

მზის გვირგვინის მსხვილმასშტაბიანი მაგნიტური წარმონაქმნების  
დინამიკა

დავით მალრაძე

*სადისერტაციო ნაშრომი წარდგენილია ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის  
საბუნებისმეტყველო მეცნიერებისა და მედიცინის ფაკულტეტზე ფიზიკის  
დოქტორის აკადემიური ხარისხის მინიჭების მოთხოვნის შესაბამისად*

ფიზიკისა და ასტრონომიის სადოქტორო პროგრამა

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

დარეჯან ჯაფარიძე, ასოცირებული პროფესორი, Ph.D.

ბიძინა ჩარგეიშვილი Ph.D., სსიპ საქართველოს ევგენი ხარაძის ასტროფიზიკური  
ობსერვატორიის დირექტორის მოადგილე

ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი

თბილისი, 2022

## განაცხადი

როგორც წარდგენილი სადისერტაციო ნაშრომის ავტორი, ვაცხადებ, რომ ნაშრომი წარმოადგენს ჩემს ორიგინალურ ნამუშევარს და არ შეიცავს სხვა ავტორების მიერ აქამდე გამოქვეყნებულ, გამოსაქვეყნებლად მიღებულ ან დასაცავად წარდგენილ მასალებს, რომლებიც ნაშრომში არ არის მოხსენიებული ან ციტირებული სათანადო წესების შესაბამისად.

დავით მაღრაძე

2022 წლის 13 ნოემბერი

## მადლობა

ულრმესი მადლიერება და პატივისცემა -

სადისერტაციო ნაშრომის სამეცნიერო ხელმძღვანელებს, ქალბატონ დარეჯან ჯაფარიძესა და ბატონ ბიძინა ჩარგეიშვილს;

ევგენი ხარაძის ეროვნული ასტროფიზიკური ობსერვატორიის თანამშრომლებსა და სადისერტაციო ნაშრომში გამოყენებული სტატიების თანაავტორებს;

ჩემს პედაგოგებს ილიას და ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტებში;

მადლობა შოთა რუსთაველის ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს, რომლის დაფინანსებითაც განხორციელდა სადოქტორო კვლევის ნაწილი.

## თანდართული შრომების ნუსხა:

1. Oghrapishvili, N. B.; Bagashvili, S. R.; **Maghradze, D. A.**; Gachechiladze, T. Z.; Japaridze, D. R.; Shergelashvili, B. M.; Mdzinarishvili, T. G.; Chargeishvili, B. B., **Study of the solar coronal hole rotation**, Advances in Space Research, Volume 61, Issue 12, p. 3039-3050, 2018.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AdSpR..61.3039O/abstract>
2. Chargeishvili, B.B., **Maghradze, D.A.**, Japaridze, D.R., Oghrapishvili, N. B., Mdzinarishvili, T.G., Chargeishvili, K.B., Shergelashvili, B. M., **Variation of Coronal Holes Latitudinal Distribution: Correction of Limb Brightening of EUV Coronal Images**, Advances in Space Research, Volume 64, Issue 2, 491-503, 2019.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AdSpR..64..491C/abstract>
3. **D.A. Maghradze**, B.B. Chargeishvili, D.R. Japaridze, N. B. Oghrapishvili, T.G. Mdzinarishvili, K.B. Chargeishvili, **Latitudinal Distribution of Solar Coronal Active Regions**, Advances in Space Research, Volume 65, 1321-1331, 2020.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AdSpR..65.1321M/abstract>
4. **D. A. Maghradze**, B. B. Chargeishvili, D. R. Japaridze, N. B. Oghrapishvili and K. B. Chargeishvili, **Long-term variation of coronal holes latitudinal distribution**, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 511, Issue 4, April 2022, Pages 5217–5224.  
<https://doi.org/10.1093/mnras/stac367>

## სარჩევი

1. შესავალი ----- გვერდი 4
2. მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის შესწავლა (Study of the solar coronal hole rotation) ----- გვერდი 7
3. მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ცვლილებები: მზის გვირგვინის უკიდურეს ულტრაიისფერ გამოსახულებათა კიდის გაკაშკაშების კორექცია (Variation of coronal holes latitudinal distribution: Correction of limb brightening of EUV coronal images) ----- გვერდი 14
4. მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილება (Latitudinal distribution of solar coronal active regions) ----- გვერდი 25
5. მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ხანგრძლივპერიოდული ცვლილებანი (Long-term variation of coronal holes latitudinal distribution) ----- გვერდი 34
6. Summary ----- გვერდი 46
7. ბიბლიოგრაფია ----- გვერდი 49

## დისერტაციის ვრცელი აბსტრაქტი

### 1. შესავალი

მზეზე განვითარებული არასტაციონარული პროცესები განაპირობებენ კოსმოსურ ამინდსა და საპლანეტათაშორისო სივრცეში ფიზიკურ პირობებს. კოსმოსური ამინდის პარამეტრების ცვლილება ზემოქმედებს დედამიწის მახლობელ სივრცეზე, განსაკუთრებით, მაგნიტოსფეროსა და დედამიწის ატმოსფეროს ზედა ფენებზე, ვინაიდან მზის ენერჯის ვარიაციები მაგნიტოსფეროს და დედამიწის ატმოსფეროს და ენერგეტიკულ ბალანსს ცვლის. მზის ქარისა და დედამიწის მაგნიტოსფეროს შეჭიდულობის გზით, მზეზე განვითარებულმა აქტიურმა პროცესებმა შესაძლებელია წარმოქმნას ძლიერი მაგნიტური ქარიშხლები, რამაც გამოიწვიოს ადამიანთა საქმიანობის ტექნოსფეროს, როგორცაა კოსმოსური ექსპერიმენტები და მიწისპირა ტექნოლოგიური სისტემები, დაზიანება. აქედან გამომდინარე, ძალზე მნიშვნელოვანი და აქტუალურია მზის ატმოსფეროში მიმდინარე აქტიური პროცესებისა და მისი მსხვილმასშტაბიანი მაგნიტური წარმონაქმნების, მათ შორის მზის გვირგვინის ხვრელების შესწავლა, საიდანაც მუდმივად გამოედინება მზის სწრაფი ქარის ნაკადები.

მზის გვირგვინის მსხვილმასშტაბიანი მაგნიტური წარმონაქმნების დინამიკის კვლევა მნიშვნელოვანია, ვინაიდან მზის გვირგვინი ძლიერ სტრუქტურირებულია მაგნიტური ველით და ამჟამად ფართოდ აღიარებულია, რომ გვირგვინის პლაზმის გაცხელების პრობლემის გადაჭრა სწორედ მაგნიტური ველის ენერჯის თერმულ ენერჯიაში კონვერტაციის მექანიზმების ამოხსნაში მდგომარეობს (Sakurai, 2017). მზის ზოგიერთი აქტიური არეებიდან ჩაკეტილი მაგნიტური სტრუქტურები უწყვეტად ფართოვდებიან და აღწევენ საკმაოდ შორ მანძილამდე (Morgan et al., 2013). მზის გვირგვინში განვითარებული ყოველწლიური და ყოველთვიური რხევები გარკვეულ პერიოდულ (წლისა და თვის ინტერვალის მქონე) ფიზიკურ გავლენას ახდენენ

დედამიწაზე მყოფ დამკვირვებელზე. ეს გამოწვეულია იმით, რომ გვირგვინის ხვრელის მყისიერად დანახული განედური განაწილება განაპირობებს მის შესაბამის ეფექტს დედამიწაზე. მზის ქარის განსხვავებულ ნაკადებში გამოვლის გამო ამ პერიოდულობებმა სხვადასხვაგვარად უნდა იჩინონ თავი გეომაგნიტურ სუბ-ქარიშხლებსა და კლიმატის ცვლილებებში (Makarova & Shirochkov 2004; Lam & Tinsley, 2016).

სადისერტაციო ნაშრომი ეძღვნება მზის გვირგვინის მსხვილმასშტაბიანი მაგნიტური წარმონაქმნების დინამიკის კვლევას. მასში განხილულია საკითხები, როგორცაა მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის ხასიათი, პოლარული და დაბალგანედური გვირგვინის ხვრელების, აგრეთვე მზის აქტიური არეების განედური განაწილება, მზის აქტივობის ციკლის განმავლობაში მზის აქტივობის ცენტრების მიგრაცია. ნაშრომში აგრეთვე წარმოდგენილია მზის გამონასახის კიდის გაკაშკაშების ეფექტის კვლევის შედეგები და დაკვირვებითი მონაცემების ფილტრაციის ყველაზე მისაღები მიდგომის შესახებ ინფორმაცია.

კვლევის მიზნებისთვის გამოყენებული იქნა კოსმოსური ხომალდების SDO/AIA-ს (2014-2015 წწ.) და SOHO/EIT-ის (1996 - 2020 წწ.) დახმარებით მიღებული დაკვირვებითი მონაცემები.

მზის გვირგვინის მსხვილმასშტაბიანი მაგნიტური წარმონაქმნების დინამიკის შესწავლა დავიწყეთ მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის შესწავლით. შემდეგ ჩვენი ყურადღება მიიქცია მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ცვლილებებმა. კვლევის მსვლელობაში გამოჩნდა მზის გვირგვინის უკიდურეს ულტრაიისფერ გამოსახულებათა კიდის გაკაშკაშების კორექციის საჭიროება. შემდეგ მოხდა ერთის მხრივ, მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილების, მეორეს მხრივ მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების გრძელპერიოდიანი ცვლილებების შესწავლა.

## 2. მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის შესწავლა (Study of the solar coronal hole rotation)

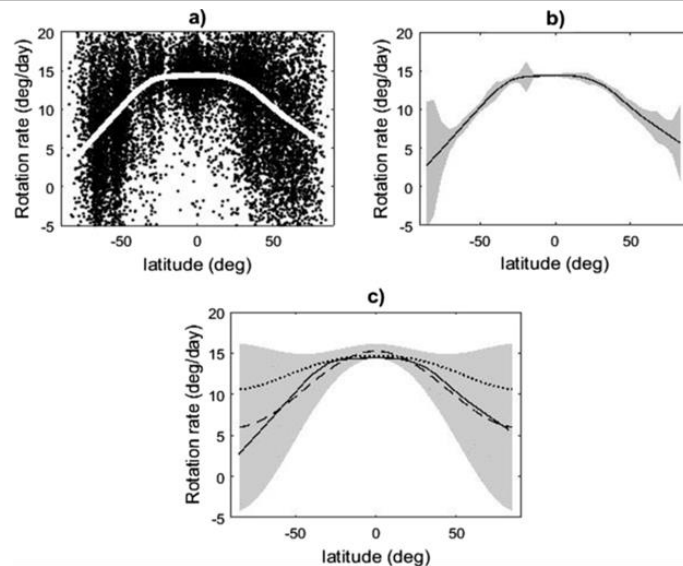
ნაშრომში „მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის შესწავლა“ - მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვა შესწავლილ იქნა SDO/AIA 193 Å ტალღის სიგრძეზე მიღებული დაკვირვებითი მასალის დამუშავების შედეგად. აქ გამოვიყენეთ მასალები პროექტის SOLSPANET (“Solar and Space Weather Network of Excellence”) ფარგლებში 2014-2015 წლების პერიოდისათვის შედგენილი გვირგვინის ხვრელების კატალოგიდან (<http://www.solspanet.eu>) - 1206 კორონული ხვრელის მონაცემები 17400 წყვილი მზის დისკზე დეკარტის კოორდინატებით.

კვლევისთვის ჩვენ უარი განვაცხადეთ დამკვიდრებულ ტრასერულ მეთოდზე, როდესაც მოცემული ტრასერისთვის, ამ შემთხვევაში გვირგვინის ხვრელისთვის მისი მყისი სიჩქარეების (დგინდება ორი უახლოესი დამზერილი ჰელიოგრაფული განედით) მწკრივით გამოითვლება საშუალო სიჩქარე და ეს სიჩქარე ენიჭება მისი შესაბამისი ჰელიოგრაფული განედებით გამოთვლილ საშუალო განედს. ასე მიღებული სიჩქარე და განედი უფრო წარმოადგენს ამ კონკრეტული ტრასერის, გვირგვინის ხვრელის, ვიდრე მოცემულ განედზე გვირგვინის შესაბამისი ფენის მახასიათებელს. დამკვიდრებული მეთოდის ნაცვლად ჩვენი მიდგომა ემყარება შემდეგს: რადგან მზის გვირგვინის ხვრელები საკმაოდ განფენილი წარმონაქმნებია (მათი ზომები თანაზომადია მზის დისკოსთან და მათი განედური ზომა რამდენიმე ათეული გრადუსიც კი შეიძლება იყოს), მათი გეომეტრიული ცენტრების, ე.წ. ცენტროიდების მოძრაობა დაბალ განედებზეც კი განიცდის ძლიერ რხევას. ეს გამოწვეულია გვირგვინის ხვრელის ფორმის ცვლილებით, რაც თავის მხრივ იწვევს მისი გეომეტრიული ცენტრის არასისტემატურ გადანაცვლებებს. ერთადერთი სისტემატური მოძრაობა არის მზის ბრუნვა (თუმცა შესაძლებელია ასევე მერიდიანული მიგრაციაც, რაც ცენტროიდის არტეფაქტული წანაცვლებების ფონზე შეიძლება არც იყოს შესამჩნევი). მონაცემთა სიმრავლის გამო რომ, არ გვექონოდა მოძრაობის სისტემატური კომპონენტი, ცენტროიდის სტატისტიკური სიჩქარე უნდა მიგვეღო ნულის ტოლი. სტაციონალური კომპონენტის არსებობის გამო ეს სიჩქარე ცხადია, არ არის ნული და უნდა განსაზღვრავდეს მოცემულ განედზე გვირგვინის ხვრელის ბრუნვას. ამიტომ ჩვენ უბრალოდ კონკრეტული გვირგვინის ხვრელის



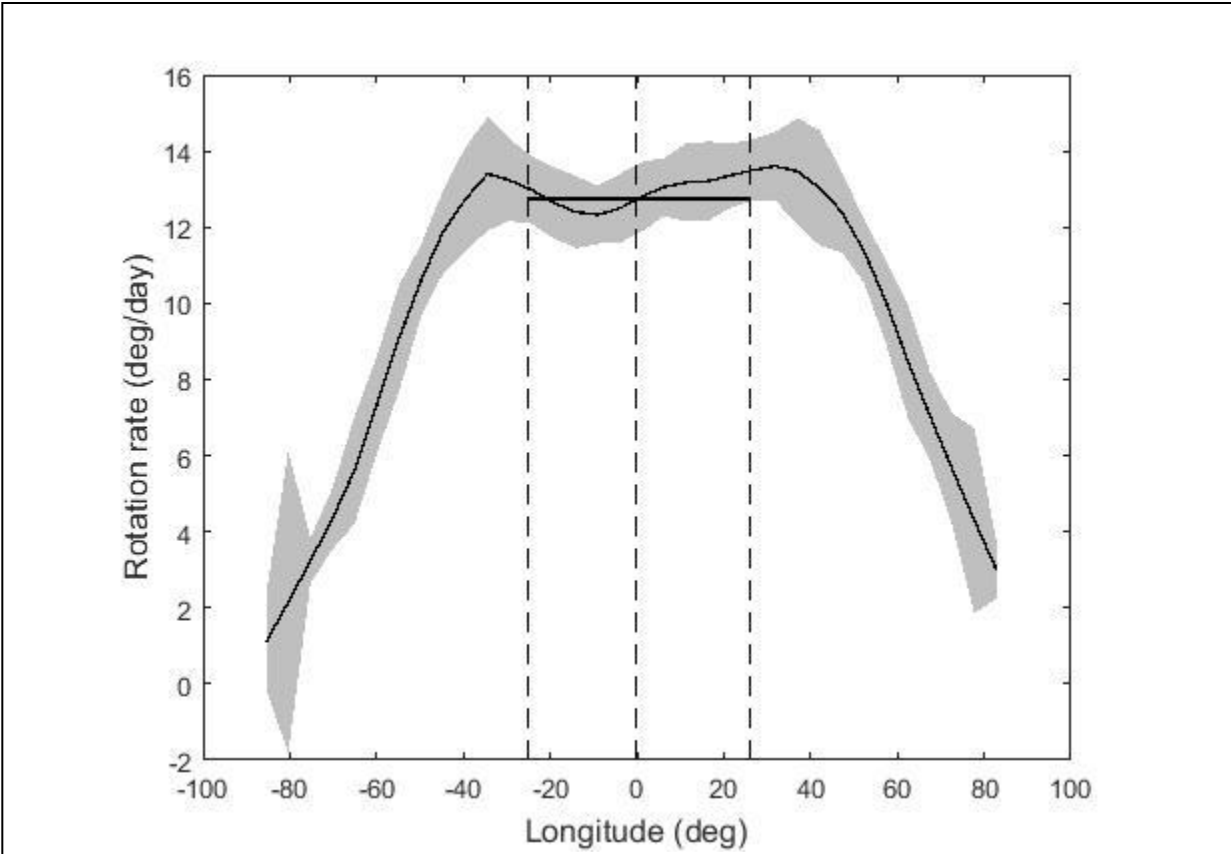
დეკარტის კოორდინატთა მწკრივით გამოვთვალეთ ჰელიოგრაფული კოორდინატები, საიდანაც მივიღეთ ბრუნვის მყისი სიჩქარეების მწკრივი შესატყვისი ჰელიოგრაფული კოორდინატებით. ამის შემდეგ კი ყველა გვირგვინის ხვრელის შესაბამისი მყისი ბრუნვის სიჩქარეების მწკრივები შესატყვისი ჰელიოგრაფული კოორდინატებით გავაერთიანეთ ერთ საერთო მატრიცაში. აღნიშნული მონაცემები, ყოველგვარი ფილტრაციის გარეშე კი აშკარად გვაჩვენებს გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის დიფერენციულ ხასიათს, რაც ასახულია ნახ. 1.-ზე.

ნახ. 1c. აჩვენებს, რომ მორგებული მრუდი ახლოს არის სნოდგრასის ფოტოსფეროს დიფერენციალური ბრუნვის მრუდთან დაბალ განედებზე, მაგრამ მაღალ განედებზე ხდება დაშორება და პოლარულ არეებში სიდიდე 6 გრადუსი/დღეში არაადექვატურად დაბალია გვირგვინის ხვრელებისთვის. ამ წინააღმდეგობის გადასალახად შევისწავლეთ ბრუნვის სიჩქარეების გრძედული განაწილება სხვადასხვა განედურ ზოლებში.



ნახ. 1. ბრუნვის სიხშირეები ხვრელების სრული გაუფილტრავი მონაცემებისთვის და მათი სტატისტიკური რეგრესიის შედეგი. a) შავი წერტილები არის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის მყისი სიჩქარეები შესატყვის განედებზე. თეთრი წირი გამოხატავს მორგებულ მრუდს, გამოთვლილს ლოკალური მედიანებით და Matlab-ის "rlowess" რეგრესიის მეთოდით გაგლუვებულს. b) ნაცრისფერი ჩრდილით მონიშნულია მონაცემების სტანდარტული გადახრა შავი წირით გამოსახული რეგრესიიდან (იგივე რაც თეთრი მრუდი a)-ში). c) უწყვეტი წირი არის მორგებულ მრუდს (იგივე რაც თეთრი მრუდი a)-ში). წყვეტილი არის მორგებული მრუდი დიფერენციული ბრუნვის ფორმულით და ნაცრისფერი ჩრდილი არის მისი სანდოობის ზღურბლი. წერტილოვანი მრუდი არის ვოტოსფეროს დიფერენციული ბრუნვის სნოდგრასის მრუდი.

