

## მთის მყინვარების დისტანციური ზონდირების ზოგიერთი თანამედროვე მეთოდი

ჩიხლაძე ვ., ვარამაშვილი ნ.

მიხეილ ნოდის სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი, თსუ, თბილისი, საქართველო  
vicachikh@gmail.com

*ანოტაცია. ნაშრომში წარმოდგენილია მთის მყინვარების დისტანციური ზონდირების თანამედროვე მეთოდების მოკლე მიმოხილვა. განხილულია ზოგიერთი მათგანის გამოყენების პერსპექტივები საქართველოში მყინვარების კოლაფსის ადრეული გაფრთხილებისთვის.*

*საკვანძო სიტყვები: მყინვარები, ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, დისტანციური ზონდირება, ადრეული გაფრთხილება.*

### შესავალი

ამჟამად საქართველოში სხვადასხვა მონაცემებით 600 – 637 მყინვარია საერთო ფართობით 340 – 520 კმ<sup>2</sup> (<https://delicatours.ge/ledniki-gruzii-1>; <https://www.bbc.com/russian/articles/c9ejkg4dg91o>). ყველაზე მოცულობითი მათგან განლაგებულია სვანეთში (მყინვარები ლარდადი-ადიში, შხარა, უშბა, ჩალაადი, თვიბერი, წანერი, ლაილა და სხვა), ხევში ( დევდორაკის და გერგეთის მყინვარები), ხევსურეთში (მყინვარი ჭაუხი) და რაჭის რეგიონში. მათ შესახებ ინფორმაცია ბატონ ვახუშტი ბაგრატიონის დროიდან იყო ცნობილი. მათ კვლევებში ისეთმა გამოჩენილმა მეცნიერებმა მიიღეს მონაწილეობა, როგორც დ. წერეთელი, ა.ასლანიკაშვილი, ვ.ცომია, რ.გობეჯიშვილი, ლ. ტიელიძე და სხვებია. ანალოგიური კვლევები ტარდება აგრეთვე კავკასიონის ქედის ჩრდილოეთის მხრიდანაც. ნაღიკის მაღალმთიანი გეოფიზიკური ინსტიტუტის მეცნიერების ნაშრომში [1] მოყვანილია მონაცემები კლიმატის ცვლილების შესახებ ცენტრალური კავკასიონის მაღალმთიან ზონაში ტერსკოლის მეტეოსადგურის 1961 – 2020 წლების მონაცემების საფუძველზე და აგრეთვე 1957 – 2020 წლების პერიოდისთვის ძირითადი ხეობების მყინვარების დეგრადაციის შესახებ.

1961-2020 წლების პერიოდისათვის ზაფხულის ტემპერატურის ზრდის სიჩქარემ ტერსკოლში 0.31°C ათწლეულში და ტებერდაში 0.41°C ათწლეულში შეადგინა. ამ საუკუნის დასაწყისიდან საკვლევი რაიონის თერმული რეჟიმის ცვლილება ზამთრის, გაზაფხულის და ზაფხულის საშუალო ტემპერატურების მნიშვნელოვანი ზრდის და ზამთრის ჯამური ნალექების უმნიშვნელო შემცირების ხარჯზე ხდებოდა. ბოლო ათწლეულებში მყინვარების ფართობების შემცირება კავკასიონის მთებში თერმული რეჟიმის ცვლილების ფონზე ხდებოდა, რომელიც, სავარაუდოდ, ძირითადი მდგენელია მრავალი მოქმედი ფაქტორიდან. შემცირებული მყინვარების გეომეტრიული ზომების და ფართობების გაზომვები ტარდებოდა მე-XX საუკუნის შუა წლებში გადაღებული აეროფოტოსურათებით და 2015-2020 წლების Sentinel-2 კოსმოსური სურათებით. საშუალოდ ხეობების მყინვარების ფართობები შემცირდა 12.2%-თ (1-2 -დან 40%-დე). ოპტიკური სისტემების მეშვეობით მყინვარების დისტანციურ ზონდირების დროს გასათვალისწინებელია აგრეთვე ახალი ავტომატური მეთოდის [2] გამოყენება, რომელიც მყინვარების კარტოგრაფირებისას საშუალებას იძლევა მსხვრეების არსებობით გამოწვეული შეცდომების სწრაფ შესწორებას და შესაძლებელია გაცილებით უფრო სწრაფად მოხდეს მყინვარების ზედაპირების ავტომატური კარტირება. ანალოგიური (მყინვარების დნობის) პროცესები, შესაძლო უფრო მაღალი ტემპებით მიმდინარეობს აგრეთვე კავკასიონის ქედის სამხრეთ მხრიდანაც. მყინვარების და მათი შემადგენელი ნაწილების გეომეტრიული მახასიათებლების მონიტორინგის ინტერესს წარმოადგენს ყინულის სისქის გაზომვა, ყინულის მოცულობის შეფასება და აგრეთვე მყინვარის ყინულის შიდა სტრუქტურის შესწავლა.

