

მთის მყინვარები და დისტანციური ზონდირება

ჩიხლაძე ვ., ვარამაშვილი ნ.

*ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
მიხეილ ნოდიას სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი
vicachikh@gmail.com*

მთის მყინვარები – რა არის ეს, სილამაზის გარდა რა სარგებელს ან საშიშროებას წარმოადგენენ ადამიანისთვის. პირველ რიგში ეს არის მტკნარი წყალის უდიდესი მარაგი და ბევრ ქვეყანაში ადამიანის ცხოვრება მნიშვნელოვნად არის მათზე დამოკიდებული. მეორეც, რაც არა ნაკლებად საფიქრალია – მათი დნობის, ან უფრო ზუსტად, მათი დაჩქარებული დნობის პროცესი, რამაც საბოლოო ჯამში შესაძლოა გამოიწვიოს ოკეანის დონის მომატება, რაც მის ნაპირებთან მცხოვრები მილიონობით ადამიანს დიდ პრობლემებს შეუქმნის. გლობალური დათბობის ფონზე მიმდინარე პროცესები მყინვარებსაც შეეხება. ისეთ ქვეყანაში როგორც საქართველოა, სადაც მთის მყინვარები შედარებით დაბალ სიმაღლეზეა და ასე თუ ისე ადვილად მისაღწევია და მათი კონტროლი და შესწავლა შედარებით მარტივია, ყურადღება მაინც დისტანციური ზონდირებისკენ იხრება, რა გასაკვირვია, რომ ისეთ ქვეყნებში, როგორებიცაა ჩინეთი, ინდოეთი, პაკისტანი, ნეპალი, ავღანეთი, ტაჯიკეთი და ა.შ. პრიორიტეტი უფრო ზონდირების დისტანციურ მეთოდებისკენ არის გადახრილი. იგივე ეხება ანტარქტიდის, ანდების, ახალი ზელანდიის, გრენლანდიის და სხვა მუდმივი ყინულებით დაფარულ მთიან სისტემებს. ამ მოკლე მიმოხილვის ფარგლებში ძნელია ყველაფრის ძირფესვიანად შეხება, ამიტომ დასაწყისში გავცნოთ რამდენიმე მოკლე ინფორმაციას მყინვარების შესახებ.

ჩრდილო ამერიკის მყინვარები გამყინვარების პერიოდის ნარჩენებია. საუკუნეების განმავლობაში ტემპერატურა მთის მწვერვალებზე იყო საკმაოდ დაბალი, რაც საკმარისი იყო იმისათვის, რომ მყინვარები მეტნაკლებად სტაბილურ მდგომარეობაში შენარჩუნებულიყო. მაგრამ გლობალური დათბობა ანადგურებს საუკუნოვან ყინულებს. ყინულის დნობის მასშტაბების განსაზღვრის მიზნით გამოიყენეს თანამგზავრული ინფორმაცია და 2000-დან 2018 წლამდე პერიოდში მყინვარების სიმაღლის ცვლილება დაადგინეს. აღმოჩნდა, რომ მყინვარების 80%-მა დაკარგა თავისი სიმაღლე, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ისინი ყინულს კარგავენ უფრო მეტს, ვიდრე ზამთარში მოსულმა თოვლმა შეიძლება ანაზღაუროს. 2000-დან 2009 წლამდე ჩრდილო ამერიკის დასავლეთი ნაწილი წელიწადში საშუალოდ 2,9 გიგატონა ყინულს კარგავდა. მაგრამ 2009-დან 2018 წლამდე ყინულის დანაკარგები ოთხჯერ გადიდა, 12,3 გიგატონამდე წელიწადში [https://bb.lv/statja/tehno/2019/01/22/ledniki-severnoy-ameriki-tayut-v-chetyre-raza-bystrye-chem-desyatiletie-nazad]



ანალოგიური პრობლემებია გრენლანდიაში, რომლის ყინულის ფარი მთელი დედამიწის მყინვარების საერთო ფართობის ერთ მეათედს შეადგენს. ყოველწლიურად გრენლანდია კარგავდა თავისი ყინულის საფარის ნაწილს, დაახლოებით 250 მილიარდ ტონა ყინულს. 2019 წლიდან დნობის სიჩქარემ რამდენჯერმე მოიმატა – ამ წელს კუნძულმა 600 მილიარდი ტონა დაკარგა. 2021 წლის დათბობა აგრეთვე იყო ანომალური – 29 ივლისს ჰაერის ტემპერატურამ რეკორდულ მაჩვენებელს მიაღწია – **+23,4** გრადუსი ცელსიუსის სკალით, რაც აბსოლუტური რეკორდია და ზაფხულის თვეების საშუალო ტემპერატურას ორჯერ აღემატება. ამ დღეს კუნძულმა 8,4 მილიარდი ტონა ყინული დაკარგა.

მყინვარების დნობის პროცესის დაკვირვებაში გვეხმარება კოსმოსური მონიტორინგის მონაცემები. რადარული გამოსახულებები თანამგზავრ **Sentinel-1**-დან გვაძლევს საშუალებას თვალი ვადევნოთ ყინულოვანი მასების დინამიკას და შევაფასოთ მისი გადაადგილების სიჩქარე თანამგზავრული რადარული ინტერფერომეტრიის (**InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar**) გამოყენებით.

Sentinel-1-ს რადარული თანამგზავრული სისტემა C-დიაპაზონის (7,5 – 3,8 სმ) რადიოტალღებს გამოიყენებს. დარეგისტრირებული გამოძახილი დაბრუნებული სიგნალის ამპლიტუდის და ფაზის შესახებ ინფორმაციას შეიცავს. რადარული ინტერფერომეტრიის მეთოდი ინტერფეროგრამის აგებაზეა დაფუძნებული – რაც მდგომარეობს ერთი და იგივე ადგილის ერთნაირ პირობებში სხვადასხვა დროს გადაღებული გამოსახულებების შედარებაში.

ყინულის დნობის პროცესის კვლევის კიდევ ერთი ინსტრუმენტია პროდუქტი **MOD10A1 Snow Cover Daily Global**, რომელიც **MODIS (TERRA)** დაბალი სივრცითი გარჩევადობის ოპტიკურ მონაცემებზეა დაფუძნებული. პროდუქტი შეიცავს მონაცემებს თოვლის საფარზე, თოვლის ალბედოსა და თოვლის კარტირების ალგორითმებს, რომლებიც თოვლის ნორმალიზებული სხვაობითი ინდექსის (**Normalized Difference Snow Index – NDSI**) საფუძველზეა აგებული.



NDSI აქვს არეკვლის მაღალი კოეფიციენტი ხელსაწყო **MODIS** – ის ზოლ 4-ში (0,545–0,565 მკმ, ელექტრომაგნიტური სპექტრის ხილული მწვანე დიაპაზონი) და არეკვლის დაბალი კოეფიციენტი ზოლ 6-ში (1,628–1,652 მკმ, საშუალო ინფრაწითელი დიაპაზონი). **NDSI** – ეს არის თოვლის ნორმალიზებული ელექტრომაგნიტური გამოსხივების არეკვლის კოეფიციენტების სხვაობითი შეფარდება 4 და 6 ზოლებში, რომელიც ეფუძნება სპექტრალურ თავისებურებებს, რომლებიც საშუალებას იძლევიან თოვლი უთოვლო ადგილებისგან და ღრუბლებისგანაც გავარჩიოთ.

<https://ru.geosignal.in.ua/post/%D1%81%D0%BF%D1%83%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE-%D0%B2%D1%8B%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1-%82%D0%BE-%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D1%82%D0%B0%D1%8F%D0%BD%D0-%B8%D1%8F-%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2>].

