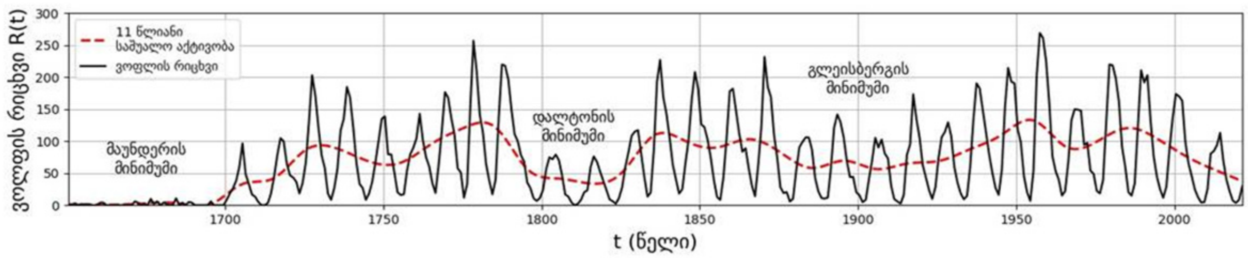
მზის აქტივობის ანალიზი სპექტრალური და რეკურენტული მეთოდებით

ბურდილაძე ლ., კობაიძე დ.

ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი

ანოტაცია. სტატიაში გამოკვლეულია მზის აქტივობის ერთ-ერთი ინდექსი - ვოლფის რიცხვი მონაცემთა დამუშავების შემდეგი მეთოდებით: ფურიე ანალიზი, ვეივლეტ ანალიზი, ჰილბერტ-ჰუანგის ანალიზი და რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზი (RQA). სპექტრალური ანალიზის მეთოდებით ნაპოვნია მზის აქტივობის ცნობილი საშუალოდ 11 წლიანი და უფრო დიდი პერიოდებიც. ფურიე და ვეივლეტ ანალიზის მეთოდებისგან განსხვავებით, ჰილბერტ-ჰუანგის ანალიზმა რაოდენობრივად მეტი და მოკლე პერიოდებიც აღმოაჩინა. რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზით გამოკვლეულია მზის აქტივობის დინამიკა რამდენიმე RQA ზომის დახმარებით. მზის აქტივობაში დაიკვირვება ფაზური გადასვლები, რომლებიც ემთხვევა მზის აქტივობის მინიმუმებს. 21-ე საუკუნის მონაცემების ანალიზით დაფიქსირდა ახალი მინიმუმის მოახლოება. ვოლფის რიცხვი აღებულია SILSO-ს მონაცემთა ბაზიდან.
საკვანძო სიტყვები: მზის აქტივობა, ვოლფის რიცხვი, სპექტრალური ანალიზი, რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზი (RQA).

შესავალი: გამომდინარე იქიდან, რომ მზეზე მიმდინარე პროცესები, როგორიცაა მზის მაგნიტური ველის ვარიაცია, მზის ქარი და ა.შ. მოქმედებს დედამიწის კლიმატზე, ტემპერატურასა და გეომაგნიტური ველის დინამიკაზე, მზის აქტივობის გამოკვლევა დღესდღეობით აქტუალური საკითხია. მზიდან ამოტყორცნილი ცხელი პლაზმა (მზის ქარი) მაღალი სიჩქარით მოემართება დედამიწისკენ, ურთიერთქმედებს დედამიწის მაგნიტურ ველთან და იწვევს მასში ფლუქტუაციებს [3]. ამ ყველაფრის მიზეზია მზის აქტივობა, რომლის შესაფასებლადაც არსებობს მზის აქტივობის ინდექსები, ერთ-ერთი ასეთია ვოლფის რიცხვი, რომელიც გამოითვლება მზის ხილულ ზედაპირზე N ლაქებისა და G ლაქების ჯგუფების რაოდენობით შემდეგი ფორმულის საშუალებით $R = k(10G + N)$, სადაც R არის ვოლფის რიცხვი, ხოლო k - ნორმირების მუდმივა, რომელიც დამოკიდებულია დამკვირვებელ აპარატურაზე. ვოლფის რიცხვის ანალიზით დგინდება, რომ მზის აქტივობაში არსებობს 11 წლიანი პერიოდულობა. გარდა ამისა, დროის გარკვეულ შუალედებში მზე დაბალი აქტივობით ხასიათდებოდა, რის გამოც ამ შუალედებს მზის აქტივობის მინიმუმები ეწოდება (მაუნდერის მინიმუმი, დალტონის მინიმუმი, გლეისბერის მინიმუმი). მაუნდერის მინიმუმს (1645წ-1715წ) სხვანაირად „მცირე გამყინვარების ეპოქას'' უწოდებენ იმის გამო, რომ ამ დროს ევროპასა და ჩრდილოეთ ამერიკაში ფიქსირდებოდა საშუალოზე დაბალი ტემპერატურა. სურ.1-ზე ნაჩვენებია ვოლფის რიცხვის ყოველწლიური საშუალო მნიშვნელობის დამოკიდებულება დროზე. მზის აქტივობის შესასწავლად მონაცემთა დამუშავებისთვის გამოვიყენეთ სპექტრალური და რეკურენტული ანალიზის მეთოდები.