მიწისზედა, საჰაერო და კოსმოსური ბაზირების ზონდირების დისტანციური საშუალებების გამოყენება შესაძლებლობას გვაძლევს ოპერატიულად თვალი ვადევნოთ ყინულოვანი წარმონაქმნების ცვლილებებს როგორც მიწის ზედაპირზე, ასევე მის სისქეშიც. ამისათვის იყენებენ გამოსხივებას ტალღის სიგრძეების დიდ დიაპაზონში აკუსტიკური და ელექტრომაგნიტური პრინციპზე მომუშავე ხელსაწყოებს.

ამჟამად ფართოდ გამოიყენება კრიოსფერული წარმონაქმნების კვლევის მრავალფეროვანი დისტანციური მეთოდები სხვადასხვა დიაპაზონებში: ხილულში [3], ინფრაწითელში [4], რადიო- [5] და მიკროტალღურში [6, 7, 8]. მთიან ადგილებში გეოლოგიურ საშიშროებების შესახებ ადრეული გაფრთხილების სისტემების და რისკების შეფასების კომპლექსური მეთოდების მიმოხილვა მოცემულია ნაშრომში [9] და შეიცავს გეოლოგიური საშიშროებების შესწავლას, როგორცაა მეწყერები, ჩამონგრევები, ღვარცოფული ნაკადები დისტანციური მეთოდების გამოყენებით (მაგალითად InSAR, ოპტიკური დისტანციური ზონდირება ან კარტირება უპილოტო საფრენი აპარატების მეშვეობით), ადგილზე საინჟინრო-გეოლოგიურ გამოკვლევებს ან მოწყობილობებს რეალურ დროში მონიტორინგისთვის.

ლენინგრადის ჰიდრომეტეოროლოგიური ინსტიტუტის მკვლევართა ჯგუფმა [10, 11] აღმოაჩინა, რომ წყლის კრისტალიზაციის დროს გარკვეულ პირობებში მაღალი ელექტრული პოტენციალის ( $10^2$  ვოლტის რიგისა) გაჩენა და ფაზების გაყოფის საზღვარზე თხელ გადასასვლელ ფენაში სტატიკური დიელექტრული შეღწევადობის მკვეთრი ზრდა ( $10^3 - 10^4$  ჯერ) დაიკვირვება.