გეორადარული კვლევების შედეგად აღმოსავლეთ ანტარქტიდის ყინულის ფარის ქვეშ აღმოაჩინეს ძველი რელიქტური ლანდშაფტი, რომელიც მთის ქედებისა და მდინარეების ველებისგან შედგება. ამ ამოცანის განსახორციელებლად დარემის უნივერსიტეტის მეცნიერებმა გადაღების მონაცემები ანტარქტიდის რელიეფის ეტალონურ მოდელთან REMA (Reference Elevation Model of Antarctica) კომპლექსში, ზედაპირის რელიეფის დაზუსტებული ციფრული მოდელი, შეუფარდეს ტეხასის უნივერსიტეტის გეოფიზიკის ინსტიტუტის მფრინავი ლაბორატორიის ბორტზე განლაგებული HiCARS-ის საავიაციო გეორადარული სისტემის გადაღების მონაცემებს, რამაც საშუალება მისცათ ყინულის ფენის ქვეშ ზედაპირის პროფილი მიეღოთ. ყინულქვეშა ტოპოგრაფიის ანალიზმა გამოამჟღავნა 32 ათასი კვადრატული კილომეტრის ფართობის ამაღლებული მონაკვეთი, რომელიც 121-დან 173 კილომეტრამდე სიგრძის და 73-დან 85 კმ-დე სიგანის სამ ბლოკად არის დაყოფილი. ეს ბლოკები 40 კილომეტრის სიგანის ღრმულებით არიან გაყოფილი. ღრმულების სიღრმე ოკეანის დონეზე ქვემოთ 620 – 1480 მეტრზეა, ხოლო სამივე ბლოკში გამოვლენილია ტოპოგრაფიული მწვერვალები ზღვის დონიდან 620 – 850 მეტრის სიმაღლის ფარგლებში. [https://nplus1.ru/news/2023/10/24/-antarctic-river-landscape?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop]

რა ხდება ჰიმალაებში?

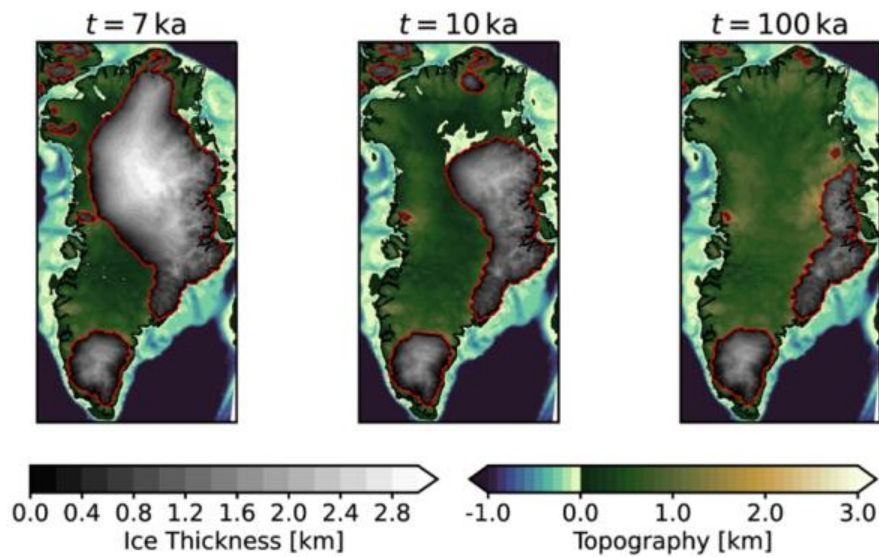
მცინვარის ყინულის სისქის შეფასებას შესაძლოა ჰქონდეს უკიდურესად მნიშვნელოვანი ინფორმაცია მცინვარში აკუმულირებული მტკნარი წყლის მარაგების შესახებ. ამის გაგება ადრე, განსაკუთრებით ჰიმალაის მთებში, მკაცრი კლიმატის და ადგილის დასერილობის გამო, საკმაოდ რთული ამოცანა იყო. გეორადარული კვლევა ყინულის სისქის დასადგენად ინდოეთის ხიმაჩალ პრადეშის შტატში მცინვარ ჩხოტა შიგრიზე ჩატარდა. გეორადარს ჰქონდა მრავალჯერადი დაბალსიხშირული ანტენა. გეორადარული გადაღება დისკრეტულ რეჟიმში ტარდებოდა 16 მჰც სიხშირეზე, მიმღებ და გადამცემ ანტენებს შორის 4 მ მანძილით. მონაცემების შეგროვების ინტერვალი აბლაციის ზონის სუფთა ყინულზე მეწყერის სიგრძის გასწვრივ 50 სმ შეადგენდა. ძირეულ ქანებიდან ანარეკლი პროფილებზე მკაფიოდ ჩანდა, რაც იმას მოწმობდა, რომ ყინულის სისქე 110-დან 150 მეტრამდეა, ხოლო გამოკვლეულ ტერიტორიაზე წყლის მარაგი დაახლოებით 0,49 კმ³ ეკვივალენტურია. შედეგებმა აჩვენა აგრეთვე ზედაპირქვეშა ფენის თავისებურობანი, ისეთები, როგორც წერტილოვანი ამრეკლი და ყინულის აბლაციის ზონის შიგნით ხაზობრივი ანარეკლი პლასტიდან. საერთო ჯამში, მცინვარ ჩხოტა შიგრის მცინვარის ყინულის საერთო მოცულობა 1,20 კმ³, ხოლო წყლის ეკვივალენტი 1,05 კმ³, ჰიმალაის მცინვარების ფართობების და სიღრმის შეფარდებების გამოყენებით [1].

დისტანციური ზონდირება თავისი ადეკვატური სივრცითი და დროითი გარჩევადობით, გლობალური დაფარვით და დაბალი ფინანსური ხარჯებით საშუალებას იძლევა სწრაფად, ნახევრად ავტომატურად და ეკონომიურად შეფასდეს მცინვარების პარამეტრების ცვლილებები დიდ ტერიტორიებზე. დისტანციური ზონდირების მიდგომებს შეუძლიათ რეგულარულად აკონტროლონ მცინვარების ისეთი თვისებები, როგორცაა ყინულის ფართობი, ბოლო წერტილის პოზიცია, მოცულობა და ზედაპირის სიმაღლე, საიდანაც შეიძლება დასკვნის გაკეთება მცინვარის მასის ბალანსის შესახებ. ასეთი მეთოდები განსაკუთრებით სასარგებლოა შორეულ რაიონებში, შეზღუდული სავლე გლაციოლოგიური გაზომვებით. მიმოხილულია ხილული და ინფრაწითელი დისტანციური ზონდირების გამოყენების მიღწევები მცინვარის პარამეტრების შესაფასებლად სავლე მეთოდებთან ერთად, ფოკუსირებულია მოცულობის/ფართობის ცვლილებებზე და მცინვარების მასის ბალანსზე. ყურადღება გამახვილებულია კოსმოსური თერმული გამოსხივების და არეკვლის რადიომეტრის (ASTER) სენსორზე და მის გამოყენებადობაზე ჰიმალაის მცინვარების მონიტორინგისთვის. დაფარული მეთოდები: სიმაღლის ციფრული მოდელებიდან (DEMs) მიღებული მოცულობითი ცვლილებები, მულტისპექტრულ ანალიზზე დაფუძნებული მცინვარების გამოკვეთის ალგორითმები, მცინვარის არეალის ცვლილებები ათწლეულის ვადებზე და AAR/ELA მეთოდები, რომლებიც გამოიყენება წლიური მასის ნაშთების გამოსათვლელად. ასევე განიხილება არსებული შეზღუდვები და არსებული გამოწვევები დისტანციური ზონდირების გამოყენებისას მთის მცინვარების მახასიათებლების რუკაზე, განსაკუთრებით ჰიმალაის კონტექსტში. [<https://www.mdpi.com/1424-8220/8/5/3355> Journals Sensors Volume 8 Issue 5 10.3390/s8053355]

ამჟამად საქართველოში სხვადასხვა მონაცემებით 600 – 637 მცინვარია საერთო ფართობით 340 – 520 კმ² (<https://delicatours.ge/ledniki-gruzii-1>; <https://www.bbc.com/russian/articles/c9ejkg4dg91o>). ყველაზე მსხვილები მათგან განლაგებულია სვანეთში (მცინვარები ლარდა-