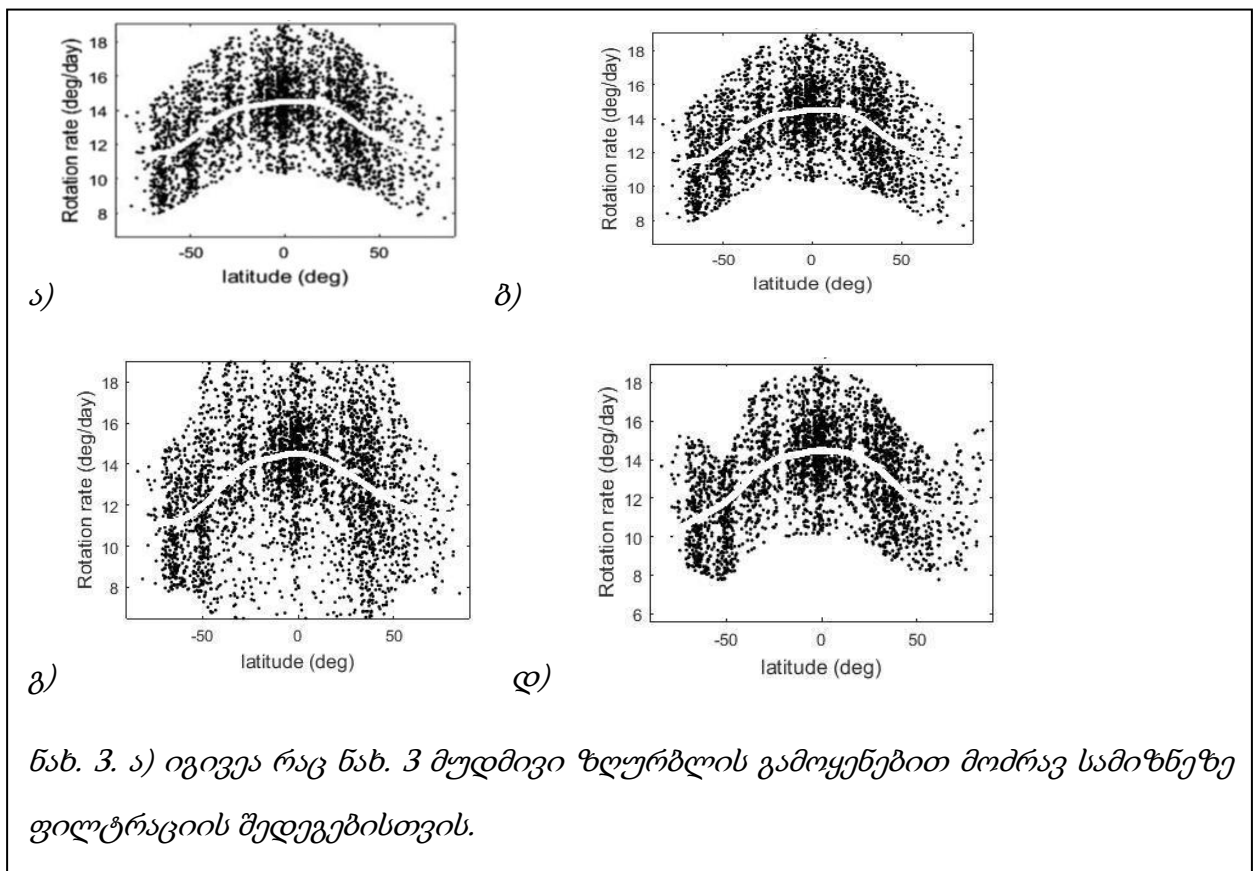
შესწავლისას გამოვლინდა, რომ ბრუნვის სიჩქარის გრძედული განაწილება ნაცვლად მუდმივობისა განსხვავებულ ტენდენციებს აჩვენებს მაღალ და დაბალ განედებზე, რაც კარგად მოჩანს ყველა ბრუნვის სიჩქარეების გრძედული განაწილების ყველა განედის ინტეგრირებულ მრუდზეც (ნახ. 2.).



ნახ. 2. გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის სიჩქარეების გრძედული განაწილება (უწყვეტი წირი). ვერტიკალური წყვეტილი წირებით მონიშნულია მონაცემთა განაწილების კვარტილები. უწყვეტი სქელი მრუდი არის მონაცემთა საშუალო მეორე და მესამე კვარტილებში.

ჩვენ დეტალურად გავანალიზეთ კუთხური სიჩქარეების გრძედული განაწილების ჰორიზონტულობის დამახინჯების მიზეზები. ყველა მათგანი რა თქმა უნდა არა მზისმიერი არამედ დაკვირვებითი ეფექტებით არის გამოწვეული. როგორც ნახ. 2.-ის ასევე სხვადასხვა განედებზე კუთხური სიჩქარეების გრძედული განაწილების სურათების ანალიზი გვიჩვენებს, მოჩვენებით ეფექტებს შორის მნიშვნელოვანია: მაღალ განედებზე შესამჩნევი დამუხრუჭება, რაც სფეროს კიდეზე განფენილი წარმონაქმნის მოძრაობის პროექციული დამუხრუჭებით აიხსნება მისი შემომავალი ან გამავალი კიდის უძრაობის გამო;  $\pm 40$  გრადუსული განედების მიდამოებში შესამჩნევი აჩქარება, რაც გვირგვინის ხვრელების ღია მაგნიტური კონფიგურაციის დახურული მარყუჟებით შემოფარგლულობით არის გამოწვეული, რომლებიც რეალური კიდის მოძრაობაზე სწრაფად ხსნიან ან ფარავენ ხვრელის კიდეს

ცენტრთან შესაბამისად მიახლოებისას ან დაშორებისას; აღმოსავლეთ-დასავლეთ აღმავალი ტრენდი, რაც მთელ გრძედზე მოჩანს, მაგრამ გამოკვეთილად  $\pm 20$  გრადუსული განედების ინტერვალშია, რადგან აქ წინა, პროექციული ეფექტები ძალიან სუსტია. ეს უკანასკნელი მზის ბრუნვით გამოწვეული დოპლერისეული ლურჯი და წითელი წანაცვლებით არის გამოწვეული შესაბამისად აღმოსავლეთ და დასავლეთ ნახევარსფეროებში. საქმე იმაშია, რომ სხვადასხვა ნახევარსფეროში ერთდაიგივე ხაზით დაკვირვება სხვადასხვა სიღრმის სურათს ასახავს, რაც დისკზე პროექცირებისას აღმოსავლეთ და დასავლეთ დისკებზე ერთდაიგივე დროის ინტერვალში ერთ შემთხვევაში ამცირებს რეალურ სივრცით ინტერვალს, მეორე შემთხვევაში კი ზრდის. აღნიშნული ანალიზის საფუძველზე შემდგომი კვლევების ოპტიმალურ განედურ ზოლად  $\pm 20$  გრადუსიანი ზოლი მივიჩნიეთ, სადაც ამავდროულად მონაცემთა 50% არის კონცენტრირებული და მიუხედავად ზოლის დავიწროვებისა მონაცემთა მხრივ დიდ დანაკარგს არ იძლევა.



აღსანიშნავია, რომ მაღალ განედებზე - ამ რეგიონების მონაცემების მაღალი გაბნევის გამო - მხოლოდ ოპტიმალური გრძედული ზოლის არჩევით აღმოსავლეთ-დასავლეთ პროექციული მოჩვენებითი ეფექტების გამორიცხვა, დარჩენილი მონაცემების შემდგომი ფილტრაციის გარეშე ვერ გადაჭრის პრობლემას. ჩვენ მონაცემთა გაფილტვრის 4 განსხვავებული მეთოდი შევამოწმეთ. მათგან პირველი, სნოდგრასის პროფილის საშუალო მნიშვნელობაზეა ფოკუსირებული, სამიზნის 30%-იანი ზღურბლით. ეს მეთოდი, გარკვეულწილად აგლუვებს მიღებული პროფილის დიფერენციალურ ხასიათს, რაც გამოიხატება მაღალი განედებისათვის გაზრდილ და დაბალი განედებისათვის შემცირებულ მნიშვნელობებში (ნახ. 3.ა).

ფილტრაციის მეორე მეთოდი, ფოკუსირებულია სნოდგრასის პროფილზე, მოცემულ განედზე სნოდგრასის მნიშვნელობის 30%-იანი ზღურბლით. ეს მეთოდი მშვენივრად მიყვება სნოდგრასის პროფილს (ნახ. 3ბ), მაგრამ ჩვენ დაგვაფიქრა ნარჩენი დეტალების ზედმეტად გაგლუვებამ.

ფილტრაციის მესამე მეთოდი, ფოკუსირებულია სნოდგრასის პროფილზე ადაპტირებული ბარიერით, ზღურბლით, რომელიც არ ახდენს ზეგავლენას საშუალო განედების მონაცემებზე და 30%-იანი ზღურბლით მხოლოდ მაღალ განედების მონაცემებს ზღუდავს (ნახ. 3გ). ამრიგად სნოდგრასის პროფილთან კარგი შესატყვისობა მიიღწევა ასიმეტრიის დეტალების კარგვის გარეშე.

მეოთხე მეთოდი, ფოკუსირებულია მონაცემების ადგილობრივ მედიანებზე 30%-იანი ზღურბლით. ეს მეთოდი პოლარული რეგიონების ნაკლებ დიფერენცირებულ ბრუნვასა და ჩრდილოეთი/სამხრეთის უფრო მკაფიოდ გამოხატულ ასიმეტრიას გვიჩვენებს. აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ფილტრაციის ოთხი მეთოდიდან პირველი არ უნდა იქნას გამოყენებული დიფერენციალური ბრუნვის შესასწავლად, ვინაიდან ბრუნვის სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობაზე ფოკუსირება და მუდმივი ზღურბლით გაფილტვრა სავარაუდოდ მრუდის დიფერენციალურობის შესუსტებას იწვევს. ამის საპირისპიროდ, მეორე მეთოდმა შესაძლოა გააძლიეროს დიფერენციალური ბრუნვის პროფილი, მაგრამ ჩვენს შემთხვევაში, მან თითქმის არავითარი სხვაობა არ მოგვცა მესამე მეთოდის შედეგებთან შედარებისას.

პირველი სამი მეთოდი სნოდგრასის ბრუნვის პროფილზე ახდენს ფოკუსირებას და, ამრიგად, შედეგების მოდელზე (სნოდგრასის პროფილზე) დამოკიდებულებას იწვევს, მაშინ როდესაც მონაცემთა ფილტრაციის მეოთხე მეთოდი თვით მონაცემებით განისაზღვრება, ფოკუსირებულია მონაცემთა მედიანურ მნიშვნელობებზე და შედეგი უფრო სანდო უნდა იყოს.

ამგვარად, განვიხილეთ მონაცემთა ფილტრაციის სხვადასხვა მეთოდი და მივედით დასკვნამდე, რომ ყველაზე მისაღებ მიდგომას წარმოადგენს მონაცემთა ადგილობრივი მედიანების გამოზვნა და ფილტრაცია მუდმივი ზღურბლის მეშვეობით; ეს მიდგომა არ არის მიკერძოებული წინასწარ განსაზღვრული მოსალოდნელი შედეგების მიმართ. შედეგებმა დაადასტურა მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის დიფერენციალური ხასიათი.

### 3. მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ცვლილებები: მზის გვირგვინის უკიდურეს ულტრაიისფერ გამოსახულებათა კიდის გაკაშკაშების კორექცია (Variation of coronal holes latitudinal distribution: Correction of limb brightening of EUV coronal images)

ნაშრომში “მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ცვლილებები: მზის გვირგვინის უკიდურეს ულტრაიისფერ გამოსახულებათა კიდის გაკაშკაშების კორექცია” 1996 - 2018 წლებში SOHO EIT-ის მეშვეობით  $195\text{\AA}$  ტალღის სიგრძეზე მიღებული ყოველდღიური გამოსახულებების დახმარებით შევისწავლეთ მზის გვირგვინის კიდის გაკაშკაშება.

მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების მაღალი სიზუსტით შესასწავლად აუცილებელია მზის ულტრაიისფერ (EUV) გამონასახებზე კიდის სიკაშკაშის შესწორება, რისთვისაც სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით, შევისწავლეთ მზის დისკოს ფონური ინტენსივობის განაწილება როგორც მზის ბრუნვის (ჰორიზონტალური), ისე მისი მართობული (ვერტიკალური) მიმართულებით. კვლევა გვიჩვენებს, რომ ინტენსივობის განაწილება მზის დისკოს ცენტრიდან კიდისაკენ არ არის პოლუსების მიმართ სიმეტრიული. მონაცემთა შემაჯამებელმა კვლევამ გვიჩვენა, რომ მზის გვირგვინის კიდის სიკაშკაშეს წრიულზე მეტად ელიფსური იზოფოტები აქვს. კიდის სიკაშკაშის მოხაზულობა კორელირებს მზის აქტივობის ციკლთან.

მზის მკვლევარებისათვის კარგად არის ნაცნობი „მზის კიდის შებნელების ეფექტის“ სახელით ცნობილი მოვლენა, რაც მზის ატმოსფეროში ხილული გამოსხივების ფორმირების თავისებურებით აიხსნება. ხედვის წირის ოპტიკური სიღრმე აღწევს ერთს უფრო მაღალ ფენებში დისკოს ცენტრთან ვიდრე კიდეებში. როცა ვუმზერთ დისკოს ცენტრს, ჩვენ უფრო ღრმად ვხედავთ, ვიდრე როცა ვუმზერთ დისკოს კიდეებს. იმის გამო, რომ ფოტოსფეროში უფრო ღრმა ფენებს უფრო მაღალი ტემპერატურა აქვთ, დაკვირვების შედეგად ადგილი აქვს მზის კიდის შებნელებას. გვირგვინში ტემპერატურული გრადიენტი პირიქით სიღრმიდან გარეთ არის მიმართული და მაღალ ფენებში ტემპერატურა უფრო მაღალია. ამიტომ მზის

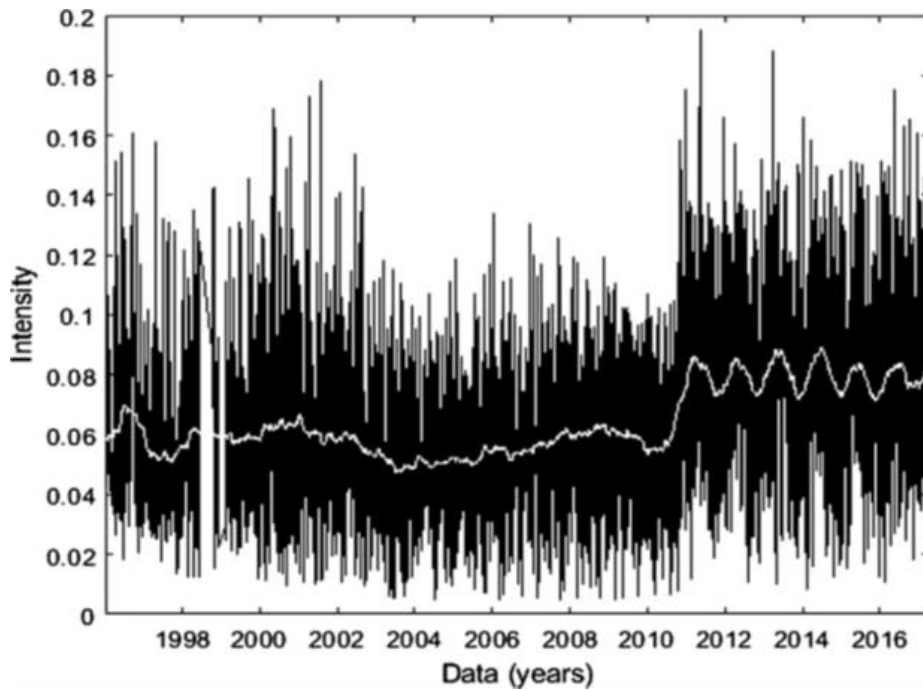
გამოსახულებებზე ვიღებთ კიდის გაკაშკაშებას. კიდის ჩაბნელებისა და კიდის გაკაშკაშების გათვალისწინება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მზის კიდესთან ახლოს მდებარე სტრუქტურების კვლევების დროს.

სტრუქტურების კვლევისას რიგი ამოცანებისთვის მნიშვნელოვანია ამ სტრუქტურების სეგმენტაცია, ანუ მათი საზღვრების დადგენა და ფონიდან გამოყოფა. უმეტეს შემთხვევაში ამ მიზნით გამოიყენება ე.წ. ინტენსივობის გლობალური (მთელი დისკოსთვის ვარგისი) ან ლოკალური (კონკრეტული სტრუქტურის გარემოსთვის ვარგისი) ზღურბლები, რომლითაც ხდება აღნიშნული სტრუქტურის ფონიდან გამოყოფა (Henney & Harvey, 2005; Krista & Gallagher, 2009; Kirk et al., 2009; Pesnell et al., 2010; Verbeeck et al., 2014; Garton et al., 2018; Delouille et al., 2018).. იმის, გამო, რომ გვირგვინის ხვრელები მზის დისკოს თანაზომადი, განფენილი წარმონაქმნებია ასეთი ზღურბლების მუშაობას ხელს უშლის მზის დისკოზე ინტენსივობის ისეთი მოჩვენებითი განაწილება, როგორცაა მზის კიდის გაკაშკაშება. იმისთვის, რათა მოვახდინოთ ამ ეფექტის განეიტრალება, საჭიროა დავადგინოთ ამ განაწილების ხასიათი ანუ მოვახდინოთ მისი მოდელირება.

მზის კიდის გაკაშკაშების ანალიტიკურ მოდელირებას სერიოზული ხარვეზი აქვს, ვინაიდან მასში გამოყენებულია სფერულ-სიმეტრიული მზის ატმოსფერო, ჰომოგენური, სიმკვრივის მიხედვით ერთგვაროვანი და ტემპერატურული წონასწორობის მქონე გვირგვინით (Andretta et al., 2003; Caplan et al., 2016). სინამდვილეში კარგად არის ცნობილი, რომ მზის გვირგვინი ამგვარი პირობებისაგან ერთობ შორს არის.

მზის გვირგვინი შედგება ძალიან განსხვავებული ტემპერატურებისა და სიმკვრივეების მქონე ზონებისაგან. კიდის გაკაშკაშების უმეტეს ემპირიულ კვლევებში გამოყენებულია ვიწრო ეკვატორული სარტყელი, ვინაიდან იგი მზის დისკოს ყველაზე ერთგვაროვან (აქტიური არეებისაგან თავისუფალ) რეგიონს წარმოადგენს. ამას გარდა, მზის დისკო მოიაზრება პოლარული სიმეტრიის მქონედ, და შესაბამისად, ხდება მიღებული შედეგების განზოგადება მზის ცენტრიდან ყველა მიმართულებით. არადა, არ არსებობს იმის დამამტკიცებელი ფაქტები, რომ კიდის გაკაშკაშება მზის დისკოზე ცენტრიდან კიდისაკენ ყველა მიმართულებით იზოტროპულად ხდება.



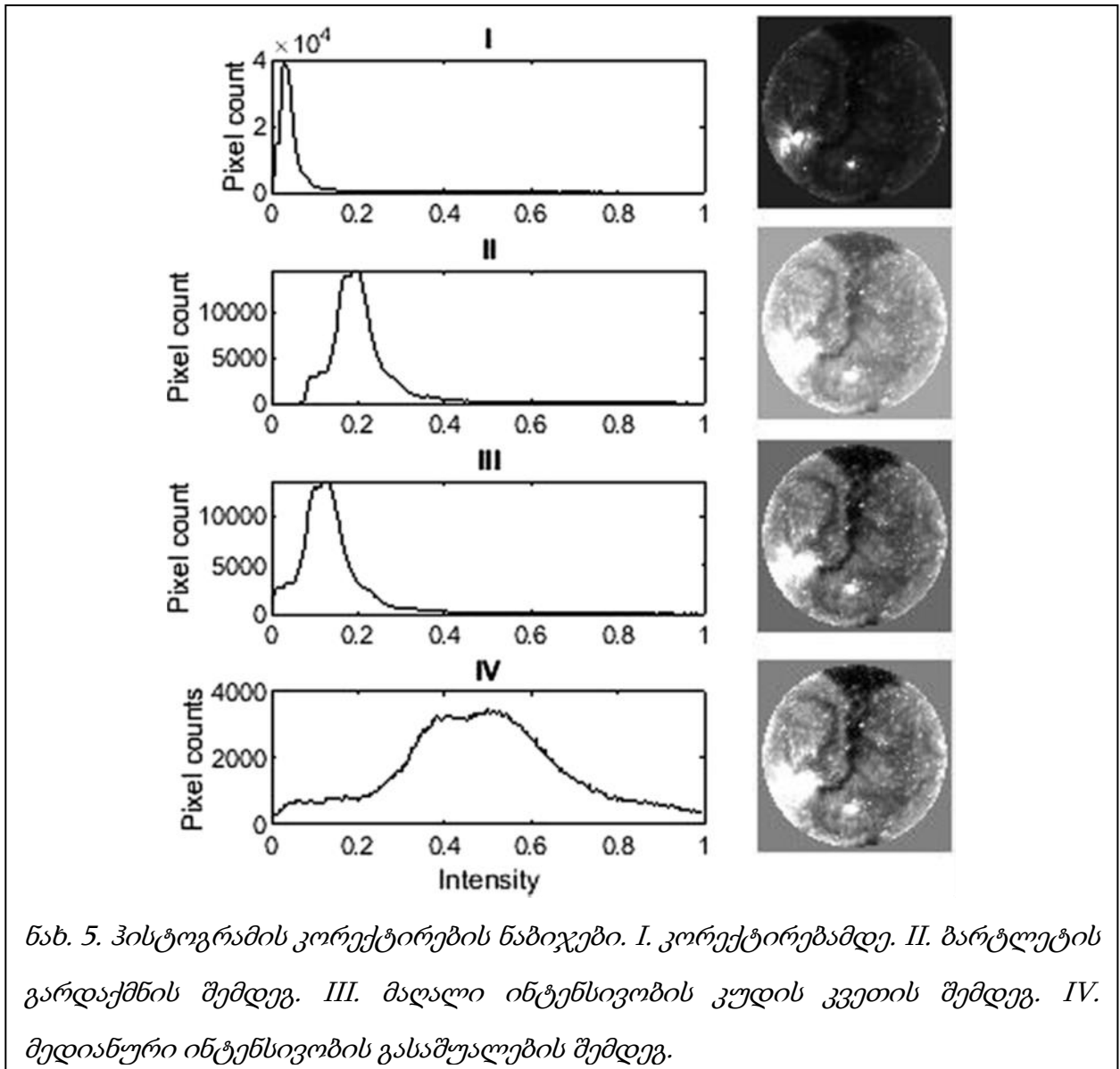


ნახაზი 4. გამოსახულების ინტენსივობის საშუალო მნიშვნელობების ვარიაციები ჰისტოგრამის კორექტირების პროცედურებამდე.