სავარაუდოდ წარმოსადგენია, რომ წყლის ფაზურ საზღვრებზე ყველა დინამიურ სტრუქტურული პროცესებს თან ახლავს ელექტრული მოვლენები, რომლებიც იწვევენ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას ამა თუ იმ დიაპაზონში, თუ საკმარისად დიდია პროცესის მიმდინარეობის სიჩქარე ან დინამიური დატვირთვის სიდიდე. იმ გარემოების გათვალისწინებით, რომ გენერირებული გამოსხივების სიმძლავრე ზოგადად ნივთიერების მასის და დინამიური დატვირთვის სიდიდის პროპორციულია, მთის პირობებში (სადაც დაიკვირვებოდა მყინვარების დასკდომა და მეწყერები, თოვლის ზვავების ჩამოსვლა და ა.შ.), იყო ჩატარებული სხვადასხვა კვლევები სხვადასხვა ბუნებრივად და ხელოვნურად გამოწვეული დინამიური პროცესების დროს, ყინულის რადიოგამოსხივების კვლევა. იყო დარეგისტრირებული ელექტრომაგნიტური და სეისმური სიგნალები 0,1-30 ჰვ სიხშირის უბანში. ელექტრომაგნიტური სიგნალები წინ უსწრებდა სეისმურ სიგნალს და იყო გამოწვეული, როგორც ჩანს, მყინვარის შეკუმშვით და შემდგომი წანაცვლებით. ამ გარემოებამ მისცა ავტორებს [12] საშუალება ჩაეთვალათ დადგენილად ადრე უცნობი მოვლენა ბუნებრივი დინამიური პროცესების დროს თოვლის და ყინულის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მოვლენა, რომელიც შესაძლოა იყოს გამოყენებული ზვავებსა და მყინვარებზე დისტანციური დაკვირვების დროს. ამ მოვლენის ერთერთი თანავტორი ვ. პსალომშიკოვი გახდა შემდგომ ზვავების ჩამოსვლის და აგრეთვე მთის მყინვარების წანაცვლების მოკლევადიანი პროგნოზის შემქმნელი [13]. თოვლ-ყინულოვანი კატასტროფების. მათი რადიოგამოსხივებით მოკლევადიანი პროგნოზის მეთოდის არსი მარტივია - ყველა დიელექტრიკული მასალა, რომლებსაც მიეკუთვნება აგრეთვე თოვლიც, ყინულიც და მთის ქანებიც, პლასტიკური დეფორმაციის, და აგრეთვე შემდგომი ნგრევის (დაშლის) დროს, შუქის, აკუსტიკური სიგნალების და რადიოდიაპაზონში ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ემისიის წყაროებია. ზვავი, რომელიც ჩამოსასვლელად ემზადება ან მყინვარე, რომელიც მოცოცავს, ასხივებენ აკუსტიკურ სიგნალს სპექტრის საკმაოდ განიერ დიაპაზონში - ინფრაბგერებიდან ულტრაბგერებამდე. აშშ-სა და შვეიცარიაში ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ აკუსტიკური ემისია მკვეთრად მატულობს რამოდენიმე საათით ან დღეღამით ადრე თოვლის ზვავის ჩამოსვლამდე ან მყინვარის წანაცვლებამდე. ასე მაგალითად, შვეიცარიაში, მთა ეიგერზე დაკვირვებული მყინვარიდან მოწყვეტილი ყინულის დიდი მასის ჩამოშლა ( $\approx 10\ 000$  მ<sup>3</sup>) იყო დარეგისტრირებული მონიტორინგის ინფრაბგერითი სისტემის დახმარებით [14], რითაც მიეცათ საშუალება შეეფასებინათ ჩამოვარდნილი ყინულის მასის მოცულობა, ტრაექტორია და სიჩქარე.

დაკვირვებებმა ინფრაბგერით გამოსხივებაზე შესაძლოა წარმოგვიდგინონ მყინვარების ჩამოშლის და ყინულოვანი ზვავების მოცულობის შესახებ რადიონობრივი ინფორმაცია, რითიც გვეხსნება ახალი პერსპექტივები ზვავსაშიში მყინვარების მონიტორინგსა და მათი ჩამოშლის მოვლენების გაფრთხილებების შესახებ.

მიმართული რადიოანტენები საშუალებას გვაძლევს საკმაოდ უსაფრთხო მანძილიდან რამოდენიმე კილომეტრის ფარგლებში დავაფიქსიროთ სიგნალის წყარო, ხოლო მათი გაჩენის დროითი წინსწრება,

შეფასებების თანახმად, რამდენიმე საათს შეადგენს, ამასთანავე ჩამოსვლამდე რამდენიმე წუთით ადრე სიგნალი მკვეთრად ძლიერდება.