ადი-ადიში, შხარა, უშხა, ჩალაადი, თვიბერი, წანერი, ლაილა და სხვა), ხევში (დევდორაკის, გერგეთის და აზანოს 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. ცომაია, რ. გობეჯიშვილი და სხვებმა. საქართველოს ჰიდრომეტეოროლოგიური ინსტიტუტის თანამშრომლებმა საქართველოს მთის მყინვარების შესწავლისას აღნიშნეს ბოლო 50 წლის განმავლობაში მათი რაოდენობის და საერთო ფართობის მნიშვნელოვანი შემცირება. აღსანიშნავია, რომ ქვეყნის აღმოსავლეთში ეს პროცესი უფრო ინტენსიურია, ვიდრე დასავლეთში. ამასთან კეთდება დასკვნა, რომ ამ საუკუნის ბოლომდე მსხვილი მყინვარების სრული დადნობა არ არის მოსალოდნელი [2]. პროგნოზები გლობალური დათბობის ფონზე არასახარბიელოა. მაგალითად გრენლანდიაში ითვლება, რომ თუ ინდუსტრიულ პერიოდამდე ტემპერატურასთან შედარებით მომატება 2,2 გრადუსზე მეტი იქნება, გრენლანდია თავისი საფარის დაახლოებით 80% დაკარგავს

[https://dzen.ru/news/story/SMINEWS_globalnoe_poteplenie_mozhet_privesti_kpotere_80_lda_vGrenlandii-7938a6a8a57bd487b3b38e8e436f5e10?lang=ru&rubric=science&fan=1&stid=67KBtoeLYwBGAf6dIzC3&t=1698001924&persistent_id=4666199950805748932&story=a68d2daa-7269-5f05-86f1-fa48530403c7&issue_tld=ru]



ამ ნახაზზე დატანილია 7, 10 და 100 ათასი წლის პერიოდებისთვის გრენლანდიის ყინულოვანი ზედაპირის საპროგნოზო გამოსახულება, თუ გლობალური დათბობის ტემპები არ შემცირდება. მარცხენა ისარი გვიჩვენებს ყინულის სისქეს, ხოლო მარჯვენა – ზედაპირის სიმაღლეს.

ბრიტანეთის ანტარქტიკული სამსახურის კლიმატოლოგებმა (ა.წ. 23 ოქტომბერს გამოქვეყნდა Nature Climate Change-ში) დაადგინეს, რომ დასავლეთ ანტარქტიდის ყინულის ფარი აგრძელებს სწრაფ დნობას და უახლოეს საუკუნეებში, მიუხედავად იმისა, რა ზომებს მიმართავს კაცობრიობა კლიმატის ცვლილებებთან ბრძოლაში, მაინც ნაწილებად დაიშლება. მართალია, აქვე დაგვაწყნარეს, რომ დასავლეთ ანტარქტიდის მყინვარების კოლაპსი არა ნაკლებ 300 – 500 წლის შემდეგ დაიწყება. [https://dzen.ru/news/story/Uchenye_nazvali_razrushenie_lednikov_Zapadnoj_Antarktidy_neizbezhnymfd64e7f01c55dd0c1902359cccb4776e?l]

ang=ru&rubric=personal_feed&fan=1&stid=7SJa&t=1698080267&persistent_id=4666199950805830391&story=beaf990d-eabd-5a27-b379-336fe14b5d61&issue_tld=ru].

ანალოგიური კვლევები ტარდება აგრეთვე კავკასიონის ქედის ჩრდილოეთის მხრიდანაც. ნალჩიკის მაღალმთიანი გეოფიზიკური ინსტიტუტის მეცნიერების ნაშრომში [3] 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 ტემპერატურების ზრდის სიჩქარემ ტერსკოლში 0.31°C ათწლეულში და ტებერდაში 0.41°C ათწლეულში შეადგინა. ამ საუკუნის დასაწყისიდან საკვლევი რაიონის თერმული რეჟიმის ცვლილება ზამთრის, ზაფხულის 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 შუაში გადაღებული აეროფოტოსურათებით და 2015-2020 წლების Sentinel-2 კოსმოსური სადგურის სურათებით. საშუალოდ ხეობების მყინვარების ფართობები შემცირდა 12.2%-ით (1-2-დან 40%-მდე). ოპტიკური სისტემების მეშვეობით მყინვარების დისტანციურ ზონდირების დროს გასათვალისწინებელია აგრეთვე ახალი ავტომატური მეთოდის [2] გამოყენება, რომელიც მყინვარების კარტოგრაფირებისას საშუალებას იძლევა მსხვრევების არსებობით გამოწვეული შეცდომების სწრაფ შესწორებას და იძლევა საშუალებას გაცილებით უფრო სწრაფად მოხდეს მყინვარების ზედაპირების ავტომატური კარტირება. ანალოგიური (მყინვარების დნობის) პროცესები, შესაძლოა უფრო მაღალი ტემპებით მიმდინარეობს აგრეთვე კავკასიონის ქედის სამხრეთ მხრიდანაც. მყინვარების და მათი შემადგენელი ნაწილების გეომეტრიული მახასიათებლების მონიტორინგის ინტერესს წარმოადგენს აგრეთვე ყინულის სისქის გაზომვა, ყინულის მოცულობის შეფასება და აგრეთვე მყინვარის ყინულის შიდა სტრუქტურის შესწავლა.

მიწისზედა, საჰაერო და კოსმოსური ბაზირების ზონდირების დისტანციური საშუალებების გამოყენება საშუალებას იძლევა ოპერატიულად ვადევენოთ თვალი ყინულოვანი წარმონაქმნების ცვლილებებს, როგორც მიწის ზედაპირზე, ასევე მის სიღრმეშიც. ამისათვის იყენებენ აკუსტიკური და ელექტრომაგნიტური გამოსხივების პრინციპზე, ტალღის სიგრძეების დიდ დიაპაზონში, მომუშავე ხელსაწყოებს.

მთის მყინვარები შემფოთებას იწვევენ თავისი ფართობის შემცირებით, სისქის ცვალებადობით, მასის ბალანსის და წყლის რესურსებისთვის მათი შედეგების და აგრეთვე, ამ ყველაფერთან დაკავშირებული საფრთხეების თვალსაზრისით. მყინვარების მასის დაკარგვის შენატანი ზღვის დონის გლობალურ მომატებაში და მყინვარებთან დაკავშირებული საფრთხეები ამჟამად ყველაზე მნიშვნელოვანია სხვა სოციალურ-ეკონომიკურ პრობლემებთან ერთად, ამიტომ მყინვარების ცვლილებების დინამიკის გაგება და მუდმივი მონიტორინგი საჭიროა კლიმატის ცვლილების შესასწავლად, წყლის რესურსების სამართავად და ჰიდროენერგეტიკისათვის, და აგრეთვე იმ საფრთხეების პროგნოზი და თავიდან აცილება, რაც მყინვარებთან არის დაკავშირებული. ბოლო წლების მიღწევები დედამიწაზე

მიმდინარე პროცესების დაკვირვების მეთოდებში მნიშვნელოვანია მცინვარების და მათთან დაკავშირებული საშიშროებების შესასწავლად. დისტანციური ზონდირების ტექნოლოგია საშუალებას გვაძლევს მცინვარების ისეთი პარამეტრები შევაფასოთ, როგორებიცაა მცინვარის ფართობი, ალბედო/არეკვლა/გაბნევა, მცინვარის ზონები და სახეობა, წონასწორობის ხაზი, მცინვარის სისქე, მოცულობა, მასის ბალანსი, მცინვარის სიჩქარე და ტოპოგრაფია.

განვიხილავთ მაღალ მიუწვდომელ მთებში წარმოქმნილი მცინვარების გაგებისა და გამოკვლევისათვის დისტანციური ზონდირების ტექნოლოგიების გამოყენების პერსპექტივებს [5, 6].