სურ.1: ვოლფის რიცხვის ყოველწლიური საშუალო მნიშვნელობები [7].

ჩვენი მიზანი იყო გამოგვევლინა მზის აქტივობის მახასიათებელი ცნობილი 11 წლიანი პერიოდის გარდა სხვა პერიოდებიც. გარდა ამისა, RQA გამოვიყენეთ მზის აქტივობის შემდეგი მინიმუმის მოახლოების პროგნოზისთვის.

მონაცემთა ანალიზის მეთოდები: სპექტრალური ანალიზის მეთოდების კლასიდან ჩვენ გამოვიყენეთ: ფურიე ანალიზი, ვეივლეტ ანალიზი, რომელიც არასტაციონარული სიგნალების დასამუშავებლად გამოიყენება [2] და ჰილბერტ-ჰუანგის ანალიზი, რომელიც არაწრფივი და არასტაციონარული სიგნალების ანალიზისთვის ხელსაყრელი მეთოდია [4]. ჰილბერტ-ჰუანგის მეთოდი მოიცავს სამ საფეხურს: სიგნალის ემპირიულ მოდებად დაშლა, ანალიზური სიგნალის მიღება და ჰილბერტის სპექტრის აგება. ემპირიული მოდების დადგენა ხდება EMD (Empirical Mode Decomposition) ალგორითმით და ისინი აღწერენ მარტივ არაწრფივ და არასტაციონარულ რხევებს. ანალიზური სიგნალი წარმოადგენს დროზე დამოკიდებულ კომპლექსურ $z(t)$ ფუნქციას, რომელიც მიიღება $x(t)$ სიგნალის ჰილბერტის გარდაქმნით

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi}\mathrm{P.V.}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x(\tau)}{t-\tau}d\tau = y(t) \tag{1}$$

$$z(t) = x(t) + iy(t) = \rho(t)e^{i\theta(t)} \tag{2}$$

სადაც $\rho(t)$-ს ეწოდება მყისი ამპლიტუდა, $I?(t)$-ს მყისი ფაზა, ხოლო მყისი სიხშირე განიმარტება, როგორც $\omega(t) = d\theta/dt$. რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზი გამოიყენება არაწრფივი სიგნალების დასამუშავებლად და არ საჭიროებს სიგნალში ანათვლების დიდ რაოდენობას. ანალიზის ჩასატარებლად x_i მიმდევრობით, ფაზური სივრცის m განზომილებითა და τ დაყოვნების პარამეტრით იქმნება m განზომილებიანი ვექტორი $\vec{y}_i$, რომლითაც იგება რეკურენტული დიაგრამა - კვადრატული მატრიცა R_{ij}, რომლის ელემენტები მოიცემა შემდეგნაირად:

$$\vec{y}_i = \left(x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+[m-1]\tau}\right), \quad \mathrm{R}_{ij} = \Theta\left(\varepsilon - \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\|\right) \tag{3}$$