ამ აღმოჩენის ერთ-ერთი გამოყენებაა ჩრდილოეთში გემების ყინულებში გაყვანისას თვითმფრინავიდან დისტანციური ზონდირებით ბზარების და სუფთა წყლის არეების მოძებნა [15]. ყინული მრავალ უნიკალურ ფიზიკურ თვისებებს ფლობს. მას გააჩნია თორმეტი სტრუქტურული მოდიფიკაცია, რომლებიც წნევის და ტემპერატურის ცვლილებისას პოლიმორფული გარდაქმნების ხარჯზე გარდაქმნიან. ზოგიერთი მოვლენები, რომლებიც დაკავშირებულია ყინულის დინამიკასთან და ყინულის ფაზის მონაწილეობით ფაზური გარდაქმნების მიმდინარეობისას, იწვევენ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გენერირებას სიხშირეების ფართო დიაპაზონში. მყინვარების და თოვლის ზედაპირების ჩამოსვლა, ყინულში ბზარების გავრცელება იწვევს საშუალო სიხშირეების დიაპაზონში რადიოგამოსხივებას. გარსია-ფერნარდესმა, ლ. კაჩურინმა, ბ.ბერიმ, გუდზენკომ და სხვებმა აღმოაჩინეს და გამოიკვლიეს წყლის, წყლის ხსნარების და ზოგიერთი სხვა ნივთიერების კრისტალიზაციისას იმპულსური რადიოგამოსხივება დაახლოებით  $10^4$  -  $10^6$  ჰც-ის სიხშირეების ზოლში. ამ ნამუშევრების ავტორები რადიოგამოსხივების იმპულსებს აკავშირებდნენ ძირითადად იმ აირის განმუხტვების პროცესებთან, რომელიც ხდება ბზარების ნაპირებს შორის, რომლებიც, როგორც ვარაუდობდნენ, კრისტალიზაციის ფრონტის მახლობლად მყარ ფაზაში ჩნდებიან. ნამუშევარ [16]-ში მოყვანილია ყინულის არაწონასწორულ ზრდის პირობებში ყინული-წყლის სისტემაში საკუთარი ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გამოკვლევა და მისი პარამეტრების კავშირი კრისტალიზაციის პროცესის სტრუქტურულ-კინეტიკურ მახასიათებლებთან. არასტაციონარული ელექტრული ველის პოტენციალი (ელექტრომაგნიტური ემისიის სიგნალი) წყლის მაკრისტალიზებელი სინჯის მახლობლად ბრტყელი ზონდის, ფართოზოლიანი (გატარების ზოლი -  $10^1$  —  $10^7$  ჰც) გამამდიერებლის, ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელის და კომპიუტერის მეშვეობით იზომებოდა. რიგ შემთხვევაში გამოიყენებოდა თვითმწერი და ოსცილოგრაფი.

ელექტრომაგნიტური ემისიის ყველა დარეგისტრირებული სიგნალი შეიძლება ორ დამახასიათებელ ჯგუფად გავყოთ: I ტიპის სიგნალები -  $10^1$  —  $10^2$  ჰც სიხშირეების ზოლში და II ტიპის სიგნალები -  $10^3$  —  $10^6$  ჰც სიხშირეების ზოლში. აღმოჩნდა, რომ I ტიპის სიგნალები დაკავშირებულია უშუალოდ ყინულის მარცვლების ფორმირებასთან, მათ შეეჯახებთან, გვერდითი განშტოებების შექმნასთან და ა.შ. და მოცემულ სიტუურ პირობებში კრისტალიზაციის დინამიკის არასტაციონარულ ხასიათს ასახავენ, მაშინ როდესაც II ტიპის იმპულსები გამოწვეულია მეორადი პროცესებით, რომლებიც თან ახლავს კრისტალიზაციის პროცესს - მზარდი ბზარების განვითარება, ხახუნი, კიუვეტის კედლებიდან მოშორება და ა.შ. ამიტომ ელექტრომაგნიტური ემისიის სიგნალების კრისტალიზაციის კინეტიკასთან და რომელიმე მეორად პროცესებთან (ბზარების განვითარება, ჩამონატეხი და ა.შ.) დადგენილ კორელაციებს, სავარაუდოდ, აქვთ უნივერსალური ხასიათი და შესაძლოა გახდეს საფუძველი ახალი ელექტრომაგნიტური მეთოდების დამუშავებისას: ა) კრისტალიზაციის მორფოლოგიურად არამდგრადი ფრონტის დისტანციური კვლევა; ბ) დიელექტრიკის კრისტალის ზრდის უკონტაქტო კონტროლი და მზარდი ბზარების გამოვლენა; გ) იმ გეოფიზიკური ობიექტების უწყვეტი მონიტორინგი, რომლებიც ყინულის და თოვლის დიდ მასას შეიცავენ და კატასტროფული მოწყვეტის უნარი გააჩნიათ (მყინვარები, თოვლის ზედაპირი და ა.შ.).