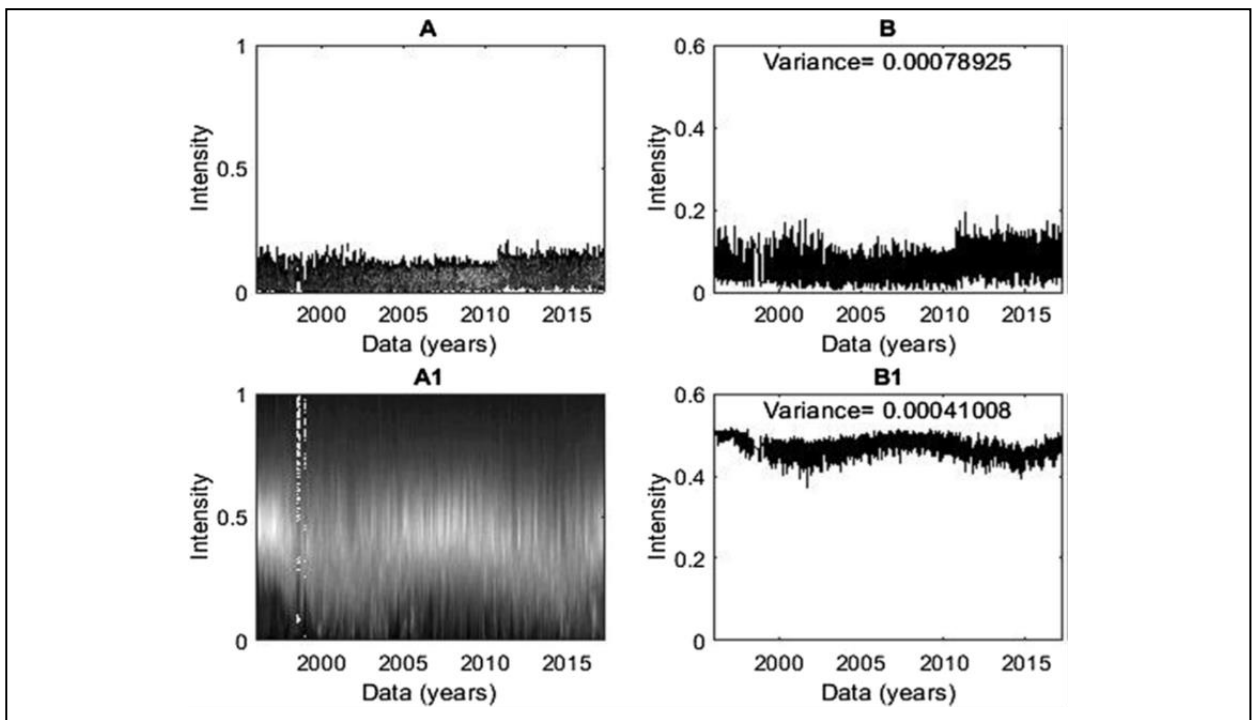
დისკის კიდის გაკაშკაშების მოდელირებისთვის მნიშვნელოვანია, რომ მოხდეს მზის დისკოზე ცენტრიდან კიდეებისაკენ ინტენსივობათა განაწილების მრუდების შესწავლა, რაც მხოლოდ ცალკეული გამოსახულებით შეუძლებელია, რადგან მზის დისკო ძირითადად დაფარულია ერთმანეთთან მკვეთრად განსხვავებული ინტენსივობების მქონე არეებით. ეს სტრუქტურები თავისთავად ძალიან დინამიურ ობიექტებს წარმოადგენენ და მუდმივად იცვლიან მზის დისკოზე მდებარეობას მზის ბრუნვის გამო. ამრიგად, მრავალი თანამიმდევრული გამოსახულების გასაშუალება შესაძლებელს ხდის გამოვყოს მზის დისკოზე ინტენსივობათა განაწილების ის კომპონენტი, რაც განპირობებულია კიდეების გაკაშკაშებით. თუმცა შესაძლებლობის ფარგლებში უნდა მოხდეს გამოსახულებების საშუალო ინტენსივობების გათანაბრება, რაც უზრუნველყოფს, რომ თითოეული ცალკეული გამოსახულების ხვედრითი წონა, მიღებულ, გასაშუალებულ შედეგში დაახლოებით თანაბარი იქნება.

ნახ. 4 გვიჩვენებს, რომ მონაცემთა კრებული ფაილების ინტენსივობები სპეციალური IDL eit\_pro მოსამზადებელი პროცედურების შემდგომაც კი გამოსახულებიდან გამოსახულაბემდე მკვეთრად იცვლება და მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მზის აქტივობის ციკლზე. 2010 წლის შემდგომ (შესაძლოა მას შემდეგ,

რაც მოხდა SOHO-სა და SDO-ს ინსტრუმენტების ურთიერთდაყალიბება), ჩვენ ვხედავთ გარკვეულ სტაბილიზაციას, მაგრამ ამავედროულად თავი იჩინა წლიურმა ფლუქტუაციებმა.



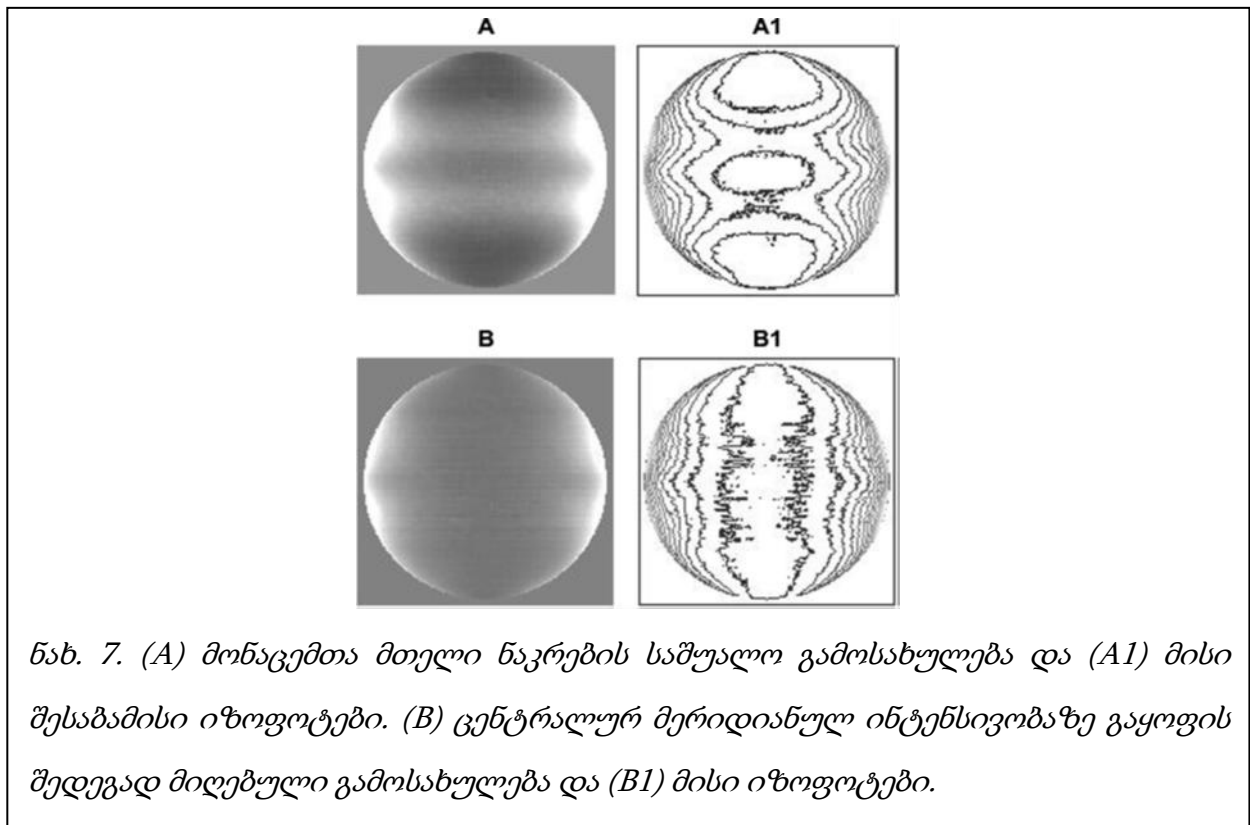
გამონასახთა მწკრივის დისკოს ცენტრიდან კიდისკენ ინტენსივობების განაწილების მრუდების შესადარებლად აუცილებელია მოვახდინოთ მწკრივის გამოსახულებათა კონტრასტის გაერთგვაროვნება. ამისთვის მივმართეთ გამოსახულების ჰისტოგრამის ე.წ. ნორმალიზების შემდეგ ხერხს, რაც თანმიმდევრობით ნახ. 5-ზე არის წარმოჩენილი. პირველი ეტაპი არის ბარტლეტის გარდაქმნა, რაც გულისხმობს ინტენსივობებიდან კვადრატული ფესვის ამოღებას. ეს ნორმალურისკენ ძრავს გამოსახულების ჰისტოგრამას. ამის მერე მაღალი ინტენსივობების უმნიშვნელო პიქსელების რიცხვიანი კუდის მოკვეთის შემდეგ ვყოფთ მედიანის ინტენსივობის ნახევარზე. თუმცა აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ შემდეგ შრომებში ამ პროცედურების ნაცვლად ვიყენებდით მოდიფიცირებული ბარტლეტის გარდაქმნას, რაც გულისხმობს ინტენსივობის ისეთი ხარისხით ამოფესვას, რომ 0 დან 1 ინტერვალში საშუალო ინტენსივობა 0,5-ის ტოლი იყოს, ყოველგვარი ჰისტოგრამის უბნების კვეთის გარეშე. ამ პროცედურების ჩატარების შემდეგ მონაცემთა ნაკრების



ნახ. 6. მონაცემთა ნაკრების შედარება ჰისტოგრამის კორექტირების პროცედურამდე (A და B) და შემდეგ (A1 და B1). (A) და (A1) არის ჰისტოგრამის ევოლუცია და (B) და (B1) არის გამოსახულებების საშუალო ინტენსივობის ვარიაციები.

შედარება წარმოჩენილია ნახ. 6-ზე, სადაც ნათლად მოჩანს ნორმალური განაწილების მახასიათებლების კორელაცია მზის აქტივობის ციკლებთან.

ცალკეულ გამოსახულებათა ჰისტოგრამები კარგად არის განაწილებული ინტენსივობის ფარდობით რადიუსში 0-დან 1-მდე, და გვირგვინის ხვრელების შესაბამისი „კუზები“ უმრავლეს ჰისტოგრამებზე მკაფიოდ იჩენენ თავს (ნახ. 5). ეს „კუზები“ ძალიან მნიშვნელოვანია გვირგვინის ხვრელების სეგმენტაციის დროს ინტენსივობის ზღურბლის ავტომატურად განსაზღვრისათვის. მზის დისკოზე ინტენსივობათა განაწილების გათანაბრებული სურათის კარგ ილუსტრაციას წარმოადგენს ნახ. 7, რომელიც გამოსახულებათა მთელი მწკრივის კორექტირების შედეგად არის მიღებული.

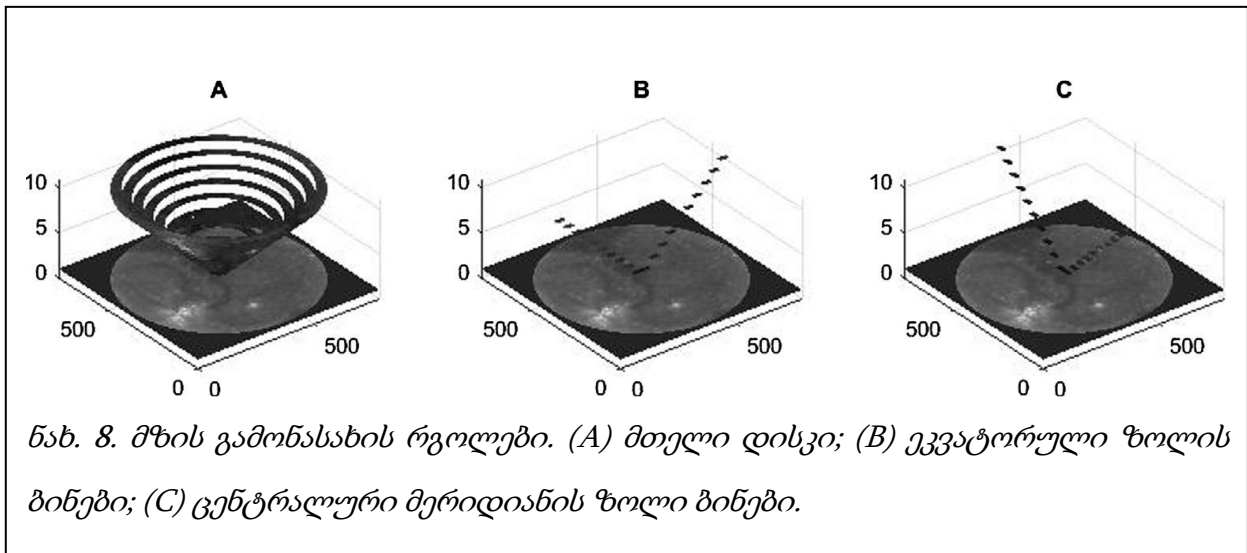


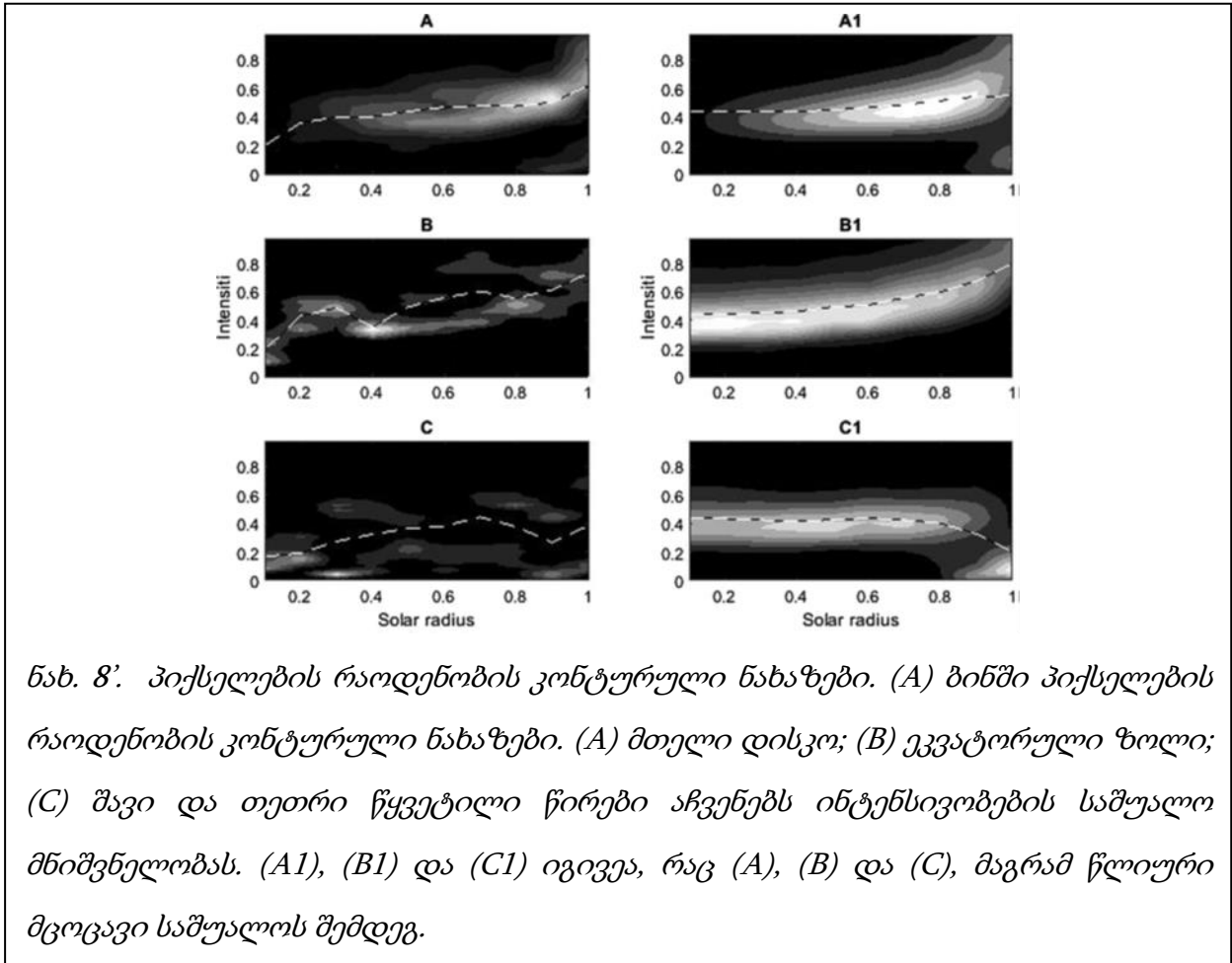
აქ ინტენსივობის ანიზოტროპული პოლარული განაწილება ცხადია. თვალში საცემია პოლუსების მიმართულებით კიდის შეზღუდვა. საკმარისად მოიძებნება შრომები, სადაც დისკოს ცენტრიდან კიდისაკენ ინტენსივობის ცვლილებები მზის სხვადასხვა წარმონაქმნებისათვის იქნა შესწავლილი. კვლევამ გამოაშკარავა, რომ ძირითად ტენდენციას წარმოადგენს წყნარი მზის რეგიონებში კიდისაკენ გაკაშკაშება;

უნიპოლარულ მაგნიტურ რეგიონებში კიდის ნეიტრალურობა და კიდის შებნელება მზის გვირგვინის პოლარულ ხვრელებში (Mango et al. 1978). აგრეთვე, ხაზი იქნა გასმული პოლარულ და ეკვატორულ რეგიონებში კიდის გაკაშკაშების კვლევის მნიშვნელობაზე (Kallunki, 2018).

ნახ. 7 თვისობრივად კარგად წარმოაჩენს კიდის გაკაშკაშების ეფექტს, მაგრამ რეალურად ამ ეფექტის კორექციისთვის აუცილებელია რაოდენობრივი კვლევები და მაკორექტირებელი გამონასახის შექმნა, რომელიც საკორექტირებელ გამონასახზე იქნება მორგებული. ამისთვის ჩვენ დავყავით მზის დისკი თანაბარი სიგანის 10 რგოლად, შემდეგ კი ამ რგოლების ეკვატორულ და ცენტრალურ მერიდიანულ 20 პიქსელი სიგანის ნაჭრებად, როგორც ნაჩვენებია ნახ 8-ზე. ნახ. 8-ზე ნაჩვენები სამივე შემთხვევაში, მონაცემთა ნაკრების თითოეული სურათისთვის, ჩვენ გამოვთვალეთ პიქსელების რაოდენობის განაწილება ინტენსივობების მიხედვით თავისი შესატყვისი ბინის დისტანციით დისკის ცენტრიდან. საბოლოოდ მივიღეთ სამგანზომილებიანი მატრიცების დროითი სერია პიქსელების რაოდენობების ინტენსივობაზე განაწილებით და შესაბამისი დისკის ცენტრიდან დაშორებით.

