

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

დავით სვანაძე

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
გეოგრაფიის დეპარტამენტი

„მყინვარების სივრცე-დროითი ფლუქტუაციების ანალიზი მცირე
გამყინვარების შემდგომ კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე
გეოინფორმაციული და დისტანციური ზონდირების მეთოდების
გამოყენებით“

გეოგრაფიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი
დისერტაცია

სადოქტორო პროგრამის ხელმძღვანელი:
თსუ პროფესორი

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი

დავით კერესელიძე

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:
თსუ პროფესორი

გეოგრაფიის მეცნიერებათა დოქტორი

ნოდარ ელიზბარაშვილი

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი

დავით კერესელიძე

Ivane Javakishvili Tbilisi State University
David Svanadze

Faculty of exact and natural sciences
Department of Geography

**Spatial-temporal Analysis of Glacier Fluctuations
South Slope of the Caucasus Using Remote sensing and GIS Methodology**

PhD in Geography

Doctoral program supervisor (coordinator):

Scientific supervisor: Professor, Doctor of
Science

David Kereselidze

Scientific supervisors: Professor, Doctor of
Science

Nodar Elizbarashvili

Professor Doctor of Science

David Kereselidze

Tbilisi

2019

სარჩევი

შესავალი.....	10
თემის აქტუალობა.....	12
კვლევის მიზანი და ამოცანები.....	16
სამეცნიერო სიახლე და პრაქტიკული მნიშვნელობა.....	17
კვლევის მეთოდოლოგია.....	18
ნაშრომის სტრუქტურა.....	21
1. სამეცნიერო, თეორიული და თემატური დებულებები.....	23
1.1. მთების მდგრად განვითარებასთან დაკავშირებული პრობლემები.....	23
1.2. გამყინვარების გეოგრაფიული თავისებურებანი, კრიოსფეროს ცვალებადობა და მნიშვნელობა.....	25
1.3. მეოთხეული პერიოდი, პლეისტოცენი, ჰოლოცენი, თანამედროვე გამყინვარება.....	28
1.4. მცირე გამყინვარების ეპოქა დედამიწის სითბური ბალანსის და გამყინვარების დინამიკა.....	32
1.5. კრიოსფეროს ცვალებადობა მისი გავლენა გეოგრაფიულ გარემოზე გლობალურ და რეგიონალურ ჭრილში.....	35
1.6. კავკასიონის მყინვარების შესწავლის ისტორია, არსებული კვლევები და მასალები.....	37
2. კავკასიონის მყინვარების არსებობის (საქართველოს ფარგლებში) გეოგრაფიული თავისებურებანი.....	41
2.1. რელიეფი და გამყინვარების ზოგადი ხასიათი.....	41
2.2. კლიმატური ფაქტორები.....	48
2.3. კლიმატის თანამედროვე ცვლილება და მოსალოდნელი სცენარები 2100 წლისათვის.....	60
2.4. კავკასიონის სამხრეთი ფერდობის კლიმატი, მისი განვითარების სცენარი 2100 წლისათვის.....	64
3. მყინვარების ფლუქტუაციების ანალიზი.....	66
3.1. საქართველოს მყინვარების გეოსაინფორმაციო სისტემა.....	66
3.2. მყინვარებზე დაკვირვება უპილოტო საფრენი აპარატით.....	75
3.3. მცირე გამყინვარების და მისი შემდგომი პერიოდის მყინვარების დინამიკა	86
3.4. მაღალმთიანი ლანდშაფტის (ტყის საფარის) დინამიკა პერიგლაციალურ ზონაში	96
დასკვნები.....	99
გამოყენებული ლიტერატურა.....	101

ცხრილების სია:

ცხრილი 1. ცენტრალური კავკასიონის ღერძული ზოლის მორფო მეტრია და თანამედროვე გამყინვარების გავრცელება (მონაცემები დამუშავებულია ავტორის მიერ, SRTM, უახლესი სატელიტური მონაცემები).....	44
ცხრილი 2. ფირნის ხაზის საშუალო სიმაღლე კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე	49
ცხრილი 3. ნივალურ-გლაციალური ზონის პარამეტრები და ამ ზონებში თანამედროვე გამყინვარების ხასიათი	51
ცხრილი 4. რადიაციული ბალანსის მნიშვნელობები სიმაღლის მიხედვით	54
ცხრილი 5. თოვლის საბურველის ხანგრძლივობა (დღეებში) (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981)	58
ცხრილი 6. საქართველოს თანამედროვე მყინვარების ზომები და მათი გავრცელება გეოგრაფიული არელების მიხედვით.....	69
ცხრილი 7. საქართველოს თანამედროვე მყინვარების რაოდენობები ზომების მიხედვით.....	69
ცხრილი 8. მყინვარ ლეხზირის ზედაპირზე ფერდობების ექსპოზიციების მიერ დაკავებული ფართობები და მათი პროცენტული განაწილება	73
ცხრილი 9. უპილოტო საფრენი აპარატით განხორციელებული აეროგადაღებების შედეგები	80
ცხრილი 10. მყინვარების ლაზოდას და ზოფხიტოს გასაშუალოებული ექსპოზიციების განაწილება.....	85
ცხრილი 11. კ. პოდოზერსკის კატალოგით იდენტიფიცირებული მყინვარების განაწილება მათი ზომების; რაოდენობების ზომების და დაკავებული ფართობის მიხედვით.....	91
ცხრილი 12. კ. პოდოზერსკის და თანამედროვე კატალოგის იდენტიფიცირებული მყინვარების ფართობების კორელაციური კავშირების შედარება მყინვარების გეოგრაფიული განაწილების და მორფოლოგიური ტიპების მიხედვით	92
ცხრილი 13. მცირე გამყინვარების პერიოდიდან 1820 წ. თანამედროვე პერიოდამდე 2015 წ. ნივალურ გლაციალური სისტემის დეგრადაცია	93
ცხრილი 14. 1960-2010 წ. მყინვარების დეგრადაცია და მათი გეოგრაფიული განაწილება.....	96
ცხრილი 15. პერიგლაციალურ ზონაში (მყინვარის მიერ განთავისუფლებული) მცენარეული საფარის დინამიკა მცირე გამყინვარების (\approx 1820 წ.) შემდგომ	97

ფიგურების სია:

ფიგურა 1. დედამიწის ტემპერატურის დინამიკა ბოლო 500 მლნ. წლის მანძილზე.....	27
ფიგურა 2. დედამიწაზე ბოლო 5 მლნ. წ. განმავლობაში ტემპერატურის მსვლელობა...29	
ფიგურა 3. უკანასკნელი 800 ათს. წლის განმავლობაში მიმდინარე კლიმატური ვარიაციები.....	30