მყინვარების შიდა სტრუქტურის, ქვეფენილი ზედაპირის, ტბების და ა.შ. შესასწავლად იყენებენ სხვადასხვა ტიპის გეორადარს, ანუ გეორადიოლოკაციურ ზონდირებას (GPR). გეორადარის საშუალებით წარმოებს მყინვარების ზედაპირიდან, რამდენიმე მეტრიდან რამდენიმე კილომეტრის სიღრმის ქვეზედაპირის გამოკვლევა.

მყინვარების დინამიკის შესასწავლად და მათი ამჟამინდელი მდგომარეობის ინვენტარიზაციისთვის თანამგზავრებიდან Quick Bird, Pleiades, Landsat 4, 5, 7, 8 მიღებულ ინფორმაციას იყენებენ.

გეორადარული პროფილირება [17] ჩატარებული ოკო-2 ტიპის გეორადარით „ტრიტონ“-ის ტიპის ანტენის ბლოკით (ცენტრალური სიხშირე 100 მჰც) დიელექტრიკული შეღწევადობით 3,2 და არეკლილი ტალღის მოლოდინის დისტანციით 120 მ. ნავიგაციური ინფორმაცია Garmin GPSmap-76Csx და GPSmap-64st ტიპის პორტატული GPS - მიმღებებიდან გროვდებოდა. ამის შედეგად იყო აგებული ფირნის ზედაპირი, მყინვარის ყინულოვანი კალაპოტი, ფსკერის მორენების კალაპოტი და კალაპოტი ძირეული ქანების საზღვარზე. ნამუშევარში [18] მოყვანილია რადიოლოკატორის აღწერილობა და 300 მეტრამდე სისქის ცივი,

სუბპოლარული და თბილი მყინვარების მონოიმპულსური ზონდირების მეთოდი. ქვეზედაპირის (ზედაპირქვეშა) რადიოზონდირების მეთოდები ფართოდ გამოიყენება მყინვარების შიდა აგებულების და ელექტროფიზიკური პარამეტრების შესასწავლად და აგრეთვე სისქის, კალაპოტის რელიეფის და სხვა მახასიათებლების დასადგენად.

მიწისზედა ტრანსპორტიდან 300 მეტრამდე და მეტი სისქის სუბპოლარული თბილი და ცივი მყინვარების ზონდირებისათვის შეიქმნა და დამზადდა დაბალსიხშირული ვიდეოიმპულსური რადიოლოკატორი (ВИРЛ) რადიოლოკაციური და ნავიგაციური მონაცემების ციფრული რეგისტრაციით. რადიოლოკატორი ВИРЛ შედგება შემდეგი ნაწილებისგან: გადამცემი, მიმღები, გადამცემი და მიმღები ანტენები, სინქრონიზაციის სისტემები, ციფრული რეგისტრაციის და ინდიკაციის სისტემები და აგრეთვე გარე მოწყობილობები - GPS-მიმღები, ოდომეტრი (მანძილის გამზომი ტრასით) და კვების წყარო. სინქრონიზაციის სისტემად გამოყენებულია რადიოარხი და ოპტიკურ-ბოჭკოვანი არხი. რადაროგრამებზე მკაფიოდ გამოიყოფა ანარეკლები კალაპოტიდან, რომლებიც შემდგომში ყინულის სისქის რუკების და ჭრილების ასაგებად გამოიყენება.