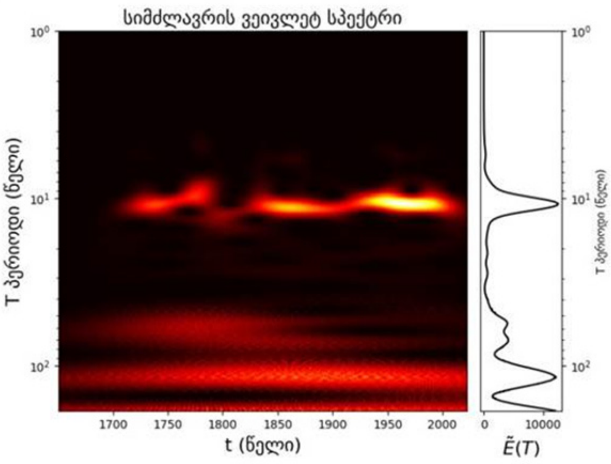
სადაც I? ჰევისაიდის ფუნქციაა, $\varepsilon > 0$ ზღურბლური მანძილია $\vec{y}_i$ და $\vec{y}_j$ წერტილებს შორის [1]. R_{ij} იძლევა ინფორმაციას მონაცემებში მნიშვნელობების განმეორებადობის შესახებ. მონაცემების რაოდენობრივი ანალიზისთვის შემოღებულია ე.წ. RQA ზომები, რომლებიც სიგნალის სხვადასხვა მახასიათებელს გვიჩვენებს; ისინი გამოითვლება R_{ij} მატრიცის დახმარებით. ჩვენ გამოვიყენეთ შემდეგი RQA ზომები: RR (განმეორებადობის მაჩვენებელი), რომელიც გვიჩვენებს რეკურენტულ დიაგრამაზე რეკურენტული წერტილების საშუალო სიმკვრივეს; DET (დეტერმინიზმი), რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენად დეტერმინისტულია სიგნალი; L (წინასწარმეტყველების დრო), რომელიც არის რეკურენტულ დიაგრამაზე დიაგონალების საშუალო სიგრძე და ENTR (შენონის ენტროპია), რომელიც აფასებს სისტემის დეტერმინისტულ და სტოქასტურ ხასიათს რეკურენტულ დიაგრამაზე დიაგონალური ხაზების მიხედვით.

$$\mathrm{RR} = \frac{1}{N^2}\sum_{i,j=1}^{N} \mathrm{R}_{ij}\,, \qquad \mathrm{DET} = \frac{1}{N^2\mathrm{RR}}\sum_{\ell=\ell_{min}}^{N_D} \ell P(\ell) \tag{5.ა}$$

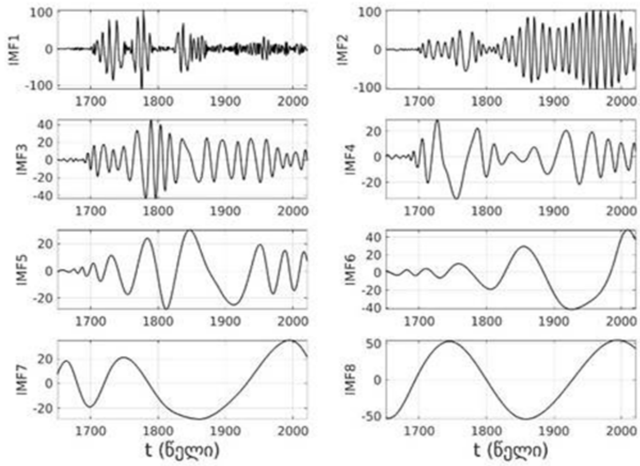
$$\mathrm{L} = \frac{\sum_{\ell=\ell_{min}}^{N_D} \ell P(\ell)}{\sum_{\ell=\ell_{min}}^{N_D} P(\ell)}, \qquad \mathrm{ENTR} = -\sum_{\ell=\ell_{min}}^{N_D} p(\ell)\ln p(\ell) \tag{5.ბ}$$

სადაც N - სიგნალში ანათვლების რაოდენობაა, N_D - რეკურენტულ დიაგრამაზე დიაგონალების რაოდენობა, $P(\ell)$ არის ℓ სიგრძის დიაგონალების რაოდენობის ფუნქცია, ხოლო $p(\ell)$ წარმოადგენს ℓ სიგრძის დიაგონალის არსებობის ალბათობას რეკურენტულ დიაგრამაზე.