ფიგურა 4. პლესტოცენის კლიმატის ცვლილება, გამყინვარების და დათბობის პერიოდების ციკლები 800 ათასი წლის მანძილზე.....	31
ფიგურა 5. უკანასკნელი გამყინვარების (WÜR M2 – LGM) მაქსიმალური პერიოდის მყინვარები კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე (ავტ. რ. გობეჯიშვილი)	31
ფიგურა 6. უკანასკნელი გამყინვარების მაქსიმალური პერიოდის (WÜR M2 – LGM) მყინვარების განაწილება მათი ფართობების მიხედვით კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე (ავტ. რ. გობეჯიშვილი);.....	32
ფიგურა 7. მცირე გამყინვარების პერიოდის კლიმატური ცვლილებები	34
ფიგურა 8. მცირე გამყინვარების პერიოდის მზის ლაქები	34
ფიგურა 9. ქვეფენილი ზედაპირის ალბედოს კოეფიციენტი ა) ოკეანის, ზღვების და სხვა წყლის ობიექტების ზედაპირი; ბ) სუფთა ყინული; გ) თოვლს-ყინულოვანი საფარი.....	35
ფიგურა 10. საკვლევის რეგიონის სქემატური რუკა.....	41
ფიგურა 11. თანამედროვე მყინვარების განაწილება დასავლეთ კავკასიონზე მათ მიერ დაკავებული ფართობის მიხედვით (რ. გობეჯიშვილის მონაცემების დაყრდნობით)	43
ფიგურა 12. სხვადასხვა ზომის მყინვარების მიერ დაკავებული ფართობები სვანეთის და რაჭის კავკასიონის მონაკვეთზე (შიდა წრე სვანეთის; გარე რაჭის მონაკვეთი)	45
ფიგურა 13. ნივალურ-გლაციალური ზონის გავრცელება კავკასიონზე.....	50
ფიგურა 14. წლის ცივი პერიოდის საშუალო თვიური ტემპერატურების მსვლელობა ზღვის დონიდან სიმაღლის (შ. ჯავახიშვილის) მიხედვით	56
ფიგურა 15. წლის ცივი (აკუმულაციის, ოქტომბერი-აპრილი) პერიოდისათვის ჰაერის ტემპერატურების საშუალო მნიშვნელობებისა და ადგილის სიმაღლის კავშირი (ჯავახიშვილი, საქართველოს ჰავის დახასიათება თვეების მიხედვით, 1988).....	56
ფიგურა 16. თოვლის საფარის ხანგრძლივობისა და ზღვის დონეზე სიმაღლის დამოკიდებულების მრუდი (X ღერძზე მოცემულია სიმაღლე ზღვის დონეზე; Y ღერძზე მდგრადი თოვლის საბურველის ხანგრძლივობა წლის განმავლობაში დღეების მიხედვით; ა) არსებული მონაცემები; ბ) მოდელირებული; (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981).....	59
ფიგურა 17. გლობალური ტემპერატურის ტრენტი პრეინდუსტრიულ ხანასა და თანამედროვე პერიოდთან შედარებით (IPCC, 2018)	61
ფიგურა 18. ხმელეთის და ოკეანეების ზედაპირის ტემპერატურების ანომალიები (IPCC, 2018)	62
ფიგურა 19. დედამიწის ზედაპირის ტემპერატურის და ნალექების მოსალოდნელი ცვლილება 2100 წლისათვის (IPCC, 2018)	63
ფიგურა 20. მეტეოროლოგიური სადგურების განლაგება საშუალო და მაღალმთიან ზოლში	64
ფიგურა 21. საქართველოს მყინვარების გეოინფორმაციული სისტემის სტრუქტურა..	67
ფიგურა 22. მყინვარების მონაცემთა ბაზის სტრუქტურა	68
ფიგურა 23. საქართველოს მყინვარების გეოსაინფორმაციო სისტემის ფრაგმენტი.....	70
ფიგურა 24. ფერდობების ექსპოზიციების განაწილება აზიმუტის მხარეების მიმართულებით.....	72

ფიგურა 25. ფერდობების ექსპოზიციების განაწილება მცინვარ ლეხზირის შემთხვევაში	72
ფიგურა 26. ა) მცინვარი ლეხზირის ჩრდილოეთი ნაკადი (იგი უკვე მოწყდა ძირითად მცინვარს); მცინვარის დასავლეთ ნაკადი; გ) აღმოსავლეთ ნაკადი	75
ფიგურა 27. უპილოტო საფრენი აპარატის გამოყენება საველე პირობებში; ფრენის ტრაექტორიები: ა) ადიში; ბ) შხარა; გ) ხალდე; დ) ზოფხიტო და ლაბოდა	79
ფიგურა 28. უპილოტო საფრენი აპარატის სახეობები ა) დრონი როტორებით; ბ) დრონი ფიქსირებული ფრთებით	79
ფიგურა 29. მცინვარი ადიში და მცირე გამცინვარების პერიოდის მორენა	81
ფიგურა 30. მცინვარ ზოფხიტოს ორთოფოტო გამოსახულება	83
ფიგურა 31. მცინვარ ზოფხიტოს ხეობის ციფრული 3D მოდელი, ა) მცინვარ ლაბოდას ენა, ბ) მცინვარ ზოფხიტოს ენა	84
ფიგურა 32. მცინვარ ზოფხიტოს ხეობის ზედაპირის ციფრული მოდელი, ა) ფერდობების ექსპოზიციების მოდელი, ბ) ჰორიზონტალები 5 მ. ინტერვალით, გ) ე.წ. „წერტილოვანი ღრუბელი“, დ) რელიეფის დაჩრდილული მოდელი, ე) ზედაპირის დახრილობის მოდელი ვ) რელიეფის ციფრული მოდელი	85
ფიგურა 33. მცირე გამცინვარების პერიოდის მორენული მწკრივები ა) ჭალაათი; ბ) ადიში	87
ფიგურა 34. რუსეთის იმპერიის 1890-1910 წწ. პერიოდის და თანამედროვე პერიოდის რუკების სიმალეების მონაცემების კავშირი	88
ფიგურა 35. მცინვარების დინამიკის ანალიზისას გამოყენებული მასალები	89
ფიგურა 36. საქართველოს სამი პერიოდის (1820 წ; 1960 წ; 2015 წ;) იდენტიფიცირებული მცინვარები გეოსაინფორმაციო სისტემებში (ფრაგმენტი) ..	90
ფიგურა 37. კ. პოდოზერსკის კატალოგთან იდენტიფიცირებული მცინვარების გეოგრაფიული განაწილება	91
ფიგურა 38. კ. პოდოზერსკის კატალოგის (1911 წ.) და 1960-იანი წლების ტოპოგრაფიული რუკებზე ასახული მცინვარების ფართობების კავშირი (ქედის მთელს პერიმეტრისათვის)	94
ფიგურა 39. მცინვარი ლეხზირის უკანდახევა და ზედაპირის დეგრადაცია	95
ფიგურა 40. გამცინვარების მიერ დაკავებული ფართობის ცვლილება ვერტიკალურ ჭრილში 1960-2011 წწ.	95
ფიგურა 41. პერიგლაციალურ ზონის მცენარეული საფარი და მათი გავრცელება	98