პოლარული აკვატორიების გემის ბორტიდან ან საფრენ აპარატიდან დისტანციური ზონდირებისათვის ზოგადი ფიზიკის ინსტიტუტში შექმნილია კომპაქტური რადარი [19]. სისტემა კომპაქტურია (40×30×20 სმ), აქვს მცირე წონა (20 კგ), დაბალი ენერგომომხმარება (200 W) და შეუძლია ერთდროულად რამდენიმე პარამეტრის გაზომვა: წყლის ტემპერატურა, ორგანული ნივთიერებების და ქლოროფილის კონცენტრაციის სივრცითი განაწილება, აგრეთვე წყლის ქიმიური ნივთიერებებით და მასში გახსნილი აირებით დაბინძურება, შელფური ყინულის თოვლის საფარის ხაოიანობის ხარისხის დადგენა, თოვლის საფარის ოპტიკური და თერმოდინამიკური თვისებები და ა.შ.

განვიხილოთ პლასტიკური დეფორმაციის დროს ყინულოვანი სტრუქტურების მდგომარეობის რადიოლოკაციური რეგისტრაციის თავისებურებანი [20]. ისინი დაფუძნებულია გაბნეული მიკროტალღოვანი გამოსხივების ინტენსიობის მომატების განსაზღვრაზე, განსაკუთრებით 13 – 14 გჰც სიხშირის სპექტრულ ინტერვალში. ეფექტი განსაზღვრება პლასტიკური დინების ავტოტალღების სიგრძით, ერთი სანტიმეტრის რიგის სახასიათო მნიშვნელობით. ავტოტალღები ქმნიან ყინულში ქაოტურად განაწილებულ, მქანკური დამაბულობის მოქმედებით დროში ცვალებად დიფრაქციული ბადეების ნაკრებებს.

ყინულის საფარის რადარული კოსმოსურათების ანალიზის დროს იყო აღმოჩენილი უკუგაბნევის კოეფიციენტის მომატებული მნიშვნელობა. პლასტიკური დინების ავტოტალღების გამოძვანების ეფექტს ყინულის საფარის თერმოდინამიკური ტემპერატურის ძლიერ დღეღამურ ცვლილებებს უკავშირებენ. შემოთავაზებულია დინების ტალღების რადარული რეგისტრაციის მეთოდის გამოყენება როგორც წინამორბედი, პულსირებადი მყინვარების ჩამოსვლისას, ვინაიდან შედარებითი გაზომვებისას ობიექტიდან გაბნეული გამოსხივება გაძლიერდება. ამ კვლევის მიზანია ყინულის დიდი მასების კრიტიკული მდგომარეობის ოპერატიული გამოვლენის მეთოდის შემოთავაზება და აგრეთვე მათი მსხვრევის პროგნოზირება. თანამგზავრული რადიოლოკაციის დახმარებით შესაძლოა პლასტიკური დინების ავტოტალღების გამოვლენით პულსირებადი მყინვარების ჩამოსვლის სავარაუდო ადგილების მიგნება. დედამიწის ზედაპირის რეგულარული რადარული გაზომვების ჩატარებისას შესაძლოა აღმოვაჩინოთ ყინულის სტრუქტურების დაშლის (ჩამოშლის) წინამორბედები, მაგალითად მყინვარების ჩამოშლა გამოსხივების გაბნევის გაძლიერებით.