თოვლის და მცინვარების დისტანციური ზონდირება

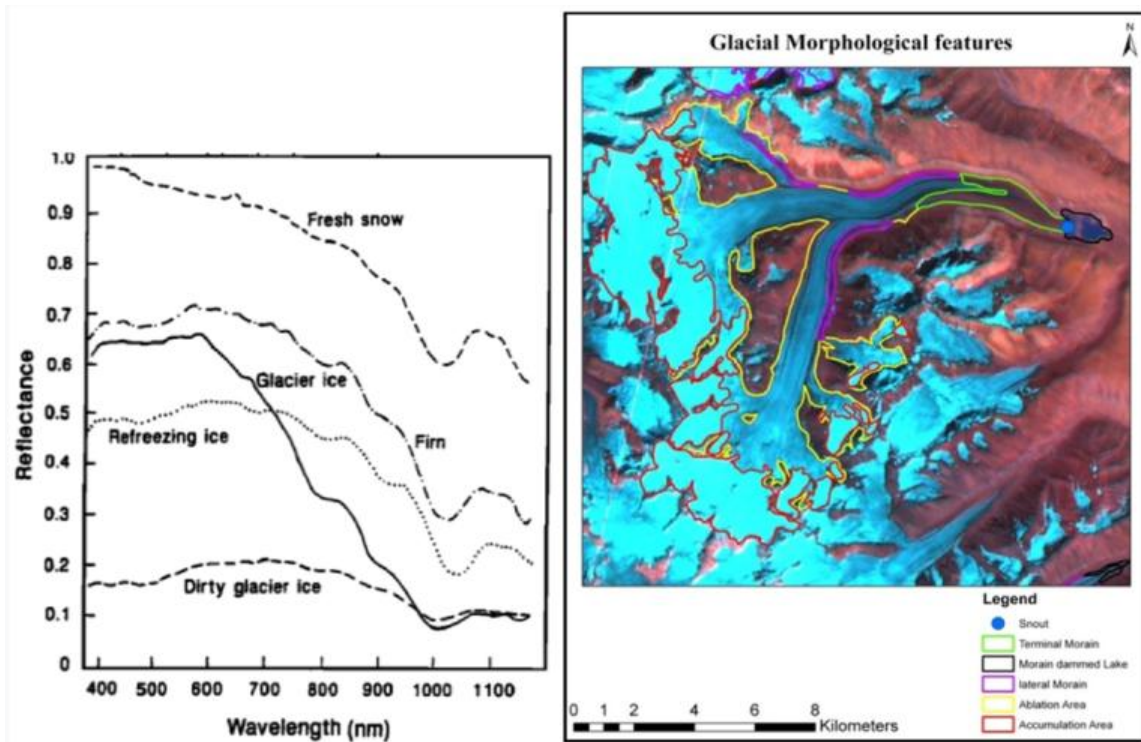
დისტანციური ზონდირება ეს არის ხელოვნება და მეცნიერება, რომელიც საშუალებას იძლევა ობიექტის შესახებ ინფორმაცია შევაგროვოთ მასთან კონტაქტის გარეშე. დისტანციური ზონდირების სისტემა მფრინავ ან კოსმოსურ პლატფორმაზე შეიძლება იყოს განთავსებული და ობიექტის შესახებ ინფორმაციის შესაგროვებლად ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას იყენებდეს. როდესაც დისტანციური ზონდირების სისტემა ბუნებრივ გამოსხივებას იყენებს, ამას უწოდებენ პასიურ დისტანციურ ზონდირებას, ხოლო როდესაც დისტანციური ზონდირების ხელსაწყო საკუთარ გამოსხივებას გენერირებს, ამას აქტიურ დისტანციურ ზონდირებას უწოდებენ [7]. მცინვარის ზედაპირი თოვლის, ფირნის, ყინულის, ქვების, ნაგავის და წყლისაგან შედგება და ყოველივე მათგანს გააჩნია ცვალებადი თვისებები სხვადასხვა ელექტრომაგნიტურ სპექტრში.

ოპტიკური ხილული და ახლო ინფრაწითელი დიაპაზონი

ელექტრომაგნიტური სპექტრის (0,4–3,0 მკმ) ოპტიკური ხილული და ახლო ინფრაწითელი უბნები (VNIR) არიან დისტანციური ზონდირების ძირითადი დიაპაზონი. VNIR სენსორები ზომავენ ობიექტის გამოსხივებას, რომლებიც დაკავშირებულია ობიექტის ალბედოსთან და მისი არეკვლის უნარზე.

მცინვარის სხვადასხვა უბნებს არეკვლის განსხვავებული მახასიათებლები გააჩნიათ, რაც მათ განსხვავებული სახის და შესაბამისად, კარტოგრაფირების საშუალებას იძლევა. ახლად მოსულ თოვლს ძალიან მაღალი არეკვლის უნარი გააჩნია ტალღის სიგრძეების ხილულ უბანში და მნიშვნელოვნად დაბალი ახლო, საშუალო და მოკლეტალღოვან ინფრაწითელ უბნებში. ფირნს, რომელიც შარშანდელ თოვლს წარმოადგენს, თოვლზე 25–30% ნაკლები არეკვლადობა აქვს. მცინვარის ყინულს აქვს მაღალი არეკვლადობა ტალღების სიგრძის ლურჯ (0,4 – 0,5 მკმ) და მწვანე (0,5 – 0,6 მკმ) დიაპაზონებში, მაგრამ ის მკვეთრად, თითქმის ნულამდე ეცემა წითელ (0,6 – 0,7 მკმ) დიაპაზონში. ნატეხები მცინვარზე მნიშვნელოვნად ამცირებენ არეკვლადობას. კოსმოსური სენსორების უმეტესობა რამდენიმე დიაპაზონში მუშაობს და მათ მულტისპექტრალურებს უწოდებენ. ერთ-ერთი წარმატებული, ხანგრძლივი და უწყვეტი VNIR-ის პროგრამა Landsat-ის პროგრამაა, რომელიც 1972 წლიდან უწყვეტად აკვირდება დედამიწას და მონაცემებს აგროვებს (Landsat MSS, TM, ETM+, OLI/TIR). VNIR-ის დანარჩენი ოპტიკური სენსორებია ASTER, SPOT, MODIS, IRS LISS III/IV და AWiFS, Quickbird და IKONOS. ტაბულა 1-ში ოპტიკური დიაპაზონის ის სპექტრალური უბნებია ჩამოთვლილი,

რომლებიც Landsat TM-შია გამოყენებული, ხოლო ტაბულა 2-ში წარმოდგენილია ზოგიერთი მნიშვნელოვანი თანამგზავრული მისიები და მათი მახასიათებლები [7].



ნახ. 1 (მარცხნივ). თოვლის და ყინულის სპექტრალური არეკვლის მრუდები ფორმირების სხვადასხვა სტადიებში და თანამგზავრული გამოსახულება (LISS III, 2000 წ. 11 სექტემბერი).
 ნახ.2 (მარჯვნივ) – ნაჩვენებია მყინვარი სამუდრა ტაპუ-ს გამოსახულება, რომელზეც არეკვლის უნარის საფუძველზე მყინვარის სხვადასხვა მახასიათებლების დემონსტრაციას ახდენს. როგორც სპექტრალური გამოძახილის მრუდიდან ჩანს, თოვლს აქვს მაქსიმალური არეკვლის უნარი, შემდეგ ფირნი და ყინული მოყვებიან. მყინვარის ნამტვრევების საფარს იგივე არეკვლის უნარი გააჩნია, როგორც გარშემო მყოფ ქანებს. იგივე შეიძლება დავასკვნათ მყინვარ სამუდრა ტაპუ-ს თანამგზავრული სურათითაც [6].

ცხრილი 1. სპექტრალური უბნები განსხვავებულ ოპტიკურ დიაპაზონებში

ზოლები (დიაპაზონები)	სპექტრალური უბანი (მკმ)
ხილული (VIS)	0,45–0,52 (ლურჯი)
	0,52–0,60 (მწვანე)
	0,63–0,69 (წითელი)
ახლო ინფრაწითელი დიაპაზონი (NIR)	0,76–0,90
მოკლეტალღოვანი ინფრაწითელი გამოსხივება (SWIR)	1,55–2,35
სითბური ინფრაწითელი (TIR)	10,42–12,50

სითბური ინფრაწითელი

სითბური ინფრაწითელი გამოსხივება (TIR) (3–15 მკმ) დისტანციური ზონდირების მძლავრი ინსტრუმენტი განსხვავებული ტემპერატურის ან გამოსხივების კოეფიციენტის მქონე ქვეითი ობიექტის გამოსაცნობად. 8–14 მკმ სითბურ დიაპაზონში შეიძლება გავზომოთ ზღვის ან დედამიწის ზედაპირის ტემპერატურა, ვინაიდან ტალღების ამ დიაპაზონში

ნისთვის ატმოსფერო მუშაობს როგორც ფანჯარა. მცინვარის ზედაპირის ტემპერატურა უფრო დაბალია, ვიდრე გარემოს ტემპერატურაა, ამიტომ შესაძლებელია მისი დიფერენცირება თერმული მონაცემებით. მცინვარის თერმულად აქტიური ფენის სიღრმე, სადაც შესაძლებელია სეზონური ცვლილებების შეგრძნება, 10 მეტრს არ აღემატება. გლაციოლოგიური დაკვირვებებისთვის ყველაზე ხშირად თერმოდიაპაზონურ სენსორებად AVHRR, MODIS, Landsat-ის სერია და ASTER-ი გამოიყენება ტაბულა 2.