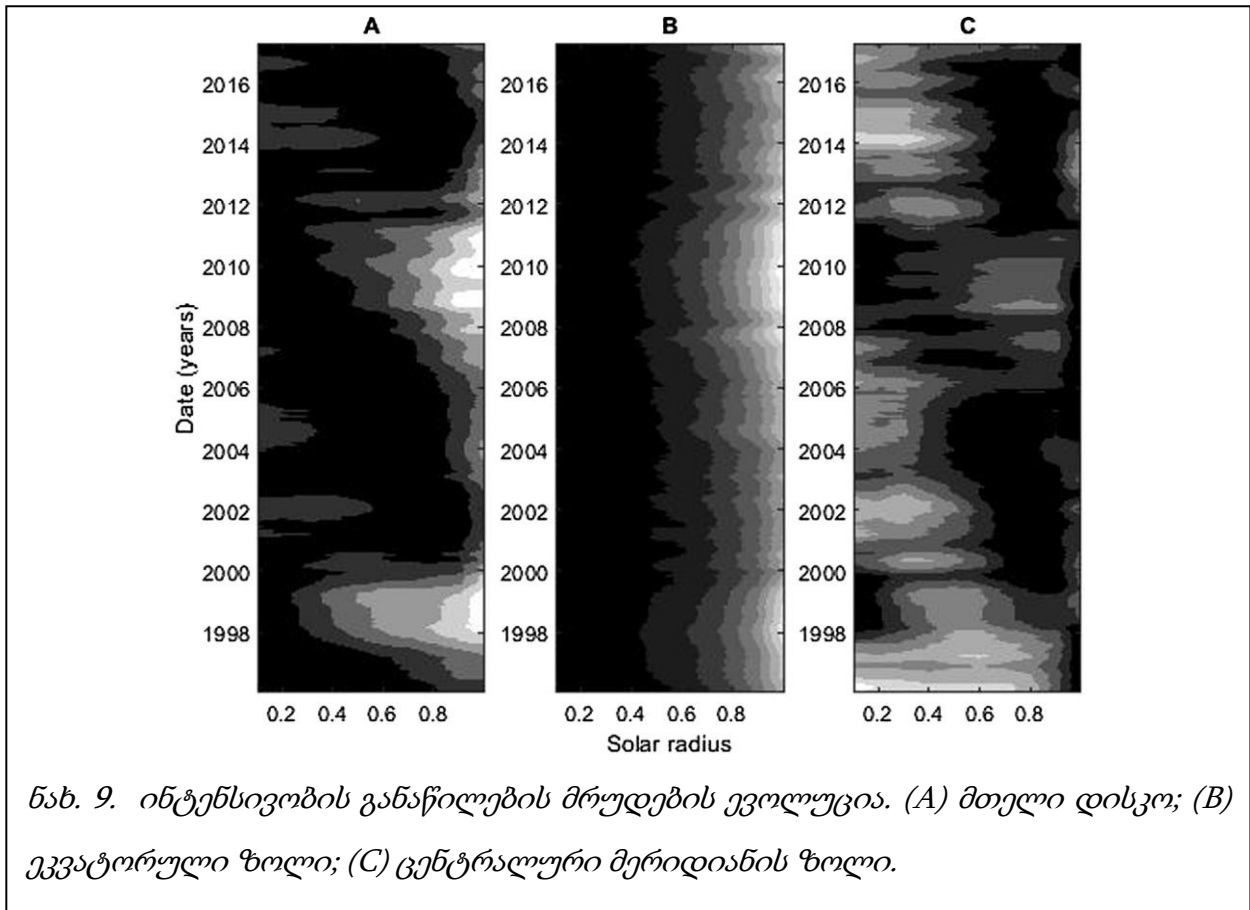
ნახ. 8' აჩვენებს ნიმუში გამონასახისთვის პიქსელის ინტენსივობების განაწილებას ცენტრიდან დისკის კიდემდე.





ნახ. 9 კი წარმოგვიდგენს გამონასახთა მთელი სერიის მთელ დისკოსა და ეკვატორულ ცენტრალურ-მერიდიანული ინტენსივობის განაწილებების დროითი ევოლუციების სურათებს.

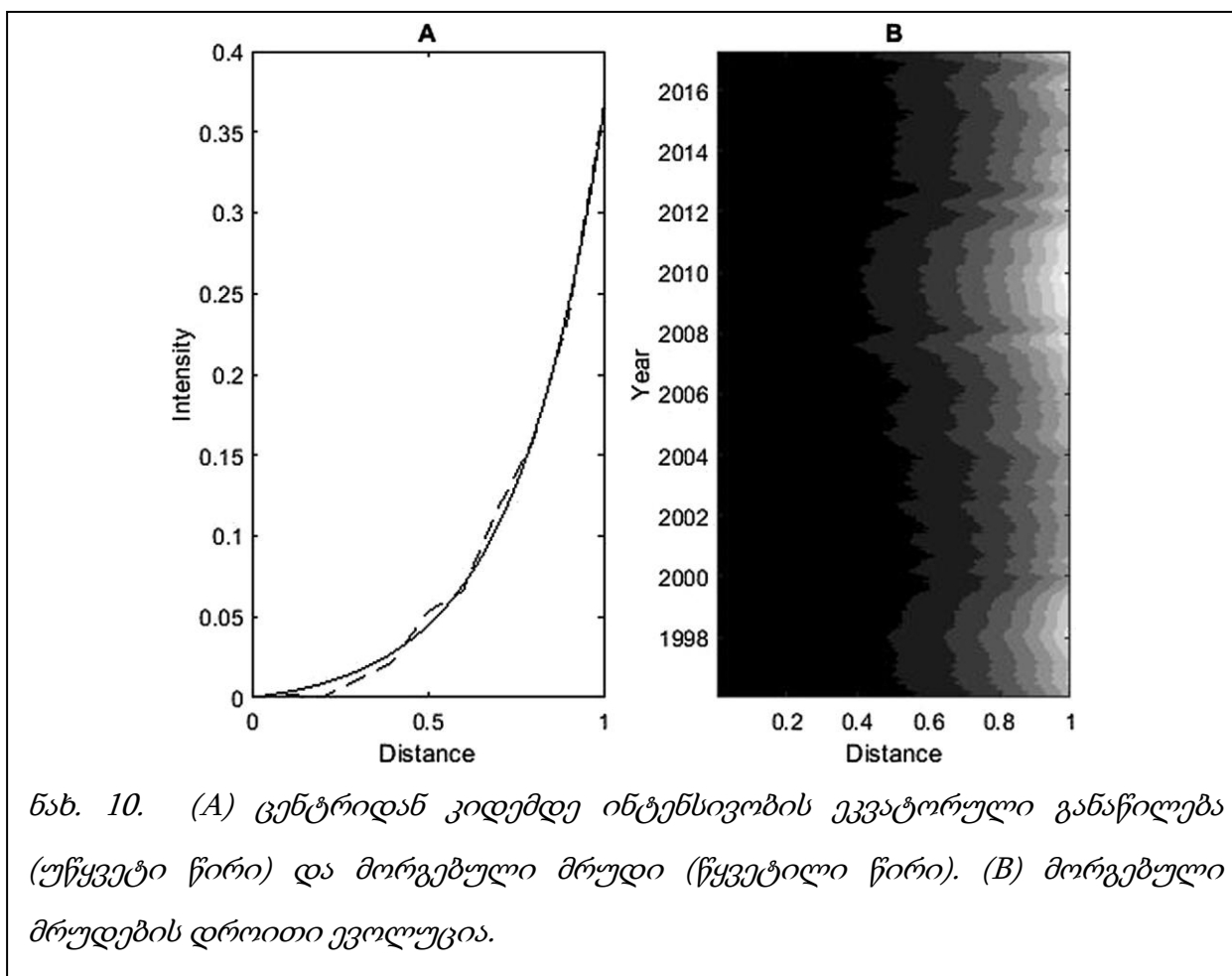
ჩვენმა კვლევამ აჩვენა, რომ ცენტრიდან პოლუსებისაკენ დიდ მანძილზე, მზის გვირგვინის ინტენსივობას ახასიათებს ნეიტრალურისაკენ (რიგ შემთხვევებში, კი შეზღუდულებისკენაც კი) მიდრეკილი ტენდენცია, რაც უშუალოდ კიდეზე იცვლება მცირე გაკაშკაშებით. რაოდენობრივი კვლევები აშკარად აჩვენებს, რომ ცენტრიდან კიდისაკენ ინტენსივობის ცვლილება არ არის პოლარულ-სიმეტრიული. მას აქვს ელიფსური იზოფოტები, და ეს ელიფსი პოლუსებისკენ არის წაგრძელებული. ეს შეიძლება აიხსნას ეკვატორურ და პოლარულ რეგიონებში რადიალური ტემპერატურის გრადიენტების განსხვავებით (David et al. 1998), რადგანაც სწორედ ტემპერატურული გრადიენტების არსებობით არის გამოწვეული ინტენსივობის კიდისეული ცვალებადობა.



მაკორექტირებელი გამონასახის შესაქმნელ ღერძად ვიყენებთ ინტენსივობის ჰორიზონტული განაწილების მრუდს, რომლის მოდელირებაც შედარებით მარტივია. მოდელირებისთვის ვიყენებთ ინტუიტიურ-გონივრულ ანალიტიკურ ფორმულას:

$$I(i) = a(i)(e^{b(i)\rho} - 1) \quad (1).$$

სადაც  $\rho$  არის უგანზომილებო მანძილი მზის დისკოს ცენტრიდან დაშორება  $\rho = \frac{r}{R_{\odot}}$ , რომელიც ნორმალიზებულია მზის რადიუსზე  $R_{\odot}$ ,  $a(i)$  და  $b(i)$  არის პარამეტრები, რომლებიც გამოითვლება ფუნქციის  $i$ -ური გამონასახის მრუდზე მორგებით, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 10-ზე. მონაცემთა მთელი ნაკრებიდან თითოეულ გამონასახ აქვს საკუთარი პარამეტრები  $a$  და  $b$ . მოცემული გამონასახის მაკორექტირებელი გამონასახის ასაგებად მონაცემთა ბაზიდან აირჩევა შესატყვისი  $a$  და  $b$ , რომლის მეშვეობით აიგება პოლარულად სიმეტრიული დისკო, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 11a-ზე. შემდეგ ხდება წრიული დისკოს სიმეტრიული გაწელვა ვერტიკალური მიმართულებით ნახევარღერძების თანაფარდობით 1.7 (რაც ცდისეულად ერგება

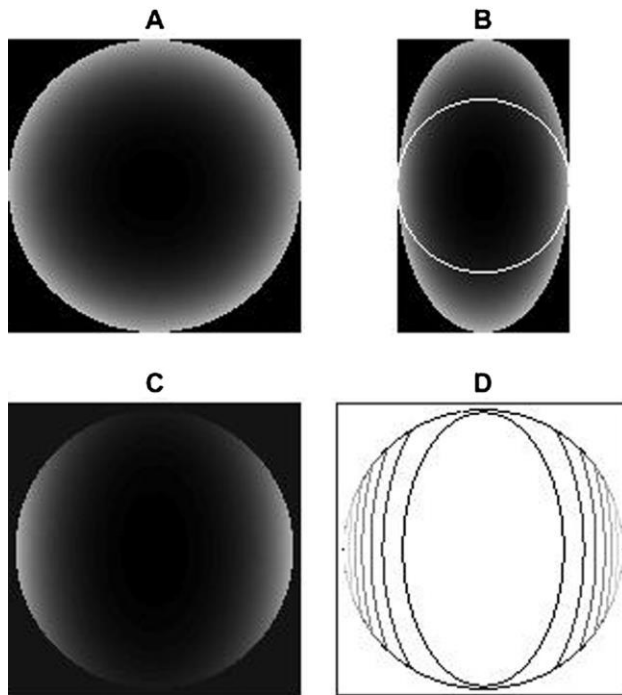


ნახ. 10. (A) ცენტრიდან კიდემდე ინტენსივობის ეკვატორული განაწილება (უწყვეტი წირი) და მორგებული მრუდი (წყვეტილი წირი). (B) მორგებული მრუდების დროითი ევოლუცია.

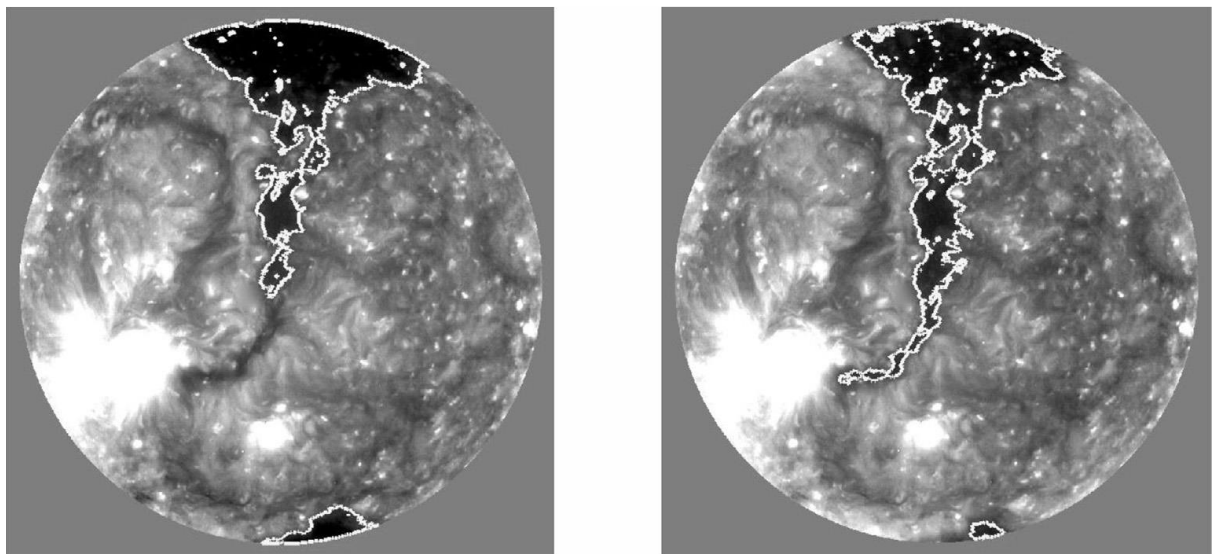
უმეტეს გამონასახს, თუმცა ავტომატურ ინტერაქტიულ კოდს აქვს მისი რეგულირების საშუალება(ც). ამის შემდეგ ამ გაწეილ ფიგურის ცენტრში კვლავ ამოიჭრება მზის დისკოს რადიუსით ახალი წრე, რომელიც უკვე წარმოადგენს მაკორექტირებელ გამონასახს.

საკორექტირებელი გამონასახიდან მაკორექტირებელი გამონასახის მიღებით საბოლოოდ ვიღებთ კორექტირებულ გამონასახს, რომელზეც განეიტრალებულია კიდის გაკაშკაშების ეფექტი. ნახ. 12-ზე გამოსახულია გამონასახის კორექტირების შედეგი წრიული იზოფოტებიანი და ელიფსური იზოფოტებიანი მაკორექტირებელი გამონასახებით. მეორის უპირატესობა აშკარაა.





ნახ. 11. (A) მაკორექტირებელი გამოსახულება წრიული იზოფოტებით; (B) საწყისი მაკორექტირებელი გამონასახი გაწეილი ელიფსამდე, თეთრი წრე აჩვენებს თავდაპირველ ზომას; (C) საბოლოო მაკორექტირებელი გამოსახულება მიღებული B-ის ნაწილის ამოჭრით შიგნით თეთრ წრეზე; (D) საბოლოო მაკორექტირებელი გამოსახულების იზოფოტები.



ნახ. 12. გვირგვინის ხერხელის სეგმენტაციის შედეგი გლობალური ზღურბლით კიდის გაკაშვების ეფექტის მოცილების შემდეგ წრიული (მარცხნივ) და ელიფსური (მარჯვნივ) იზოფოტებით.

#### 4. მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილება (Latitudinal distribution of solar coronal active regions)

ნაშრომში “მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილება” SOHO EIT-ის 1995 - 2017 წლებში ყოველდღიურად მიღებულ გამოსახულებებზე დაყრდნობით შევისწავლეთ მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილების ციკლური ცვალებადობა.

ამ კვლევაში გამოყენებული იქნა სრულად ავტომატიზირებული პროგრამული უზრუნველყოფა, რაც შემდეგ ეტაპებს მოიცავდა: გამოსახულებათა საწყისი მომზადება მონაცემთა სერიებში; ჰისტოგრამების ნორმალიზაცია და კიდის გაკაშკაშების კორექცია; გამოსახულებების ჰისტოგრამებიდან მიღებული ინტენსივობის მნიშვნელობათა ზღურბლის გამოყენებით, ამ გამოსახულებების სეგმენტაცია; სეგმენტირებულ გამოსახულებათა სკანირება ჰელიოგრაფიულ კოორდინატებში; მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილების პროფილების მიღება მონაცემთა სერიების ცალკეული გამოსახულებისათვის.

მზის გვირგვინის სტრუქტურის შემადგენლობა მოკლედ ასე შეიძლება აღიწეროს: გვირგვინის აქტიური არეები, რომლებიც წარმოადგენს მაგნიტურ მარყუჟებში ჩაჭერილ გვირგვინის მკვრივ და ცხელ ნაწილს, რომელიც განთავსებულია ფოტოსფეროს მძლავრი მაგნიტური ველების მქონე რეგიონების (მზის ლაქები და მათი ნარჩენები) ზევით. ფონური გვირგვინი აქტიური არეების გარეშე, ე.წ. წყნარი მზის გვირგვინი, რომელიც ნაკლებად კაშკაშაა მაგრამ ასევე მოქცეულია მაგნიტური ველის მარყუჟისებრ კონფიგურაციებში, რომლებიც ამოდის მზის ფოტოსფეროდან და ხშირად აჩვენებს განსაკუთრებულ გაკაშკაშებას გვირგვინის მცირე აქტიური არეების, გვირგვინის კაშკაშა წერტილების სახით. ისინი თანაბრად არიან განაწილებული მზის ატმოსფეროში და განიხილება, როგორც მცირე ზომის აქტიური არეები (Madjarska, 2019). არის ასევე ბნელი რეგიონები, ე.წ. მზის გვირგვინის ხვრელები, რომლებიც ასევე წარმოადგენენ წყნარი მზის ნაწილს რომელთაც აქვთ ღია მაგნიტური კონფიგურაცია, რადგან მათი მაგნიტური ველის ძალწირები მზის ქარის მიერ შორს საპლანეტათაშორისო სივრცეში არის წატაცებული (Cranmer, 2009).