აბსტრაქტი

კაცობრიობის განვითარების დასაწყისიდან ადამიანის არსებობის, გადარჩენისა და განვითარების უმთავრესი განმაპირობებელი ის გეოგრაფიული გარემოა, რომელშიც მას უწევს არსებობა. ბუნებრივი გარემოს ჩამოყალიბებაზე ფუნდამენტური გავლენა აქვს დედამიწის სითბურ ბალანსს, კლიმატურ ზონებს. კლიმატის პარამეტრების დროსა და სივრცეში ციკლურ ცვალებადობას მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს ადამიანთა სოციალ-ეკონომიურ, დემოგრაფიულ განვითარებაზე. იგი განსაზღვრავს ხმელეთის თავისუფალი სივრცეების ათვისების შესაძლებლობას გლობალური მასშტაბით, გამყინვარების პერიოდისათვის მაღალი განედებიდან დაბალი განედებისაკენ, ვერტიკალურ ჭრილში კი მაღალმთიანი ტერიტორიებიდან უფრო დაბალი ადგილებისაკენ მიგრაციას. გამყინვარებათ შორის დათბობის პერიოდებში კი პირიქით, თავისუფლდება მეტი ტერიტორია, შესაბამისად ჩნდება ახალი შესაძლებლობები, ხმელეთის მეტ ტერიტორიაზე ფორმირდება უკეთესი საცხოვრებელი გარემო.

დედამიწის არსებობის ისტორიაში კლიმატის ძირეული ცვლილებები არაერთხელ მომხდარა და კვლავაც განმეორდება. უკანასკნელად მძლავრი გამყინვარების ფაზა პლეისტოცენური ეპოქის დასასრულს ≈ 12 ათასი წლის წინათ დამთავრდა. მის შემდგომ გეოლოგიურ ეპოქას ჰოლოცენი (ბერძ. holos - მთელი, მთლიანი და kainos - ახალი) ანუ გამყინვარების შემდგომი პერიოდი ეწოდა. ჰოლოცენის 2/3 ისტორიულ დროზე მოდის, როდესაც დედამიწამ, ოკეანეებმა კონტინენტებმა მიიღეს დაახლოებით იგივე მოხაზულობა როგორც დღესაა. ჩამოყალიბდა თანამედროვესთან მიახლოებული ბუნებრივი ზონები, კლიმატი, გეოგრაფიული გარსის სხვა კომპონენტები. ჰოლოცენში, გლობალური საშუალო ტემპერატურა ხასიათდება აღმავალი ტრენდით, რამაც განაპირობა კიდევ კაცობრიობის განვითარების ახალ საფეხურზე გადასვლა, მოსახლეობის დემოგრაფიული ზრდა, განსახლების არელების გაფართოება, დიდი გეოგრაფიული აღმოჩენები, არქიტექტურის, მეცნიერების, კულტურის, ხელოვნების განვითარება, რაც XX საუკუნეში სამეცნიერო ტექნიკური პროგრესით და კოსმოსის ათვისების საწყისი ეტაპით დაგვირგვინდა.

ჰოლოცენის პერიოდი არ ხასიათდებოდა ერთგვაროვანი აღმავალი ტემპერატურული რეჟიმით და იგი რყევებით მიმდინარეობდა. „მცირე გამყინვარების

ეპოქა“ არის აცივების ის პერიოდი, რომელსაც ადგილი XIV-XIX საუკუნეში ჰქონდა. ეს მართალია არ იყო დედამიწის ისტორიაში, არაერთხელ მომხდარი, კლასიკური გაგებით გამყინვარების მასშტაბის მოვლენა, მაგრამ მან მაინც დიდი როლი ითამაშა იმდროინდელი საზოგადოების განვითარებაში. „მცირე გამყინვარების პერიოდი“ შუა საუკუნეების ისტორიული ხანაა, რომელიც კლიმატის ცვლილებების პარალელურად, ხასიათდება მძიმე ისტორიული პერიპეტიებით, მოსავლიანობის შემცირებას თან ახლდა საკვების ნაკლებობა, შავი ჭირის და ქოლერის ეპიდემიები, ხშირი ომიანობა (Vries, 2014). წარსული კლიმატური ცვლილებების მიზეზების და მისგან გამოწვეული ცვლილებების გააზრება საკვანძო საკითხია, რომელიც გვეხმარება გავიაზროთ კაცობრიობის მდგრადი განვითარების სამომავლო კონტურები, რაც შესაძლოა კლიმატის ცვლილებების პარალელურად განვითარდეს ორივე მიმართულებით, აცივების ან დათბობის შემთხვევაში.

ნაშრომში განხილულია მცირე გამყინვარების გეოგრაფიული ასპექტები, თანამედროვე და პალეო გეოგრაფიული გარემოს ცვლილებები უკანასკნელი 200 წლის მანძილზე და ამ ცვლილებების კომპლექსური გეოგრაფიული ანალიზი, განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ხეობის ტიპის მყინვარების და გამყინვარების კერების დინამიკას და თანამედროვე ტექნოლოგიური საშუალებების გამოყენებით მათი შესწავლას.

ნაშრომის შესრულებისას, საქართველოს მაგალითზე, 2017-2018 წლებში, პირველად მყინვარების კვლევაში გამოყენებულია ახლო მანძილის დისტანციური ზონდირების მეთოდოლოგია, რაც უპილოტო საფრენი აპარატების გამოყენებით მყინვარების და მათი პერიგლაციალური ზონების აერო ფოტოგრაფირებას გულისხმობს. მონაცემების დამუშავებისას გამოყენებულია ფოტოგრამმეტრიული და გეოსაინფორმაციო (ArcGIS, Global mapper, Pix4D) პროგრამული უზრუნველყოფები. ნაშრომი ეფუძნება ჩემს მიერ 2005 წლიდან პერიოდულ დაკვირვებებს საქართველოს მყინვარებზე. საველე-სამეცნიერო ექსპედიციებს საქართველოს ხეობის ტიპის უმეტეს მყინვარებზე.

ნაშრომი განხორციელდა ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში, შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მიერ დაფინანსებული დოქტორანტურის საგანმანათლებლო პროგრამის საგრანტო კონკურსში გამარჯვებული PhD2016_77 გრანტის ფარგლებში.