შედეგები: ფურიე ანალიზის მეთოდმა გამოავლინა ცნობილი 11 წლიანი პერიოდი და მასთან ახლოს მყოფი სხვა პერიოდებიც, რაც ნიშნავს იმას, რომ იგი განიცდის დროში ვარიაციას; თუ როგორია ვარიაცია, ამას გვიჩვენებს ვოლფის რიცხვის სიმძლავრის ვეივლეტ სპექტრი (სურ.2). როგორც ჩანს, მაუნდერის მინიმუმის დროს 11 წლიანი პერიოდი არ დაიკვირვება [5], დალტონის მინიმუმის დასაწყისში ეს პერიოდი განიცდის ცვლილებას და მსგავსი ყოფაქცევა დაიკვირვება გლეისბერგის მინიმუმშიც. მიღებული ემპირიული მოდების სპექტრალურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ გარდა ცნობილი 11 წლიანი პერიოდისა ვოლფის რიცხვში იკვეთება 5.5, 8.5, 53.1, 124, 186.01 და 372.02 წლიანი პერიოდულობა. სურ.3-ზე მოცემულია სიგნალის შესაბამისი ემპირიული მოდები, საიდანაც ჩანს, რომ მათი რხევის პერიოდები არ არის დროში მუდმივი, განსაკუთრებულად შესამჩნევი ცვლილება კი დაიმზირება მინიმუმების დროს. სურ.4 (ა)-დან ჩანს, რომ მინიმუმების შესაბამის დროის შუალედებში იკვეთება მოწესრიგებული (დიაგონალური) სტრუქტურები [6]; ამასთან, სურ.4 (ბ)-ზე შეგვიძლია დავაკვირდეთ, რომ RQA ზომების მნიშვნელობები იზრდება მზის აქტივობის მინიმუმების მოახლოებასთან ერთად. განსაკუთრებით აღსანიშნავია 2000-იანი წლების პერიოდი, საიდანაც ჩანს, რომ RQA ზომები ზრდას იწყებენ, რაც გვაძლევს იმის პროგნოზის საშუალებას, რომ გვიახლოვდება ახალი აქტივობის მინიმუმი, რომელიც არ უნდა იყოს მაუნდერის მინიმუმის მსგავსი, რადგან RQA ზომების ცვლილება არ არის ისეთი მკვეთრი, როგორც ეს მაუნდერის მინიმუმის შემთხვევაშია.

