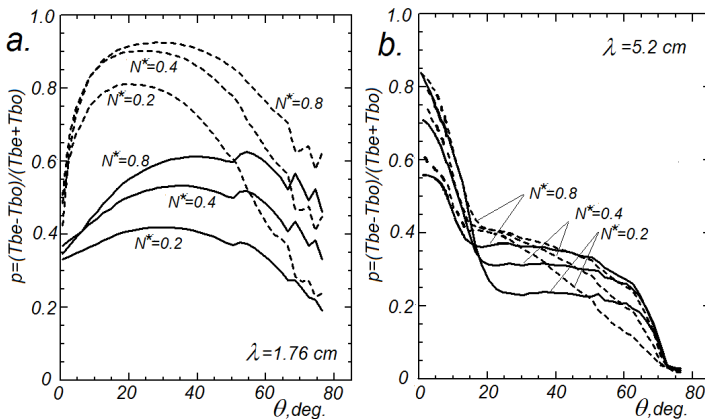


2.5. att. Starojuma lokalizācija (augstums virs fotosfēras robežas, kur integrālais optiskais biezums $\tau_{\text{sum } e,0} = 1$ gar redzes staru no novērotāja) ordinārajā modā (pārtrauktas linijas) un ekstraordinārajā modā (nepārtrauktas linijas) izolētā plankuma starojuma modeļiem ($B_{\text{max}} = 3200 \text{ Gs}$) atkarībā no plazmas blīvuma viļņa garumam 1,76 cm novērojumiem pie centrālā meridiāna (a) un vidējos garumos (trīs diennaktis pēc tam, kad tas izgājis cauri centrālajam meridiānam) (b). Atzīmēti trešā žirolīmeņa augstumi

Abu starojuma modu lokalizācijas analīze (augstums redzes starā, kur summārais optiskais biezums gar redzes staru no novērotāja ir $\tau_{sum} = 1$) un bremzes un magnetobremzes starojuma attiecības (ieguldījums) parāda ievērojamu atšķirību starp aplūkojamiem izolētiem Saules plankumiem un bipolārajiem Saules aktīvajiem apgabaliem. Tāpat principiāli atšķiras starojuma mehānismu attiecības nosacīti īsiem un vidējiem viļņu garumiem.

Novērojot izolētu plankumu pie Saules centrālā meridiāna ar viļņa garumu 1,76 cm, ordinārās modas starojums tiek izstarots tikai ar bremzes starojuma mehānismu un ar visiem iespējamajiem atmosfēras parametriem (2.5. att.). Nosacīti retinātā atmosfērā ($N^* < 0,5$) ordinārās modas starojums notiek no hromosfēras un zemā blīvumā tuvojas hromosfēras temperatūras minimumam. Šī īpatnība ir galvenais iemesls ordinārās modas starojuma spožuma temperatūras raksturīgajai depresijai īsa garuma viļņiem. Salīdzinoši blīvā atmosfērā ($N^* < 0,5$) ordinārā moda var izstaroties no augšējās hromosfēras un pārejas slāņa atkarībā no atmosfēras temperatūras. Trešais žirolīmenis atrodas uz koronas robežas un ir pilnībā caurspīdīgs ordinārās modas starojumam ($\tau_{o3} < 10^{-4}$) retinātai atmosfērai un puscaurspīdīgs relatīvi blīvai atmosfērai ($\tau_{o3} < 0,3$).

Īsviļņu ekstraordinārās modas starojums plankuma novērošanas pie centrālā Saules meridiāna tiek izstarots no augšējās hromosfēras un pārejas slāņa plašā augstuma diapazonā atkarībā no plazmas blīvuma. Ekstraordinārās modas starojuma trešais žirolīmenis paliek puscaurspīdīgs.



2.6. att. Izolētā plankuma starojuma polarizācijas pakāpe atkarībā no novērošanas leņķiem viļņu garumos 1,76 cm (a) un 5,2 cm (b) «aukstajā» ($T^* = 0,5$) (nepārtraukta līnija) un «karstajā» ($T^* = 1,5$) (pārtrauktas līnijas) plazmā

Ar vidējiem plankuma novērošanas leņķiem (2–3 diennaktis pēc izešanas caur centrālo meridiānu) ordinārās modas starojums izstarojas pārsvarā no pārejas slāņa plašā augstuma diapazonā un no hromosfēras zemā atmosfēras

blīvumā ($N^* < 0,3$). Zemā plazmas blīvumā ordinārās modas starojums tāpat nolaižas līdz hromosfēras temperatūras minimumam. Šajā gadījumā arī vidējos leņķos iespējams novērot ordinārās modas spožuma temperatūras deficītu. Trešais žirolīmenis paliek puscaurspīdīgs ordinārās modas starojumam.

Ekstraordinārās modas starojums ar vidējiem novērojuma leņķiem notiek pārsvarā no trešā žirolīmeņa samērā karstajā plazmā ($T^* > 1$). Aukstajā plazmā ($T^* < 1$) trešais žirolīmenis ir puscaurspīdīgs ekstraordinārai starojuma modai ($0,3 < \tau_{e3} < 0,75$). Ja ir zems plazmas blīvums ($N^* < 0,2 \div 0,3$), ekstraordinārās modas starojums var izstaroties no augšējās hromosfēras un pārejas slāņa.

2.2. tabula

Izolētā plankuma ordinārās un ekstraordinārās modas starojuma spilgtuma temperatūras (10^3 K) viļņa garumam 1,76 cm pazeminātā atmosfēras blīvumā

$\Theta = 5 \text{ deg. } B_{\text{max}} = 3200 \text{ Gs } T_b^e$					
T^*	N^*	0,1	0,2	0,4	0,8
	0,25	3,74	10,9	31,6	88,7
	0,5	3,98	10,3	29,9	84,7
	1	5,93	11,9	31,1	85,6
	2	16,3	28,4	58,4	132,5
$\Theta = 55 \text{ deg. } B_{\text{max}} = 3200 \text{ Gs } T_b^e$					
T^*	N^*	0,1	0,2	0,4	0,8
	0,25	4,71	13,9	41,1	114,1
	0,5	4,65	12,7	37,3	110,4
	1	5,5	12,1	34,5	101,2
	2	8,3	13,7	32,9	94,2
$\Theta = 5 \text{ deg. } B_{\text{max}} = 3200 \text{ Gs } T_b^e$					
T^*	N^*	0,1	0,2	0,4	0,8
	0,25	1,92	5,18	16,8	53,3
	0,5	2,44	4,89	14,2	46,4
	1	3,87	5,63	11,8	39,3
	2	7,11	8,26	13,5	34,3
$\Theta = 55 \text{ deg. } B_{\text{max}} = 3200 \text{ Gs } T_b^e$					
T^*	N^*	0,1	0,2	0,4	0,8
	0,25	3,2	9,6	30,7	91,7
	0,5	3,4	8,5	26,6	83,7
	1	4,5	8,4	23,0	73,0
	2	7,5	10,2	21,5	61,2

Starojuma mehānismu attiecība izolētam plankumam strauji mainās viļņu garumos, lielākos par 2,5–2,7 cm. Izolēta plankuma simulācijas analīze viļņa garumam 5,2 cm parāda, ka šajā gadījumā abās modās starojumam pārsvarā tiek noteikts magnetobremzes mehānisms (otrais vai trešais žirolīmenis ekstraordināras modas starojumam, otrs žirolīmenis – ordināras modas starojumam) praktiski ar visiem iespējamajiem atmosfēras parametriem. Raksturīgo starojuma mehānismu 2,5–2,7 cm attiecības sadales robežu nosaka ar otrā žirolīmeņa pacelšanu pietiekami karstā koronā. Tas izskaidro to, ka ordināras modas starojumam zemāk par viļņa garumu 2,67 cm spektrālajos novērojumos NOAA 10325 uz RATAN-600 parādās raksturīgā spožuma temperatūras depresija (Bezrukov et al. 2011).

Šis starojuma mehānismu attiecības īpatnības pazeminātā plazmas blīvumā nosaka aktīvo apgabalu polarizācijas pakāpei raksturīgos lielumus atkarībā no novērojumu leņķiem (2.6. att.). Izolētā plankuma starojuma polarizācijas pakāpes maksimums ar viļņu garumu, mazāku par 2,5 cm, jānovēro pie ~40 grādu novērošanas leņķiem un pie centrālā meridiāna ar lielākiem viļņu garumiem.

Izolētā plankuma abās modās starojuma absolūtās spožuma temperatūras pazeminātā atmosfēras blīvumā, kas sagaidāmas, novērojot ar NoRH, parādītas 2.2. tabulā.

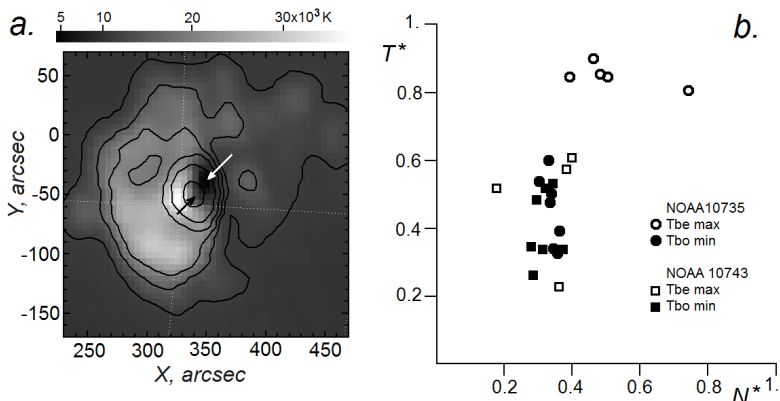
2.6. Starojuma novērojumu interpretācija viļņa garumam 1,76 cm NOAA 10735 un 10743

Novērojumi uz NoRH aktīvajam apgabalam NOAA 10375 ar viļņa garumu 1,76 cm pie centrālā meridiāna pārejas demonstrē ordināras modas starojuma raksturīgo spožuma temperatūras depresiju. Ordināras modas starojuma spožuma temperatūra var sasniegt $4,7 \cdot 10^3$ K. Ordināras modas starojuma spožuma temperatūras minimuma punkts vairumā gadījumu nesakrīt ne ar plankuma ēnas ģeometrisko centru, ne ar ekstraordināras modas maksimuma punktu (2.7.a att.). Nākamajā apgriezienā pie Saules centrālā meridiāna pārejas NOAA 10743 šī depresija ir mazāk izteikta ($T_{bmin}^0 = 8 \div 10 \cdot 10^3$ K), tomēr ir novērojama.

Aplūkojamā aktīvā apgabala modelim paliek spēkā pieņēmums par magnētiskā lauka potenciālo raksturu un strāvas slāņu neesamību. Šajā gadījumā abu modu novērojamo mikroviļņu starojumu ekstrēmumu eksistenci var interpretēt kā plankuma robežās esošus divus cieši blakus novietotus apgabalus ar dažādiem plazmas parametriem.

Iezīmēsim un turpmāk aplūkosim divus tuvu esošos apgabalus ar dažādiem atmosfēras parametriem – ekstraordināras modas starojuma maksimuma apgabalu (T_{bmax}^0) un ordināras modas starojuma minimuma apgabalu (T_{bmin}^0).

Pie Saules meridiāna aktīvo apgabalu pārejas redzes stars neiziet ārpus nodalītā apgabala robežām, un atmosfēras parametru sadalījumu, pēc augstuma novērojumiem, var uzskatīt par atkārtotu.



2.7. att. Izolētā plankuma parastās modas starojuma spilgtuma temperatūras NOAA 10375 viļņa garumam 1,76 cm pēc NoRH novērojumiem 2005-05-18UT03:00.

Ar kontūru parādītas izolētā plankuma ordinārās modas starojuma spilgtuma temperatūras. Kontūra parāda - 11, 15, 20, 30, 60, 200 × 10³ K. Melnā bultiņa norāda uz punktu ar $T_{bmax}^e = 308 \cdot 10^3$ K (ekstraordinārās modas starojuma maksimuma iecirknis), baltā - $T_{bmin}^e = 4,7 \cdot 10^3$ K (ordinārās modas starojuma depresijas iecirknis) (a).