მყინვარების ზონდირების დისტანციური მეთოდების ამ მოკლე მიმოხილვის დასკვნით ნაწილში ჩვენი ვარაუდით, იმისათვის, რომ მომავალში თავიდან ავიცილოთ ისეთი ბუნებრივი კატასტროფები, როგორც შოვსა და დევდორაკის ხეობაში [21], სადაც ყაზხეგის ვულკანული ცენტრის ქსელმა 2014 წლის 17 მაისს დააფიქსირა ყინულის და ქვების მასის ჩამოშლა დევდორაკის მყინვარის რაიონში და წარმომოხილი ქვა-ყინულის ზვავის მოძრაობა [22], ხოლო ავტორებმა [23], Landsat, ASTER, SENTINEL, PIADES -ით მიღებული თანამგზავრული და აეროფოტოგადაღების სურათების გამოყენებით და სითბური გამოსხივების და გლობალური ციფრული მოდელის გაუმჯობესებული გარჩევადობით 30 მ (ASTER GDEM; 2011წ. 17 ნოემბერი) კოსმოსური რადიომეტრის დახმარებით შეძლეს ამ მოვლენის რეკონსტრუქცია, საჭიროა შეიქმნას ადრეული შეტყობინების ისეთი სისტემები, რომლებიც ადამიანებს დროის მარაგს მისცემენ თავის გადასარჩენად. ცხადია, რომ უპირატესობა უნდა მიენიჭოს ზვავების ჩამოსვლის და მთის

მყინვარების წანაცვლების პროგნოზირების მოკლევადიან მეთოდებს [13], და რაც უფრო პერსპექტიულია - პლასტიკური დეფორმაციის დროს ყინულის სტრუქტურების მდგომარეობის თანამგზავრებიდან რადიო-ლოკაციურ რეგისტრაციას [20].