ცხრილი 2. დედამიწის დისტანციური ზონდირებისთვის რჩეული მისიებისთვის განკუთვნილი ოპტიკური თანამგზავრების სია

პლატფორმა/სენსორი	გაშვების წელი	დიაპაზონების რაოდენობა	სივრცითი გარჩევადობა	სპექტრალური გარჩევადობა
Landsat MSS	1972			
Landsat TM	1984		80 მ	4MS
Landsat ETM+	1999–2003		15, 30, 60/100 მ	PAN, 6MS, 1TIR
Landsat OLI/TIR	2013			2TIR, PAN, 8MS
ASTER	1999	15, 30, 90 მ	14 დიაპაზონი	3VIS/NIR, 6SWIR, 5TIR
SPOT	1984	20მ/10 მ	4 დიაპაზონი	3VIS, 1PAN
MODIS	1999	250, 500, 1000 მ	36 დიაპაზონი	VIS, TIR
Quick Bird	2001	0,6 მ	4 დიაპაზონი	3VIS/NIR, PAN
IKONOS	1999	1 მ	4 დიაპაზონი	3VIS/NIR, PAN
IRS LISS III/IV, AWiFS	1988–2011	72 მ-დან 5.8 მ	4 დიაპაზონი	VIS/NIR

მიკროტალღოვანი ელექტრომაგნიტური სპექტრები

მიკროტალღოვანი სპექტრის ტალღის სიგრძით ოპტიკური VNIR -ის შემდეგ თოვლის და ყინულის თვისებების შესასწავლად ყველაზე პოპულარული უბანია. ზემოდასახეობითი სენსორები შეიძლება როგორც პასიური (რადიომეტრი, 3–6 მკმ სპექტრალური დიაპაზონი) და აქტიური (რადარი, სპექტრალური დიაპაზონი 1–1 მ). ატმოსფერო გამჭურვალეა მიკროტალღოვანი სპექტრის მთელ დიაპაზონში ნებისმიერი ამინდის პირობებში, ამიტომ მიკროტალღოვანი გამოსხივება შეიძლება მცინვარების შესასწავლად დღე-ღამის ნებისმიერ დროს და ნებისმიერ ამინდის პირობებში იყოს გამოყენებული.

ძირითადი უპირატესობაა მიკროტალღური სიგნალების უნარი თოვლსა და ყინულში სხვადასხვა სიღრმეზე შეაღწიოს და შესაბამისად მოგვაწოდოს ინფორმაცია მცინვარების სიღრმისეულ სტრუქტურის შესახებ. სიგნალების შეღწევის სიღრმე ტალღის სიგრძეზეა დამოკიდებული. მშრალი თოვლის ზონაში შეღწევის სიღრმე ათობით მეტრს შეადგენს.

L-დიაპაზონის რადარი არსებითად შეიძლება მცინვარების შიდა სტრატეგიკაციის შესახებ ინფორმაციის მისაღებად იყოს გამოყენებული. სველი თოვლის შემთხვევაში შეღწევადობა ნაკლებია, ვიდრე მშრალ თოვლში. ტალღის სიგრძის გაზრდა ასევე ზრდის შეღწევადობის უნარს. ზედაპირის ხავოიანობა აგრეთვე არსებითად მოქმედებს მიკროტალღური გამოსხივების არეკვლასა და უკუ გაბნევაზე. რადიოლოკაციური დისტანციური ზონდირების სივრცითი გარჩევადობა შეიძლება მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდეს. სინთეზირე-

ბული აპერტურის მქონე SAR მონაცემები შეიძლება იყოს გამოყენებული მცინვარების სახის, სტრატეგიკაციის და აგრეთვე სხვა, ისეთი როგორცაა სისქე და მოძრაობა, პარამეტრების შესასწავლად.

ცხრილებში 3 და 4 წარმოდგენილია დაწვრილებითი ინფორმაცია მიკროტალღურ დიაპაზონებსა და თანამგზავრების შესახებ [7].

ცხრილი 3. მიკროტალღოვანი სპექტრის დიაპაზონები და სენსორები

დიაპაზონი	ტალღის სიგრძე (სმ)	ხელსაწყო
Ka	0.8–1.1	–
K	1.1–1.7	–
Ku	1.7–2.4	–
X	2.4–3.8	TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed
C	3.8–7.5	SIR-C, ERS 1/2, ENVISAT ASAR, RADARSAT 1/2
S	7.5–15	ALMAZ
L	15–30	JERS-1, SEASAT, ALOS PALSAR
P	30–100	–

ცხრილი 4. ზოგიერთი რჩეული სამიებო-სამაშველო მისიების ჩამონათვალი

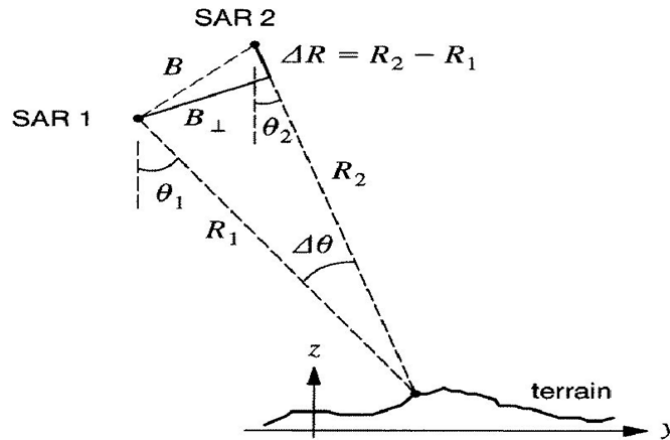
სისტემა	ქვეყანა	გაშვების წელი	დიაპაზონი	გარჩევადობა (მ)
SEASAT	აშშ	1978	L	25
ERS 1/2	ევროპა	1991/1995	C	30
J-ERS	იაპონია	1992	L	18
SIR-C	აშშ	1994	L	–
X-SAR	გერმანია/იტალია	1994	C/X	15–25
Radarsat-1/2	კანადა	1995/2007	C	10–100/3–100
SRTM	აშშ/გერმანია/იტალია	2000	C/X	90/30
ENVISAT	ევროპა	2002	C	30, 150, 1000
ALOS	იაპონია	2006	L	7–100
TerraSAR-X	გერმანია	2007	X	1–16
TanDEM-X	გერმანია	2009	X	1–16
COSMOS-SkyMed	იტალია	2009	X	1–100

როგორც ჩანს, მსგავსი ტიპის ამოცანების გადასაწყვეტად საბჭოთა კავშირი აგრეთვე ახორციელებდა „კოსმოსი“-ს სერიის თანამგზავრების გაშვებას. ასე მაგალითად, კოსმოსიდან ყინულის დაზვერვისას აუცილებელია ზღვის ყინულის საზღვრების დადგენა, მისი ასაკობრივი გრადაციების ამოცნობა, ყინულის ზედაპირზე არხების და ღიობების აღმოჩენა, საფარის მცინვარების საზღვრების აღმოჩენა და დადგენა. რადიოფიზიკურ საშუალებებს, უპირველეს ყოვლისა, გვერდითი სკანირების რადარებს და მიკროტალღურ რადიომეტრებს, აქვთ მნიშვნელოვანი უპირატესობა ამ პრობლემების გადაჭრაში. თანამგზავრებზე დაყენებული ამ საშუალებების საშუალებით შესაძლებელია ინფორმაციის მიღება დღე და ღამე, ნებისმიერ ამინდის პირობებში, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია პოლარული რეგიონებისთვის. გარდა ამისა, რადარი სხვა რადიოფიზიკური საშუალებებისგან განსხვავდება მაღალი გარჩევადობით. აქტუალურია თანამგზავრული რადიოფიზიკური

კომპლექსების შემადგენლობისა და ძირითადი პარამეტრების ოპტიმიზაციის საკითხები. პირველი მონაცემები არქტიკული ყინულის შესახებ კოსმოსიდან 3 სანტიმეტრიანი ტალღის დიაპაზონში იქნა მიღებული Cosmos-1500 თანამგზავრის გვერდითი სკანირების რადარის გამოყენებით. კოსმოსიდან ყინულის დაზვერვის პრობლემების გადასაჭრელად, მიზანშეწონილია გამოიყენოთ უფრო მაღალი პოტენციალის მქონე გვერდითი სკანირების რადარი მიკროტალღურ რადიომეტრთან ერთად, რომელსაც ვერტიკალური პოლარიზაციის მქონე 0.8 და დაახლოებით 3 სმ არხები აქვს [9].