Atmosfēras parametru novērtējums NOAA 10735 un 10743 virs plankumā dažādām dienām, iegūts atbilstoši novērojumiem un modelēšanas daudzumam (b)

Plazmas parametrus katram apgabalam var novērtēt pēc spožuma temperatūru modeļu atkarības no abu modu starojuma novērotiem un simulētiem spožuma temperatūru vienlaicīga vienādojuma noteikumiem:

$$\begin{cases} T_{bsym}^x(T_1^*, N_1^*, x_1, y_1, \theta) = T_{b_{max}1}^x(x_1, y_1) \\ T_{bsym}^o(T_1^*, N_1^*, x_1, y_1, \theta) = T_{b1}^o(x_1, y_1) \end{cases}, \begin{cases} T_{bsym}^x(T_2^*, N_2^*, x_2, y_2, \theta) = T_{b2}^x(x_2, y_2) \\ T_{bsym}^o(T_2^*, N_2^*, x_2, y_2, \theta) = T_{b_{min}2}^o(x_2, y_2) \end{cases} \quad (2.6.)$$

kur:

$T_1^*, N_1^*, T_2^*, N_2^*$ - plazmas parametri atbilstoši ekstraordinārās modas apgabala starojuma maksimumam un ordinārās modas minimumam,

$T_{b_{max}1}^e, T_{b1}^e, T_{b2}^e, T_{b_{min}2}^e$ - abu modu atbilstošo apgabalu starojuma spožuma temperatūras,

x_1, y_1, x_2, y_2 - nodalīto apgabalu lokālās koordinātas attiecībā uz plankuma centru,

T_{bsym}^e - abu modu starojuma spožuma temperatūras simulēšana saskaņā ar iepriekš minētā aktīvā apgabala modeli.

Piecu atmosfēras parametru novērojumu NOAA 10735 un piecu novērojumu NOAA 10743 ($-30^\circ < \Theta < 30^\circ$) vērtējumu rezultāti parādīti 2.7.b. att.

Saskaņā ar šiem vērtējumiem ekstraordinārās modas starojuma NOAA 10735 maksimuma apgabalam ir raksturīga samērā augsta temperatūra ($T^* = 0,85 \div 0,9$) un plazmas blīvuma izkliedējums ($N^* = 0,4 \div 0,8$). Ordinārās modas starojuma minimuma apgabalam NOAA 10735 ir izteikts retinājums ($N^* = 0,32 \div 0,35$) tādā pašā pazeminātā plazmas kinētiskajā temperatūrā ($T^* = 0,33 \div 0,6$). Acīm redzams, ka šajā gadījumā saskaņā ar interpretāciju ordinārās modas starojums nāk no hromosfēras (no augstuma $0,05 \cdot 10^9$ cm) ar raksturīgiem elektronu blīvumiem $1,2 \div 1,5 \cdot 10^9$ cm⁻³.

Abu nodalīto apgabalu atmosfēras parametru novērtējums parāda, ka NOAA 10743 tie ir daudz tuvāki nekā NOAA 10735. Abos apgabalos atmosfēras blīvums paliek pazemināts ($N^* = 0,28 \div 0,4$). Ekstraordinārās modas starojuma maksimuma apgabalam ir atmosfēras temperatūra ($T^* = 0,53 \div 0,6$), tā ir augstāka nekā ordinārās modas starojuma minimuma apgabalam ($T^* = 0,5 \div 0,33$), tāpat kā arī NOAA 10735, taču šī starpība nav tik liela.

Tādā veidā, izmantojot izolētā Saules plankuma starojuma spožuma temperatūras modeļu vērtējumu viļņa garumam 1,76 cm pazeminātā atmosfēras blīvumā, novērojumus NOAA 10735 ar NoRH var interpretēt šādi: virs divu plankumu apgabala pastāv izteikti atšķirīgi atmosfēras parametri – apgabali ar daudz karstāku atmosfēru un iespējami pazeminātu blīvumu, kas atbilst ekstraordinārās modas starojuma maksimumam, un apgabali ar samērā aukstu un retinātu atmosfēru, kas atbilst ordinārās modas starojuma minimumam. Nākamajā apgriezīnā plankuma laukums un maksimālā indukcija plankuma centrā samazinājās, kas noveda pie šo apgabalu atmosfēras parametru izlīdzināšanās.

Analoģiskais plazmas blīvuma novērtējums priekš NOAA 10325 un NOAA 11289 uzrāda vēl mazāku blīvumu: $N^* = 0,23 \div 0,25$, t. i., plazmas elektroniskais blīvums augšējās hromosfēras līmenī ir $0,5 \cdot 10^9$ cm⁻³.

Analizējot izolētu Saules plankumu divdimensiju mikroviļņu novērojumus ar augstu spektrālo izšķirtspēju, ir iespējams noteikt atmosfēras parametrus visos augstumos no hromosfēras līdz koronai virs dažādiem plankuma iecirkņiem.

3. BIPOLĀRO AKTĪVO APGABALU KORONĀLĀ MAGNĒTISKĀ LAUKA MĒRĪŠANA

3.1. Koronālās magnetogrāfijas metode, pamatota ar starojuma polarizācijas inversijas analīzi kvazišķērsvirziena izplatīšanas apstākļos

Koronālo cilpu, protruberanču, strīmeru u. tml. veidojumu novērojumi optiskajā, ultravioletajā un rentgena diapazonā skaidri parāda koronālo magnētisko lauku morfoloģiju un struktūru un to dinamiku. Tomēr precīza koronālo magnētisko lauku indukciju noteikšana ir problēma, kas pagaidām nav līdz galam atrisināta. Tas īpaši attiecas uz magnētiskajiem laukiem hromosfērā, pārejas slānī un apakšējā koronā. Zināmajām koronālās magnetogrāfijas metodēm ir divi galvenie virzieni.

Pirmais koronālās magnetogrāfijas virziens – fotosfēras magnētisko lauku ekstrapolācija koronā. Magnētiskā lauka indukcijas sastāvdaļas uz fotosfēras virsmas tiek noteiktas ar augstu precizitāti un augstu telpisko izšķirtspēju un var kalpot par sākuma nosacījumiem indukcijas definīcijas nelineāras robežproblēmas atrisināšanai. Vairākos darbos (e.g. Seehafer & Staude 1979, Gary 1989, McClymont & Mikic 1994, Amari et al. 1999, Alissandrakis 1999, Klimchuk 2000) ir parādītas magnētiskā lauka potenciālās aproksimācijas noteikšanas iespējas kvazistatiskajā koronā. Darbā (Jiao et al. 1997) parādīts, ka apmierinoša bezspēka (*force free*) magnētiskā lauka noteikšanas nelineārā uzdevuma skaitliskie risinājumi un pētāmās magnētisko spēka līniju formas sakrīt arī ar izmērītā magnētiskā lauka indukciju (Lee 1998). Citos darbos (Semel & Skumanovich 1998, Klimchuk & Canfield 1994) ir atspoguļotas ekstrapolācijas metodes iespējamās principiālās kļūdas, kļūdoties fotosfēras magnētiskā lauka noteikšanā un pārkāpjot pieņēmumu par koronālā magnētiskā lauka bezspēka raksturu (Metcalf et al. 1995). No otras puses, salīdzinot izmērīto koronālo magnētisko lauku augstumu (Bezrukov et al. 2005) ar ekstrapolētajiem laukiem (Alissandrakis et al. 1996), ir redzamas būtiskas neatbilstības.

Koronālo magnētisko lauku tiešā mērīšana pēc Saules mikroviļņu starojuma novērojumiem lielā mērā ļauj noteikt aktīvo reģionu magnētiskā lauka integrālās indukcijas. Šajā ziņā magnētisko lauku tiešās mērīšanas metodes ir ļoti neprecīzas. Vairākos darbos (Bogod & Gelfreikh 1980, Apushkinsky et al. 1996, Borovik et al. 1999, 2002, Gelfreikh & Shibasaki 1999, Gelfreikh 2004) atspoguļota aktīvo reģionu magnētisko lauku indukciju noteikšana, izmantojot bremsēšanas (*free-free*) starojuma polarizācijas analīzi. Darbos (Akhmedov et al. 1982, Hurford 1986, Lee et al. 1993, Gary & Hurford 1994, White 2004) aplūkota magnētisko lauku indukciju un to augstumu noteikšana, balstoties uz magnetobremzēšanas starojuma rašanās nosacījumu analīzi atbilstošajos žirorezonanses līmeņos.

Koronālās magnetogrāfijas metode, kas balstīta uz starojuma polarizācijas inversijas kvazišķērsvirziena izplatīšanās apstākļu analīzi, atšķirībā no visām pārējām koronālās magnetogrāfijas metodēm ļauj:

- tieši mērit magnētisko lauku indukcijas, izmantojot mikroviļņu novērojumus,
- precīzi lokalizēt magnētiskos laukus virs aktīvajiem reģioniem,
- noteikt magnētiskā lauka indukcijas vektoru virzienu telpā.

Metodes fiziskā bāze ir teorija par starojuma modas mijiedarbību kvazišķērsvirziena magnētiskajā laukā (e.g. Cohen 1960, Zheleznyakov 1970, Zheleznyakov & Zlotnik 1963, Bandiera 1982). Kvazišķērsvirziena (*quasi transverse*, turpmāk – QT) izplatības jomā notiek starojuma modas mijiedarbība un novērotas starojuma cirkulārās polarizācijas izmaiņas:

$$p = p_0(2e^{-2\delta_0} - 1)$$

$$2\delta_0 \approx 1.15 \times 10^{-25} B^3 N_e L_d \lambda^4 \quad (3.1),$$

kur:

p_0 un p – cirkulārās polarizācijas pakāpes pirms un pēc inversijas,

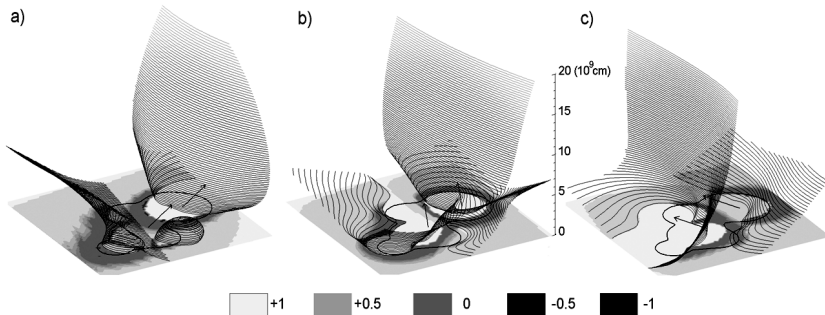
B – magnētiskā lauka indukcija, Gs,

N_e – plazmas elektroniskais blīvums, 10^9 cm^{-3} ,

$L_d = \Theta |d\Theta/ds|^{-1}$ – magnētiskā lauka ģeometriskais faktors,

λ – viļņa garums, cm.

Katrā novērojuma leņķī kvazišķērsvirziena izplatīšanās apvidum ir virsmas skats (QT virsma, QT ekrāns) (Peterova 1974, Peterova & Ryabov 1976, Kravtsov & Naid 1976, Ryabov et al. 2005) (3.1. att.).



3.1. att. NOAA 9068 QT virsmas simulācijas no fotosfēras magnetogrammas dažādos novērošanas leņķos $\Theta = -48$ gr. (a), $\Theta = -6$ gr. (b), $\Theta = +42$ gr. (c) 5,2 cm viļņu garumā un relatīvas cirkulārās polarizācijas pakāpes sadalījumu projekcijas uz attēlu plaknē (Ryabov 2004)

Polarizācijas inversijas analīze katrā QT virsmas punktā ļauj noteikt magnētiskā lauka indukciju, kas vērsta pieskares plaknē šajā QT virsmas punktā.

Šķērsojot aktīvo reģionu pa Saules disku, QT virsma vai vairākas QT virsmas pakāpeniski šķērso visu koronas telpu virs aktīvā reģiona, kas ļauj noteikt koronālā magnētiskā lauka indukciju trīsdimensiju sadalījumu un tā virzienu. Teorētiski metodes precizitāte aprobežojas ar aktīvo reģionu starojuma mikroviļņu novērojumu kalibrēšanas precizitāti. Praktiski sasniedzamā metodes precizitāte, pamatojoties uz (3.1.) attiecību, ir maksimāla pie starojuma depolarizācijas (Gelfreikh et al. 1987, Ryabov et al. 2004, 2005).

Spektrapolarimetriskie novērojumi plašā viļņu garuma diapazonā ļaus noteikt koronālos magnētiskos laukus atbilstoši plašā indukciju diapazonā ar starojuma spožuma temperatūras pirmkaršu kalibrēšanas precizitāti un to augstumu virs fotosfēras ar karšu telpisko izšķirtspējas precizitāti.

3.2. Cirkulārās polarizācijas pakāpju karšu normalizācijas metode

Kaut arī metodes fiziskā bāze ir labi zināma un vairākkārt ir veikti inversiju novērojumi polarizācijai, ko radījusi kvazišķērsvirziena izplatība (e.g. Piddington & Minnet 1951, Peterova & Akhmedov 1974, Gelfreikh et al. 1987, Alissandrakis 1999), tiešā metodes izmantošana mikroviļņu novērojumiem ir diezgan sarežģīta. Metodes izmantošana, izvēloties aktīvos reģionus, paredz ievērot vairākus pieņēmumus un pamatot atsevišķu starojuma, ko radījusi kvazišķērsvirziena izplatība, inversiju rašanās apstākļus (Ryabov et al. 2004, 2005).