## ლიტერატურა

- [1] Bekkiev M., Dokukin M., Kalov R., Tashilov A. Modern degradation of valley glaciers of the Central Caucasus. // *Fundamental and Applied Climatology*, 7(3), 2021, pp. 113–141. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-113-141> (in Russian)
- [2] Holobăcă I-H, Tielidze L., Ivan K., Elizbarashvili M, Alexe M., Germain D., Petrescu S.H., Pop O.T., Gaprindashvili G. Multi-sensor remote sensing to map glacier debris cover in the Greater Caucasus, Georgia. // *Journal of Glaciology* 67(264), 2021, pp. 685–696. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.47>
- [3] Kotlyakov V., Desinov L., Desinov S., Rudakov V. Movements of Pamir glaciers in 2020 // *Ice and Snow*, t. 61. No. 3., 2021, pp. 471–480 DOI: 10.31857/S2076673421030102. (In Russian)
- [4] Lo Vecchio A., Lannutti E., Lenzano M., Mikkan R., Vacafior P., Lenzano L. MODIS Image-derived ice surface temperature assessment in the Southern Patagonian Ice field. // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, v. 43. Iss. 6., 2019, pp. 754–776. DOI: 10.1177/0309133319851022.
- [5] Macheret Yu., Glazovsky A., Lavrentyev I., Marchuk I. Distribution of cold and warm ice in glaciers on Nordenskiöld Land (Spitsbergen) according to ground-based radio sounding data. // *Ice and Snow*, t 59. No. 2, 2019, pp. 149–166. DOI: 10.15356/20766734-2019-2-430. (In Russian)
- [6] Bordonsky G., Gurulev A., Krylov S., Orlov A., Tsyrenzhapov S. Determination of areas of bottom gas separation in water areas with fresh ice according to radar and radiometric measurements. // *Modern problems of remote Sensing the Earth from Space*, Vol. 13, No. 3, 2016, pp. 150–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161, (In Russian);
- [7] Tikhonov V., Raev M., Sharkov E., Boyarsky D., Repina I., Komarova N. Monitoring sea ice in polar regions using satellite microwave radiometry // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, Vol. 12, No. 5, 2015, pp. 150–169 (In Russian);
- [8] Shokr M., Sinha N. *Sea Ice: Physics and Remote Sensing*. // USA: John Wiley and Sons; American Geophysical Union, 2015, 600 p. DOI: 10.1002/9781119028000
- [9] Zhu C., Xu Y., Tao Z., Zhu H.-H., Cao C., He M. Overview of Comprehensive Risk Assessment Methods and Hazards Early Warning System for Geological Hazards in the Mountain Area. // *Remote Sens.* 15, 2023, 2239. <https://doi.org/10.3390/rs15092239>
- [10] Kachurin L., Bekryaev V., Psalomshchikov V., DAN, vol. 174, No. 5, 1967, 1122, (In Russian)
- [11] Kachurin L., Grigorov N. // *ZhFKh*, vol. 51, No. 11, 1977, 2864, (In Russian)
- [12] Kachurin L., Grigorov N., Kuzin Yu., Psalomshchikov V., Stepanyuk I. Electromagnetic radiation of snow and ice during dynamic processes. // *Dokl. USSR Academy of Sciences*, vol. 248, numb. 3, 1979, pp. 583–585. UDC 551.322 GEOPHYSICS (in Russian)
- [13] Yablokov M. Avalanches give a signal. // <https://ours-nature.ru/b/book/17/page/5-lavini/159-lavini-podayut-signal> (in Russian)
- [14] Marchetti E., Walter F., Meier L. Broadband infrasound signal of a collapsing hanging glacier. // *Geophysical Research Letters*, 48, 2021, e2021GL093579. <https://doi.org/10.1029/2021GL093579>
- [15] Stepanyuk I., Smirnov V. Methods 2001 for measuring the characteristics of the dynamics of the canopy cover. // *Saint Petersburg, Gidrometeoizdat*, (in Russian)
- [16] Shibkov A., Zheltov M., Korolev A. Growing ice is a source of electromagnetic radiation. // *Bulletin of TSU*, vol. 6, iss. 2, UDC 539.37:537.221, 2001, (in Russian).
- [17] Kitov A., Denisenko I., Lunina O., Gladkov A., Plyusnin V., Ivanov E. Remote and georadar research of the Radde glacier of the Munku-Sardyk ridge (Eastern Sayan). // *Geoinformation support for sustainable development of territories: Materials of the International. conf. M.: Moscow University Publishing House*, t. 21, part 1, 2015, pp. 318–332, (in Russian)
- [18] Berikashvili V., Vasilenko E., Macheret Yu., Sokolov V. Monopulse radar for glacier sounding with an optical synchronization channel and digital signal processing. // *Journal of Radio Electronics*, No. 4, 2004, (in Russian)
- [19] Bunkin A., Klinkov V., Lednev V., Pershin S., Yulmetov R. Remote sensing of polar waters with a compact lidar: Achievements and prospects. // *RAS Proceedings of the Institute of General Physics named after. A.M. Prokhorova* Vol. 69. 2013, pp. 148-170, (in Russian).
- [20] Gurulev A., Bordonsky G., Orlov A. Registration of autowaves of plastic flow in ice structures during radar measurements. // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, t. 20, No. 3, 2023, pp. 222–229. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-222-229 (in Russian).
- [21] Chernomorets S., Savernyuk E., Petrakov D., Dokukin M., Gotsiridze G., Gavardashvili G., Drobyshchev V., Tutubalina O., Kolchin A., Zaporozhchenko E., Kamenev N., Kamenev V., Kaeb A., Kargel J., Huggel K. Ice - rock collapse and subsequent mudflow in the Devdoraki Gorge (Caucasus, Georgia) in 2014. // *Mudflows: disasters. risk. forecast. protection. Materials of the IV International Conference, Irkutsk*, 2016, p. 244-248. (in Russian).
- [22] Svalova V., Zaalishvili V., Ganapathy G., Nikolaev A., Melkov D. Landslide risk in mountain areas. // *Geology of the South of Russia*, 10 (2), 2019, pp. 110-127, (in Russian).

[23] Tielidze L., Kumladze R., Wheate R., Gamkrelidze M. The Devdoraki Glacier catastrophes, Georgian Caucasus. // Hungarian Geographical Bulletin 68(1), 2019, pp. 21–35. DOI: 10.15201/hungeobull.68.1.2

## **SOME MODERN METHODS FOR REMOTE SENSING OF MOUNTAIN GLACIERS**

**Chikhladze V., Varamashvili N.**

*Mikheil Nodia Institute of Geophysics of Ivane Javakishvili Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia vicachikh@gmail.com*

*Abstract. The paper presents a brief overview of modern methods of remote sensing of mountain glaciers. The prospects for using some of them for early warning of glacier collapse in Georgia are considered.*

*Keywords: glaciers, electromagnetic radiation, remote sensing, early warning.*