იმის გამო, რომ გვირგვინის სტრუქტურას, ისევე როგორც მის გაცხელებას მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს მაგნიტური ველი, რომელიც ფოტოსფეროს გავლით

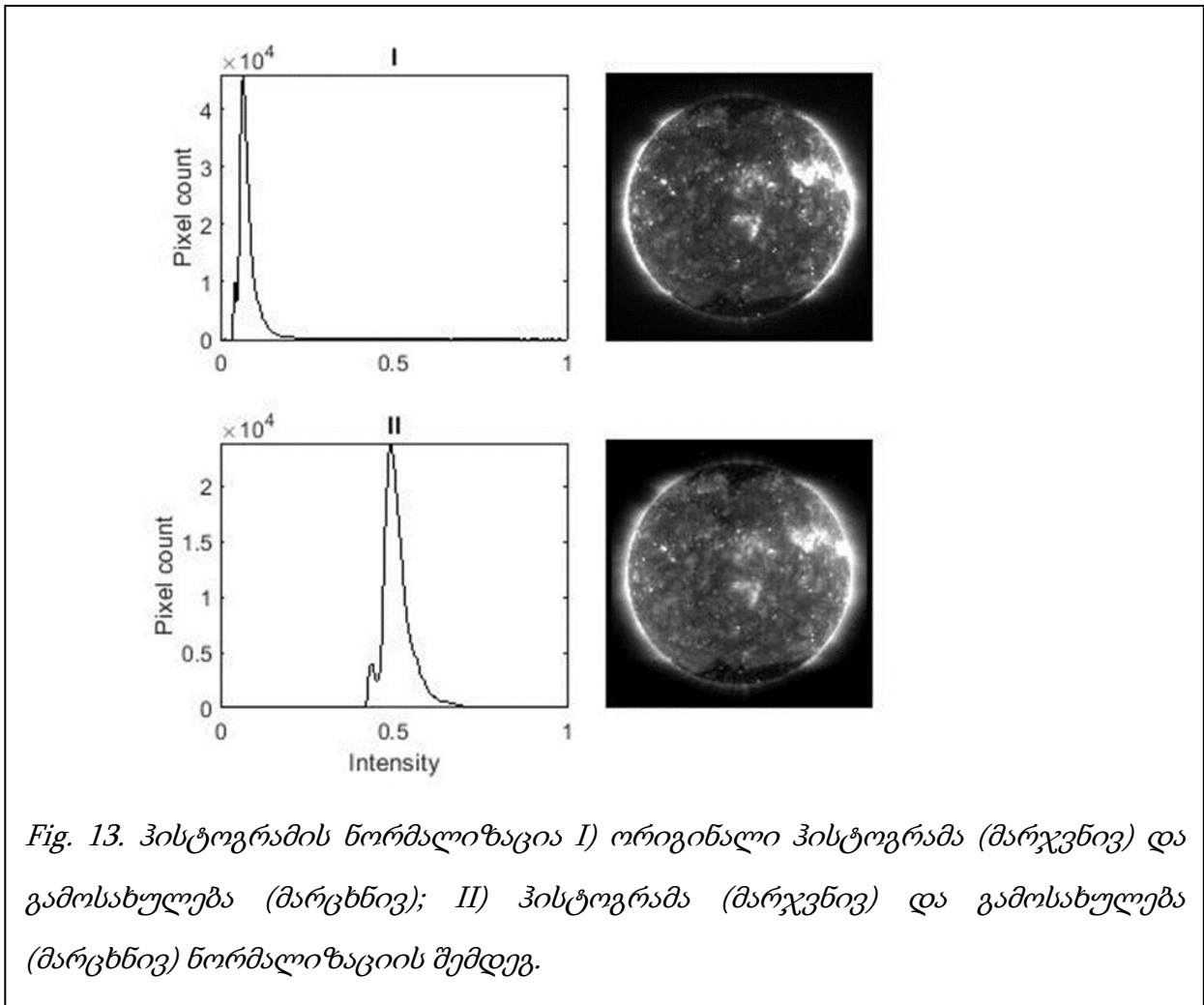
განჭოლავს ქრომოსფეროსა და გვირგვინს და ვრცელდება მთელს საპლანეტათაშორისო სივრცეში, მნიშვნელოვანია გვირგვინის წარმონაქმნებისა და ფოტოსფერული მაგნიტური ველების დაკვირვებითი მონაცემების შედარება და მათ შორის კორელაციური კავშირების დადგენა.

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილების ციკლური ევოლუციის შესწავლა და მისი მახასიათებლების შედარება მზის ლაქების შესახებ არსებული მონაცემების მახასიათებლებთან.

მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილების დროითი ვარიაციების გამოსაკვლევად ყოველდღიური FITS ფაილების სერია ჩამოტვირთული იქნა მონაცემთა ბაზიდან 1995-2017 წლების პერიოდისთვის. სერიის თითოეულ ფაილს ჩაუტარდა IDL eit\_pro პროცედურა.

კვლევისთვის ინტენსივობის გლობალური ზღვრის გამოყენებით მოხდა წარმონაქმნების სეგმენტაცია. ინტენსივობის გლობალური ზღვრის გამოყენებას მზის მთელი დისკოსთვის ხელს უშლის მზის ლიმბის გაკაშკაშება, რაც გვირგვინის ტემპერატურის დადებითი გრადიენტით არის გამოწვეული. აქტიური არეების სეგმენტაციის შემთხვევაში, ვინაიდან კიდის სიკაშკაშის მოხსნამდე კიდესთან ხდება წყნარი მზისა და აქტიური არის შერწყმა და მოხსნის შემდეგაც სეგმენტაცია შეუძლებელი ხდება, მიმდინარე შრომაში მაქსიმალურად მოხდა მაღალი ინტენსივობის ფრთის ხელუხლებლად შენარჩუნება. იმისათვის რათა ცენტრიდან კიდისკენ ინტენსივობის განაწილების მრუდები მივიღოთ, აუცილებელია მრავალი გამოსახულების საშუალოების საშუალო განაწილების გამოთვლა, რათა მოხდეს ლოკალურ ადგილებში ინტენსივობის დროებითი ცვალებადობის გამორიცხვა. ეს მოითხოვს შესასწავლი გამოსახულებების წვლილი თანაბარი იყოს საშუალოს განსაზღვრისას. ამისათვის მოვახდინეთ ორიგინალი გამოსახულების grayscale კონვერტაცია ინტენსივობების (0,1) შუალედში. შემდეგ კი გამოსახულების ჰისტოგრამის ნორმალიზაცია ისე, რომ არ ვეხებით უკიდურეს 0 და 1 საზღვრებს. ეს მიიღწევა ბარლეტის ტრანსფორმაციის (Bartlett, 1936) მსგავსად ინტენსივობების ხარისხში აყვანით, რაც ცვლის ჰისტოგრამაზე ინტენსივობათა განაწილებას ისე, რომ არ იცვლება კიდურა საზღვრები. სპეციალური ავტომატური კოდის ნაწილმა

მოახდინა გამოსახულების იმ ხარისხით ამოფესვა (ბარტლეტის კვადრატული ფესვის ნაცვლად), რომ საშუალო ინტენსივობა მოხვდა ცენტრალურ 0.5 ნიშნულზე (ნახ. 14).

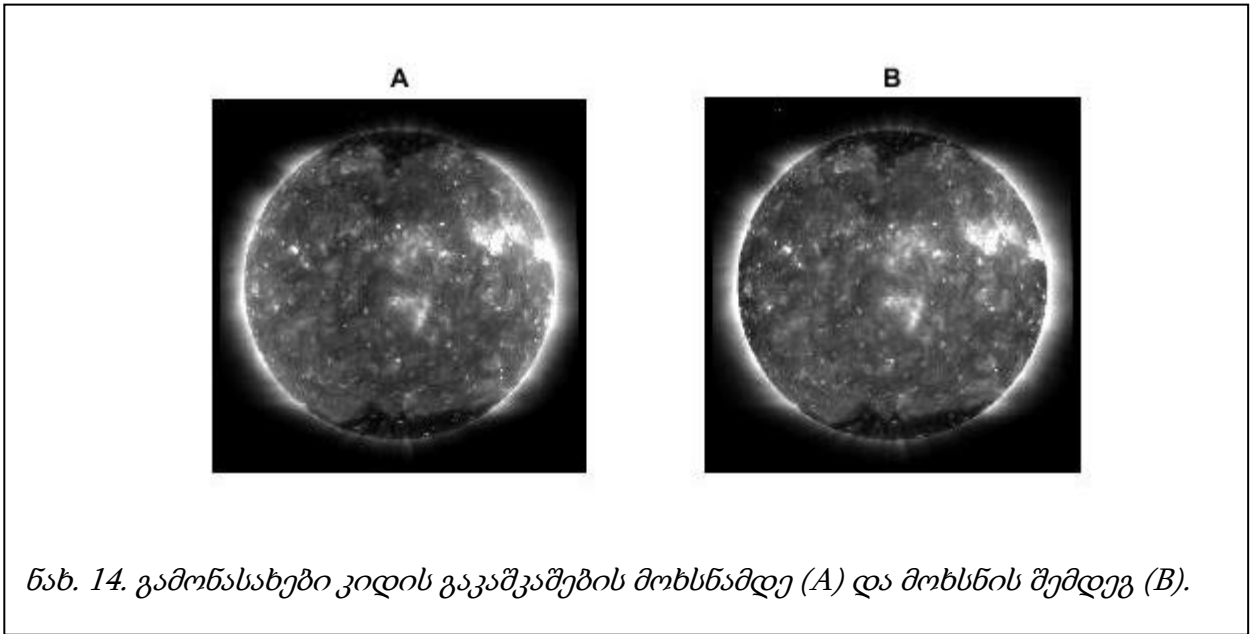


*Fig. 13. ჰისტოგრამის ნორმალიზაცია I) ორიგინალი ჰისტოგრამა (მარჯვნივ) და გამოსახულება (მარცხნივ); II) ჰისტოგრამა (მარჯვნივ) და გამოსახულება (მარცხნივ) ნორმალიზაციის შემდეგ.*

ამის შემდეგ ინტენსივობის ცენტრიდან კიდისკენ ცვლილების შესწავლა მზის გვირგვინის ხვრელებისათვის ჩატარებული პროცედურების ანალოგიურად განხორციელდა (Chargeishvili et al., 2019).

ავტომატური კოდის გამოყენებით (Chargeishvili et al., 2019) ყოველ დასამუშავებელ გამონასახზე განხორციელდა კიდის გაკაშკაშების მოშორება. ნიმუშად წარმოდგენილია შედეგი ნახ. 14-ზე. მზის გამოსახულებაზე აქტიური არის სეგმენტირებისთვის შესაძლებელია გამოვიყენოთ გლობალური ზღურბლი, მაგრამ ზღურბლის მნიშვნელობა უნდა იყოს თვით გამოსახულების ჰისტოგრამის ფუნქცია. ნახ.15-ზე მოცემული ზღურბლის დადგენის პროცედურები შემდეგია: აქტიური არეების გამოსაკვეთად ვახდენთ ნათელი ფონის მოშორებას, რისთვისაც კორექტირებული გამოსახულების ინტენსიური პიქსელების განვრცობა ხდება 30

პიქსელიანი რადიუსით (ნახ.15.II). კორექტირებულ გამონასახს ვაკლებთ ამ ე.წ. ფონს და შედეგად ვიღებთ ფონმოხსნილ გამონასახს (ნახ.15.III). უკანასკნელის ჰისტოგრამის მაღალინტენსიური ფრთის გაგლუვებას ვახდენთ და ვაკლებთ საწყის მრუდს.



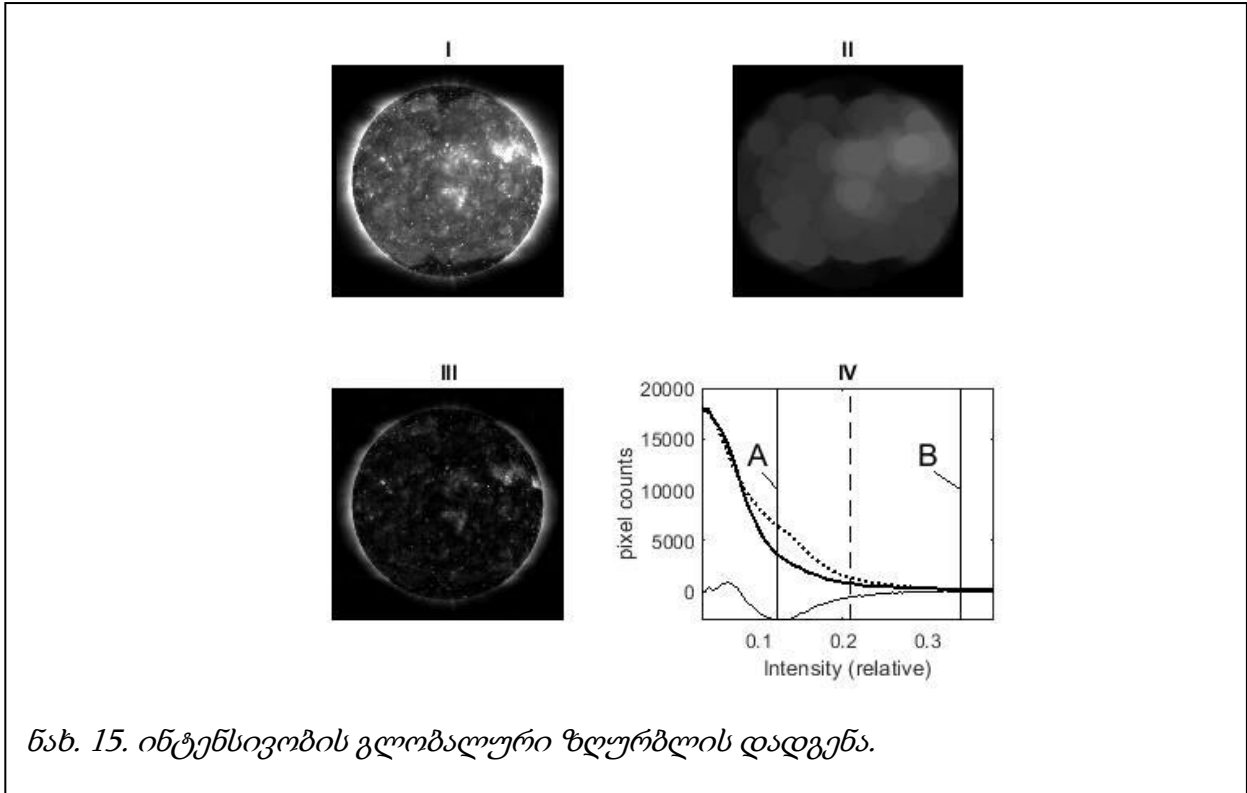
ნახ. 14. გამონასახები კოდის გაკაშკაშების მოხსნამდე (A) და მოხსნის შემდეგ (B).

ნარჩენ მრუდზე ვღებულობთ ჩაზნექილ მიდამოს, რომელსაც კოდი ადვილად მონიშნავს როგორც საყრდენ ინტენსივობის ზღურბლს  $I_1$  (ნახ.15.IV A, ვერტიკალური წირი). მეორე საყრდენ ზღურბლად  $I_2$  (ნახ.15.IV, B ვერტიკალური წირი) ვარჩევთ მრუდის მაღალინტენსიური ფრთის იმ წერტილს, სადაც ინტენსივობა შეადგენს მაქსიმალური ინტენსივობის 1 პროცენტს. აქტიური არეების სეგმენტაციისთვის ოპტიმალურ ზღურბლს წარმოადგენს ინტენსივობა, რომელსაც შემდეგი თანაფარდობით ვითვლით:

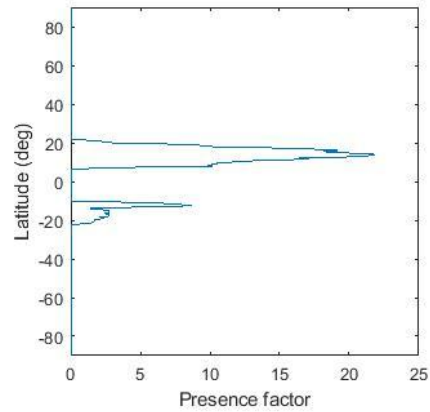
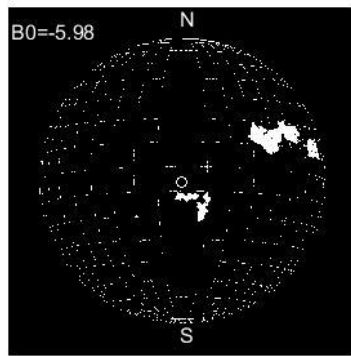
$$I = 0.45(I_1 + I_2) \quad (2)$$

გამოყენებული კოდის მეშვეობით ხდება სეგმენტაციის შედეგად მიღებული ბმული ელემენტების სფერული ფართობების შეფასება. კვლევისთვის ზღვრულ ფართობად შერჩეული იქნა ზედაპირის წილობრივი ფართობის (ერთეული რადიუსის მქონე სფეროს ზედაპირის წილი) მნიშვნელობა  $6 \times 10^{-4}$ , რომელიც გამოირიცხავს გვირგვინის კაშკაშა წერტილებსა და მცირე ზომის აქტიურ არეებს. სეგმენტაციის

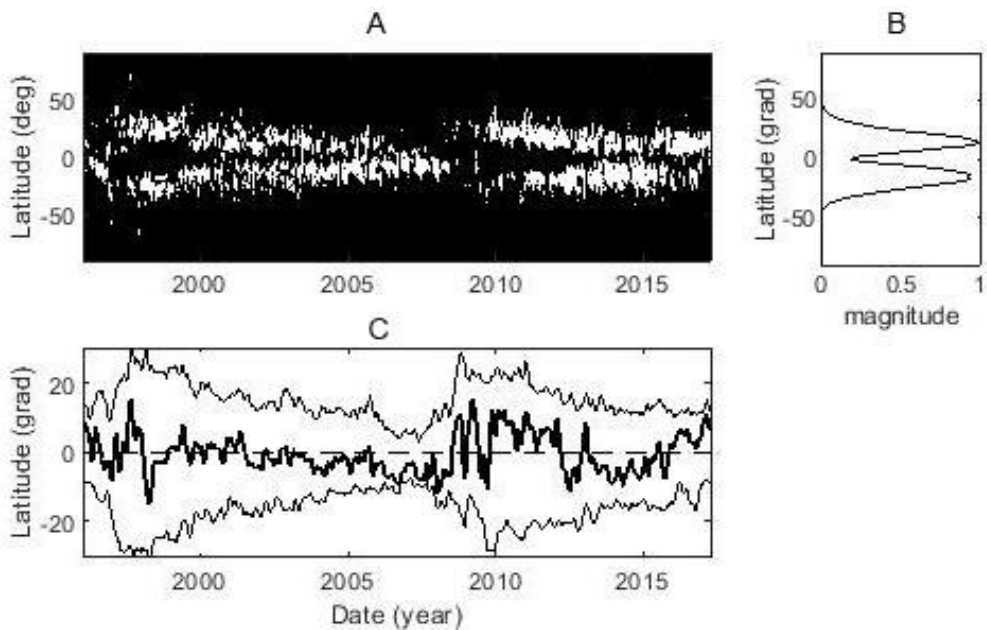
შედეგად მიღებული ბინარული გამონასახის სკანირება მოხდა ჰელიოგრაფულ კოორდინატთა სისტემაში ნახევარგრადუსიანი გარჩევით  $\pm 70^\circ$  გრძედულ და  $\pm 90^\circ$  განედურ შუალედებში.



მზის გვირგვინის წარმონაქმნების განედური განაწილების შესაფასებლად შემოღებული იქნა ე.წ. დასწრების ფაქტორი. მის გამოსათვლელად ვაფასებთ, თუ მოცემული განედის პარალელის რა ნაწილი უჭირავს აღნიშნულ წარმონაქმნს. ვინაიდან სხვადასხვა განედის შესაბამისი პარალელების ფიზიკური (არაგრადუსული) სიგრძე განსხვავებულია, ვახდენთ ამ სიდიდის ნორმირებას ეკვატორზე მისი განედის კოსინუსზე გაყოფით. ამის შედეგად მიღებული დასწრების ფაქტორი ინვარიანტულია ნებისმიერი განედისთვის.



ნახ. 16. მზის ბინარული გამონასახი სეგმენტირებული აქტიური არეებით და თარიღის შესაბამისი ჰელიოგრაფული ბადით (მარცხნივ) და მისი დასწრების ფაქტორის განედური განაწილება (მარჯვნივ).