ინტერფერომეტრიული SAR

დაბრუნებული სიგნალის ამპლიტუდის გარდა, SAR ასევე იყენებს დაბრუნებული სიგნალების ფაზას სამიზნის შესახებ ინფორმაციის მოსაპოვებლად. ინტერფერომეტრიული SAR (InSAR) მეთოდი ეფუძნება სულ მცირე ორი რთული SAR გამოსახულების ფაზურ განსხვავებას, რომლებიც მიიღება სხვადასხვა ორბიტალური პოზიციიდან (ერთჯერადი გადასასვლელი) ან სხვადასხვა დროს (განმეორებითი გადასასვლელი). SAR ინტერფერომეტრია იყენებს ფაზის განსხვავებას ორ დაბრუნებულ სიგნალს შორის, რათა გაზომოს მცირე ცვლილებები დედამიწის ზედაპირზე. ერთგადასასვლელი ინტერფერომეტრით, სადაც რადარი აღჭურვილია ორი ანტენით, ადგილზე ერთი და იგივე წერტილი შეიძლება გაიზომოს ერთდროულად ოდნავ განსხვავებული კუთხით, რის შედეგადაც მიიღება სტერეო გამოსახულებები. ეს სურათები შეიძლება გამოყენებულ იქნას წერტილის შესახებ უაღრესად ზუსტი ტოპოგრაფიული ინფორმაციის მისაღებად და სიმაღლის რუკების მოსამზადებლად. InSAR შესანიშნავია მყინვარის ზედაპირის სისქის ცვლილებების გამოსათვლელად დიდი სივრცითი და დროითი მასშტაბებით. SRTM არის ერთი გავლის ინტერფერომეტრიის საუკეთესო მაგალითი, რომელიც გამოიყენებოდა მაღალი სიზუსტის გლობალური სიმაღლის მატრიცის შესაქმნელად. ERS 1 და 2 ტანდემის მონაცემები (1996/1997) იყო პირველი განმეორებითი გავლის SAR მონაცემები ინტერფერომეტრიული ლაზირების შესაძლებლობით. TerraSAR-X დანამატი ციფრული სიმაღლის გაზომვისთვის (TanDEM-X) არის InSAR ოჯახის ახალი წევრი SRTM-თან ერთად, რომელიც შედგება ორი თანამგზავრისგან TerraSAR-X და TanDEM-X. TanDEM-X (TDX) დაიწყო 2010 წლის ივნისში, როგორც TerraSAR-X-ის გაფართოება მჭიდრო ფორმირებით, რომელიც უზრუნველყოფს სტერეოსკოპულ გამოსახულებას. ამ მისიის მთავარი მიზანი იყო ინტერფერომეტრიული მონაცემების შეგროვება მთელს მსოფლიოში, რათა მიეღო ერთიანი, მაღალი გარჩევადობის გლობალური DEM, შედარებით დიდი ვერტიკალური სიზუსტით, 2 მ-ზე უკეთესი, ჰორიზონტალური გარჩევადობით 12 მ [10]. ამ ერთჯერად ბისტატიკურ მისიას აქვს მაღალი ხარისხის და ზუსტი DEM-ის წარმოქმნის უპირატესობა, განმეორებითი მისიის შედეგად მიღებული მონაცემების დაბალი თანმიმდევრულობის და შეზღუდული სიზუსტის მიუხედავად. DEM გენერაცია InSAR პროცედურიდან მოიცავს ინტერფერომეტრიის გენერირებას, ფაზის ამოხსნას, მრავალჯერად დათვალიერებას, ხელახლა გამარტივებას, ფაზა-სიმაღლეზე გადაქცევას და გეოკოდირებას [11]. ინტერფეროგრამა წარმოიქმნება ორი ანტენიდან დაბრუნებულ სიგნალებს შორის ფაზის სხვაობიდან. ინტერფეროგრამის ფაზაზე გავლენას ახდენს გეომეტრიული ეფექტები და სამიზნე ტოპოგრაფია, იმ პირობით, რომ არ არის სამიზნე მოძრაობა [12]. გეომეტრიული ეფექტების აღმოფხვრით შესაძლებელია სამიზნე სიმაღლის მიღება და DEM-ის წარმოქმნა [12].



InSAR-ის მიღების გეომეტრიის პრინციპი (ფიგურა [1] – დან)

InSAR-ის მიერ გენერირებული DEM არის ძალიან ზუსტი და შეიძლება გამოყენებულ იქნას მცინვარის სიმაღლის ცვლილებების დასადგენად სხვა ტოპოგრაფიულ პარამეტრებთან ერთად. სიმაღლის ცვლილება შემდეგ შეიძლება გამოყენებულ იქნას მცინვარების მასის ბალანსის გამოსათვლელად. ERS1/2 ტანდემის მისია ფართოდ გამოიყენებოდა სხვადასხვა ობიექტების მოძრაობის დასადგენად [13]. ნახაზი გვიჩვენებს რადარის ინტერფერომეტრიის მონაცემების შექმნის გეომეტრიას.

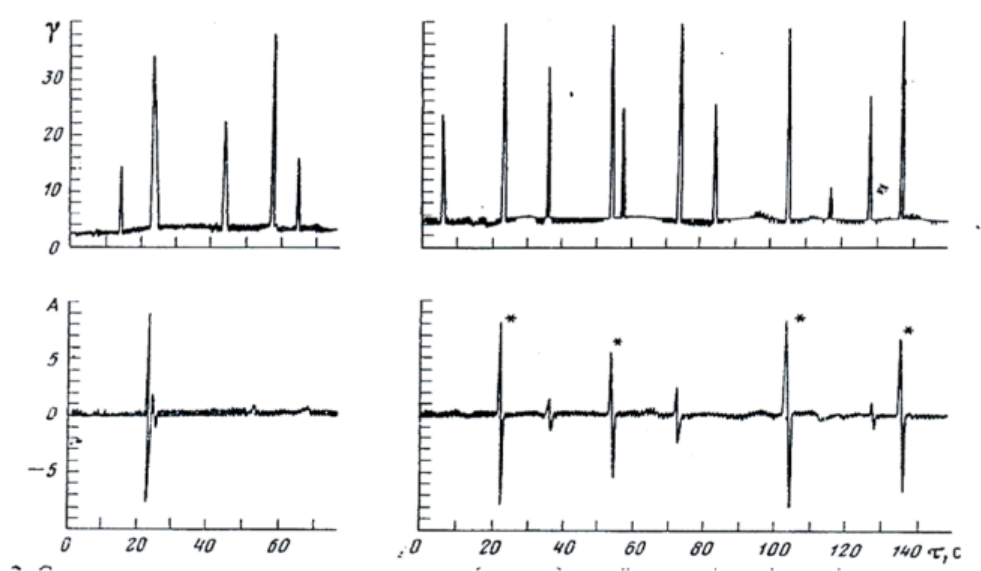
SAR1 და SAR2 დაფრინავენ პარალელური ტრაექტორიების გასწვრივ და სკანირებენ რელიეფს ერთდროულად რამდენიმე სხვადასხვა მიმართულებით (ერთგასასვლელი ინტერფერომეტრია) [14]. InSAR მეთოდი დაფუძნებულია SAR1-დან და SAR2-დან დაბრუნებული სიგნალების ფაზაზე. InSAR ტექნოლოგიის გამოყენება შესაძლებელია მაღალი სიზუსტით ტოპოგრაფიული ინფორმაციის მისაღებად და სამიზნე გადაადგილებისთვის.