Turpmāk, lai izmēritu raksturīgo bipolāro aktīvo Saules apgabalu koronālo magnētisko lauku indukciju, izmantota mikroviļņu starojuma cirkulārās polarizācijas pakāpju karšu normalizācijas metode (Ryabov et al. 2004, Bezrukov et al. 2005). Metode balstās uz (3.1.) attiecību un ietver izvēlēto aktīvā apgabala punktu starojuma polarizācijas inversijas analīzi, tai ejot pa Saules disku.

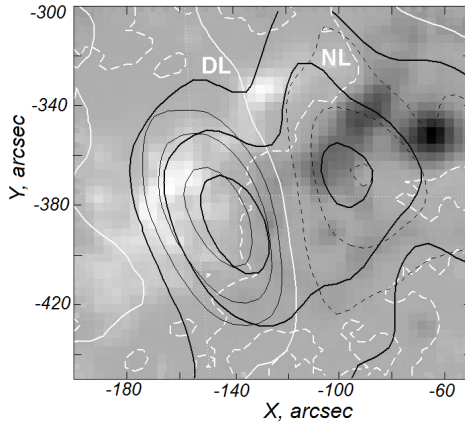
Normalizācijas metodes īstenošanai un testēšanai tika izvēlēti vairāki ikdienas novērojumi 5,2 cm viļņu garumā šādu aktīvo apgabalu pilnai pāriešanai pa Saules disku:

1. NOAA 9068 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2000-07-06),
2. NOAA 9097 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2000-07-25),
3. NOAA 9339 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2001-02-10),
4. NOAA 9415 (centrālā Saules meridiāna pāriešana 2001-04-09).

Izmantotās 5,2 cm viļņu garuma Saules starojuma kartes tika iegūtas ar *Siberian Solar Radio Telescope* (SSRT) ar telpisko izšķirtspēju 20 leņķiskās sekundes (Grechnev et al. 2003).

Visi analīzei izvēlētie aktīvie apgabali ir bipolāri un saistīti ar stabilām Saules plankumu grupām. Plankumu grupām ir raksturīgs liels galvenais plankums. Plankumu grupu asis izvietotas garuma virzienā, kas nozīmē magnētiskā lauka galveno orientāciju pa QT efekta izpausmes garumu Saules griešanas laikā.

Visu aktīvo apgabalu starojuma Stoksa I parametra sadalījums 5,2 cm viļņu garumā ir asimetrisks un ar maksimālo intensitāti izvietots galvenajā aktīvā apgabala daļā. Turpmāk Stoksa parametra I maksimuma punkts pieņemts par aktīvā apgabala centru.



3.2. att. NOAA 9068 SSRT 5,2 cm I (resnie konturi) un V (konturi) kartes un *Kitt Peak National Observatory* fotosfēras magnetogrammas apvienošana tuvu pie centrālā Saules meridiāna. Depolarizācijas līnija DL (balta nepārtraukta) atbilst $V/I = 0$ un atrodas tuvu fotosfēras magnētiskajai neitrālajai līnijai NL (balta pārtraukta līnija) (Bezrukov et al. 2005)

5,2 cm viļņu garuma starojuma cirkulārās polarizācijas pakāpju karšu un fotosfēru magnetogrammu apvienošana rāda, ka polarizācijas zīme sakrīt ar visu apgabalu magnetogrammu zīmi (3.2. att.). Novērojot aktīvo apgabalu centrālā meridiāna tuvumā, mikroviļņu starojuma depolarizācijas līnija ($p = 0$) ir tuva fotosfēras magnetogrammu neitrālajai līnijai ($B_{photo} = 0$).

Izvēlēto aktīvo apgabalu starojuma 5,2 cm viļņu garumā polarizācijas novērojumi visā to pāriešanas pa Saules disku laikā uzrāda:

- vismaz vienu polarizācijas inversiju, atrodoties aktīvajā apgabalā katrā Saules puslodē,
- to, ka polarizācijas zīmes maiņa notiek tajā apgabala daļā, kas atrodas tuvāk limbam,
- secīgu depolarizācijas līniju nobīdi rietumu virzienā.

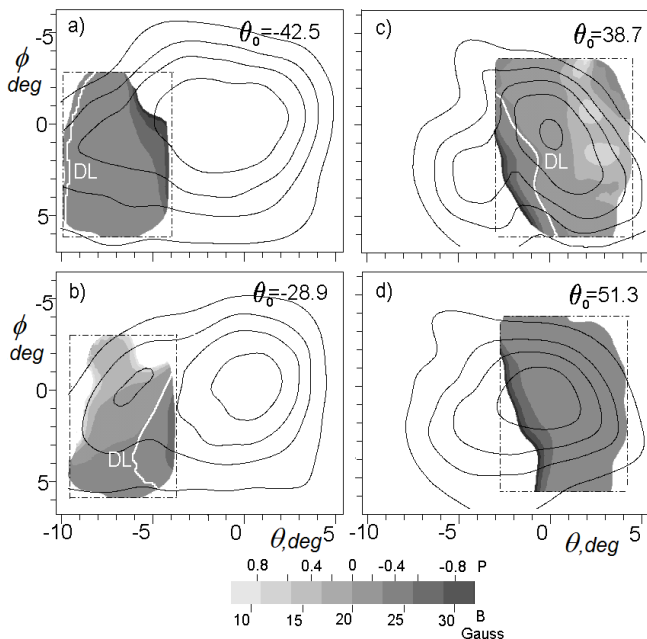
Šīs mikroviļņu starojumu polarizācijas inversijas īpatnības acīmredzot ir neapšaubāmas QT efekta izpausmes (Bandiera 1982). Cirkulārās polarizācijas pakāpju karšu normalizācijas metode ietver šādus apsvērumus:

- aktīvā apgabala starojums, izejot cauri Saules centrālajam meridiānam, ir brīvs no QT efekta,

- aktīvā apgabala magnētiskā lauka lielums un struktūra saglabājas visu laiku, pārejot pa Saules disku,
- novērots tikai viens QT efekts,
- mikroviļņu starojuma kartes ir precīzi kalibrētas.

Pirmais pieņēmums ir nepieciešams, lai polarizācijas pakāpju karti, kas noteikta, aktīvajam apgabalam ejot caur Saules centrālo meridiānu, pieņemtu par neinvertētās polarizācijas sākotnējo karti, ar kuru tiks salīdzinātas citu leņķisko novērojumu kartes. Aplūkotajiem aktīvajiem apgabaliem Saules centrālā meridiāna tuvumā QT virsma atrodas relatīvi augstu, kur magnētiskais lauks ir vājš un iespējamo QT efektu var neņemt vērā.

Otrais pieņēmums ir nepieciešams, lai vairākas aktīvo apgabalu starojuma polarizācijas pakāpju kartes ar dažādiem leņķiskajiem novērojumiem varētu salīdzināt ar sākotnējo polarizāciju karti un tās polarizāciju pakāpju normalizāciju. Šī aplūkoto aktīvo apgabalu pieņēmuma pamatojums ir to Saules plankumu grupu stabilitāte, ar kurām tie ir saistīti.



3.3. att. NOAA 9415 divdimensionālas magnetogrammas dažādos novērošanas leņķos heliogrāfiskās koordinātas attiecībā pret aktīvā apgabala centru. Depolarizācijas līnija (balta līnija) atbilst 20 Gs indukcijai un secīgi nobīdās rietumu virzienā (Bezrukov et al. 2005)

Magnētiskā lauka indukcijas divdimensiju sadalījuma moduļa noteikšana ar normalizācijas metodi izriet no (3.1.) attiecības un ņemot vērību $NL_a = 10^{18}$ cm⁻², kas ir aptuveni vienāda novērojamajai koronas daļai (Ryabov 2004):

$$B(x, y) = 205\lambda^{-4/3} \left[-\ln\left(\frac{p(x, y)}{2p_o(x, y)} + 0.5\right) \right]^{1/3}, \quad (3.2.),$$

kur:

x, y – novērojamā punkta koordinātas attiecībā pret aktīvā apgabala centru,
 λ – viļņa garums, cm,

$p(x, y)$ – novērojamā punkta cirkulārās polarizācijas pakāpe konkrētajā novērošanas leņķī,

$p_o(x, y)$ – novērojamā punkta bāzes cirkulārās polarizācijas pakāpe novērošanas leņķī, kas tuvs nullei,

B – magnētiskā lauka indukcijas modulis, Gs.

Aktīvā apgabala mikroviļņu starojuma cirkulārās polarizācijas pakāpju normalizētās un novērojamās kartes telpiskā apvienošana notika, ņemot vērā zināmo diferenciālo Saules griešanos. Metodes lietošana mikroviļņu starojuma novērošanas virknei rezultējas kā vairākas divdimensiju magnetogrammas dažādiem novērošanas leņķiem (3.3. att.).

Nosakot izvēlēto aktīvo apgabalu magnetogrammas, normalizēto polarizāciju pakāpju diapazons tika ierobežots ar zināmu precizitāti spožuma temperatūru mērījumiem ar SSRT robežās $-0,95 < p/p_o < 0,95$, kas noteica izmērīto indukciju diapazonu 7–35 Gs. Ņemot vērā to, ka metodes precizitāte ir maksimāla polarizācijas līnijas tuvumā (Gelfreikh et al. 1987, Ryabov 2004, 2006), ir acīmredzams, ka aktīvo apgabalu mikroviļņu starojuma polarizāciju inversijas analīze viļņu garumu diapazonam ar augstu spektrālo izšķirtspēju var nodrošināt magnētiskā lauka indukciju mērījumu precizitāti līdz izejas novērojumu kalibrēšanas precizitātei.

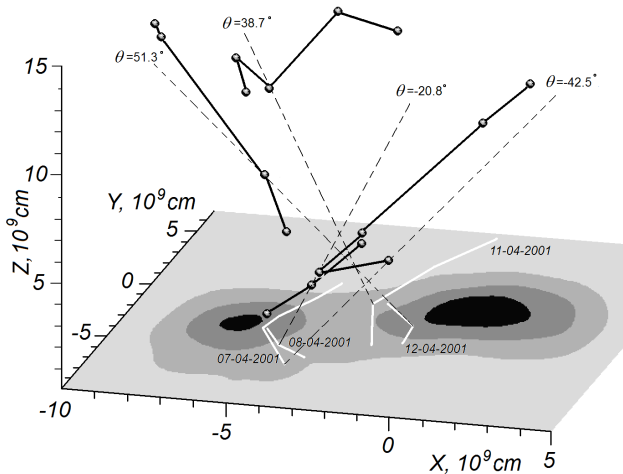
3.3. Trīsdimensiju koronālā magnetogrāfija

Vairākos darbos (Kundu & Alissandrakis 1984, Alissandrakis & Preka-Papadema 1984) parādīta QT virsmas augstumu noteikšana pēc mikroviļņu starojuma depolarizācijas līnijas novirzes attiecībā pret fotosfērisko magnetogrammu neitrālo līniju. Citos darbos (Gelfreikh et al. 1987, Aschwanden et al. 1994) QT virsmas augstumi noteikti no cirkulārās polarizācijas inversijas ātruma analīzes 5,2 cm viļņu garumā. Tomēr šīs QT virsmas augstumu noteikšanas metodes ir samērā neprecīzas, un tām ir novērtējuma raksturs. Augstumu un magnētiskā lauka trīsdimensiju sadalījuma indukcijas virs aktīvā apgabala var aprēķināt

ar fotosfēriskā magnētiskā lauka ekstrapolāciju bezspēka tuvinājumā koronas augstumā (Allisandrakis et al. 1996, Lee et al. 1998, Ryabov et al. 2003).

Rakstā (Bezrukov et al. 2005) izmantota jauna QT virsmas augstumu noteikšanas metode, kas balstīta uz nobīdes analīzi attēla plaknē punktiem ar vienādiem indukcijas moduļiem diviem secīgiem novērojumiem. Šī metode ļauj atteikties no pieņēmumiem par aktīvā apgabala magnētiskā lauka struktūras nemainību visā pāriešanas laikā un uzlabot QT virsmas augstumu noteikšanas precizitāti. Veiktie magnētiskā lauka augstumu mērījumi ar indukciju $B = 21$ Gs (kas atbilst polarizācijas pakāpju attiecībai $p/p_0 = -0,1$ viļņu garumam $5,2$ cm) NOAA 9068 un 9097 uzrādīja vidējo augstumu šai indukcijai $5,8 \cdot 10^9$ cm ar relatīvo mērījumu precizitāti līdz 20–30%. Attiecībā uz NOAA 9415 tika veidots magnētiskā lauka indukcijas $B = 21$ Gs telpiskais sadalījums virs aktīvā apgabala (3.4. att.).

Saules aktīvo apgabalu spektropolarimetrisko novērojumu secīgums frekvenču diapazonā ar augstu spektrālo un telpisko izšķirtspēju ļaus noteikt precīzu magnētiskā lauka trīsdimensiju sadalījumu visā koronas apjomā virs aktīvā apgabala.