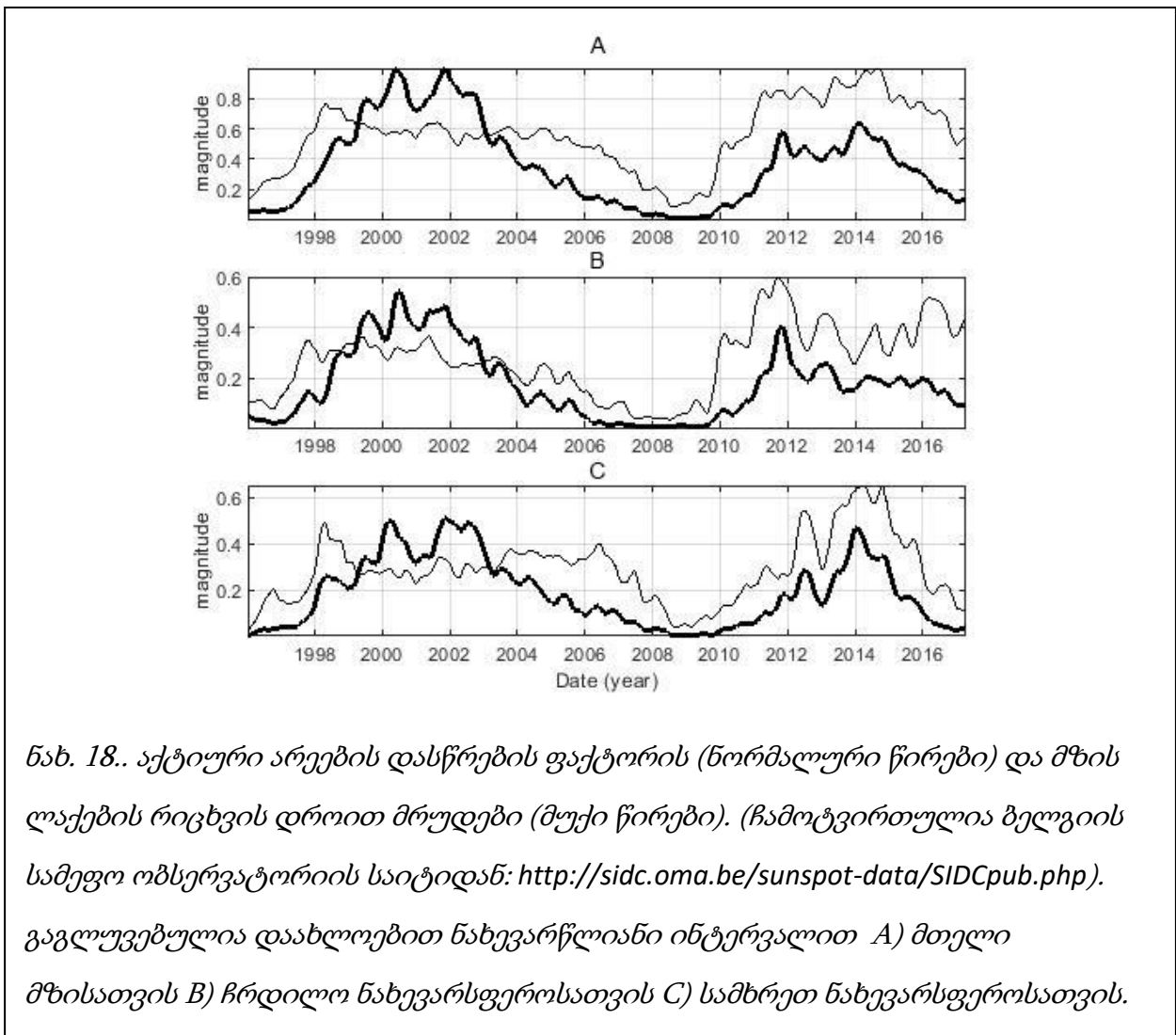
ნახ. 17. A) აქტიური არეების განედური განაწილების დროითი ევოლუცია. B) შესასწავლი პერიოდის განმავლობაში აქტიური არეების საშუალო განედური განაწილება C) აქტიური არეების აქტივობის ცენტრების მიგრაციის მრუდები, გაგლუვებული დაახლოებით ნახევარწლიანი ინტერვალით

ნახ. 17-ზე წარმოდგენილია მზის გამონასახზე აქტიური არეების დასწრების ფაქტორის განედური განაწილება. სერიის ყველა გამონასახზე აქტიური არეების განედური განაწილების პროფილები თანმიმდევრული თარიღებით წარმოდგენილია ნახ. 17.A. აქ წარმოდგენილი დასწრების ფაქტორების განედური განაწილების დროითი ევოლუცია გვახსენებს მზის ლაქების კარგად ცნობილ პეპლების დიაგრამას (Maunder, 1904). როგორც ნახ. 17.B-დან ჩანს, აქტიური არეები ძირითადად კონცენტრირებულია  $\pm 50^\circ$  განედის ფარგლებში და პიკები მოდის დაახლოებით  $\pm 20^\circ$  განედზე. ნახ. 17.C-ზე წარმოდგენილია აქტიური არეების აქტივობის ცენტრების მიგრაცია მზის მთელი ზედაპირისათვის, აგრეთვე მისი ჩრდილოეთ და სამხრეთ ნახევარსფეროებისთვის ცალ-ცალკე. ორივე ნახევარსფეროზე აქტივობის მინიმუმის პერიოდიდან აქტივობის ცენტრი მიგრაციას იწყებს მაღალი განედებიდან (დაახლოებით  $\pm 30^\circ$ ) ეკვატორისკენ და ეს გრძელდება შემდეგი მინიმუმის დადგომამდე. აქტივობის საერთო ცენტრის მიგრაცია ამ დროის განმავლობაში მრავალჯერ იცვლის მიმართულებას.

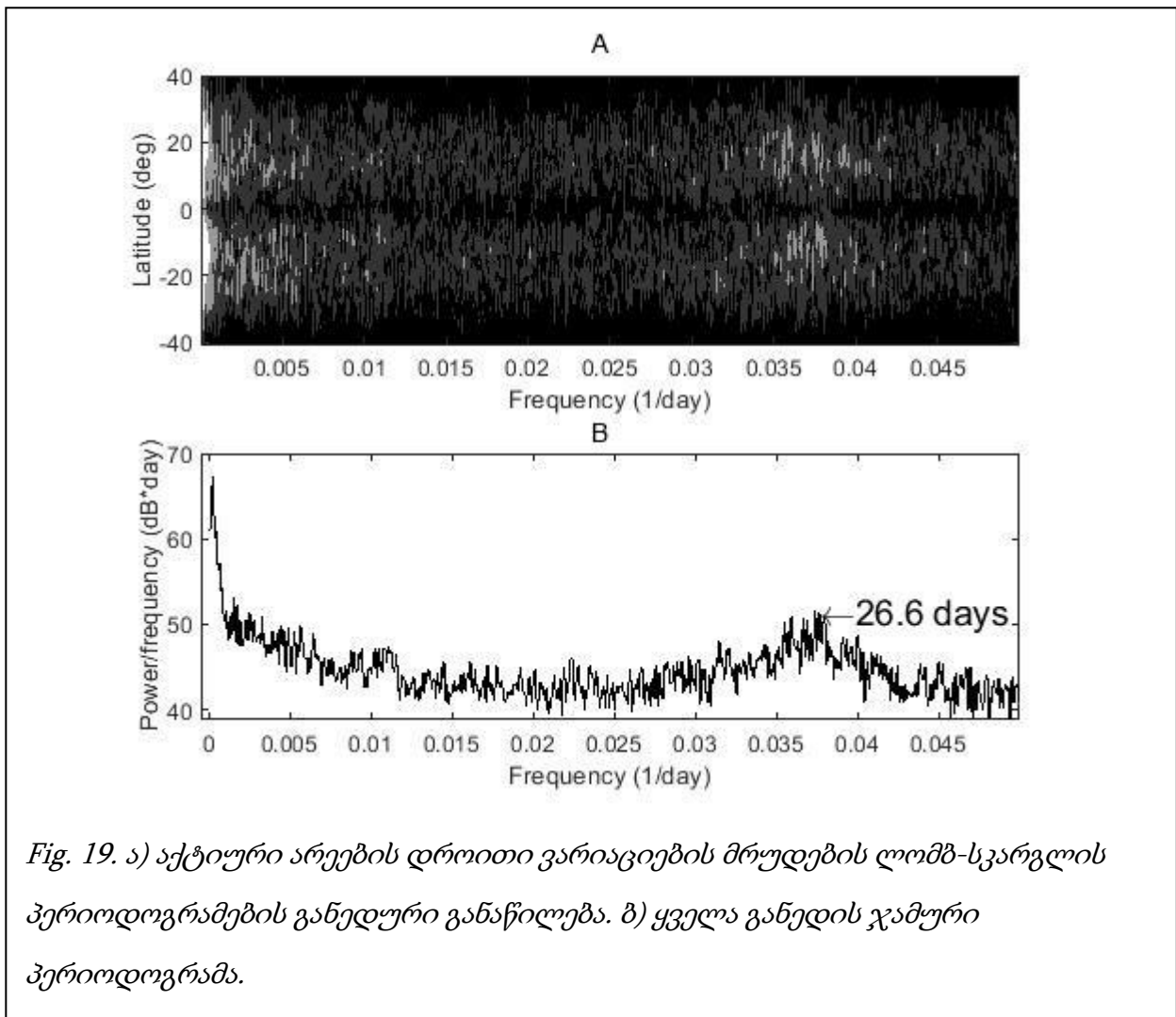
ნახ. 18-ზე წარმოდგენილია აქტიური არეების დასწრების ფაქტორის დროითი მრუდები მზის ლაქების რიცხვის მრუდებთან ერთად. მრუდები ნორმალიზებულია ისე, რომ მათი მაქსიმუმი ერთეულის ტოლია. აქტიური არეების დასწრების ფაქტორის მრუდები ფორმით კარგად იმეორებს მზის ლაქების რიცხვების მრუდებს, თუმცა პიკები უფრო ფართოა. აქტიური არეების დასწრების ფაქტორის ვარიაციებს გარდა მსხვილმასშტაბიანი ცვლილებებისა ახასიათებს წვრილმასშტაბიანი რხევებიც, რაც ნახ. 17.A-ზე ვერტიკალური ბოჭკოვანი სტრუქტურების არსებობითაც ვლინდება. ყოველ მოცემულ განედს შეესაბამება დასწრების ფაქტორის დროითი ვარიაციის მრუდი. იმის გამო, რომ მონაცემები დროით ღერძზე არათანაბრად არის განაწილებული, აღნიშნული მრუდების სპექტრალური ანალიზის ჩასატარებლად გამოყენებული იქნა lomb-skargle პერიოდოგრამის მეთოდი, რაც სწორედ მსგავსი მონაცემების ანალიზისთვის არის გამიზნული (VanderPlas, 2018). ანალიზის შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 19-ზე. ნახ. 19-ის ორივე ნახაზზე გამოკვეთილია სიხშირეების ორი უბანი. უკიდურესი დაბალსიხშირული პიკი შეესაბამება დაახლოებით 12 წელს და არის აშკარად გამოხატული აქტივობის ორი პიკის შედეგი (ნახ. 18). რაც შეეხება შედარებით მაღალსიხშირულ პიკს, ის ყველა განედის პერიოდოგრამაზე ვლინდება.



ჯამურ პერიოდოგრაფაზე დაფიქსირებული სიხშირის შესაბამისი პერიოდი აშკარად მზის ბრუნვის სინოდური პერიოდის გამოვლინებაა.



ამრიგად, მზის გვირგვინის აქტიური არეების განედური განაწილების ციკლური ცვალებადობის შესწავლის შედეგად მივიღეთ განედური განაწილების პროფილების დროითი ცვლილება და აქტივობის ცენტრების მიგრაცია მზის დისკოზე. მზის აქტივობის მინიმუმიდან შემდგომ მინიმუმამდე, ორივე ნახევარსფეროში აქტივობის ცენტრები იწყებენ მიგრაციას მაღალი განედებიდან ეკვატორისაკენ. ამავდროულად, აქტივობის საერთო ცენტრი არაერთხელ იცვლის მიგრაციის მიმართულებას. მზის გვირგვინის აქტიური არეების ე.წ. დასწრების ფაქტორის განედური განაწილება ძალიან ჰგავს მაგნიტური პეპლების დიაგრამას, რაც ადასტურებს მათ მიზეზ-



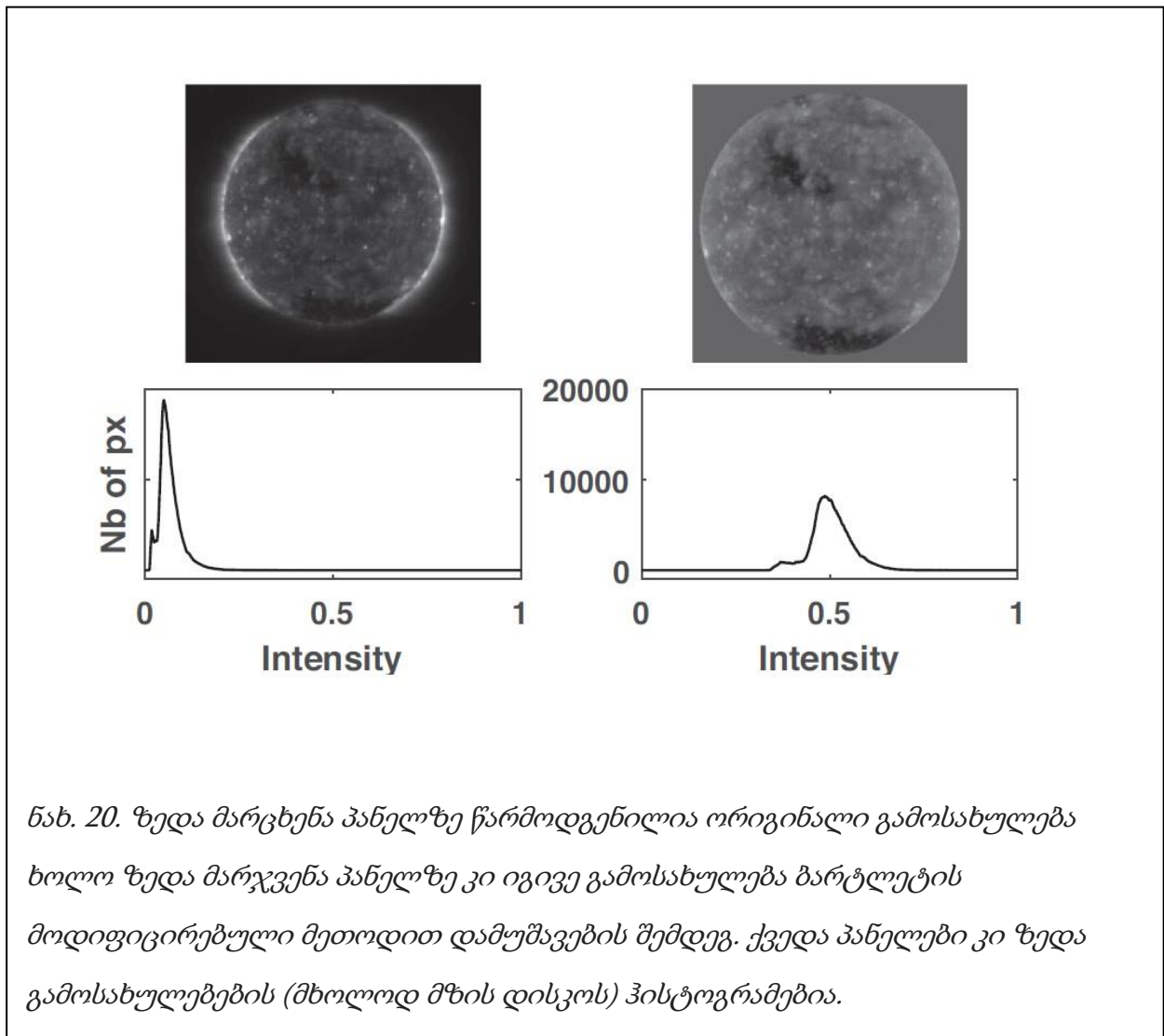
*Fig. 19. ა) აქტიური არეების დროითი ვარიაციების მრუდების ლომბ-სკარგლის პერიოდოგრამების განედური განაწილება. ბ) ყველა განედის ჯამური პერიოდოგრამა.*

შედეგობრივ კავშირს. დასწრების ფაქტორის განედური განაწილების დროითი ვარიაციები აჩვენებს გარკვეულ პერიოდულობას, მკვეთრად გამოკვეთილი სიხშირეების ორი უბნიდან. ერთი, მაღალსიხშირული, შეესაბამება 11 წლიან ციკლს და ის დაახლოებით 12 წლის ტოლია, და მეორე კი - სხვადასხვა განედებზე 26-27 დღეებს შორის მერყეობს, რაც მზის ბრუნვის სინოდურ პერიოდთან კავშირს ცხადყოფს. ამ სიხშირეს არ აქვს კავშირი მზეზე მიმდინარე პროცესებთან და მის აქტივობასთან, ის დაკვირვების ეფექტია, მაგრამ რა თქმა უნდა მნიშვნელოვანია მისი გათვალისწინება მზე-დედამიწის კავშირებისა და კოსმოსური ამინდის შესწავლისას. გვირგვინის აქტიური არეების დასწრების ფაქტორის ცვლილებები დაკავშირებულია მზის ლაქების ყოველდღიური რაოდენობის ციკლურ ცვალებადობასთან.

## 5. მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ხანგრძლივი ვარიაცია (Long-term variation of coronal holes latitudinal distribution)

ნაშრომში “მზის გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ხანგრძლივი ვარიაცია” ვიკვლევდით მზის გვირგვინის ხვრელების აქტივობის ცენტრის მიგრაციას აქტივობის ციკლების ფაზების მიხედვით. გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ციკლური ბუნების გამოსავლენად, მნიშვნელოვანია ხანგრძლივადიანი სადამკვირვებლო მასალის გამოყენება; სადაც დაკვირვებათა ხანგრძლივობა მზის აქტივობის მინიმუმ ორი ციკლის განმავლობაში არის წარმოებული. ამდენად SDO უფრო მაღალხარისხიანი დაკვირვებითი მასალის ნაცვლად, ხანგრძლივობის გამო, ჩვენ ვამჯობინეთ გამოგვეყენებინა მზის და ჰელიოსფერული ობსერვატორიის/უკიდურესი ულტრაიისფერი გამონასახების მიმღები ტელესკოპით (SOHO/EIT) 195 Å ტალღის სიგრძის ფილტრში მოპოვებული დაკვირვებითი მასალა. მონაცემთა ბაზიდან ჩამოვტვირთეთ 1995-2020 წლების პერიოდის შესაბამისი ყოველდღიური FITS-ფაილების მასივი. მზის გვირგვინის ხვრელებთან დაკავშირებული სამეცნიერო ამოცანების ამოხსნის ძირითადი საკვანძო ნაბიჯი ამ ხვრელების იდენტიფიცირებასა და სეგმენტირებაში მდგომარეობს. ამ პრობლემასთან დაკავშირებით სამეცნიერო ლიტერატურაში სხვადასხვა მეთოდებს ვხვდებით. დაწყებული ყველაზე ტრადიციული, გამოსახულებათა მონაცემების ვიზუალური ინსპექტირებიდან ნახევრადავტომატური ან ავტომატური მეთოდებით დასრულებული. ჩვენი GUI კოდიც (მომხმარებლის გრაფიკული ინტერფეისი) ნახევრადავტომატურია. აქ ვიზუალური ინსპექტირებისა და გლობალური და ადგილობრივი ზღურბლების კომბინაცია გამოიყენება. ეს კოდი ავტომატური დამუშავების ზემოთაღწერილი მეთოდის მოდიფიცირებას წარმოადგენს. მონაცემთა წინასწარი დამუშავება აგრეთვე ზემოთაღნიშნულის მსგავსი მეთოდით განხორციელდა. შერჩეული მონაცემების ყოველი ფაილი დამუშავდა IDL ‘EIT PREP.PRO’ ‘SOLARSOFT’ სტანდარტული პროცედურით. გვირგვინის ხვრელების სეგმენტაციისათვის საჭირო ზღურბლი არ არის უნივერსალური და იცვლება არამხოლოდ სხვადასხვა გამოსახულებისათვის, არამედ ერთი გამოსახულების შიგნითაც. დაკვირვებითი სურათის 0-დან 1-მდე ინტერვალში შავ-თეთრ

გამოსახულებად გადაყვანის შემდეგ, სეგმენტაციის ინტენსივობის ზღურბლის განსაზღვრის ავტომატიზაციისათვის, გამოსახულების ჰისტოგრამის მახასიათებლების გამოყენებაა საჭირო. ამის გასაკეთებლად, ჩვენ გარდავქმენით გამოსახულება ბარტლეტის მოდიფიცირებული (ზემოთაღწერილი) მეთოდის მეშვეობით. თუკი ბარტლეტის მეთოდით ხდება კვადრატული ფესვის ამოღება, ეს მოდიფიცირებული მეთოდი იმგვარად იღებს ხარისხის ფესვს, რომ გამოსახულების საშუალო ინტენსივობა არის 0.5 (იხ. ნახ. 22).