Abstract

From the beginning of the mankind development the existence, survival and development of the human is mainly predetermined by the geographical environment, in which he/she has to exist. The Earth thermal balance, its climate zones have a fundamental impact on the natural environment formation. Spatial and temporal cyclic variability of climate parameters has a significant influence on the socioeconomic and demographic development of humans. It determines the possibilities of assimilation of free spaces of the firm land on a global scale, from upper to lower latitudes for glaciations period, and migration from high-mountain territories to lower places in the vertical section. On the contrary, in the warming periods between glaciations more territories are getting free, respectively new possibilities open, and the better living environment is formed on larger territories of the firm land.

Radical climate changes not just once have occurred in the history of the Earth existence and they will repeat again. Last time the great glaciations phase was ended ≈ 12 thousand years ago at the close of Pleistocene epoch. The subsequent geological epoch was called Holocene (in Greek: holos – complete, whole and kainos – new) or succeeding glaciations period. Two thirds of Holocene falls on the historical time, when the Earth, oceans and continents have taken approximately the same outlines, as of today. The natural zones, climate, and other components of the geographical envelope approached to the modern ones were formed. A global average temperature in the Holocene is characterized by ascending trend that exactly caused a transition of the mankind development on a new stage, demographic population growth, expansion of settling areas, great geographical discoveries, development of architecture, science, culture, art that was crowned with a scientific and technological advance and initial stages of space exploration in the XX century.

Holocene period was not distinguished by uniform ascending temperature regime and it proceeded with variations. “The Little Ice Age” is the cooling period that took place in XIV-XIX centuries. Though it was not the glaciation event of classic scale that not just once have been occurred in the Earth history, but it played anyway a big role in the development of that time society. “The Little Ice Age” is a historic period of the Middle Ages, which along with climate changes is characterized by heavy historical peripetias, when reduction of yields was

accompanied by food shortage, Black plague and cholera epidemics, frequent wars (Vries, 2014). Understanding of reasons of preceding climate changes and caused alterations is a key issue that assists us to comprehend the future outlines of sustainable development of the mankind that probably can develop in parallel with climate change in both directions, in case of cooling or warming.

Geographic aspects of the Little Ice Age, changes of contemporary and paleogeographic environment for the last 200 years are considered and integrated geographical analysis of these changes is made in the work. Special attention is paid to the dynamics of valley-type glaciers and glaciations focuses, and their study using up-to-date technological equipment.

In the course of work performance by the example of Georgia, in 2017-2018 for the first time the remote sensing methodology at close distances has been used for glaciers' study, that foresees aerial photography of glaciers and their periglacial zones using pilotless aerial vehicles. Photogrammetric and Geo-information (ArcGIS, Global mapper, Pix4D) program supports have been used for data processing. The work is based on the periodical observations carried out by us over glaciers starting from 2005 and scientific field expeditions to the majority of valley-type glaciers of Georgia.

The work was performed in the Ivane Javakhishvili Tbilisi State University within the frameworks of the grant PhD2016_77 winning the doctoral studies educational programme grant competition and funded by the Shota Rustaveli National Science Foundation.

წინასიტყვაობა

მინდა მადლიერება გამოვხატო ჩემი ხელმძღვანელების ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გეოგრაფიის დეპარტამენტის პროფესორების ნოდარ ელიზბარაშვილის და დავით კერესელიძის მიმართ ნაშრომის მომზადებაში დახმარებისა და ხელმძღვანელობისათვის.

განსაკუთრებით მინდა ავღნიშნო ჩემი, როგორც გეოგრაფის ჩამოყალიბებაში შეტანილი უზომო ღვაწლისათვის აწ გარდაცვლილი ჩემი მასწავლებლები რამინ გობეჯიშვილი და ალექსანდრე (სანდრო) ჯავახიშვილი. მათ ჩემზე მოახდინეს დაუვიწყარი შთაბეჭდილება როგორც თავისი საქმის მოყვარულებმა და პროფესიონალებმა. წარმოდგენილი დისერტაცია მათ ნათელ ხსოვნას ეძღვნება. ასევე მადლიერებით მინდა ავღნიშნო ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გეოგრაფიის დეპარტამენტის, გარემოს ეროვნული სააგენტოს ჰიდრომეტეოროლოგიის დეპარტამენტის, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის, თსუ მ. ნოდიას სახელობის გეოფიზიკის და ვახუშტი ბაგრატიონის გეოგრაფიის ინსტიტუტის თანამშრომლებისა და კოლეგების თანადგომა.

შესავალი

კრიოსფეროს გენეზისის პროცესი, გავრცელების არეალი, მასშტაბი, არსებობის ხანგრძლივობა და ფლუქტუაციები, დამოკიდებულია პლანეტარული მასშტაბის და დედამიწაზე არსებული გლობალური ან ლოკალური ფაქტორების ხანგრძლივ ურთიერთქმედებაზე, რომელთა შორის უმთავრესია - მზის ენერჯის ვარიაციები, დედამიწის ორბიტალური პარამეტრების ციკლური ბუნება; ატმოსფეროს ქიმიური შემადგენლობა; ქვეფენილი ზედაპირის ტიპი და მისი ალბედოს უნარი; რელიეფის ვერტიკალური გავრცელება, ოკეანეების და ხმელეთის ტერიტორიების განფენილობა და მათი პლანეტაზე გადანაწილება, ცინულოვანი საფარის განფენილობა სხვადასხვა განედებზე და მისი ხმელეთსა და წყლის ზედაპირებთან ურთიერთ თანაფარდობა მთელს პლანეტაზე. აღიშნული გლობალური ფაქტორების გავლენით ჩამოყალიბებული თოვლ-მყინვარული საფარი, გენეზისის პროცესშივე და ჩამოყალიბების დასრულების შემდგომაც, მასშტაბების პროპორციულად თავადაც ხდება კლიმატის გლობალური და რეგიონალური ცირკულაციის ერთ-ერთი განმსაზღვრელი ფაქტორი და ხანგრძლივი დროით ახდენს გავლენას მის ფორმირებაზე.

გამყინვარება და მათ შორის დათბობის პერიოდების მონაცვლეობა დედამიწაზე გლობალური მასშტაბის მოვლენაა და ძირეულად ცვლის გეოგრაფიულ გარემოს პლანეტაზე. პროცესის მასშტაბიდან გამომდინარე დღევანდელ გეოლოგიურ პერიოდს „ჰოლოცენს“ გამყინვარების შემდგომი პერიოდიც კი ეწოდება.