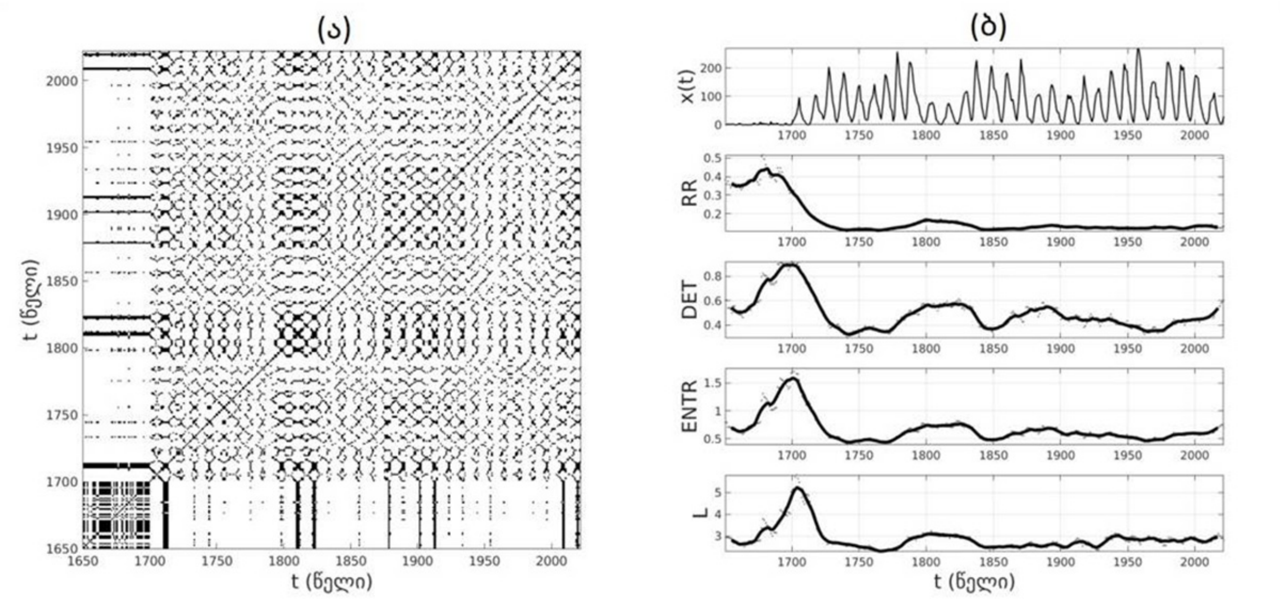


სურ.2: ვოლფის რიცხვის სიმძლავრის ვეივლეტ სპექტრი, მიღებული მორლეს კომპლექსური ვეივლეტით.

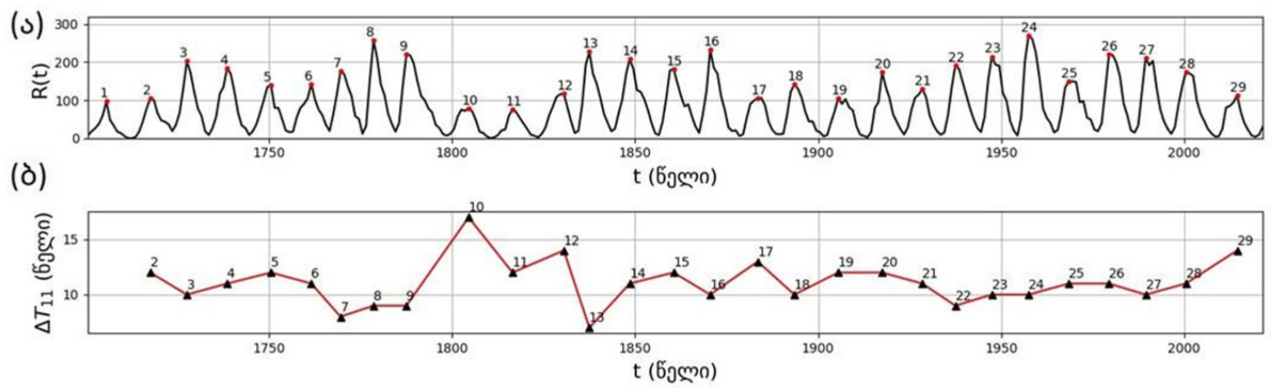


სურ.3: ვოლფის რიცხვის მონაცემების ემპირიული მოდები, მიღებული EMD ალგორითმით.

როგორც ვნახეთ, როდესაც მზე აქტივობის მინიმუმში გადადის, ვოლფის რიცხვის პე-რიოდი იცვლება. ამის დანახვა მარტივად შეიძლება სურ.5-ზე მიღებული შედეგიდან, საიდანაც ჩანს, რომ როდესაც მზე აქტივობის მინიმუმის ფაზაში გადადის, ვოლფის რიცხვის ლოკალური მაქსიმუმი დროში იგვიანებს (ორ პიკს შორის დროითი დაყოვნება იზრდება, ანუ ვოლფის რიცხვის რხევის პერიოდი იზრდება). მაგალითად, სურ.5 (ა)-ზე მე-10 და მე-9 პიკს შორის დაყოვნება გაცილებით დიდია, ვიდრე მე-9-სა და მე-8-ს შორის. სურ.5 (ბ)-ზე 21-ე საუკუნის დასაწყისში დროითი დაყოვნების სწორედ ასეთი ზრდა დაიკვირვება, რაც გვაძლევს იმის ვარაუდის საშუალებას, რომ მზის აქტივობის ახალი მინიმუმი ახლოვდება.