3.4. att. QT virsmas lokalizācija (punkti) NOAA 9415. Katrā punktā magnētiskā lauka indukcijas vektors ir perpendikulārs starojuma izplatīšanās virzienam (pārtrauktas līnijas) dažādos novērošanas leņķos. Punktu augstumi noteikti no vienādas indukcijas $B = 21$ Gs punktu nobīdes analīzes pie diferenciālās Saules griešanās. Baltās līnijas uz attēla plaknes – relatīvo polarizācijas pakāpju $p/p_0 = -0,1$ līniju projekcijas (melnās līnijas), kas atbilst indukcijai $B = 21$ Gs (Bezrukov et al. 2005)

4. SAULES MIKROVIĻŅU STAROJUMA SPEKTROPOLARIMETRISKIE NOVĒROJUMI AR VSRC RADIOTELESKOPU RT-32

4.1. Saules mikroviļņu starojuma spektropolarimetrisko novērojumu nepieciešamības pamatojums

Mūsdienās ir plaši pieejami Saules novērojumi ar kosmiskajiem aparātiem rentgena staru un ultravioleto staru diapazonā ar augstu telpisko izšķirtspēju, tie sniedz pilnīgu informāciju par magnētisko lauku ģeometriju un morfoloģiju, uzliesmojumiem, koronālo masu izvirdumiem un Saules aktivitātes parādībām. Tomēr tieši Zemes mikroviļņu novērojumi ar speciālajiem radioteleskopiem Zemes atmosfēras radioredzamības logā ir viens no galvenajiem informācijas avotiem par magnētiskā lauka un plazmas mijiedarbību, kas norisinās augšējā hromosfērā, pārejas apgabalā un Saules apakšējā koronā. Šīm zonām raksturīgi lieli magnētiskā lauka gradienti un liels plazmas elektronu blīvuma un kinētiskās temperatūras izmaiņu diapazons. Tas izraisa to, ka polarizētais starojums, kas veidojas visā augšējās hromosfēras, pārejas slāņa un apakšējā korona augstumā diapazonā, izvietojas salīdzinoši nelielā viļņu garumu diapazonā – 1–10 cm.

Saules starojuma divdimensiju sadales novērojumi visā mikroviļņu diapazonā dos unikālu iespēju iegūt informāciju par fizikālajiem procesiem, kas notiek visā apgabalā un kas ir nozīmīgi Saules aktivitātes parādību attīstībai (e.g. Kundu 1965, Bastian et al. 1998, Lee 2007). Šīs informācijas analīze ļauj iegūt Saules magnētiskā lauka sadalījuma un atmosfēras parametru trīsdimensiju attēlu. Samērā šaurais mikroviļņu diapazons šādi detalizētai analīzei acīmredzami noteiks novērojumu augstas spektrālās izšķirtspējas nepieciešamību. Vairākkārt norādīts par aktīvo apgabalu izstarojuma spektru smalkās struktūras esamību, kas acīmredzot saistīta ar magnētiskā lauka sarežģīto struktūru un strāvas slāņu esamību (e.g. Kaverin 1980, Hurford 1986, Bogod 2010).

Viens no būtiskiem secinājumiem, kas izdarīts iepriekšējās nodaļās, ir secinājums par daudzfrekvenču mikroviļņu novērojumu nepieciešamību, lai precīzi noteiktu atmosfēras struktūru virs izolētiem Saules plankumiem un koronālajiem caurumiem un lai beidzot apstiprinātu hipotēzi par to atmosfēras samazināto blīvumu. Iepriekšējā nodaļā veiktā trīsdimensiju magnētiskā lauka aktīvā apgabala noteikšana, balstoties uz starojuma polarizācijas inversiju kvazišķērsvirziena izplatījumā, arī liecināja par mikroviļņu starojuma daudzfrekvenču novērojumiem ar augstu spektrālo izšķirtspēju, lai palielinātu precizitāti un dotu iespēju noteikt magnētisko lauku visā koronas apjomā virs aktīvā apgabala.

Saules aktīvo apgabalu struktūras pētījumu piemēri uz daudzfrekvenču novērojumu pamata (e.g. RATAN-600 spektropolarimetriskie novērojumi

(Pariiskii et al. 1976, Bogod et al. 2004, 2012, Kaltman et al. 2012), VLA daudzfrekvenču novērojumi (Kundu 1986, Zheleznyakov & Zlotnik 1988, Zlotnik 1995, Vourlidis & Bastian 1996), OVSA spektropolarimetriskie novērojumi (Lee et al. 1993, Gary et al. 1994) parāda to efektivitāti. Šobrīd Saules spektropolarimetrisko novērojumu ar augstu spektrālo izšķirtspēju nepietiekamais apjoms kavē aktīvo apgabalu struktūras detalizētu izpēti.

20. gadsimta 50.–60. gados LPR (Lielais Pulkovas radioteleskops) un RATAN-600 (abi Krievijā) bija pirmie radioteleskopu projekti Saules starojuma mikroviļņu daudzfrekvenču novērojumiem (Khaikin et al. 1960, Ikhsanova 1969, Pariiskii et al. 1976). To īstenošana un attīstība noteica tos Saules fizikas uzdevumu risināšanas virzienus, kas saistīti ar Saules aktivitātes izpēti un prognozēšanu. Pašlaik nozīmīgs ir FASR projekts, kas ietver Saules novērojumus maksimāli iespējamā centimetru un decimetru viļņu garumu diapazonā un ar maksimālo spektrālo izšķirtspēju, tādējādi tas ir orientēts uz praktiski visu iespējamo Saules fizikas uzdevumu risināšanu (Bastian 1998, 2003, 2004).

4.2. Pašreizējais Saules spektropolarimetrisko novērojumu stāvoklis

Līdz šim Saules radioastronomijas tehnika attīstījās divos virzienos. Pirmais – pastāvīgi darbojošos specializēto Saules radioteleskopu izveidošana, lai novērotu mikroviļņu starojumu ar augstu telpisko izšķirtspēju fiksētos garajos viļņos (NoRH, SSRT, VLA). Otrais – spektropolarimetru izmantošana universālajos radioteleskopos, lai novērotu Saules mikroviļņu starojuma spektrus ar samērā zemu telpisko izšķirtspēju; šādi radioteleskopi parasti darbojas pēc atsevišķām novērošanas programmām (e.g. Kundu et al. 1979, Zhdanov & Zhdanov 2011).

4.1. tabula

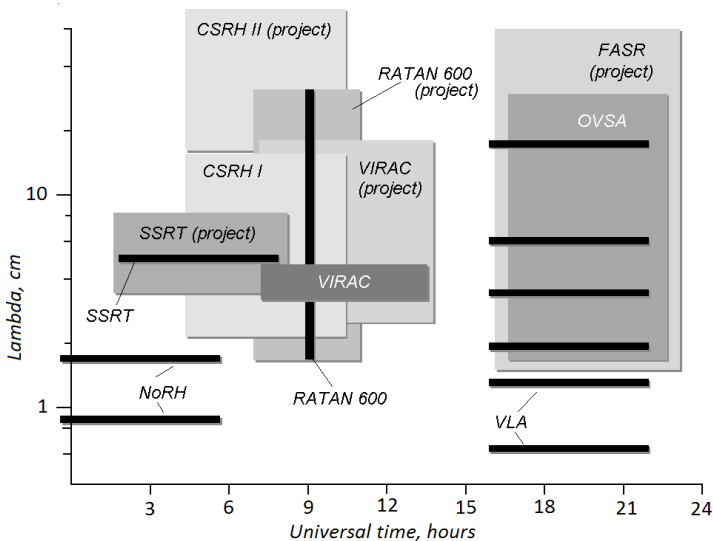
Galvenie esošie un projektējamie radioteleskopi Saules centimetru un decimetru viļņu starojuma spektropolarimetriskai novērošanai

Radioteleskopa nosaukums	Viļņu garuma diapazons	Stāvoklis 2012. gadā
<i>Nobeyama Radio Heliograph</i> (NoRH), Japāna	0,88, 1,76 cm	Pastāvīgi Saules novērojumi no 1991. gada (Nakajima et al. 1994)
<i>Siberian Solar Radio Telescope</i> (SSRT), Krievija	5,2 cm	Pastāvīgi Saules novērojumi no 1995. gada (Smolkov et al. 1984, Grechnev et al. 2003)
Multiwave SSRT	3,7–7,5 cm	Prototipa testēšana (Lesovoi et al. 2012)

Radioteleskopa nosaukums	Viļņu garuma diapazons	Stāvoklis 2012. gadā
RATAN-600, Krievija	1,67–31,4 cm, 52 kanāli	Saules pastāvīgie novērojumi no 1976. gada. Uztveršanas aparātūras modernizācija, spektrālās izšķirtspējas paaugstināšana? Novērošanas laika paplašināšana līdz 4 stundām dienā (Bogod 2011a, b)
<i>Chinese Spectral Radio Heliograph</i> (CSRH), Ķīna CSRH I	15–75 cm, 64 kanāli	Prototipa testēšana
CSRH II	2–15 cm, 32 kanāli	(Yan et al. 2004, 2009, 2011) Projekts
<i>Jansky Very Large Array</i> (VLA), ASV	0,6–0,75, 1,25–1,36, 1,94–2,08, 3,41–3,75, 6–6,66, 17,3–22,4, 88–100 cm	Neregulāri Saules novērojumi http://www.vla.nrao.edu/
<i>Extended VLA</i>	0,7–30 cm 16 384 kanāli	Projekts http://www.aoc.nrao.edu/evla/
<i>Extended Oven Valley Solar Array</i> (EOVSA, OVSA), ASV	1,67–30 cm, 86 kanāli	Regulāri Saules novērojumi no 1989. gada. FASR prototipa testēšana (Gary et al. 1994)
<i>Frequency Agile Solar Radiotelescope</i> (FASR), ASV	1,5–60 cm	Projekts (Bastian et al. 1998, 1999, 2003, 2004)
<i>Ventspils International Radio Astronomy Center</i> (VIRAC), Latvija	2,5, 6 cm 3,2–4,7 cm, 16 kanāli	Neregulāri Saules novērojumi no 1998. gada. (Ozolins et al. 1998) Spektropolarimetriskā kompleksa testēšana (Bezrukov 2013)

Mūsdienās aizvien lielākās tehniskās iespējas ļāvušas apvienot šos divus virzienus. Vispārēja tendence ir praktiski visu esošo Saules radioteleskopu modernizācija un jaunu radioteleskopu projektēšana, lai veiktu mikroviļņu starojuma spektropolarimetriskos novērojumus ar augstu spektrālo izšķirtspēju un sintezētu Saules starojuma divdimensiju kartes ar augstu telpisko izšķirtspēju.

4.1. tabulā sniegta ziņas par galveno modernizējamo un projektējamo Saules spektropolarimetrisko radioteleskopu pašreizējo stāvokli.



4.1. att. Viļņu garumu diapazoni un iespējamais novērošanas laiks dienas laikā esošajiem, modernizētajiem un projektējamiem radioteleskopiem Saules centimetru un decimetru viļņu garumu starojuma novērojumiem

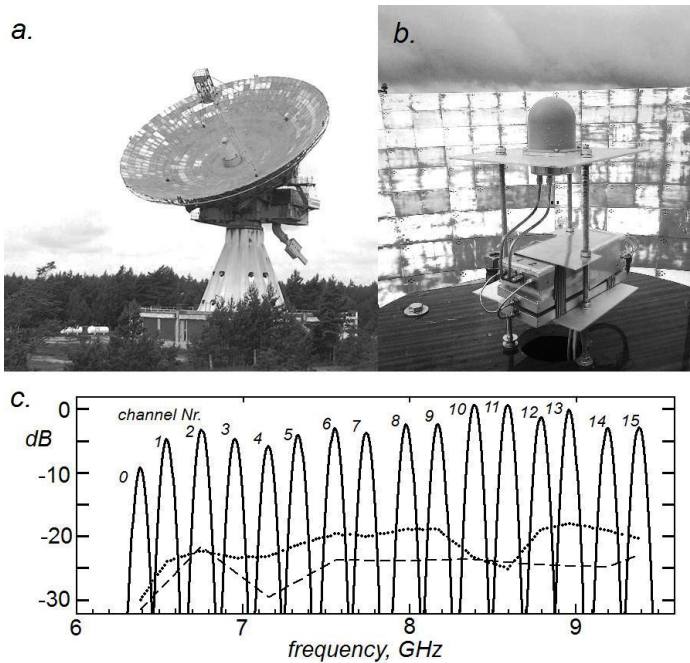
Visu uzskaitīto projektu īstenošana ļaus dienas laikā iegūt ievērojamu daļu no visas iespējamās informācijas par Saules centimetru un decimetru viļņu starojumu (4.1. att.).