ამჟამად ფართოდ გამოიყენება კრიოსფერული წარმონაქმნების კვლევის მრავალფეროვანი დისტანციური მეთოდები სხვადასხვა დიაპაზონებში: ხილულში [15], ინფრაწითელში [16], რადიო- [17] და მიკროტალღურში [18, 19, 20]. მთიან ადგილებში გეოლოგიურ საშიშროებების შესახებ ადრეული გაფრთხილების სისტემების და რისკების შეფასების კომპლექსური მეთოდების მიმოხილვა მოცემულია ნაშრომში [21] და შეიცავს გეოლოგიური საშიშროებების შესწავლას, ისეთების როგორც 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 [22, 23] აღმოაჩინა, რომ წყლის კრისტალიზაციის დროს გარკვეულ პირობებში მაღალი ელექტრული პოტენციალის (10^2 ვოლტის რიგისა) გაჩენა და ფაზების გაყოფის საზღვარზე თხელ გადასვლელ 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 სავსე კვლევები სხვადასხვა ბუნებრივად და ხელოვნურად გამოწვეული დინამიური პროცესების დროს, ყინულის რადიოგამოსხივების კვლევა. იყო დარეგისტრირებული ელექტრომაგნიტური და სეისმური სიგნალები 0,1-30 ჰც სიხშირის უბანში. ელექტრომაგნიტური სიგნალები წინ უსწრებდა სეისმურ სიგნალს და იყო გამოწვეული, როგორც ჩანს, მყინვარის შეკუმშვით და შემდგომი წანაცვლებით. ამ გარემოებამ მისცა ავტორებს [24] საშუალება ჩათვალათ 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 ერთ-ერთი თანაავტორი ვ. პსალომშიკოვი გახდა შემდგომ ზვავების ჩამოსვლის და აგრეთვე მთის მყინვარების ცოცვის მოკლევადიანი პროგნოზის შემქმნელი [25]. 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 რადიოდიამაზონში ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ემისიის წყაროებია.



ამ სურათზე ნაჩვენებია ელექტრომაგნიტური (ზედა) და სეისმური (ქვედა) სიგნალების სინქრონული ჩანაწერი, რომელიც დაფიქსირდა მყინვარის ბუნებრივი და ხელოვნური რყევის დროს 1977 წლის 17 აგვისტოს. ელექტრომაგნიტური და სეისმური სიგნალების გატარების ზოლია 0,1 – 30 ჰც [24].

ზვავი, რომელიც ჩამოსასვლელად ემზადება ან მყინვარე, რომელიც მოცოცავს, ასხივებენ აკუსტიკურ სიგნალს სპექტრის საკმაოდ განიერ დიაპაზონში – ინფრაბერებიდან ულტრაბერებამდე. აშშ-სა და შვეიცარიაში ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ აკუსტიკური ემისია მკვეთრად მატულობს რამოდენიმე საათით ან დღე-ღამით ადრე თოვლის

ზვავის ჩამოსვლამდე ან მყინვარის წანაცვლებამდე. ასე მაგალითად, შვეიცარიაში, მთა ეიგერზე დაკიდებული მყინვარიდან მოწყვეტილი ყინულის დიდი მასის ჩამოშლა ($\approx 10\ 000\ \text{მ}^3$) იყო დარეგისტრირებული მონიტორინგის ინფრაბგერითი სისტემის დახმარებით [26], რამაც მისცა საშუალება შეეფასებინათ ჩამოვარდნილი ყინულის მასის მოცულობა, ტრაექტორია და სიჩქარე.

დაკვირვებებმა ინფრაბგერით გამოსხივებაზე შესაძლოა წარმოგვიდგინონ მყინვარების ჩამოშლის და ყინულოვანი ზვავების მოცულობის შესახებ რაოდენობრივი 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 [27]. ყინული მრავალ უნიკალურ ფიზიკურ თვისებებს ფლობს. მას გააჩნია თორმეტი სტრუქტურული მოდიფიკაცია, რომლებიც წნევის და ტემპერატურის ცვლილებისას პოლიმორფული გარდაქმნების ხარჯზე გარდაიქმნებიან. ზოგიერთი მოვლენები, რომლებიც დაკავშირებულია ყინულის დინამიკასთან, ყინულის ფაზის მონაწილეობით ფაზური გარდაქმნების მიმდინარეობისას იწვევენ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გენერირებას სიხშირეების ფართო დიაპაზონში. მყინვარების და თოვლის ზვავების 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 კვლევების ავტორები რადიოგამოსხივების იმპულსებს აკავშირებდნენ ძირითადად იმ აირის განმუხტვების პროცესებთან, რომელიც ხდება ბზარების ნაპირებს შორის, რომლებიც, როგორც ვარაუდობდნენ, კრისტალიზაციის ფრონტის მახლობლად მყარ ფაზაში ჩნდებიან. [28] ნაშრომში 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, 9 ფართოზოლიანი (გატარების ზოლი – $10^{-1} - 10^7$ ჰც) გამაძლიერებლის, ანალოგური 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 შეჯახებებთან, გვერდითი განშტოებების შექმნასთან და ა.შ. და მეოცემულ სიტბურ პირობებში კრისტალიზაციის დინამიკის არასტაციონარულ ხასიათს ასახავენ, მაშინ როდესაც II ტიპის იმ-

პულსები 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 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.

თანამედროვე განმყინვარება მთის რაიონებში შესამჩნევად რეაგირებს ამჟამად მიმდინარე კლიმატის დათბობაზე. ციმბირის მცირე მყინვარები უფრო ოპერატიულად რეაგირებენ კლიმატის ცვლილებებზე და ამიტომ თავისებურ ინდიკატორებად შეიძლება ჩაითვალოს. ადრე მყინვარები ძირითადად ქვეითი საშუალებით შეისწავლებოდა, ხოლო წინა საუკუნის შუა წლებიდან უკვე დისტანციური ზონდირების (აეროფოტოგადაღებები და კოსმოგადაღებები) მონაცემების გამოყენებით.

2018 წელს პირველად ჩატარდა რადეს მყინვარის (აღმოსავლეთი საიანი) გეორადარული პროფილირება, რამაც არა მარტო დააზუსტა მისი ზედაპირული მახასიათებლები, არამედ მისცა საშუალება შეეფასებინადა ყინულის სისქე და აგრეთვე მისი შიდა სტრუქტურა (ფირნის ფენა, ყინული, კალაპოტი). გეორადარული პროფილირება [29] 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. დადგინდა ამ მყინვარის ყინულის მოცულობა – 0,003 კმ³ და ძირითადი ყინულის სხეულის მაქსიმალური სისქე – 42 მეტრი. 112 წლის დაკვირვების შედეგად დადგინდა, რომ მყინვარის ფართობი შემცირდა 0,43-დან 0,09 კმ²-დე, ხოლო მისი სისქე 30 მეტრით. ბოლო 68 წლის განმავლობაში მყინვარ რადეს ღია ძირითადი ნაწილის ფართობი შემცირდა 0,3-დან 0,06 კმ²-დე.

ნამუშევარში [30] 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 ვიდეომპულსური 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. რადაროგრაფებზე მკაფიოდ გამოიყოფა ანარეკლები კალაპოტიდან, რომლებიც შემდგომში ყინულის სისქის რუკების და ჭრილების ასაგებათ გამოიყენება.

პოლარული აკვატორიების გემის ბორტიდან ან საფრენ აპარატიდან დისტანციური ზონდირებისათვის ზოგადი ფიზიკის ინსტიტუტში შექმნილია კომპაქტური ლიდარი [31]. სისტემა კომპაქტურია (40×30×20 სმ), აქვს მცირე წონა (20 კგ) და 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 [32]. ისინი დაფუძნებულია გაბნეული მიკროტალღოვანი გამოსხივების ინტენსიობის მომატების განსაზღვრაზე, განსაკუთრებით 13–14 გჰც სიხშირის სპექტრულ ინტერვალში. ეფექტი განისაზღვრება პლასტიკური დინების ავტოტალღების სიგრძით, ერთი სანტიმეტრის რიგის სახასიათო მნიშვნელობით. ავტოტალღები ქმნიან ყინულში ქაოტურად განაწილებულ, მექანიკური დამაბულობის მოქმედებით დროში ცვალებად დიფრაქციული ბადეების ნაკრებებს.