ამჟამად ცინულოვან საფარს დედამიწის დაახლოებით 10% ($16 \times 10^6 \text{ კმ}^2$) უჭირავს. ბოლო (LGM) გამყინვარების დროს ეს მაჩვენებელი თითქმის 3 ჯერ მეტი იყო (Paterson, 1994). საფარულ და მაღალმთიან გამყინვარებაზე ჯამში დედამიწაზე არსებული თხევადი წყლის საერთო მოცულობის $\approx 3\%$, ($36 \times 10^6 \text{ კმ}^3$) და მტკნარი წყლის მარაგის 75-80% მოდის. ცინულის მასის სრულად გადნობის შემთხვევაში მსოფლიო ოკეანის დონე 81 მეტრით აიწევს, საიდანაც 73 მ. ანტარქტიდის; 7.5 მ. გრენლანდიის 0.5 მ. დანარჩენ ცინულებზე მოდის (Oerlemans, 2001). რეგიონალური და ლოკალური მასშტაბით მყინვარები გარდაქმნის რელიეფს, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მისგან ჩამომდინარე მდინარეების შიდა წლიურ ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე, ხარჯსა და ჰიდროენერგეტიკულ პოტენციალზე, რეგიონის სასმელი და სასოფლო-სამეურნეო წყლით უზრუნველყოფაზე.

მყინვარები სწრაფად რეაგირებენ დედამიწის სითბური რეჟიმის ცვალებადობაზე და ამჟამად მიმდინარე კლიმატის გლობალური ცვლილებების მიმართ მაღალი მგრძობელობით გამოირჩევიან. უკანასკნელ ხანს მკვეთრად გაიზარდა სათბურის ეფექტის მქონე გაზების კონცენტრაცია ატმოსფეროში - 408 ppm¹ (<https://www.co2.earth/>) რასაც დამატებითი უარყოფითი გავლენა აქვს კრიოსფეროზე.

კლიმატის ცვლილების საერთაშორისო სამთავრობოთაშორისი კომისიის IPCC² უკანასკნელი კვლევები ადამიანის სამეურნეო საქმიანობის კვალდაკვალ პრეინდუსტრიულ და ინდუსტრიულ ხანას შორის გლობალური კლიმატის ცვლილებას უკვე ადასტურებს + 0.8-1.2°C დიაპაზონში და დამატებით პროგნოზირებს +1.5 °C-მდე მატებას 2030-2052 წლისათვის თუ არსებული ტემპით³ გაგრძელდა სათბური გაზების ემისიები ატმოსფეროში.

აღნიშნული პროცესი გეოგრაფიულ გარსში, ძირეული ცვლილებების გამომწვევია და ეხება ადამიანთა საცხოვრებელი გარემოს ისეთ ფუნდამენტურ მიმართულებებს, როგორცაა კაცობრიობის საკვებით უზრუნველყოფა, სასმელი წყლით უზრუნველყოფის პრობლემას მოწყვლად რეგიონებში, იმ ბუნებრივი კატასტროფების გახშირებას და მათი გეოგრაფიის გაფართოებას, რომლებიც კლიმატის ცვლილების მიმართ განსაკუთრებით სენსიტიურია (ქარიშხლები, სიციხის ტალღები, გვალვები, ტყის ხანძრები და სხვა), ოკეანის დონის აწევას და ხმელეთის დაბლობი ტერიტორიების ზღვის წყლით დაფარვას. შეუქცევადი კლიმატური ცვლილებები აუცილებლად გამოიწვევს გეოგრაფიული გარემოს გლობალური მასშტაბის გარდაქმნას. წარსული კლიმატური ვარიაციების შედეგად კრიოსფეროს გარსზე მომხდარი ფუნდამენტური ცვლილებების გააზრება მნიშვნელოვანია სამომავლოდ მდგრადი განვითარების საკითხების უკეთ გააზრებისა და კაცობრიობის განვითარების სამომავლო განვითარებისათვის.

კლიმატი განსაზღვრავს კაცობრიობის საცხოვრისის - გეოგრაფიული, ლანდშაფტური გარსის რაობას, ხანგრძლივად მოქმედებს მის ფორმირებაზე, მდგრადობაზე. განაპირობებს ადამიანთა სოციუმის ბუნებრივ გარემოსთან

¹ 2018 წლის დეკემბრის მონაცემი

² <http://www.ipcc.ch/>

³ ატმოსფეროში სათბური გაზების ემისიების ყოველწლიური დონე CO₂ ექვივალენტით 49 გტ/წ. შეადგენს

ადაპტაციის შესაძლებლობას, მის სამეურნეო საქმიანობას და გარკვეულწილად განსაზღვრავს კიდევაც მის ფსიქო ტიპებს. კაცობრიობის განვითარების პროცესში კლიმატის ვარიაციები ხშირად ხდებოდა. მის პარალელურად ადამიანები იცვლიდნენ საცხოვრებელ არეალებს ჰორიზონტალურ ან ვერტიკალურ ჭრილში უკეთესი გარემოს ძიებისას.

ჰოლოცენის განმავლობაში, მას შედეგ რაც დამთავრდა ბოლო სტადიალური გამყინვარება (LGM), კლიმატის ვარიაციებს არაერთხელ ჰქონდა ადგილი და იგი ყოველთვის ძირეულ გავლენას ახდენდა ადამიანთა სოციუმზე. უკანასკნელად მსგავს მოვლენას ადგილი ისტორიულ პერიოდში $\approx 1300-1850$ წწ. ჰქონდა იგი სამეცნიერო ლიტერატურაში დამკვიდრებული ტერმინის „მცირე გამყინვარების ეპოქა“⁴ სახელითა ცნობილი. მიუხედავად იმისა, რომ ეს არ იყო კლასიკური მასშტაბური გამყინვარების ციკლი, მან ადამიანთა სოციუმის განვითარებაში და მდგრადობაში დიდი ცვლილებები გამოიწვია, განსაკუთრებით ჩრდილო ნახევარსფეროს ევროპის, აზიის და ჩრდილოეთ ამერიკის კონტინენტებზე. მცირე გამყინვარების ორი უფრო ცივი ფაზიდან, მეორე $\approx 1645-1715$ წწ. პერიოდში, ევროპის ტერიტორიაზე საშუალო ტემპერატურა - 2°C -ზე მეტით დაბალი იყო დღევანდელთან შედარებით (Oosthoek, 2015).

თემის აქტუალობა

კრიოსფეროს მდგენელებზე, ნივალურ-გლაციალურ ზონასა და ცალკეულ მყინვარებზე დაკვირვება საინტერესო მეცნიერული ინფორმაციის წყაროა, რეგიონში მიმდინარე კლიმატური ცვლილებების შესახებ. თავად მყინვარების არსებობა ფასდაუდებელი ბუნებრივი რესურსია, რომელიც აგვირგვინებს უნიკალური ვერტიკალურ ლანდშაფტურ ზონალობას საქართველოს ტერიტორიაზე.