Daudzkanālu komplekss spektropolarimetriskiem Saules novērojumiem 3,2–4,7 cm viļņu garumu diapazonā, ko realizē ar VSRC radioteleskopu RT-32 (Bezrukov 2013) ir viens no pirmajiem modernizējamiem un projektējamiem Saules radioteleskopiem, un vienīgi ar to pašlaik tiek veikti Saules novērojumi šajā viļņu garumu diapazonā Zemes austrumu puslodē.

4.2. Daudzkanālu spektropolarimetriskais komplekss Saules mikroviļņu novērojumiem, kas realizēts ar VSRC radioteleskopu RT-32

Daudzkanālu programmaparatūras komplekss spektropolarimetriskajiem novērojumiem paredzēts, lai novērotu un iegūtu Saules mikroviļņu starojuma Stoksa parametru divdimensiju karti viļņu garumu diapazonā 3,2–4,7 cm. Pašlaik tiek izstrādāts projekts novērojamo viļņu garumu diapazona paplašināšanai līdz 2,5–18 cm.

Izmantojot spožus avotus (Cas A, Cyg A), izmēritais radioteleskopa RT-32 antenas virziena diagrammas platums pēc pusjaudas līmeņa (HPBW) ar uzstādītu platjoslas apstarotāju ir 3,5–5,2 leņķiskās minūtes. Signāla/trokšņa attiecība (sistēmas troksnis, kas attiecināts pret mierīgās Saules antenas temperatūras līmeni konkrētajā viļņu garumā) un krosspolarizācijas traucējumu līmenis (signāla iekļūšana no vienas polarizācijas ieejas otras polarizācijas izejā) vidēji ir apmēram 20 dB. Kompleksa antena–apstarotājs–spektropolarimetrs frekvenču kanālu sistēmas temperatūras, kas izmērītas, izmantojot mierīgās Saules apgalbus un citus spožus avotus (Mēness, Cas A, Cyg A), ir apmēram 130–180 K (mērīšanas metodes – e.g. Kuzmin & Salomonovich 1964, Rohlfis & Tomson 2004). Dinamiskais diapazons – vismaz 30 dB attiecībā pret mierīgas Saules antenas temperatūrām konkrētajā viļņu garumā.

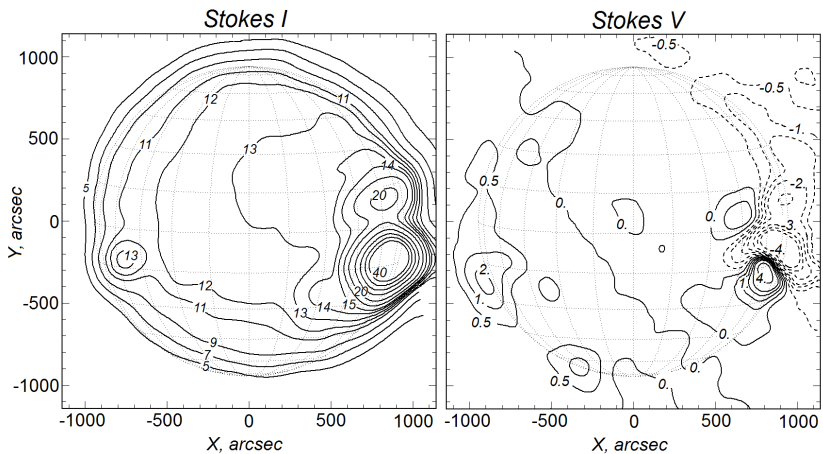


4.2. att. Radioteleskops VSRC RT-32 (a). Platjoslas apstarotājs un Saules mikroviļņu spektropolarimetrisko novērojumu kompleksa UHF daļa – uzstādīti antenas sekundārajā fokusā (b). Spektropolarimetra kanālu relatīvās frekvenču raksturlieknes (nepārtrauktas līnijas), krosspolarizācijas traucējumi (raustīta līnija) un signāla/trokšņa attiecība (punktētā līnija) (c) (Bezrukov 2013).

Pilna spektropolarimetriskā kompleksa testēšana tika veikta vairākās Saules novērojumu sesijās no 2012. gada jūlija līdz septembrim. Rezultātā iegūtas vairākas polarizētā Saules mikroviļņu starojuma divdimensiju karšu virknes viļņu garumu diapazonā 3,2–4,7 cm.

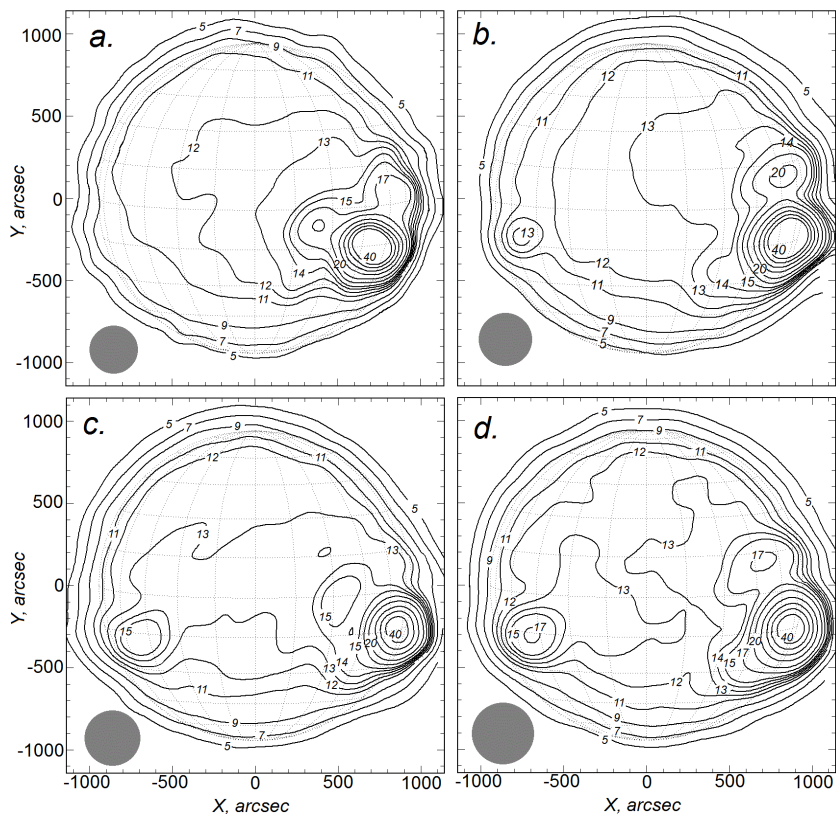
Saules novērojumi tika veikti ar azimutālo skenēšanu, līdzīgi kā rakstā (Magnum 2007). Antena pārvietojās pa azimutu ar konstantu ātrumu, katrā skenēšanā novirzoties augstumā par pusi vismazākās vērsuma diagrammas platuma (1,2–1,6 leņķiskās minūtes) attiecībā pret esošo Saules centra stāvokli. Pilnai Saules radioattēla skenēšanai bija nepieciešami 28–30 skeni un aptuveni 1,5 stundas.

Karšu veidošana no izmērītajiem antenu temperatūru skenēm ietver sevī katra spektropolarimetra mērījuma antenas esošo horizontālo koordinātu pārveidošanu attēla plaknes koordinātās attiecībā pret Saules centru un heliogrāfiskajām koordinātām. Tālāk tika veikta antenu temperatūru mērījumu divdimensiju karšu sintēze, izmantojot kartes trūkstošo pikseļu bilineāro interpolāciju.



4.3. att. Saules starojuma Stoksa parametra I un V kartes ar viļņu garuma 3,76 cm, kas veidotas heliogrāfiskajās koordinātās. Novērojums 2012-07-17 UT 7:15 uz VIRAC RT-32. Kontūri doti 10^3 K. Stoksa parametra V kartē, nepārtraukti kontūri atbilst RCP, punktēti – LCP (Bezrukovs 2013)

Testa rezultāti pierādīja iegūstamo Saules mikroviļņu izstarojuma karšu adekvātumu, spektrālo sakarību pareizību un pietiekamu spožuma temperatūru mērījumu precizitāti (4.3., 4.4. att.).



4.4. att. Saules starojuma Stoksa parametra I kartes viļņu garumu secībai:

a. – 3,41 cm (2012-07-16 UT 14:18), b. – 3,76 cm (2012-07-17 UT 7:15),
c. – 3,97 cm (2012-07-18 UT 13:30), d. – 4,44 cm (2012-07-18 UT 09:10).

Kontūri doti 10^3 K. Tumšie apli ir antenas RT-32 virziena diagrammas HPBW pēc pusjaudas atbilstošajam viļņa garumam (Bezrukovs 2013)

4.3. Saules mikroviļņu starojuma spožuma temperatūras karšu atjaunošana un „tīrīšana”

Ar radioteleskopu RT-32 VSRC novērojamā Saules antenu temperatūru telpiskā sadalījuma saistība ar patieso mikroviļņu izstarojuma spožuma temperatūru sadalījumu izriet no vispārzināmām attiecībām (e.g. Kraus 1984, Rohlfs & Tomson 2004):

$$T_a(x + \Delta x, y + \Delta y) = k_{cal}(T_b(x, y) * D(x, y)) + N_{sys}, \quad (4.1.)$$

kur:

T_a – novērots antenas temperatūras sadalījums attēlā plaknē,

x, y – attēla plaknes koordinātas attiecībā pret Saules centru,

Dx, Dy – koordinātu noteikšanas kļūdas,

T_b – patiesā Saules starojuma spožuma temperatūru sadalījums,

D – radioteleskopa antenas punktveida avota funkcija (*p.s.f.* – *point spread function*),

k_{cal} – kalibrēšanas koeficients,

N_{sys} – sistēmas aditīvie trokšņi.

Patiesā Saules mikroviļņu starojuma spožuma temperatūru sadalījuma atjaunojums būs apgriezta (4.1.) uzdevuma risinājums.

Vispārīgā gadījumā kļūdu avoti, nosakot patieso spožuma temperatūru punktā uz Saules mikroviļņu izstarojuma kartē, ir šādi:

- antenas temperatūru mērījumu aparātūras precizitāte;
- kļūdas, kas saistītas ar antenas stāvokļa noteikšanas neprecizitāti;
- kļūdas, kas saistītas ar antenas virziena diagrammas neregularitāti.

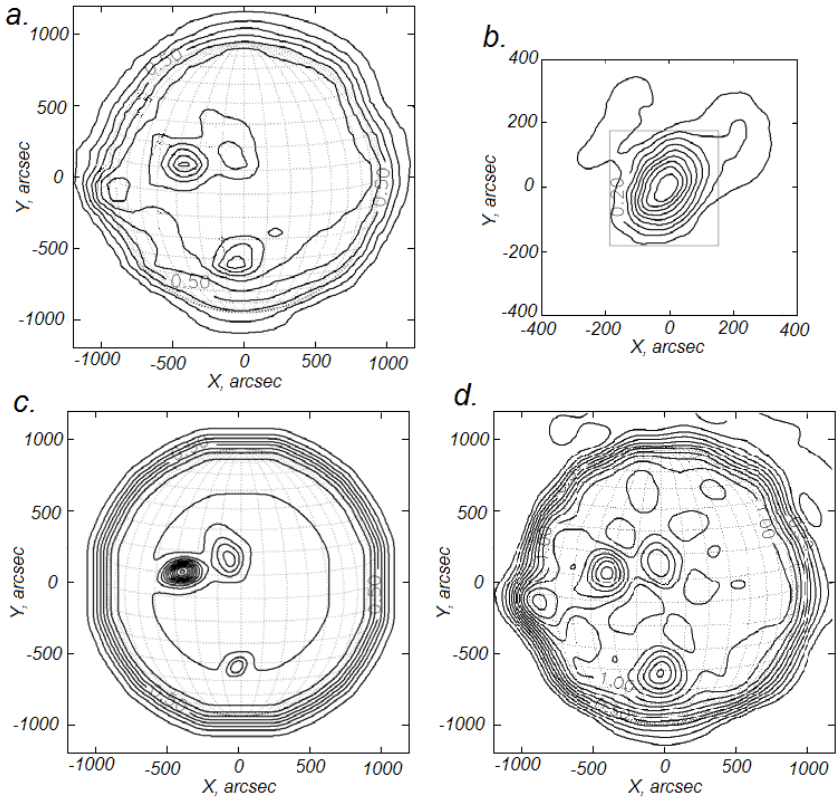
Izmērītie spektropolarimetra kros polarizācijas traucējumu un sistēmas trokšņa līmeņi atšķiras starp kanāliem un vidēji ir apmēram 20 dB (relatīvā mērījuma precizitāte ~ 1–1,5%) mērīšanas laikā aptuveni 10 ms. Palielinot signāla uzkrāšanas laiku līdz 1 s, iespējams palielināt antenu temperatūras mērījuma precizitāti par 10 dB (relatīvā mērījumu precizitāte palielināta līdz ~ 0,1–0,15%).