სურ.4: (ა) რეკურენტული დიაგრამა (ბ) ვოლფის რიცხვი და შესაბამისი RQA ზომები.



სურ.5: (ა) ვოლფის რიცხვის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი (ბ) სიგნალის პიკებს შორის დროითი მანძილი.

დასკვნა: ვეივლეტ ანალიზმა აჩვენა, რომ მზის აქტივობა 11 წლიანი პერიოდულობით არ ხასიათდება მაუნდერის მინიმუმში და ეს პერიოდი განიცდის ვარიაციას დროში. ფურიე და ვეივლეტ ანალიზის მეთოდებთან შედარებით, ჰილბერტ-ჰუანგის გარადქმნამ რაოდენობრივად მეტი და უფრო მოკლე პერიოდი გამოავლინა. ამასთან, ანალიზმა აჩვენა, რომ მზის აქტივობის მინიმუმებში RQA ზომები იზრდებიან. ეს ზრდა შეინიშნება 21-ე საუკუნის დასაწყისშიც, რაც ნიშნავს იმას, რომ ახლოვდება აქტივობის ახალი მინიმუმი და ეს ახალი მინიმუმი არ იქნება მაუნდერის მინიმუმის მსგავსი.

მადლობა: მადლობას ვუხდით ასოცირებულ პროფესორს, ბატონ ოლეგ ხარშილაძეს, გაწეული კონსულტაციებისთვის.

ლიტერატურა:

1. Chelidze T., Matcharashvili T. Dynamical patterns in seismology // Recurrence Quantification Analysis. Springer, Cham, 2015. pp. 291-334.
2. ხარშილაძე ო., რთული სიგნალების დამუშავების მეთოდები, სალექციო კურსი - 2018.
3. An Introduction to Space Weather by Mark Moldwin, 2008.
4. Norden E. Huang, Introduction to the Hilbert–Huang transform and its related mathematical problems//Hilbert–Huang transform and its applications. 2014 . pp.1-26.
5. Gao, P. X. Periodicity of sunspot group number during the Maunder Minimum//Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 472.3, 2017, pp. 2913-2918.
6. Stangalini, Marco, et al. Recurrence quantification analysis of two solar cycle indices//Journal of Space Weather and Space Climate 7 (2017): A5
7. ვოლფის რიცხვის მონაცემების ელექტრონული მისამართები: მაუნდერის მინიმუმის პერიოდის ვოლფის რიცხვი - https://ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices; მაუნდერის მინიმუმიდან დღემდე არსებული მონაცემები -https://www.sidc.be/silso/datafiles.

ANALYSIS OF SOLAR ACTIVITY WITH SPECTRAL AND RECURRENCE METHODS

Burdiladze L., Kobaidze D.

Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Mikheil Nodia Institute of Geophysics, Tbilisi, Georgia

Abstract. *In this paper, we processed one of the indices of solar activity, Wolf Number (Relative Sunspot Number), using the following data analysis methods: Fourier Analysis, Wavelet Analysis, Hilbert-Huang Analysis and Recurrence Quantification Analysis (RQA). Spectral analysis methods have found the well-known solar activity period of 11 years and longer periods as well. Compared to the Fourier and Wavelet Analysis methods, the Hilbert-Huang Transform found quantitatively more and shorter periods. We investigated the dynamics of solar activity with several RQA measures. During solar activity, phase transitions have been observed that coincide with the minimum of activity. Analyzing the 21st century data, a new minimum has been observed, which will not be similar to the Maunder minimum. Wolf's number data has been taken from the SILSO world database centre.*
Keywords: *Solar Activity, Wolf's number, Spectral analysis, Recurrence Quantification Analysis (RQA)*