სამეცნიერო შესწავლის გარდა, მას გააჩნია მნიშვნელოვანი ღირებულება პრაქტიკული კუთხით, იქნება ეს ტურიზმის - სამთო სათხილამურო სახეობების, სამეცნიერო ტურიზმის განვითარების, ალპინიზმის, სათავგადასავლო ტურიზმის მხრივ. რეგიონის დაცულობის მხრივ - სამთო გადასასვლელების, საფეხმავლო, საცხენოსნო ან სხვა სატრანსპორტო საშუალებების გადაადგილების სირთულის

⁴ ტერმინი „მცირე გამყინვარების პერიოდი“ პირველად შემოგვთავაზა François E. Matthes. იგი წარმატებით ახორციელებდა ტოპოგრაფიულ გადაღებებს მყინვარულ აუზებში

მიხედვით, მდინარეთა წყლიანობის, ჩამონადენის სეზონური გადანაწილების, მათი ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალის თვალსაზრისით.

დადებითი ფაქტორების პარალელურად მყინვარების არსებობა თავის თავში შეიცავს ბუნებრივი საფრთხეების საკმაოდ სერიოზულ კომპონენტს, განსაკუთრებით მიმდინარე კლიმატის გლობალური ცვლილებების ფონზე.

მყინვარების დინამიკაზე დაკვირვება სამეცნიერო შესაძლებლობაა თვალყური მივადევნოთ კლიმატის ცვალებადობის რეგიონალურ და გლობალურ ტენდენციებს არა მხოლოდ თანამედროვე, არამედ წარსულ პერიოდებშიც. მათი ფირნის აუზებში დალექილი თოვლის საფარი, რომლიც კრისტალიზაციის პროცესში ყინულში გარდაიქმნება, ინახავს მოსვლის პერიოდისათვის ატმოსფეროში არსებული ძირითადი პარამეტრების შესახებ ღირებულ ინფორმაციას, ამდენად ყინულის შრეებზე დაკვირვებისას, შესაძლებელი ხდება წარსული კლიმატის ძირითადი პარამეტრების აღდგენა. მსგავსი ინფორმაცია ღირებულია, როგორც სამეცნიერო თეორიული კუთხით, ასევე კლიმატის ცვლილებების საადაპტაციო ღონისძიებების შემუშავებისა და მდგრადი განვითარების პრაქტიკული საკითხების დაგეგმვისათვის.

თანამედროვე და ძველი გამყინვარებით კავკასიონი, მსოფლიოს მთიან სისტემებს შორის განსაკუთრებულ გეოგრაფიულ რეგიონს წარმოადგენს, რამდენიმე ფაქტორის გათვალისწინებით: იგი სუბტროპიკული და ზომიერი სარტყლის მიჯნაზე არსებული მთიანი სისტემაა და გამყინვარების ჯერადობითაც და სინქრონულობით გარკვეულ მსგავსებას ავლენს ალპების მთიანი სიტემის გამყინვარებასთან შედარებით მცირე მასშტაბით. საქართველოს ჩრდილოეთ საზღვარი კავკასიონის ქედის გაყოლებით, მცირე და დიდი ზომის მყინვარები თითქმის მთლიან უწყვეტ ჯაჭვს ქმნიან, მცირე გამონაკლისების გარდა. ბუნებრივი მრავალფეროვნების მხრივ ტერიტორიულად ისეთი მცირე ზომის ქვეყნისათვის, როგორც საქართველოა, თანამედროვე გამყინვარების არსებობა აგვირგვინებს უნიკალურ ვერტიკალურ ზონალურობას, ლანდშაფტების მრავალფეროვნების თვალსაზრისით ხმელეთის ტერიტორიის მცირე მონაკვეთზე. მცირე გამყინვარების პერიოდიდან თანამედროვე პერიოდამდე მყინვართა მიერ განთავისუფლებულ ტერიტორიაზე აქტიურად ხდება ლანდშაფტური ცვლილებები. პერიგლაციალური ზონის მნიშვნელოვანი ტერიტორიების დასახლება მოხდა ბორეალური ტიპის მცენარეული საფარის

სუბალპური ტყის და მდელოს სახეობებით, ამ ტერიტორიაზე ვერტიკალურად აიწია ტყის საფარის გავრცელების ზედა საზღვარმაც.

გლობალური მასშტაბით მცინვარები წარმოადგენენ მტკნარი წყლის უმნიშვნელოვანეს რესურს დედამიწაზე. რეგიონალურ და ლოკალურ დონეზე კი, მათ კიდევ უფრო დიდი მნიშვნელობა ენიჭებათ, რადგანაც შეიცავენ რეგიონისათვის მტკნარი წყლის უნიკალურ რესურსს. გამცინვარების მასშტაბები და რაობა გავლენას ახდენს მდინარეთა ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე, მათ ჰიდროენერგეტიკულ პოტენციალზე. მცინვარების არსებობა კარგი შესაძლებლობაა სოფლის მეურნეობაში სარწყავი წყლის დეფიციტის შესავსებად.

მცინვარები ძალიან მნიშვნელოვანი ბუნებრივი რესურსია სამთო და სათავგადასავლო ტურიზმის მიმართულების დივერსიფიცირებისა და ბუნებრივი მრავალფეროვნების კუთხითაც. იგი მაღალმთიან ლანდშაფტს განუმეორებელ სილამაზესა და მიმზიდველობას ანიჭებს, რაც ბევრ ტურისტს იზიდავს. იმ ქვეყნებში, სადაც მცინვარებია წარმოდგენილი, განვითარებულია სათავგადასავლო ტურიზმი და შექმნილია გლაციალური პარკები. ამ კუთხით, საქართველოსაც გააჩნია საინტერესო პოტენციალი. უკანასკნელ პერიოდში, მნიშვნელოვნადაა გაზრდილი როგორც ორგანიზებული ასევე არაორგანიზებული ტურიზმის ის მიმართულებები, რომელთა მარშრუტებში ხშირად შედის მაღალმთიანი ლანდშაფტების და მათ შორის მცინვარების მონახულება.

მცინვარების არსებობა საინტერესო ფენომენია რეგიონის დაცულობის კუთხით და სამხედრო-გეოგრაფიული თვალსაზრისით. მცინვარების მორფოლოგიური ტიპები, განაპირობებს სამთო-საუღელტეხილო გადასასვლელების რაობას და აჩენს შესაძლებლობას მათზე გავლის ან ჩაკეტილობის მხრივ. შესაბამისად რეგიონები, რომლებიც მაღალი რელიეფის და მათ შორის მცინვარული საფარით იყო ჩაკეტილი, უნიკალურ ისტორიულ-გეოგრაფიულ რეგიონში ყალიბდება, მინიმალური კავშირებით დანარჩენ რეგიონებთან.