Precizitāti radioteleskopa elektriskās ass stāvokļa noteikšanai attiecībā pret esošo Saules centru nosaka ar radioteleskopa antenas asu leņķisko stāvokļa devēju diskretizāciju (1 bits = 20 leņķiskās sekundes) un antenas lokālo horizontālo koordinātu noteikšanas sistemātisko kļūdu. Kļūda, nosakot lokālā avota stāvokli attiecībā pret Saules centru, ir ±10 leņķiskās sekundes katrā asī. Antenas temperatūras relatīvā mērījuma kļūda, kas rezultējas no lokālā avota stāvokļa noteikšanas kļūdas, ņemot vērā virziena diagrammas parasto Gausa tuvinājumu, visīsākajam viļņa garumam ir ~ 1,5%.

Radioteleskopa RT-32 leņķisko devēju sistemātiskās kļūdas un antenas virziena diagramma ir pietiekami labi izpētītas pēc kalibrēšanas avotu novērojumiem (Bezrukovs & Ozolinsh 2012). Radioteleskopa antenas elektriskās ass nobīde no antenas asu leņķisko devēju nullēm (lokālās horizontālās koordinātas) ir ~ 1,5–2 leņķiskās minūtes un ir atkarīga no novērojuma augstuma antenas konstrukcijas deformācijas dēļ. Radioteleskopa RT-32 uzvadišanas sistēma automātiski kompensē šīs kļūdas līdz leņķisko devēju diskretizācijas vērtībai.

Galvenais novērojamā Saules mikroviļņu starojuma patieso spožuma temperatūru noteikšanas kļūdu avots ir radioteleskopa RT-32 antenas ierobežotie

plankumu ordinārās modas deficīts, koronālie caurumi, prominences, koronālās kondensācijas u. c.).



4.5. att. Saules “netīrā” karte ar viļņa garumu 2,5 cm (a). Radioteleskopa RT-32 antenas atbalss uz punktveida avotu viļņa garumā, kas noteikta pēc Cyg A novērojumiem (b). Ar standarta procedūru MEM (c) un GMEM (d) veiktās sākotnējās kartes „tīrīšanas” rezultāti

Nemot to vērā, tika noteikts, ka optimālā metode, lai atjaunotu ar radioteleskopu RT-32 novēroto Saules lokālo avotu starojuma spožuma temperatūru kartes, ir algoritms GMEM (*Generalized MEM* – vispārinātā maksimālās entropijas metode) (Bezrukov et al. 2010). Būtiska šī algoritma atšķirība no standarta ir iespēja “tīrīt” lokālos avotus ar negatīvām spožuma temperatūrām. Algoritmu iespējams modificēt, lai atjaunotu atsevišķu telpisko spektrālo komponentu kartes.

Pamata algoritms GMEM Saules mikroviļņu spožuma temperatūru kartes atjaunošanai katrai cirkulārai polarizācijai un katram frekvenču kanālam ietver šādas darbības:

- 1) lokālo avotu „netīrās” kartes atdalīšana no „netīrās” Saules izstarojuma spožuma kartes, kas iegūta novērojumos:

$$T_{dls} = \frac{1}{k_{cal}} T_a - T_{qs} * D \quad (4.2)$$

- 2) lokālo avotu „netīrās” kartes sadalīšana pozitīvajās un negatīvajās komponentēs:

$$T_{dls}^+ = \begin{cases} T_{dls}; T_{dls} > 0 \\ 0; T_{dls} \leq 0 \end{cases},$$

$$T_{dls}^- = \begin{cases} -T_{dls}; T_{dls} < 0 \\ 0; T_{dls} \geq 0 \end{cases}, \quad (4.3)$$

- 3) lokālo avotu kartes pozitīvo un negatīvo komponentu atsevišķa „tīrīšana” ar standarta MEM procedūru:

$$T_{ls}^+ = MEM(T_{dls}^+, D, n)$$

$$T_{ls}^- = MEM(T_{dls}^-, D, n), \quad (4.4)$$

- 4) mierīgās Saules spožuma temperatūru teorētiskās kartes un lokālo avotu „tīro” karšu summēšana:

$$T_b = T_{qs} + k(T_{ls}^+ - T_{ls}^-), \quad (4.5)$$

- 5) paliekošo traucējumu kartes noteikšana atjaunošanas atbilstības kontrolei:

$$T_{res} = \frac{1}{k_{cal}} T_a - T_b * D \quad (4.6)$$

kur:

T_a – novērotā Saules starojuma antenu temperatūru karte,

k_{cal} – kalibrēšanas koeficients, ko nosaka no iepriekš izvēlētiem mierīgās Saules apgabaliem ar zināmām spožuma temperatūrām (no novērojumiem),

T_{qs} – mierīgās Saules spožuma temperatūru telpiskais sadalījums konkrētā garuma vilnī (Borovik et al. 1992),

D – radioteleskopa RT-32 antenas atbalss (punktveida avota funkcija) uz punktveida avotu, kas nosakāms pēc tādu kalibrēšanas avotu novērojumiem, kas uzskatāmi par punktveida avotiem, konkrētā garuma vilnī,

T_{dls}^- – lokālo avotu spožuma temperatūru „netīrās” karte,

T_{dls}^+ , T_{dls}^- – lokālo avotu „netīrās” kartes pozitīvās un negatīvās komponentes,

MEM – MEM standarta procedūra ar n iterācijām,

T_{ls}^+ , T_{ls}^- – lokālo avotu „tīro” karšu pozitīvās un negatīvās komponentes,

k – mēroga koeficients,

T_b – Saules starojuma spožuma temperatūru sadalījuma rezultējošā „tīrās” karte,

T_{res} – paliekošā traucējumu karte.

Optimālā MEM procedūras iterāciju skaita un mēroga koeficientu izvēle katram viļņu garumam veikta empīriski, lai iegūtu maksimālo nomākumu artefaktiem, kuri rodas, sintezējot karti no skeniem, un lai iespējami maksimāli saglabātu lokālo avotu zema kontrasta komponentes. Vēl viens Saules starojuma spožuma temperatūru kartes atjaunošanas un „tīrīšanas” adekvātuma kritērijs ir trokšņu sadalījuma vienmērīgums paliekošajā kartē. Algoritma GMEM (ar empīriski izvēlētiem parametriem) izmantošanas rezultātu analīze ļauj mums to pieņemt par pamatu uz radioteleskopa RT-32 novērojamo Saules starojuma spožuma temperatūru karšu atjaunošanai (4.5.d att.).

4.4. Saules fizikas uzdevumi, uz kuriem var orientēt Saules spektropolarimetriskos novērojumus ar VSRC radioteleskopu RT-32

To aktuālo uzdevumu loka izvēle, uz kuru risināšanu varētu būt orientēti Saules spektropolarimetriskie novērojumi ar radioteleskopu RT-32, nosaka VIRAC veicamo Saules novērojumu tālākās attīstības virzienu un tā vietu mūsdienā Saules fizikā (Bezrukov 2009, 2011).

Ņemot vērā VSRC radioteleskopa RT-32 pašlaik unikālo lielo spektrālo izšķirtspēju un ierobežoto telpisko izšķirtspēju spektropolarimetra viļņu garumu diapazonā, Saules novērojumus nākotnē ir optimāli orientēt uz šādām aktuālām Saules fizikas problēmām:

1. Saules lielmēroga struktūras novērojumi, piemēram:
 - mierīgās Saules mikroviļņu starojuma telpiskās un spektrālās struktūras pētīšanai (e.g. Bastian et al. 1996, Borovik et al. 1989, 1992, Gary & Zirin 1988),
 - koronālie caurumi un lielle izolētie Saules plankumi (e.g. Krissinel et al. 2000, Obridko & Schelting 1999, Bilenko 2005),
 - lielmēroga koronālās cilpas.
2. Lokālo avotu mikroviļņu starojuma plūsmas fluktuāciju novērojumi:
 - aktīvo apgabalu magnētisko lauku izcelšanās un attīstīšanās pētīšanai (e.g. Gelfreikh & Nefedev 1975),
 - mikroviļņu starojuma plūsmas oscilāciju analīzei, lai prognozētu hromosfēras un koronālos uzliemjumus (e.g. Wang et al. 2003, Yasnov et al. 2004, Bogod & Yasnov 2009),
 - mikroviļņu starojuma smalkās spektrālās struktūras uzliesmojumu aktivitātes indikatora pētīšanai (Kaverin et al. 1980)
3. Precīza divdimensiju un trīsdimensiju koronālā magnetogrāfija.

5. REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

1. Pierādīts, ka Saules aktīvo apgabalu atmosfēras blīvums virs izolētajiem plankumiem ir pazemināts salīdzinājumā ar bipolāro aktīvo apgabalu atmosfēras blīvumu.
2. Ir iegūti atmosfēras blīvuma modeļnovērtējumi virs izolēta Saules plankuma pārejas apgabalā augstumā $1 \div 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$.
3. Ir iegūtas izolētā Saules plankuma abu modu starojumu spožuma temperatūru modeļatkarības no iespējamiem atmosfēras parametriem.
4. Izstrādāta precizēta metodika, lai noteiktu magnētisko lauku virs bipolāri aktīva apgabala, tās pamatā ir mikroviļņu starojuma polarizācijas inversijas analīze tā kvazišķērsizplatīšanās gadījumā. Koronālā magnētiskā lauka indukcijas lieluma noteikšanas precizitāte sasniedz $3 \div 5\%$ un augstuma noteikšanas precizitāte – $10 \div 20\%$, izmantojot pieejamās Saules mikroviļņu starojuma divdimensiju kartes $5,2 \text{ cm}$ viļņu garumam.
5. Iegūtas divdimensiju magnetogrammas bipolārajiem aktīvajiem apgabaliem NOAA 9068, 9097, 9339, 9415.
6. Sastādīts precizēts magnētiskā lauka trīsdimensiju sadalījums virs bipolārā aktīva apgabala NOAA 9415. Konstatēts, ka magnētiskā lauka 21 Gs indukcijas augstums ir $3 \div 5 \cdot 10^9 \text{ cm}$ un ka magnētiskā lauka izplatības telpiskais raksturs atbilst lauka bipolārajam avotam.
7. Ar Ventspils Starptautiskā radioastronomijas centra radioteleskopu RT-32 īstenots un testēts Saules mikroviļņu starojuma $3,2 \div 4,7 \text{ cm}$ viļņu garuma diapazonā novērošanas daudzkanālu spektropolarimetriskais komplekss ar augstu spektrālo izšķirtspēju.
8. Iegūtas vienas no pirmajām Saules mikroviļņu starojuma Stoksa I un V parametru divdimensiju karšu sekvencēm $3,2 \div 4,7 \text{ cm}$ viļņu garuma diapazonā ar spektrālo izšķirtspēju līdz $0,1 \text{ cm}$.
9. Noskaidrots visatbilstošākais Saules mikroviļņu starojuma karšu, kas iegūtas ar radioteleskopu RT-32, atjaunošanas un „tīrīšanas” algoritms.
10. Noteikts Saules fizikas uzdevumu loks, kurus varēs veiksmīgi atrisināt, izmantojot spektropolarimetriskos novērojumus ar Ventspils Starptautiskā radioastronomijas centra radioteleskopu RT-32.

6. PROMOCIJAS DARBĀ IEKĻAUTĀS AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Ryabov B. I., Bogod V. M., Gelfreikh G. B., Maksimov V. P., Drago F., Lubyshev B. I., Peterova N. G., Borisevich T. P., Bezrukov D. A. (2004) Coronal magnetograms of solar active regions, *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symposium*, Vol. 223, p. 215. Eds. Stepanov A. V., Benevolenskaya E. E., Kosovichev A. G. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
2. Bezrukov D. A., Ryabov B. I., Bogod V. M., Gelfreikh G. B., Maksimov V. P., Drago F., Lubyshev B. I., Peterova N. G., Borisevich T. P. (2005) On the Technique of Coronal Magnetography Through Quasi-Transverse Propagation of Microwaves. *Baltic Astronomy*, Vol. 14, No. 1, 83.
3. Bezrukov D., Ryabov B. (2009) Prospects of solar microwave observations at the Ventspils radio astronomy center. *Latvian Journal of Physics and Technical sciences*, Vol. 46, No. 5, pp. 58-63.
4. Bezrukov D. A., Ryabov B. I., Zalite K., Baikova A. T. (2009) Applications of recovering procedures to RT-32 radio maps of the Sun. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 46, No. 6, p. 49-56.
5. Bezrukov D., Ryabov B., Peterova N. G., Topchilo N. A. (2011) Sharp changes in the ordinary mode microwave emission from a stable sunspot: model analysis. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 48, No. 2, p. 56-69.
6. Bezrukovs D. (2011) Recent Advances in Solar Physics at VIRAC: Analysis of Solar Active Regions on the Basis of Microwave Observations. *Baltic Astronomy*, Vol. 20, No. 2, pp. 205-210.
7. Bezrukovs D., Ryabov B., Shibasaki K. (2012) Isolated Sunspot with Dark Patch in Coronal Emission. *Baltic Astronomy*, Vol. 21, No. 4, pp. 509-516.
8. Bezrukov D. (2013) Spectral Polarimetric Observations of the Sun by VITAC RT-32 Radio Telescope: First Results. *Baltic Astronomy*, Vol. 22, No. 1, pp. 9-13.