ყინულის საფარის რადარული კოსმოსურათების ანალიზის დროს იყო აღმოჩენილი უკუგაბნევის კოეფიციენტის მომატებული მნიშვნელობა. პლასტიკური დინების ავტოტალღების გამომჟღავნების 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 ჩვენ ვარაუდით, იმისათვის, რომ მომავალში მომზადებულები შევხვდეთ ისეთ ბუნებრივ კატასტროფებს, როგორც მოხდა შოვში და აგრეთვე დევდორაკის ხეობა-

ში [33], სადაც ყაზბეგის ვულკანული ცენტრის ქსელმა 2014 წლის 17 მაისს დააფიქსირა ყინულის და ქვების მასის ჩამოშლა დევდორაკის მყინვარის რაიონში და წარმოშობილი ქვაყინულის ზვავის მოძრაობა [34], ხოლო ავტორებმა [35], Landsat, ASTER, SENTINEL, PLIADES-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 წაცოცებების პროგნოზირების მოკლევადიან მეთოდებს [25], და რაც უფრო ყოვლისმომცველია – პლასტიკური დეფორმაციის დროს ყინულის სტრუქტურების მდგომარეობის თანამგზავრებიდან რადიოლოკაციურ რეგისტრაციას [32].

ლიტერატურა – References – Литература

- [1] Singh S., Rathore B., Bahuguna I., Ramnathan A., Ajai. Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region, *Current Science* Vol. 103, No. 1 (10 July 2012), pp. 68-73 (6 pages) <https://www.jstor.org/stable/24084943>
- [2] Kordzakhia G., Shengelia L., Tvauri G., Dzadzamia M. The Climate Change Impact on the Glaciers of Georgia. *RS Global Sp. z O.O, Scientific Educational Center Warsaw, Poland. Word Science, T. 1. No. 4 (44). Pp.29-32*
- [3] 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)
- [4] Holobacă I-H, Tielidze L., Ivan K., Elizbarashvili M, Alexe M, Germain D., Petrescu SH., Pop OT., 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>
- [5] Chikhladze V., Varamashvili N. Some Modern Methods For Remote Sensing Of Mountain Glaciers. *International Scientific Conference "Geophysical Processes in the Earth and its Envelopes" Proceedings, Tbilisi, Georgia, November 16-17, 2023*
- [6] Pandey P., Ramanathan A., Venkataraman G. Remote Sensing of Mountain Glaciers and Related Hazards. *Open Access Peer-Reviewed Chapter. In. Intech Open Limited. 5 Princes Gate Court, London, SW7 2QJ, 08 June 2016. DOI: 10.5772/61917*
- [7] Gareth R.W., Pellikka P. Principles of remote sensing. *Remote Sensing of Glaciers*, Editors: Pellikka P and Rees G, CRC Press, Boca Raton, Fla, 2010, pp. 1–20.
- [8] Rignot E, Echelmeyer K, Krabill W. Penetration depth of interferometric synthetic-aperture radar signals in snow and ice. *Geophysical Research Letters*, 28(18), 2001, pp. 3501–3504.
- [9] Drapkin M., Kurevleva T., Loschilov V. Assessing the information content of satellite radiophysical complex data when sounding Arctic ice. *Proceedings of GosNITSIPR*, issue 26, 1986, pp. 48-55.
- [10] Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Werner M., Younis M., Zink M. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 2007, pp. 3317–3341.
- [11] Erasmi S., Rosenbauer R., Buchbach R., Busche T., Rutishauser S. Evaluating the quality and accuracy of TanDEM-X digital elevation models at archaeological sites in the Cilician Plain, Turkey. *Remote Sensing*, 6, 2014, pp. 9475–9493, doi:10.3390/rs6109475.
- [12] König M. Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Reviews of Geophysics*, 39 (1), 2001, pp. 1–27.
- [13] Kumar V., Venkataraman G., Rao Y.S. SAR interferometry and speckle tracking approach for glacier velocity estimation using ERS-1/2 and TerraSAR-X spotlight high resolution data. *Geoscience and*

- Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009 (Volume:5), Cape Town, 2009, pp. 332–335.
- [14] Balmer R., Hartle P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, 1998, R1–R54.
- [15] 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)
- [16] Lo Vecchio A., Lannutti E., Lenzano M., Mikkan R., Vacafior P., Lenzano L. MODIS Image-derived ice surface temperature assessment in the Southern Patagonian Icefield. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. V. 43, Iss. 6, 2019, pp. 754–776. DOI: 10.1177/0309133319851022.
- [17] 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)
- [18] 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);
- [19] 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);
- [20] 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
- [21] 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>
- [22] Kachurin L., Bekryaev V., Psalomshchikov V., DAN, vol. 174, No. 5, 1122, 1967, (in Russian).
- [23] Kachurin L., Grigorov N., ZhFKh, vol. 51, No. 11, 2864, 1977, (in Russian)
- [24] Kachurin L., Grigorov N., Kuzin Yu., Psalomshchikov V., Stepanyuk I. Electromagnetic radiation of snow and ice during dynamic processes. *Dokl. USSR Academy of Sciences*, volume 248, number 3, 1979, 583–585. UDC 551.322 GEOPHYSICS (in Russian)
- [25] Yablokov M. <https://ours-nature.ru/b/book/17/page/5-lavini/159-lavini-podayut-signal> Avalanches give a signal (in Russian).
- [26] 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>
- [27] Stepanyuk I., Smirnov V. *Methods for measuring the characteristics of the dynamics of the canopy cover*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, (in Russian)
- [28] Shibkov A., Zheltov M., Korolev A. Growing ice is a source of electromagnetic radiation. UDC 539.37:537.221. *Bulletin of TSU*, vol. 6, issue 2, 2001, (in Russian)
- [29] 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)
- [30] 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)
- [31] 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* Volume 69. UDC 535.243.3, 535.8, 504.7, 52.08, 556.082 (in Russian)
- [32] 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)
- [33] Chernomorets S., Savernyuk E., Petrakov D., Dokukin M., Gotsiridze G., Gavardashvili G., Drobyshev 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)

- [34] Svalova V., Zaalishvili V., Ganapathy G., Nikolaev A., Melkov D. Landslide risk in mountain areas. *Geology of the South of Russia*. (in Russ.). 10 (2), 2019, 110-127.
- [35] Tielidze L., Kumladze R., Wheate R., Gamkrelidze M. The Devdoraki Glacier catastrophes, Georgian Caucasus. *Hungarian Geographical Bulletin* 68, 2019 (1), pp. 21–35. DOI: 10.15201/hungeobull.68.1.2

მთის მყინვარები და დისტანციური ზონდირება

ჩიხლაძე ვ., ვარამაშვილი ნ.

რეზიუმე

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

საკვანძო სიტყვები: მყინვარები, მყინვარების დნობა, ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, დისტანციური ზონდირება, ადრეული გაფრთხილება

MOUNTAIN GLACIERS AND REMOTE SENSING

Chikhladze V., Varamashvili N.

Abstract

The paper presents a brief review of modern methods of remote sensing of mountain glaciers. Prospects of using some of them for early warning of glacier collapse in Georgia are discussed. The facts of the reduction of glaciers are given.

Key words: glaciers, melting glaciers, electromagnetic radiation, remote sensing, early warning.

ГОРНЫЕ ЛЕДНИКИ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Чихладзе В., Варамашвили Н.

Реферат

Представлен краткий обзор современных методов дистанционного зондирования горных ледников. Рассмотрен вопрос применения некоторых из них в Грузии для раннего предупреждения в случае коллапса ледников. Приведены факты сокращения некоторых из них

Ключевые слова: ледники, таяние ледников, электромагнитное излучение, дистанционное зондирование, раннее предупреждение