მცინვარების არსებობას დადებითი ფაქტორების საპირისპიროდ, გააჩნიათ მკვეთრად უარყოფითი ბუნებრივი რისკებიც ფაქტორებიც. ამის მაგალითია თუნდაც მცინვარი დევდორაკი, რომელზეც უკანასკნელად 2014 წელს დაფიქსირდა გლაციალური ღვარცოფი, რომელმაც დიდი ზიანი მიაყენა ინფრასტრუქტურას და ასევე სამწუხაროდ გამოიწვია ადამიანთა მსხვერპლიც. კლიმატის ცვლილებით

გამოწვეულ მცინვარების უკანდახევას თან ახლავს მიკრო სტადიალური მორენების ჩამოყალიბება და მათ შორის ტბების ფორმირება, რაც მისი უეცარი გარღვევის შემთხვევაში შესაძლოა სერიოზული ზიანის მომტანი გახდეს. 2018 წლის ივლისის თვეში⁵, მცინვარ ლეხზირის ენის წინ წარმოიქმნა ყინულოვანი და მორენული მასის ხერგილებს შორის ≈ 65000 მ² ფართობის მქონე დროებითი ტბა, რომლიც ივლისის თვეშივე თანდათანობით დაიცალა. მსგავსი გენეზისის ტბების უეცარი გარღვევა შესაძლოა სერიოზული ზარალის მომტანი გახდეს. მცინვარების მონიტორინგში უპილოტო საფრენი აპარატებით პერიოდული მონიტორინგი ადრეული შეტყობინების სისტემების პარალელურად, შესაძლოა გამოყენებულ იქნას ბუნებრივი კატასტროფების თავიდან აცილებაში.

როგორც ცნობილია, მცირე გამყინვარების დასასრულიდან ($\approx 1820-1850$ წწ.) მცინვარები მთელს დედამიწაზე აქტიურად იხევენ უკან, ეს პროცესი განსაკუთრებით აჩქარდა XX-XXI საუკუნეების მიჯნაზე და დღესაც აღმავალი ტრენდით ხასიათდება. მოცემული პერიოდიდან შემცირდა ზეწრული და მთის მცინვარები. გამონაკლისს არც კავკასიონის მთიანი სისტემა წარმოადგენს. აღსანიშნავია ის მომენტი, რომ მცირე გამყინვარების პერიოდისათვის მცინვარები იმყოფებოდნენ სტაბილურ მდგომარეობაში, უკანასკნელ ხანს კი კლიმატის გლობალური ცვლილებების პარალელურად მოსალოდნელია მცინვარების მასების სიმტკიცის დარღვევა, რასაც დიდი ალბათობით თან მოჰყვება მცინვარის ხეობებში ფლუვიო-გლაციალური ღვარცოფების, ყინულოვანი მასების მექანიკური ნგრევის, მცინვარების ტანზე და პერიგლაციალურ ზონაში ტბების წარმოქმნა და სხვა ბუნებრივად საშიში მოვლენების გააქტიურება. ეკონომიკური საქმიანობის ზრდის პარალელურად იზრდება საქართველოს ენერგეტიკული პოტენციალის ათვისების ტემპიც, მცირე და დიდი ჰიდროელექტროსადგურების ნაწილი დაგეგმილია უშუალოდ მცინვარულ აუზებში (მდ. ლეხზირის, მდ. თერგის, მდ. რიონის, მდ. ნენსკრას ხეობებში). ამ მხრივ მეტად აქტუალურია მცინვარებზე პერიოდული დაკვირვებების წარმოება, რაც შეიძლება გახდეს გარკვეული პრევენციული ღონისძიებების საფუძველი, რათა თავიდან იქნას აცილებული, როგორც გარემოზე უარყოფითი ზემოქმედება, ასევე კარგად იქნას შეფასებული არა მხოლოდ ინფრასტრუქტურული ობიექტების გარემოზე

⁵ <http://nea.gov.ge/ge/news/detailed/778/myinvar-lexzirze-arsebuli-mdgomareoba>

ზემოქმედება, არამედ თავად საინჟინრო-ინფრასტრუქტურულ ობიექტებზე გარემოს ზემოქმედების რისკ ფაქტორები.

კვლევის მიზანი და ამოცანები

კვლევის მიზანია კარტოგრაფიული, გეოსაინფორმაციო, ფოტოგრამმეტრიული, გლაციო-გეომორფოლოგიური და სხვა მონაცემების ანალიზის გზით, ხეობის ტიპის რეპრეზენტაციული მყინვარებისათვის, მცირე გამყინვარების შემდგომი (≈ 1820 წწ.) დეგრადაციის მასშტაბის გეოგრაფიული (სივრცე-დროითი) შეფასება. ხეობის ტიპის მყინვარების გარდა ჯამში ნივალურ-გლაციალური ზონის დეგრადაციის ინტენსივობის შეფასება და პროგნოზი.

ნაშრომის ერთერთ მთავარ იდეას წარმოადგენს დედამიწის შემსწავლელი მრავალდარგობრივ სამეცნიერო მიმართულებებში ახლო მანძილს დისტანციური ზონდირებით უპილოტო საფრენი აპარატების „დრონი“, ფოტოგრამმეტრიული და გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფების გამოყენებით თვისობრივად ახალი ტიპის ციფრული კარტოგრაფიული მონაცემების მიღება. მონაცემებზე დაყრდნობით მცირე გამყინვარების პერიოდიდან მყინვარების უკანდახევის ინტენსივობის დადგენა ჰორიზონტალურ და ვერტიკალურ ჭრილში.

კვლევის ამოცანებს წარმოადგენს:

- მცირე გამყინვარების შემდგომი პერიოდის პერიგლაციალური ზონის განვითარების ანალიზი
- უპილოტო საფრენი აპარატის გამოყენებით მყინვარებზე და პერიგლაციალურ ზონაში აეროფოტოგადაღებების წარმოება, მეთოდოლოგიის გამოყენება მყინვარების კვლევაში
- მყინვარების დეგრადაციის სივრცე-დროითი და რიცხვითი სტატისტიკური ანალიზი (მცირე გამყინვარების პერიოდიდან თანამედროვე პერიოდამდე)
- მყინვარულ აუზებში ბუნებრივ-ლანდშაფტური პროცესების ანალიზი

სამეცნიერო სიახლე და პრაქტიკული მნიშვნელობა

დისტანციური ზონდირების მასალების (აეროფოტო, აეროკოსმოსური სურათი) არ არსებობის პირობებში ხარვეზის აღმოფხვრა და ახლო მანძილის დისტანციური ზონდირების მეთოდებით და უპილოტო საფრენი აპარატის გამოყენება საქართველოს ზოგიერთ მყინვარის ენისა და პერიგლაციალური ზონისათვის მაღალი გარჩევადობის აერო ფოტოს გადაღება და ორთოფოტოს შედგენა.