7. AUTORA PUBLIKĀCIJAS PAR CITĀM TĒMĀM

1. Ozolinsh G., Paupere M., Rakitko G., Bezrukov D., Bondarenko V., Sika Z. (1998) The VIRAC 32-metre radiotelescope first astronomical test observations. *Latvian Journal of Physics and Technical sciences*, No. 6, p. 31-38.
2. Bervalds E., Ozolinsh G., Sika Z., Bezrukov D., Abele M., Pavenis A. (1998) The VIRAC 32-meter antenna – reconstruction of the system of tracking and guidance. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, No. 6, p. 12-19.
3. Abele M., Vilks I., Bezrukov D., Sika Z. (2004) Measurements of the reflecting surfaces of RT32 radio telescope. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, No. 2, p. 46-53.
4. Bezrukovs D., Ozolinsh G. (2012) The Antenna Pattern of VIRAC Radio Telescope RT-32 at 6 cm Wavelength. *Space Research Review*, Vol. 1, p. 6.

8. ZIŅOJUMI UN STENDA REFERĀTI ZINĀTNISKAJĀS KONFERENCĒS

1. 2nd International Scientific Conference “Information society and modern business”. Ventspils University College, Ventspils, July 1-2, 2005. D. Bezrukov, V. Bezrukov, G. Ozolins, M. Paupere, B. Ryabov, Z. Sika “*Solar radio observations with the RT-32*”.
2. Latvijas Universitātes 64. konference, 9. februāris, 2006. D. Bezrukov, B. Ryabov “*Solar active regions with and without coronal condensation*”.
3. Latvijas Universitātes 68. konference, 18. februāris, 2010. D. Bezrukovs, B. Rjabovs, A. Bajkova “*Saules mikroviļņu novērošanas perspektīvas Ventspils Radioastronomijas centrā*”.
4. The Astronomical Conference of Russia (VAK-2010). SAO, Sankt-Petersburg, Russia, September 13-18, 2010. N. Peterova, N. Topchilo, B. Ryabov, D. Bezrukov „*The cyclotron emission characteristics above the active region NOAA 10325*” (in Russian).
5. The Community of European Solar Radio Astronomers (CESRA), Conference “Energy storage and release through the solar activity cycle – models meet radio observations”. La Roche en Ardenne, Belgium, June 15-19, 2010. D. A. Bezrukov, B. I. Ryabov “*Prospects of Solar Microwave Observations at the Ventspils Radio Astronomy Center*”.
6. Young European Radio Astronomers Conference (YERAC), Spain, July 5-8, 2010. D. Bezrukov, B. Ryabov, A. Bajkova “*The Recovering Procedures for Radio Maps of the Sun*”.
7. Latvijas Universitātes 69. konference, 10. februāris, 2011. D. A. Bezrukov, N. G. Peterova, B. I. Ryabov, N. A. Topchilo “*Model analysis of a stable sunspot with sharp changes in ordinary mode radiation at microwaves*”.
8. International astronomy conference “Expanding the Universe”, Tartu, Estonia, 27-29 April, 2011. D. Bezrukov “*Recent advances in Solar physics in VIRAC: Analysis of Solar active regions on the base of microwave observations*”.
9. Latvijas Universitātes 70. konference, 18. februāris, 2012. D. Bezrukovs, B. Rjabovs “*On the Analogy of Isolated Sunspots and Coronal Holes*”.
10. “Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing”, Ventspils, May 7-8, 2012. D. Bezrukov, B. Ryabov (Ventspils International Radio Astronomy Center), K. Shibasaki (Nobeyama Solar Radio Observatory) “*Isolated Sunspot With Dark Patch In Coronal Emission*”.
11. Ventspils International Radio Astronomy Conference “Advances in radio astronomy of Near-Earth Environment”, Ventspils, August 13-15, 2012. D. Bezrukovs, B. Ryabovs “*Spectral-Polarimetric Observations of the Sun by VIRAC RT-32 Radio Telescope*”.
12. Latvijas Universitātes 71. konference, 13. februāris, 2013. D. Bezrukovs, B. Rjabovs “*Spectral Polarimetric Observations of the Sun by the VIRAC Radio Telescope RT-32 : New Possibilities*”.

9. LITERATŪRA

- Akhmedov Sh. B., Gelfreikh G. B., Bogod V. M., Korzhavin A. N. (1982) Solar Physics, Vol. 79, p. 41-58.
- Akhmedov Sh. B., Ryabov B. I. (1980) Bulletin Solnechnie Dannie, No. 12, c. 85-94 (in Russian).
- Alissandrakis, C. E. (1999) Third Advances in Solar Physics Euroconference: Magnetic Fields and Oscillations, ASP Conference Series, Vol. 184, p. 23-27.
- Alissandrakis C. E., Borgioli F., Chiuderi Drago F., Hagiard M., Shibasaki K. (1996) Solar Physics, Vol. 167, Issue 1-2, pp. 167-179.
- Alissandrakis C. E., Preka-Papadema P. (1984) Astronomy and Astrophysics, Vol. 139, p. 507.
- Altschuler M. D., Trotter D. E., Orrall F. Q. (1992) Solar Physics, Vol. 26, Issue 2, pp. 354-365.
- Amari T., Boulmezaoud T. Z., Mikic Z. (1999) Astronomy and astrophysics, Vol. 139, p. 271.
- Apushkinsky G. P., Topchilo N. A., Tsyganov A. N., Nesterov N. S. (1996) Astron. Nachr., Vol. 317, No. 6, p. 317.
- Aschwanden M. J., Lim J., Gary D. E., Rlimchuk J. A. (1995) The Astrophysical Journal, Vol. 454, pp. 512-521.
- Bakunina A., G. Ya. Smolkov G. Ya., S. D. Snegirev S. D. (2008) Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 51, Issue 8, pp. 579-596.
- Bandiera R. (1982) Astronomy and Astrophysics, Vol. 112, pp. 52-60.
- Bastian T. S. (2004) Chapter 3 in Kluwer ASSL book "Solar and Space Weather Radiophysics", Current Status and Future Developments Series, Vol. 314, pp.47-68. Eds. Dale E. Gary and Christoph U. Keller.
- Bastian T. S. (2003) Proc. SPIE, 4853, p. 98.
- Bastian T. S., Benz A. O., Gary D. E. (1998) ARA & A, Vol. 36, p.131.
- Bastian T. S., Dulk A., Leblanc Y. (1996) ApJ, Vol. 473, p. 539.
- Bastian T. S., Gary D. E., White S. M., Hurford G. J. (1998) Proc. SPIE, Vol. 3357, p. 609-619.
- Bastian T. S. (2003) Proc. SPIE, 4853, p. 98.
- Bastian T. S., Gary D. E. (1998) In Coronal Physics from Radio and Space Observations, Proceedings of the CESRA Workshop, G. Trotter, ed. (Springer-Verlag: Berlin), p. 218.
- Bastian T. S., Gary D. E., White S. M. (1999) Report to the Astronomy and Astrophysics Survey Committee. (<http://www.ovsa.njit.edu/fasr/Panel99r.html>)
- Bastian T. S., Gary D. E., White S. M., Hurford G. J. (1998) Proc. SPIE, Vol. 3357, p. 609-619.
- Bilenko I. A. (2005) International Journal of Geomagnetism and Aeronomy (IJGA), 6, GI 1009.
- Bogod V. M. (2011a) Astrophysical Bulletin, V. 6, No. 2, 207-222.
- Bogod V. M., Alesin F. V., Pervakov A. A. (2011b) Astrophysical Bulletin, V. 6, No. 2, 223-233.
- Bogod V. M., Gelfreikh G. B. (1980) Solar Physics, Vol. 67, p. 29.
- Bogod V.M., Gelfreikh G.D., Ryabov B.I., Hafizov S.R. (1993) ASP Conference Series, Vol. 46, p. 302.
- Bogod V. M., Gelfreikh G. B., Drago F. Ch., Maximov V. P., Nindos A., Kaltman T. I., Ryabov B. I., Tokhchukova S. Kh. (2003) arXiv:astro-ph/ 3009444 v1.
- Bogod V. M., Gelfreikh G. D., Ryabov B. I., Hafizov S. R. (1993) ASP Conference Series, Vol. 46, p. 302.
- Bogod V. M., Yasnov L. V., Kaltman T. I. (2011) Astronomy Reports, Vol. 55, No. 1, pp. 82-90.

- Bogod V. M., Gelfreikh G. B., Yasnov L. V. (2004) In Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. IAU Symposium, Vol. 223, pp. 613-614.
- Bogod V. M., Stupishin A. G., Yasnov L. V. (2012) Solar Physics, Vol. 276, Issue 1-2, pp. 63-73.
- Bogod V. M., Yasnov L. M. (2009) Solar Physics, Vol. 255, 2, pp. 253-271.
- Bogod V. M., Yasnov L. V., Kaltman T. I. (2011) Astronomy Reports, Vol. 55, No. 1, pp. 82-90.
- Bong S. Ch., Lee J., Dale G., Hong S. E. (2006) The Astrophysical Journal, Vol. 636, pp. 1159-1165.
- Borovik V. N., Gelfreikh G. B., Lybishev B. I. (1975) Astron. Zh., Vol. 52, pp. 97-105.
- Borovik V. N., Gelfreikh G. B., Medar V. G., Grigorieva I. Y. (2002) Proc. 10th European Solar Physics Meeting, ESA SP-506, p. 431.
- Borovik V. N., Kurbatov M. Sh., Livshits M. A., Ryabov B. I. (1989) Astron. Zh., Vol. 67, pp. 1038-1052.
- Borovik V. N., Kurbatov M. Sh., Makarov V. V. (1992) Astron. Zh., Vol. 69, pp. 1288-1302.
- Borovik V. N., Medar V. G., Korzhavin A. N. (1999) Astronomy Letters, Vol. 25, No. 4, p. 250.
- Borovik V. N., Gelfreikh G. B., Medar V. G., Grigorieva I. Y. (2002) Proc. 10th European Solar Physics Meeting, ESA SP-506, p.431.
- Brajša J., Pohjolainen S., Ruždjak V., Sakurai N., Vršnak R., Wohl H. (1994) Solar Physics, 164, pp. 79-91.
- Brosius J. W., White S. M. (2004) Astrophys. J., 601, pp. 546-558.
- Cohen M. H. (1960) The Astrophysical Journal, Vol. 131, p. 664.
- Cranmer S. R. (2009) Living Reviews in Solar Physics, Vol. 6, No. 3.
- Cranmer S. R. (2002) Space Science Reviews, Vol. 101, Issue 3, pp. 229-294.
- Cohen M. H. (1960) The Astrophysical Journal, Vol.131, p.664.
- Foukal, P. V. (1976) Astrophysical Journal, Vol. 210, Dec. 1, 1976, pt. 1, p. 575-581.
- Gary D., Zirin H. (1988) Astrophysical Journal, Vol. 329, pp. 991-1001.
- Gary D. E. (1989) The Astrophysical Journal Suppl., Vol. 69, h. 323.
- Gary D. E., Hurford G. J. (1994) Astrophysical Journal, Vol. 420, p. 903.
- Gary D. E., Zirin H., Wang H. (1990) Astrophysical Journal, Vol. 335, p. 321.
- Gelfreikh G. B. (2004) Chapter 6 in Kluwer ASSL book "Solar and Space Weather Radiophysics", Current Status and Future Developments Series, Vol. 314, pp. 115-133. Eds. Dale E. Gary and Christoph U. Keller.
- Gelfreikh G. B., Lybishev B. I. (1979) Soviet Astronomy, Vol. 23, pp. 316-322.
- Gelfreikh G. B., Nefedev V. P. (1975). Pisma v Astron. Zh., (1), p. 32. (in Russian).
- Gelfreikh G. B., Peterova N. G., Ryabov B. I. (1987) Solar Physics, 108, pp. 89-97.
- Gelfreikh G. B., Shibasaki K. (1999) Proc. 9th European Meeting on Solar Physic, ESA SP-448, p. 1339.
- Grebinskij A., Shibasaki K., Zhang H. (1998) Proc. Of the Nobeyama Symposium, Kiyosato, Japan, Oct. 27-30, NRO Report 479, pp. 59-64.
- Grechnev V. V., Lesovoi S. V., Smolkov G. Ya., Krissinel B. B., Zandanov V. G., Altyntsev A. T., Kardapolova N. N., Sergeev R. Y., Uralov A. M., Maksimov V. P. (2003) Solar Physics, Vol. 216, No. 1-2, pp. 239-272.
- Hollis J. M., Dorhand J. E., Yusef-Zadeh F. (1992) The Astrophysical Journal, Vol. 386, pp. 293-298.
- Högbom J. A. (1974) Astronomy and Astrophysics Supplement, Vol. 15, p. 417.
- Hurtford G. J., Gary D. E. (1986) Coronal Processes and Plasmas, NASA Conf. Proc., p. 2442.
- Ihsanov R. N. (1967) Astronomicheskij zhurnal, Vol. 44, No. 5, pp. 1048-1059 (in Russian).