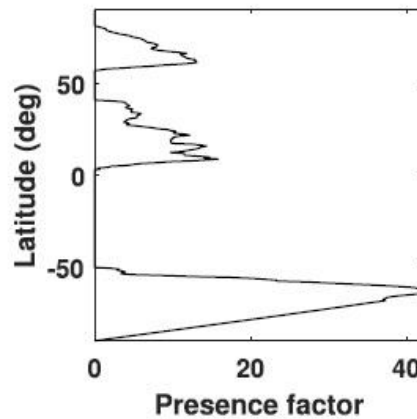
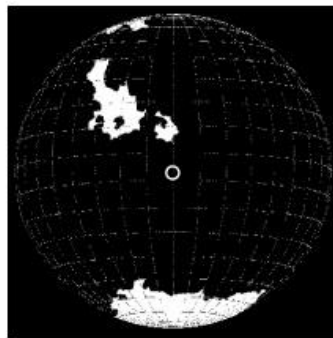
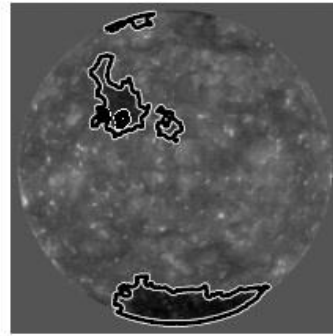
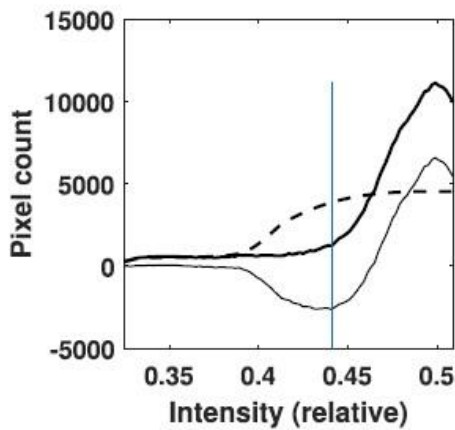
ნახ. 20. ზედა მარცხენა პანელზე წარმოდგენილია ორიგინალი გამოსახულება ხოლო ზედა მარჯვენა პანელზე კი იგივე გამოსახულება ბარტლეტის მოდიფიცირებული მეთოდით დამუშავების შემდეგ. ქვედა პანელები კი ზედა გამოსახულებების (მხოლოდ მზის დისკოს) ჰისტოგრამებია.

იმის გამო, რომ გვირგვინის ხვრელების იდენტიფიკაციასა და სეგმენტაციაში წამყვან როლს ასრულებს ამ უკანასკნელის ინტენსივობის განსხვავება გარემოსგან, ძალიან მნიშვნელოვანია ინტენსივობის ცვლილების არტეფაქტების წინასწარ

მოშორება. ერთ-ერთ ამგვარ, გავრცელებულ არტეფაქტს წარმოადგენს კიდების გაკაშკაშების ეფექტი, რომელიც გამოწვეულია გვირგვინის ტემპერატურის დადებითი სიმაღლის გრადიენტით. იგი გამორიცხავს ერთი ინტენსივობის ზღურბლის გამოყენებას დისკოზე დიდი ზომების მქონე ობიექტის სეგმენტაციისთვის. კიდის გაკაშკაშების თავისებურებები და მისი ეფექტის მოხსნის პროცედურები ზემოთ უკვე განვიხილეთ (Chargeishvili et al., 2019). საუკეთესო შედეგის მისაღწევად, ინტერაქტიული კოდის ინტერფეისს აქვს შესაძლებლობა ხელით დაარეგულიროს მაკორექტირებელი გამონასახი, რადგან კოეფიციენტები  $a(i)$  და  $b(i)$  მიიღება ინტენსივობის პროფილების ცენტრირებული მცოცავი წლიური საშუალოს გამოყენებით და ზოგიერთ შემთხვევაში, შედეგები მნიშვნელოვნად განსხვავდება მოცემული სურათის რეალური პროფილისგან. ასევე არის საშუალება ინტერაქტიურ რეჟიმში შეიცვალოს მაკორექტირებელი გამონასახის იზოფოტების ელიფსურობის თანაფარდობა უკეთესი შედეგის მისაღწევად.

კიდის გაკაშკაშების ეფექტის მოშორების შემდეგ შესასრულებელ მოქმედებას წარმოადგენს დისკოზე გვირგვინის ხვრელების სეგმენტაცია. კორექტირებული გამონასახის ჰისტოგრამაზე მუქი წარმონაქმნებით დასახლებული არის მომეზნისათვის, კოდი აგლუვებს ჰისტოგრამის დაბალი ინტენსივობის ფრთას და შედეგს აკლებს ორიგინალიდან. დარჩენილ მრუდზე, მიიღება ჩავარდნილი არე, რომელიც იოლად შეიძლება მონიშნულ იქნას კოდის მიერ, როგორც ინტენსივობის ზღურბლი, რომელიც საჭიროა გვირგვინის ხვრელის სეგმენტაციისათვის (იხილეთ ნახ. 21-ზე ზედა მარცხენა პანელი და 22-ზე ქვედა მარჯვენა პანელი). შემდეგ კოდი შემოხაზავს სასურველი ობიექტის კონტურს. უმრავლეს შემთხვევაში, შემოხაზული ობიექტი მართლაც გვირგვინის ხვრელია. მაგრამ ზოგიერთ შემთხვევაში ხდება, რომ კოდი ცდება და შემოხაზავს ბოჭკოებს ან ე.წ. ჩაბნელებას (diming - როგორც წესი წარმოიქმნება გვირგვინის აქტიური არიდან ნივთიერების ამოტყორცნის შემდეგ) ანდა პირიქით გვირგვინის ნამდვილი ხვრელის შემოხაზავა გამორჩება. ამ შემთხვევაში, კოდს აქვს ინტერაქტიური რეჟიმი, სადაც შესაძლებელია ცალკეული, საინტერესო რეგიონისათვის ინტენსივობის განსხვავებული ზღურბლის მითითება. და ამრიგად კოდი ავტომატურად ხელახლა ახდენს სასურველი ობიექტის შერჩევას. თუკი ობიექტის სეგმენტაცია შეცდომით მოხდა, შესაძლებელია, დისკოზე

სეგმენტირებული სხვა ობიექტებისაგან დამოუკიდებლად, ამ ცალკეული ობიექტის სეგმენტაციის შეცვლა. იმ შემთხვევებში, როდესაც მკვლევარს არ შეუძლია სავარაუდო ხვრელების სხვაობებისაგან გამორჩევა, მკვლევარი Helioviewer-ში შესაბამის მაგნიტოგრამაზე ამოწმებს საეჭვო ობიექტის ერთპოლარულობას. აგრეთვე, კოდის უკან გადახვევის ფუნქცია შესაძლებელს ხდის ობიექტის გადამოწმებას მზის ბრუნვის



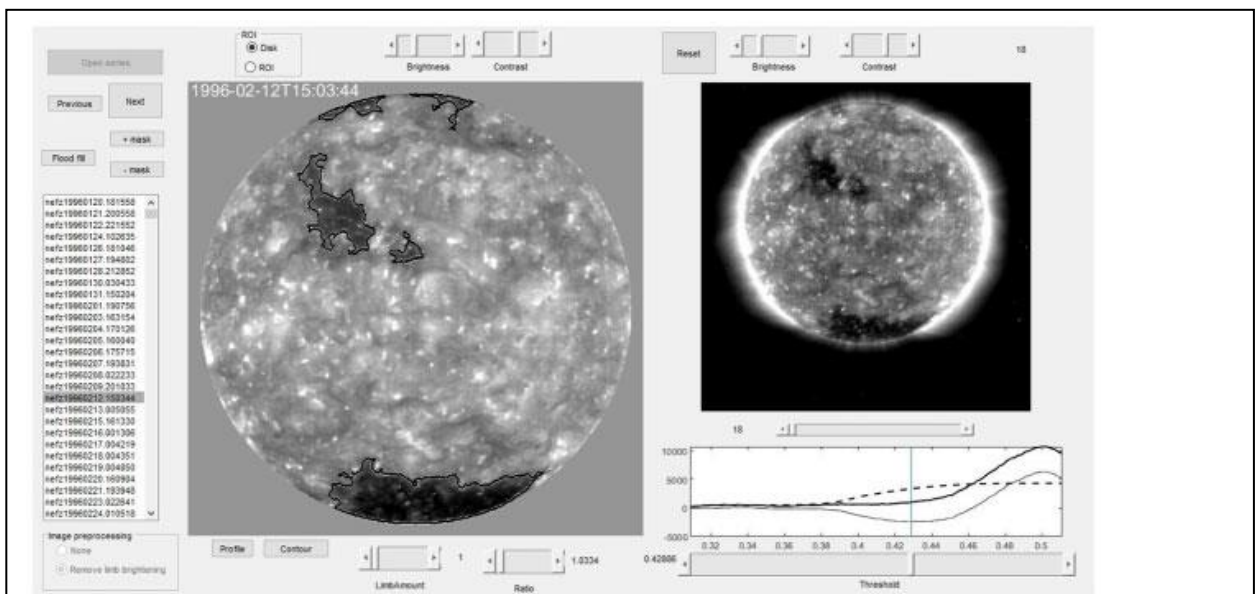
ნახ. 21. ზედა მარცხენა პანელი: გამოსახულების ჰისტოგრამის ინტენსივობის ქვედა ფრთა (მსხვილი უწყვეტი წირი), გაგლუვებული ჰისტოგრამა (პუნქტირი წირი), მათი გამოკლების შედეგი (უწყვეტი წირი) და ზღურბლი (ვერტიკალური წირი). ზედა მარჯვენა პანელი: მზის გვირგვინის სეგმენტირებული ხვრელები მზის დისკოზე. ქვედა მარცხენა პანელი: მზის დისკოს ორობითი (შავ-თეთრი) გამოსახულება, რომელზეც დატანილია ჰელიოსფერული კოორდინატების ქსელი. ქვედა მარჯვენა პანელი: გვირგვინის ხვრელების არსებობის ფაქტორის განაწილება მოცემულ თარიღზე.

დინამიკაში; რითაც გამოირიცხება ნივთიერების ამოტყორცნასა და ხანმოკლე ხვრელებთან დაკავშირებული აღრევა.

დამაჯერებლად ჩამოყალიბებული სეგმენტირებული ორობითი გამოსახულებიდან აუცილებელია ოპტიმალური მახასიათებელი მნიშვნელობის

შერჩევა, რომლის განედური განაწილება საუკეთესოდ ასახავს რეალურ ფიზიკურ სურათს. ჩვენს შემთხვევაში, მოცემულ განედსა და დროის მოცემულ მომენტში გვირგვინის ხვრელების აქტივობის გასაზომად ხვრელების რაოდენობის ნაცვლად, ვხელმძღვანელობთ ზემოთ წარმოდგენილი დასწრების ფაქტორით. დასწრების ფაქტორი აფასებს მოცემული პარალელის გასწვრივ ობიექტის სიგრძეს გამოსახულს ეკვატორის ნახევრის პროცენტის სახით. ამრიგად, დასწრების ფაქტორი სწორად მიუთითებს ხვრელებით დაკავებულ განედებს, მაშინ როდესაც სხვა მეთოდები არ იძლევიან ასე ზუსტ მონაცემებს.

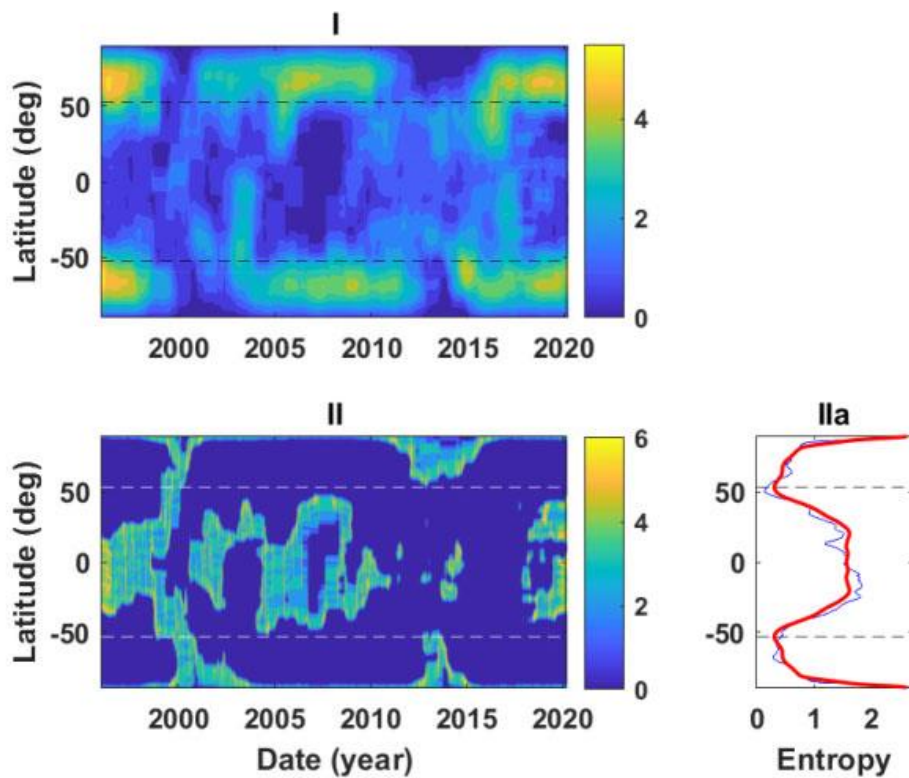
კოდი FITS-ფაილის სათაურიდან იღებს დაკვირვების თარიღს, მზის დისკოს ცენტრის პიქსელურ კოორდინატებს, Solar-B-ს, მზის დისკოს პიქსელურ რადიუსს და ოპერირებს ჰელიოგრაფიულ კოორდინატებში. კოდი ნახევარგრადუსიანი ზოლებით ასკანერებს მზის დისკოს სეგმენტირებულ, ორობით გამოსახულებას განედის  $\pm 90$  გრადუსის შუალედსა და გრძედის  $\pm 80$  გრადუსის შუალედში და იღებს მონაცემებს დისკოს  $361 \times 321$  წერტილიდან. საბოლოოდ მონაცემთა სერიის ყოველი გამოსახულების დასწრების ფაქტორის პროფილები თავმოყრილია განედური



ნახ. 22. მზის გვირგვინის ხვრელების სეგმენტაციისათვის განკუთვნილი ინტერაქტიული კოდის მომხმარებლის გრაფიკული ინტერფეისი და არსებობის ფაქტორის განედური პროფილის შედეგი.

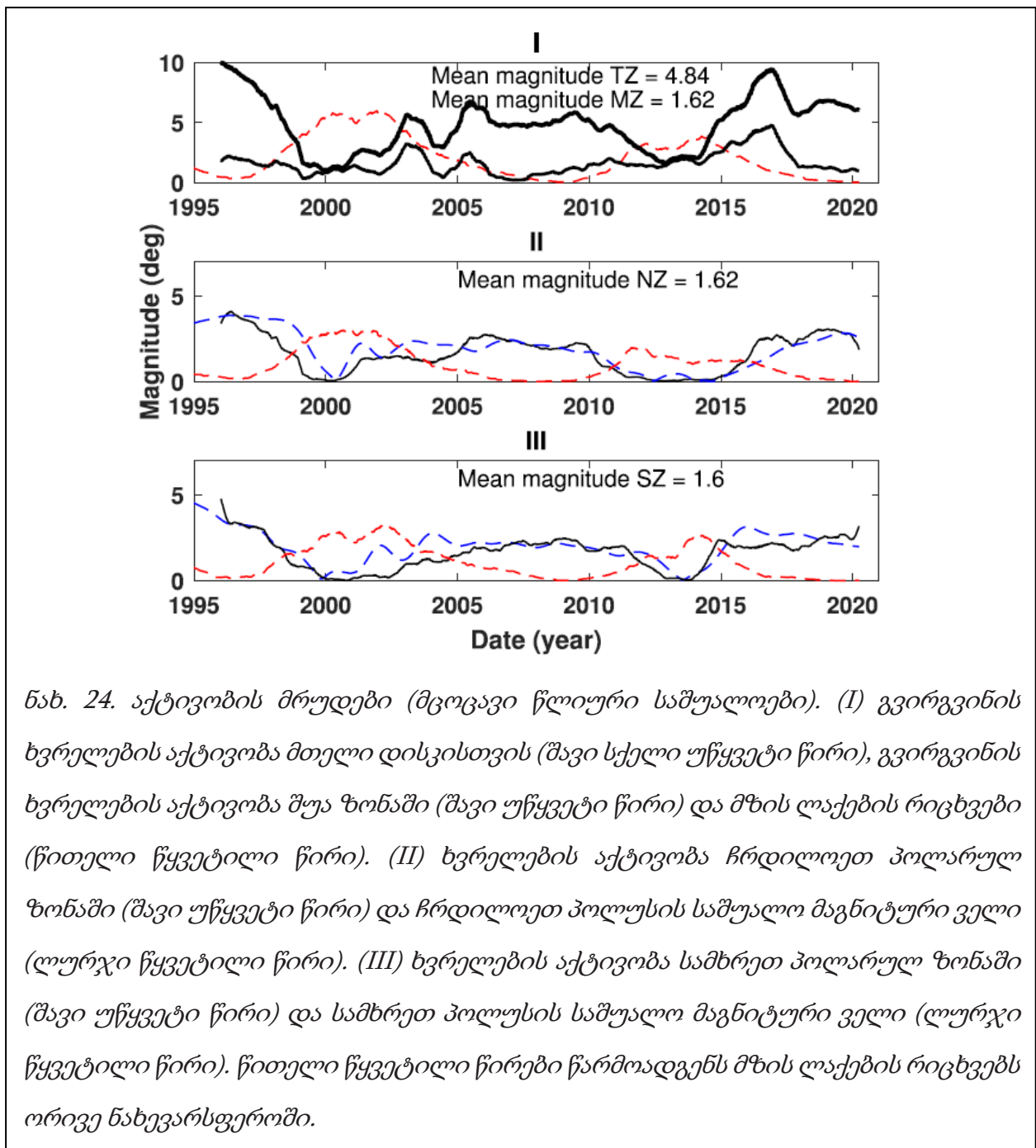


მონაცემების მატრიცაში. ნახ. 23.I-ზე გამოსახულია ამ მატრიცით აგებული გვირგვინის ხვრელების დასწრების ფაქტორების დროითი ევოლუცია. თვალნათელია აღნიშნული დამოკიდებულების განსხვავებულობა პოლარულ და ზომიერ სარტყლებში. არსებობის ფაქტორის ადგილობრივი ენტროპიის განაწილებით (ნახ. 23. II და IIa), ჩვენ მზე დავყავით აქტივობის სამ ზონად. ზონათა გამყოფი ხაზები გადიან განედის  $\pm 53^\circ$  (ენტროპიის მინიმუმები). ნახ. 24 წარმოგვიჩენს გვირგვინის ხვრელების აქტივობას ზომიერ და პოლარულ სარტყლებში.

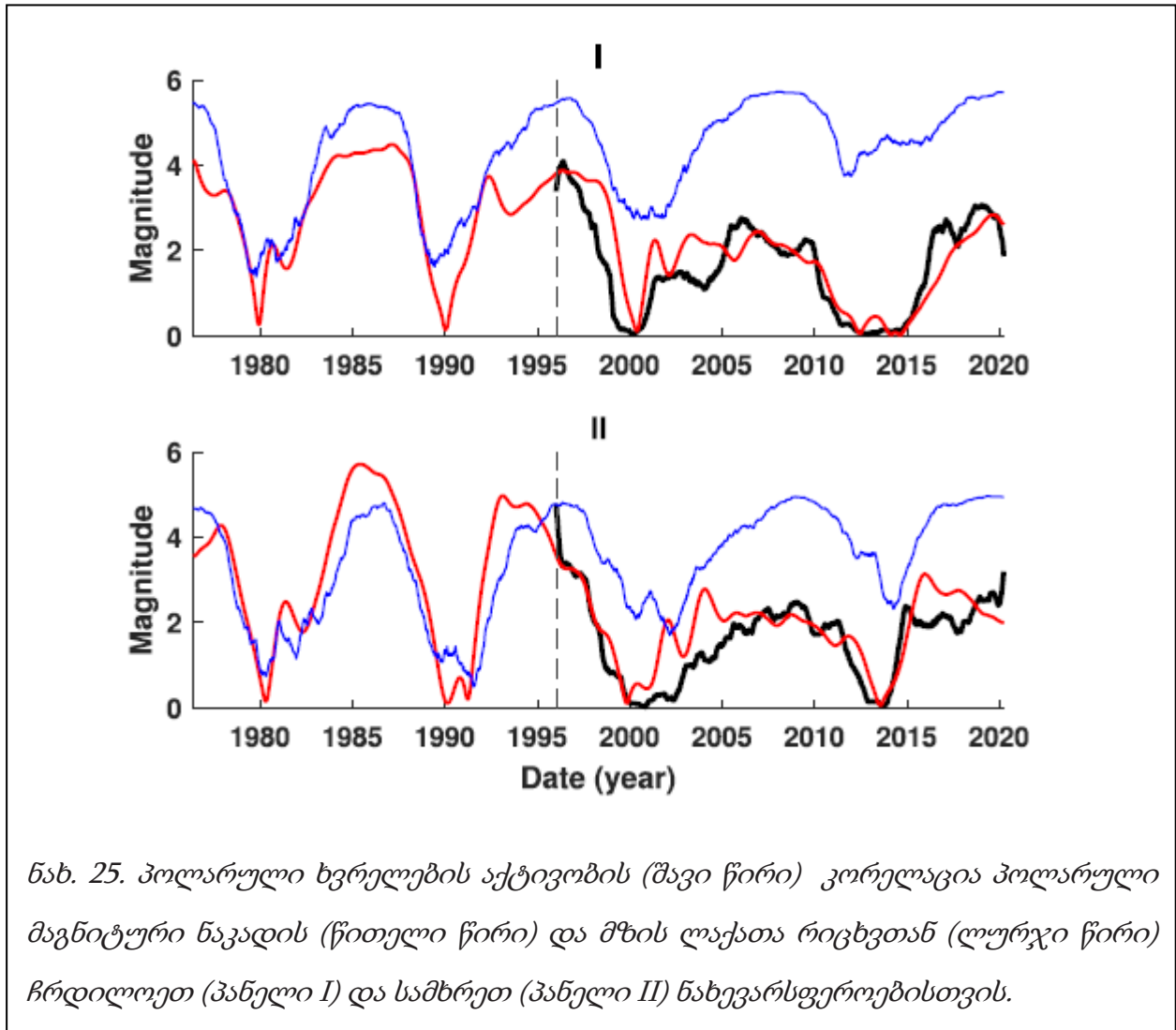


ნახ. 23. (I) გვირგვინის ხვრელების დასწრების ფაქტორის განედურ დროითი განაწილება (მცოცავი წლიური საშუალო). უკეთესი ვიზუალიზაციისთვის გამოიყენება დასწრების ფაქტორის მნიშვნელობების კვადრატული ფესვი. (II) ზედა გამოსახულების ლოკალური ენტროპია. (IIa) მრუდი: ადგილობრივი ენტროპიის საშუალო მნიშვნელობის შედეგი მთელი პერიოდის განმავლობაში (ლურჯი ვიწრო უწყვეტი წირი) და მისი სიმეტრიის შედეგი (წითელი სქელი წირი). სადემარკაციო ხაზები ნაჩვენებია კორიზონტალური წყვეტილი ხაზების სახით ყველა პანელში.

გვირგვინის ხვრელების განედური განაწილების ცვლილებების მაგნიტური ველის აქტივობასა და მზის ლაქების რაოდენობასთან შედარებისათვის ჩვენ ვიყენებდით საშუალო პოლარული მაგნიტური ველების მონაცემებს ვილკოქსის მზის ობსერვატორიიდან (Wilcox Solar Observatory, WSO), ხოლო მზის ლაქების რაოდენობის შესახებ მონაცემებს ერთის მხრივ მსოფლიო მონაცემთა ცენტრიდან (SILSO-World Data Center 1996–2020) და მეორეს მხრივ, მზის ლაქების ნახევარსფერული რაოდენობის კატალოგიდან (Temmer et al. 2006).



ნახ. 25-ზე წარმოდგენილია პოლარული ხვრელების აქტივობის (შავი წირი) კორელაცია პოლარული მაგნიტური ნაკადის (წითელი წირი) და მზის ლაქათა რიცხვთან (ლურჯი წირი) ჩრდილოეთ (პანელი I) და სამხრეთ (პანელი II) ნახევარსფეროებისთვის.

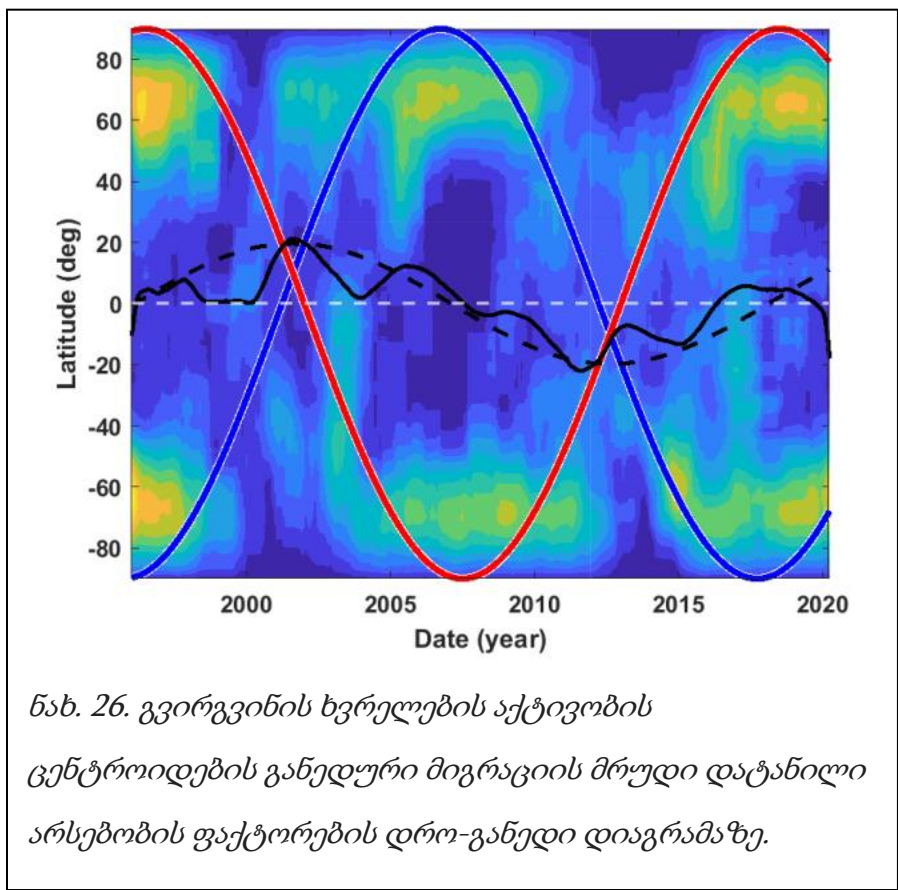


უფრო მოსახერხებლად მივიჩნიეთ პოლარული ხვრელების და პოლარული მაგნიტური ველების მონაცემების შედარება მზის ლაქების მონაცემებთან, რომლებიც გადატრიალებულია თავივე (ლურჯი წირები).

პოლარული გვირგვინის ხვრელებისა და პოლარული მაგნიტური ველების ასეთი მჭიდრო კორელაცია მიუთითებს მათი მამოძრავებელი მექანიზმის საერთოობაზე. არის ასევე გარკვეული გამოძახილი საშუალო სარტყელში მზის

ლაქების აქტივობასა და საშუალო გვირგვინის ხვრელების აქტივობას შორის გარკვეული დაგვიანებული ექოს სახით.

რაც შეეხება გვირგვინის ხვრელების აქტივობის ცენტრის მიგრაციას, მისი ამსახველი სურათი მოცემულია ნახ. 26-ზე. ნახ. 26 აჩვენებს, რომ 23-ე ციკლში ზოგი გამონაკლისის გარდა აქტივობის ცენტრი არის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში და მზის ლაქების მინიმუმის ფაზაში გადაინაცვლებს სამხრეთ ნახევარსფეროში და რჩება იქ 24-ე ციკლის განმავლობაში. გვირგვინის ხვრელების განედურ-დროითი განაწილების მორფოლოგიასა და ხვრელების აქტივობის ცენტრის მიგრაციას შორის კავშირი არ არის ცალსახა.



Huang, Lin & Lee ( 2017 ) შეისწავლეს ღია მაგნიტური ნაკადების განედურ-დროითი მიგრაცია და მათი დიაგრამა ძლიერ მსგავსია ჩვენს მიერ მიღებული გვირგვინის ხვრელების დიაგრამისა. მათ ნახეს, რომ მზის ლაქათა მატების ფაზაში საპირისპირო პოლარობის ღია მაგნიტური ნაკადები ახდენენ საპირისპირო მიმართულებით პოლუსიდან პოლუსისკენ ტრანსეკვატორულ მიგრაციას. ვიცით რა,

რომ ღია მაგნიტური ნაკადების რეგიონები წარმოადგენენ გვირგვინის ხვრელების მასპინძელ არეებს შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ჩვენს მიერ მიღებული მიგრაციული მრუდი რეალურად წარმოადგენს სხვადასხვა პოლარობის გვირგვინის ხვრელების განედურ-დროით ზედაპირზე დამოუკიდებელი მიგრაციული ბილიკების სუპერპოზიციას. და მართლაც 22 წლიანი პერიოდისა და 1.07 π ფაზური სხვაობის სინუსოიდური მრუდების შერჩევა იძლევა სრულყოფილ თანხვედრას დაკვირვებით მრუდთან.

ამრიგად, სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში კოსმოსური ხომალდებიდან SDO/AIA და SOHO/EIT მიღებულ მასალაზე დაყრდნობით ჩატარებული კვლევის შედეგად ჩვენს მიერ მიღებული ძირითადი შედეგებია:

მზის გვირგვინის დაბალგანედური და პორალური ხვრელების განედურ განაწილებაში, მიუხედავად მათი მამოძრავებელი მექანიზმების მსგავსებისა, დაიკვირვება მნიშვნელოვანი განსხვავება. მზის გვირგვინის ხვრელის აქტივობის ცენტრის მიგრაცია ორი, საწინააღმდეგო მიგრაციული ტრაექტორიის კომბინაციაა. ისინი თანაიკვეთებიან ეკვატორზე და მიემართებიან საწინააღმდეგო პოლუსებისაკენ სადაც ისინი ქმნიან მზის გვირგვინის ეგრეთწოდებულ პოლარულ ხვრელებს. შემდეგ კვლავ მოძრაობენ დაბალი განედებისაკენ და ეს პროცესი ციკლურად მიმდინარეობს.

სტატისტიკური ანალიზის ჩატარების შედეგად მიღებულია მზის გვირგვინის ხვრელების ბრუნვის დიფერენციალური ხასიათი;

მზის აქტივობის ცენტრები მზის ორივე ნახევარსფეროში მიგრირებენ მაღალი განედებიდან ეკვატორისაკენ. ამავდროულად, აქტივობის საერთო ცენტრი არაერთხელ იცვლის მიგრაციის მიმართულებას;

მზის დისკოზე ინტენსივობის ცენტრიდან კიდისაკენ განაწილება არ არის პოლარულ-სიმეტრიული. ის არის პოლუსებისკენ წაგრძელებული ელიფსის ფორმის. კიდის გაკაშკაშების ფორმა მზის აქტივობის ციკლთან არის დაკავშირებული;

დაკვირვებითი მონაცემების ფილტრაციის ყველაზე მისაღებ მიდგომას წარმოადგენს მონაცემთა ადგილობრივი მედიანების გამოზვნა და ფილტრაცია მუდმივი ზღურბლის მეშვეობით;

ჩვენს მიერ მიღებული შედეგები მნიშვნელოვანია მზის აქტივობის მაგნიტური დინამოს მექანიზმის დეტალების ახსნისათვის. მომავალში განზრახული გვაქვს მოვახდინოთ მზის გვირგვინის უკვე იდენტიფიცირებული ხვრელების პოლარობის განსაზღვრა და შესაბამისად, მიგრაციული ტრაექტორიების პოლარობის გამორკვევა. რითაც უფრო დავაზუსტებთ გვირგვინის ხვრელების ევოლუციური მოძრაობის შესახებ სამცნიერო ხედვას.

## 6. Summary

We started the study of the dynamics of large-scale magnetic features of the solar corona from the study of the solar coronal hole rotation. After that, the variation of coronal holes latitudinal distribution gained our attention. And we faced the need of correction of limb brightening of EUV coronal images. From there on, our study went to two directions. Firstly, we studied the latitudinal distribution of solar coronal active regions. Next, we studied the long-term variation of coronal holes latitudinal distribution.

In the article from 2018, we studied the solar coronal hole rotation. Rotation of coronal holes we studied using data from SDO/AIA for 2014 and 2015. A new approach to the treatment of data is applied. Instead of calculated average angular velocities of each coronal hole centroid and then grouping them in latitudinal bins for calculating average rotation rates of corresponding latitudes, we compiled instant rotation rates of centroids and their corresponding heliographic coordinates in one matrix for further processing. Even unfiltered data showed clear differential nature of rotation of coronal holes. We studied possible reasons for distortion of data by the limb effects to eliminate some discrepancies at high latitudes caused by the high order of scattering of data in that region. A study of the longitudinal distribution of angular velocities revealed the optimal longitudinal interval for the best result. We examined different methods of data filtering and realized that filtration using targeting on the local medians of data with a constant threshold is a more acceptable approach that is not biased towards a predefined notion of an expected result. The results showed a differential pattern of rotation of coronal holes.

In 2019, we published an article on Variation of coronal holes latitudinal distribution: Correction of limb brightening of EUV coronal images. There We studied the limb brightening of SOHO EIT daily images of the solar corona taken in 195Å wavelength line from 1996 to 2018. Using special software, we studied the distribution of the background intensity of the entire disk in the direction of rotation (horizontally) and perpendicular to the direction of rotation (vertical). The study shows that the intensity distribution from the center to the limb of the solar disk is not polar-symmetric. A data-derived study showed that the coronal limb

brightening has rather elliptical than circular isophotes. The pattern of the limb brightening correlates with the cycle of solar activity. The moving average patterns with the window of the year give good results for removing the limb brightening when preparing coronal images for further study.

An article where we studied the cyclic evolution of the latitudinal distribution of solar coronal active regions based on daily images from SOHO EIT for the period 1995–2017 was published in the end of 2019. Here, fully automated software was used, which included the following steps: initial preparation of images in the data series, normalization of histograms and correction of limb brightening, segmentation of images using threshold intensity values obtained from their histograms, scanning of segmented images in heliographic coordinates and obtaining profiles of latitudinal distribution of coronal active regions for each image of the data series. From the output data, we obtained a temporary change in the latitudinal distribution profiles and the migration of activity centers on the solar disk. From the period of minimum activity to the next minimum in both hemispheres, activity centers begin to migrate from high latitudes towards the equator. At the same time, the general center of activity repeatedly changes the direction of migration. The latitudinal distribution of the so-called presence factor of coronal active regions closely resembles the magnetic butterfly diagram, which proves their direct causal relationships. Variations in the presence factor of coronal active regions are correlated with cyclic variations in the sunspot daily numbers.

The final work - Long-term variation of coronal holes latitudinal distribution – was published in 2022. Here we studied the evolution of the latitudinal distribution of coronal holes using the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)/Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) 195 Å data from 1996 May to 2020 April. To measure the presence of coronal holes at a given latitude, we use the presence factor, which estimates the length of an object along a given parallel, expressed as a percentage of half of the equator length. By semi-automatic processing of the data series, we obtained the 361 × 7346 latitude–time matrix. The corresponding diagram shows the significant difference in evolutionary shapes of a latitudinal distribution of non-polar and polar coronal holes. However, the morphology of the evolutionary picture and the migration route of the geometric centre of activity of the coronal hole in the diagram indicate that non-polar and polar coronal holes have the same driving mechanism. It is believed that



the migration of the centre of activity of the coronal hole in the latitude–time diagram is a combination of two opposite migration paths. They intersect at the equator and diverge to opposite poles, where they form the so-called polar coronal holes, then again move to lower latitudes, and this happens cyclically. Determining the opposite migration paths by antiphase sinusoids, their deviation from antiphase determines the detected north–south asymmetry in the activity of the coronal hole.

## 7. ბიბლიოგრაფია

1. Andretta, V., Del Zanna, G., Jordan, S.D., 2003. The EUV helium spectrum in the quiet Sun: A by-product of coronal emission? *A&A* 400, 737.
2. Bartlett, M.S., 2016. The Square Root Transformation in Analysis of Variance. *J. Royal Statistical Soc.* 3 (1), 68.
3. Bumba, V., Garcia, A., Klván, M., 2000. Longitudinal distribution of solar magnetic fields and activity during the ending and starting periods of activity cycles. *Sol. Phys.* 196 (2), 403–419.
4. Caplan, R.M., Downs, C., Linker, J.A., 2016. Synchronic coronal hole mapping using multi-instrument EUV images: Data preparation and detection method. *Astrophys. J.* 823: 53, 23 pp.
5. Chargeishvili B. B., Maghradze D. A., Japaridze D. R., Oghrapishvili N. B., Mdzinarishvili T. G., Chargeishvili K. B., Shergelashvili B. M., 2019, *Adv. Space Res.* , 64, 491
6. Cranmer, S.R., 2009. Coronal holes. *Living Rev. Sol. Phys.* 6 (1), article id. 3, 66 pp.
7. David, C., Gabriel, A.H., Bely-Dubau, F., Fludra, A., Lemaire, P., Wilhelm, K., 1998. Measurement of the electron temperature gradient in a solar coronal hole. *A & A* 336, L90–L94.
8. Delouille, V., Hofmeister, S., Reiss, M., Mampaey, B., Temmer, M., Veronig, A., 2018. Coronal Hole detection using supervised classification. *Machine Learning Techniques for Space Weather*, p. 365.
9. Garton, T.M., Gallagher, P.T., Murray, S.A., 2018. Automated coronal hole identification via multi-thermal intensity segmentation. *J. Space Weather Space Clim.* 12, pp.
10. Henney, C.J., Harvey, J.W., 2005. Automated Coronal Hole Detection using He 1083 nm Spectroheliograms and Photospheric Magnetograms. *Large-scale Structures and their Role in Solar Activity ASP Conference Series*, New Mexico, USA, p. 261.
11. Huang G. H., Lin C. H., Lee L. C., 2017, *Sci. Rep.* , 7, 9488

12. Kallunki, J., 2018. Preliminary Studies of Solar Limb Brightening At 8mm. *Phys. Astron. Int. J.* 2 (1), 3 pp.
13. Kirk, M.S., Pesnell, W.D., Young, C.A., Hess Webber, S.A., 2009. Automated detection of EUV polar coronal holes during solar cycle 23. *Solar Phys.* 257 (1), 99.
14. Krista, L.D., Gallagher, P.T., 2009. Automated coronal hole detection using local intensity thresholding techniques. *Solar Phys.* 256 (1), 87.
15. Lam M. M., Tinsley B. A., 2016, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* , 149, 277
16. Madjarska, Maria S., 2019. Coronal bright points. *Living Rev. Sol. Phys.* 16 (1), article id. 2, 79.
17. Makarova L. N., Shirochkov A. V., 2004, *Adv. Space Res.* , 34, 432
18. Mango, S.A., Bohlin, J.D., Glackin, D.L., Linsky, J.L., 1978. The solar XUV He I and He II emission lines. I - Intensities and gross center-to-limb behavior. *Astrophys. J.* 1 (220), 683.
19. Maunder E. W., 1904, *MNRAS* , 64, 747
20. Morgan, H., Jeska, L., Leonard, D., 2013. The expansion of active regions into the extended solar corona. *Astrophys. J. Suppl.* 206 (2), article id. 19, 10.
21. Morgan, H., Taroyan, Y., 2017. Global conditions in the solar corona from 2010 to 2017. *Sci. Adv.* 3 (7), e1602056.
22. Pesnell, W.D., Hess W., Shea A., Karna, N., Kirk, M.S., 2010, Automated Detection of Polar Coronal Holes in EUV, Solar Heliospheric and INterplanetary Environment (SHINE 2010). In: Proc. conference held 26-30 July, 2010 at the La Fonda historic hotel in Santa Fe, New Mexico.
23. Sakurai, T., 2017. Heating mechanisms of the solar corona. *Proc. Jpn. Acad. Ser. B: Phys. Biol. Sci.* 93 (2), 87–97.
24. Temmer M., Rybak J., Bendík P., Veronig A., Vogler F., Otruba W., Potzi W., Hanslmeier A., 2006, *A&A* , 447, 735
25. VanderPlas, J.T., 2018. Understanding the Lomb-Scargle periodogram. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 236 (1), article id. 16, 28 pp."

26. Verbeeck, C., Delouille, V., Mampaey, B., De Visscher, R., 2014. The SPoCA-suite: Software for extraction, characterization, and tracking of active regions and coronal holes on EUV images. *Astron. Astroph. A29*, 561.