- Ihsanov R. N. (1966) Proc. GAO Pulkovo, Vol. 24, issue 4, Nr. 180, pp. 41-50 (in Russian).
- Ikhsanova V. N. (1969) Bulletin Solnechnie Dannie, No. 2, pp. 85-87 (in Russian).
- Jiao L., McClymont A. N., Mikic Z. (1997) Solar Physics, Vol. 174, p. 311.
- Kaltman T. I., Bogod V. M., Stupishin A. G., Yasnov L. V. (2012) Astronomy Reports, Vol. 56, Issue 10, pp. 790-799.
- Kaverin N. S., Kobrin M. M., Korshunov A. I., Shushunov V. V. (1980) Astron. Zh., Vol. 57, pp. 767-770.
- Khaikin S. E., Kaidanovskiy N. L., Esepkina N. A., Shivris O. N. (1960) Proc. GAO Pulkovo, Vol. 164, pp. 3-26 (in Russian).
- Klimchuk J. A. (2000) Solar Physics, Vol. 193, p. 53.
- Klimchuk J. A., Canfield R. C. (1994) In Solar Active Region Evolution: Comparing Models with Observations. PASP Conf. Series., Vol. 68, p. 233.
- Krieger A. S., Timothy A. F., Roelof E. C. (1973) Solar Physics, Vol. 29, Issue 2, pp. 505-525.
- Krissinel B. B., Kuznetsova S. M., Maksimov V. P., Prosovetsky D. V., Grechnev V. V., Stepanov P., Shishko L. F. (2000) Publ. Astron. Soc. Japan, Vol. 52, pp. 909-917.
- Koutchmy S., Le Piouffle V. (2008) IAU Symp., 259, p. 227.
- Kraus J. D. (1984) Radioastronomy, Cygnus-Quasar Books.
- Kundu M. R. (1986) In NASA Goddard Space Flight Center. Coronal and Prominence Plasmas, pp. 291-295.
- Kundu M. R. (1965) Solar Radio Astronomy. Interscience, New York.
- Kundu M. R., Alissandrakis C. E. (1984) Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), Vol. 139, No. 2, Oct. 1984, p. 271-284.
- Kundu M. R., Rao A. P., Erskine F. T., Bregman, J. D. (1979) Astrophysical Journal, Part 1, Vol. 234, p. 1122-1136.
- Kuzmin A., Salomonovich A. (1964) Radio Astronomical methods of antenna parameters measurements. Moscow, Sov. Radio (in Russian).
- Lee J. W., Gary D. E., Hurford G. J. (1993) Solar Physics, Vol. 144, pp. 349-360.
- Lee J., McClymont F. N., Mikic Z., White S. V., Kundu M. R. (1998) Astarophysical Journal, Vol. 501, p. 853.
- Lesvoi S. V., Altyntsev A. T., Ivanov E. F., Gubin A. V. (2012) Solar Physics, ArXiv1202.4794v1.
- Lubyshev B. I. (1977) Soviet astronomy, Vol. 21, p. 74.
- Lucy (1974) AJ, Vol. 79, No. 6, pp. 754-763.
- Magnum J. G., Emerson D. T., Greisen E. W. (1997) A&A, Vol. 474, pp. 679-687.
- McClymont A. N., Mikic Z. (1994) The Astrophysical Journal, Vol. 422, p. 899.
- McQueen R. M., Blankner J. G., Elmore D. F., Lesinski A. R., White O. R. (1998) Solar Physics, 182, pp. 97-105.
- Metcalf T. R., Jiao L., McClymont A. N., Canfield R. C., Uitenbroek H. (1995) The Astrophysical Journal, Vol. 439, p. 474.
- Nakajima H., Nishio M., Enome S., Shibasaki K., Takano T., Hanaoka Y., Torii C., Sekiguchi H., Bushimata T., Kawashima S., Shinohara N., Irimajiri Y., Koshiishi H., Kosugi T., Shiomi Y., Sawa M., Kai K. (1994) Proc. IEEE, Vol. 82, No. 5, pp. 705-713.
- Obridko V. N., Shelting B. D. (1999) Solar Physics, 187, p. 185.
- Obridko V. N., Staude J. (1988) Astron Astrophys., 189, pp. 232-242.
- Obridko V. N., Shelting B.D. (1999) Solar Physics, 187, p.185.
- Oster, L. (1964) Theoretical models for magnetic fields in the solar atmosphere. Annales d'Astrophysique, Vol. 27, p. 14.

- Pariiskii Yu. N., Kololkov D. V., Shivris O. N., Kaidanovskii N. L., Esepkina N. A., Zverev Yu. K., Stotskii A. A., Akhmedov Sh. B., Bogod V. M., Boldyrev S. I., Gelfreikh G. B., Ipatova I. A., Korzhavin A. N., Romantsov V. V. (1976) *Astron. Zh.*, Vol. 53, pp. 1017-1026.
- Peterova N. G. (1975) *Solnechnie Dannie*, 1975, No. 3, pp. 96-101 (in Russian).
- Peterova N. G., Akhmedov Sh. B. (1974) *Soviet. Astron.*, Vol. 17, h. 768.
- Peterova N. G., Pilyeva N. A., Ryabov B. I. (1996) *Baltic Astronomy*, Vol. 5, pp. 157-164
- Peterova N. G., Ryabov B. I. (1976) In *The Physics of Solar Spots*, M., Nauka, pp. 89-93 (in Russian).
- Peterova N. G., Akhmedov Sh.B. (1974) *Soviet. Astron.*, Vol. 17, h. 768.
- Peterova N. G., Pilyeva N.A., Ryabov B.I. (1996) *Baltic Astronomy*, Vol. 5, pp. 157-164
- Piddington J. H., Minnett H. C. (1951) *Austral. J. Sci. Res.*, Issue A4, p. 131.
- Richardson W. H. (1972) *Journal of Optic Society of America*, Vol. 62, No. 1, pp. 55-59.
- Rohlfs K., Wilson T. (2004) *Tools of Radio Astronomy*. Springer-Verlag, Berlin.
- Ryabov B. I. (2006) *Proceedings of Nobeyama Symposium 2004*, NSRO Report No. 1, pp. 111-119.
- Ryabov B. I. (2004) Chapter 7 in *Kluwer ASSL book "Solar and Space Weather Radiophysics", Current Status and Future Developments Series*, Vol. 314, pp. 135-152.
- Ryabov B. I. (1997) *Baltic Astronomy*, Vol. 6, pp. 651-660.
- Ryabov B., Nagelis J., Mancevics L., Skerse D., Kaminskis J. (1992) A model support to analysis of high resolution radio observations of the sun, *Baltic Astronomy*, Vol. 1, p. 239.
- Ryabov B. I., Nindos A., Shibasaki K., Maksimov V. P., Lesovoi S. V., Pevtsov A. A. (2003) *American Geophysical Union, Fall Meeting 2003*, abstract #SH42B-0508.
- Ryabov B. I. (1997) *Baltic Astronomy*, Vol. 6, pp. 651-660.
- Ryabov B. I., Pilyeva N. A., Alissandrakis C. E., Shibasaki K., Bogod V. M., Garaimov V. I., Gelfreikh G. B. (1999) *Solar Physics*, Vol. 185, No. 1, pp. 157-175.
- Ryabov B.I. (2006) *Proceedings of Nobeyama Symposium 2004*, NSRO Report No. 1, pp. 111-119.
- Seehafer N., Staude J. (1979) *Astronomische Nachrichten*, Vol. 300, No. 3, p. 151-162.
- Semel M., Skumanich A. (1998) *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 331, p. 383.
- Smolkov G. Ya., Pistolkors A. A., Treskov T. A., Krissinel B. B., Putilov V. A. (1984) *IAU, 3rd Asian-Pacific Regional Meeting, Astrophysics and Space Science*, Vol. 119, No. 1, pp. 1-4.
- Strong K. T., Alissandrakis C. E., Kundu M. R. (1984) *Astrophys. J.*, 277, pp. 865-873.
- Stupishin A. G., Bogod V. M., Yasnov L. V. (2012) *EGU General Assembly 2012*, held 22-27 April, 2012 in Vienna, Austria, p. 13573.
- Timothy A. F., Krieger A. S., Vaiana G. S. (1975) *Solar Physics*, Vol. 42, May, pp. 135-156.
- Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. (1986) *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Krieger publisher.
- Topchilo N., Peterova N., Borisevich T. (2010) *Astronomy Report*, Vol. 54 (1), pp. 69-85.
- Tu Chuan-Yi, Zhou Cheng, Marsch E., Xia Li-Dong, Zhao Liang, Wang Jing-Xiu, Wilhelm K. (2005) *Science*, Vol. 308, Issue 5721, pp. 519-523.
- Vourlidis A., Bastian T. S. (1996). *Astrophysical Journal*, Vol. 466, p. 1039.
- Vourlidis A., Bastian T. S., Aschwanden M. J. (1997) *Astrophysical Journal*, Vol. 489, p. 403.
- Vourlidis A., Bastian T. S., Aschwanden M. J. (1996) *American Astronomical Society, 188th AAS Meeting*, #36.02; *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 28, p. 873.
- Vourlidis A., Gary D., Shibasaki K. (2006) *Pub. Astron. Soc. Japan*, Vol. 88, pp. 10-20.
- Wang T. J., Solanki S. K., Curdt W., Innes E. E., Dammasch I. E., Kliem B. (2003) *A & A*, Vol. 404, pp. 1105-1121.

- Wang Y.-M., Nash A. G., Sheeley N. R. Jr. (1989) *Science* (ISSN 0036-8075), Vol. 245, Aug. 18, p. 712-718.
- Wang Y.-M., Sheeley N. R. Jr. (1992) *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), Vol. 392, No. 1, June 10, p. 310-319.
- White S. M. (2004) Chapter 5 in Kluwer ASSL book "Solar and Space Weather Radiophysics", Current Status and Future Developments Series, Vol. 314, pp. 89-113.
- White S. M., Kundu M. R. (1997) *Sol. Phys.*, Vol. 174, p. 31.
- White S. M., Kundu M. R., Gopalswamy N. (1999) *The Astrophysical Journal*, Vol. 366, pp. 43-46.
- Wilhelm K. (2006) *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 455, Issue 2, pp. 697-708.
- Yan Y., Zhang J., Chen Z., Wang W., Liu F., Geng L. (2011) In Proc. Of XXXth URSI Gen. Assembly and Scientific symposium.
- Yan Y., Zhang J., Huang G. (2004) In Proc. Asia-Pacific Radio Science Conference.
- Yan Y., Zhang J., Wang W., Liu F., Chen Z., Ji G. (2009) *Earth, Moon and Planets*, 100 (1), pp. 97-100.
- Yasnov L. V., Bogod V. M., Yan Y., Kotelnikov V. S. (2004) In Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. IAU Symposium, Vol. 223, pp. 493-494.
- Zhdanov D. A., Zandanov V. G. (2011) *Central European Astrophysical Bulletin*, pp. 223-228.
- Zheleznyakov V. V. (1977) *Electromagnetic waves in cosmic plasma. Generation and propagation*. Moskva: Nauka, p. 432 (in Russian).
- Zheleznyakov V. V. (1970) *Radio emission of the sun and planets*, International Series of Monographs in Natural Philosophy, Oxford: Pergamon Press. Ed. by Hey J. S.
- Zheleznyakov V., Zlotnik E. (1988) *Sov. Astron. Lett.*, Vol. 14, pp. 461-472.
- Zheleznyakov V., Zlotnik E. (1963) *Astron. Zhurn.* 40, p. 663
- Zheleznyakov V., Zlotnik, E. (1964) *Soviet. Astron.*, Vol. 7, p. 485.
- Zhugzhda Yu. D. (1966) *Astronomicheskyy zhurnal*, Vol. 43, pp. 967-975 (in Russian).
- Zirker J. B. (1977) *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 15, Aug., p. 257-269.
- Zlotnik E. Ya. (1968). *Soviet astronomy*, 12 (2), 245-253.
- Zlotnik E. Ya. (1968). *Soviet astronomy*, 12 (3), 464-472.
- Zlotnik E. Ya., White S. M., Kundu M. R. (1998) 2nd Advances in Solar Physics Euroconference Three Dimensional Structure of Solar Active Regions. ASP Conferences Series, Vol. 155, p. 135.