ჩატარებული აეროგადაღებების საფუძველზე მსხვილ მასშტაბიანი (მასშტაბი 1:5000, 1:2000) მყინვარის ენის და პერიგლაციალური ზონის თემატური რუკების შედგენა

- ხეობის ტიპის მყინვარებისათვის უკანდახევის ინტენსივობის შეფასება მცირე გამყინვარების შემდგომი პერიოდიდან თანამედროვე პერიოდამდე;
- ისტორიული, კარტოგრაფიული და დისტანციური ზონდირების მასალების გეოსაინფორმაციო მეთოდოლოგიით, კვლევის გლაციო-გეომორფოლოგიური, სტატისტიკური და სხვა მეთოდებით მცირე გამყინვარების პერიოდისათვის ნივალურ-გლაციალური ზონის მასშტაბის აღდგენა
- უახლესი დისტანციური ზონდირების, კარტოგრაფიული წყაროების, ანალიზის საფუძველზე ფირნის ხაზი სიმაღლის განსაზღვრა და მისი დინამიკა;
- დისტანციური ზონდირების მეთოდების გამოყენება მყინვარის მასის ბალანსის კვლევისას;
- ობიექტის ზედაპირზე ფერდობების ექსპოზიციების გადანაწილების, საშუალო დახრილობის განსაზღვრა და მისი კავშირი მყინვარის დეგრადაციასთან;
- მყინვარულ და პერიგლაციალურ არეალებში მცენარეული საფარის დინამიკის შეფასება და ანალიზი სატელიტური სურათების და გადაღებული აეროფოტოების ანალიზის საშუალებით;
- მყინვარების დეგრადაციის ინტენსივობას და კლიმატური მოდელებზე დაყრდნობით ნივალურ-გლაციალური ზონის დეგრადაციის პროგნოზი;

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა განპირობებულია მისი შესრულების პროცესში, ახლო მანძილს დისტანციური ზონდირების მეთოდოლოგიის შედეგად, მიღებული ციფრული კარტოგრაფიული მასალის გენერირებაზე. ანალოგიური

მეთოდოლოგიით, ასევე შესაძლებელია დაკვირვებები განხორციელდეს ყველა იმ ტიპის (მეწყერი, კლდე ზვავი, ხრამი, მდინარეთა ნაპირების გარეცხვა, სანაპირო პლაჟის დინამიკა და სხვა) ბუნებრივ ფენომენზე, რომელიც საფრთხეს უქმნის მიმდებარე ტერიტორიაზე არსებულ საინჟინრო ინფრასტრუქტურას და მოსახლეობას. განმეორებითი ან პერიოდული გადაღებების პროცესში, მაღალი დეტალიზაციის ხარისხით და სამეცნიერო სიზუსტით შეფასდეს ობიექტის მასის გადაადგილება. ყოველი გადაღების პარალელურად შეიქმნას ციფრული კარტოგრაფიული მასალა საკვლევო ობიექტის მასის გადაადგილების შესაფასებლად, აიგოს გასწვრივი, განივი პროფილები, სხეულის ზედაპირზე განისაზღვროს ყოველი ობიექტის მდებარეობის კოორდინატები და შეფასდეს მისი დინამიკა დროსა და სივრცეში. მნიშვნელოვანია, რომ კვლევის ამ ეტაპზე მიღებული გეოსაინფორმაციო მონაცემთა ბაზა, ციფრული ფოტოგრამმეტრიული მასალები (აეროფოტო, წერტილოვანი ღრუბელი) კარგი საფუძველია სამომავლო კვლევების განხორციელებისათვის.

კვლევის მეთოდოლოგია

დისერტაციის შესრულების ძირითად ღერძს წარმოადგენს გეოსაინფორმაციო, დისტანციური ზონდირების და ფოტოგრამმეტრიული მეთოდების სინთეზი კარტოგრაფიულ; გლაციო-გეომორფოლოგიურ, სტატისტიკურ მეთოდებთან, რაც კარგი საშუალება კვლევების მაღალ სამეცნიერო დონეზე წარმოებისათვის. მყინვარების დინამიკის კვლევაში წარმატებით გამოიყენება ახლო მანძილის დისტანციური ზონდირების და ფოტოგრამმეტრიული მეთოდოლოგია, რომელიც ობიექტთან შედარებით მცირე 50-500 მეტრის სიმაღლიდან ხორციელდება (Qinghua YE, 2006).

ამჟამად დედამიწის მრავალი ხელოვნური თანამგზავრი არსებობს ბაზარზე, რომლებიც უწყვეტ რეჟიმში გადმოსცემენ ოპტიკურ ან ციფრული ფორმატის მონაცემებს დედამიწის ზედაპირის, მცენარეული საფარის, კრიოსფეროს, ატმოსფეროს და ზოგადად გეოგრაფიული გარემოს შესახებ. მათი შესაძლებლობების დიაპაზონი ფართოა და დედამიწის შემსწავლელი მრავალდარგობრივი სამეცნიერო მიმართულებით აქტიურად გამოიყენება. თუმცა კოსმოსური თანამგზავრების ნაკლს მათი გარჩევადობა, მონაცემების ფასი და ოპერატიულობა წარმოადგენს. პოლარულ ორბიტაზე გაყვანილი სატელიტები გარკვეულ დროს ანდომებენ დედამიწის სრულ

დაფარვას. მაგ. Landsat 8-ს სჭირდება 16 (<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>) დღე-ღამე რომ დედამიწას სრულად შემოუფრინოს და მოგვცეს განმეორებით სურათი იგივე ტერიტორიისათვის. გარდა ამისა, მათი გარჩევადობა დაბალია აერო ფოტოებთან შედარებით, რომლიც უშუალოდ ატმოსფეროს ქვედა ფენებში თვითმფრინავების ფრენის სიმაღლეზე ხორციელდება, მასში ჩამონტაჟებული მძლავრი ციფრული ფოტოაპარატის საშუალებით. მსგავსი აეროფოტოგადაღება საკმაოდ დიდ თანხებთანაა დაკავშირებული. საქართველოს ტერიტორიის სრული აერო ფოტოგრაფირება და ორთოფოტოს გენერირება ბოლოს განხორციელდა „რუკები მიწის მდგრადი მართვისთვის - საქართველოს ორთოფოტო“ პროექტის ფარგლებში 2014-2017 წლებში⁶. ოკუპირებული ტერიტორიების და საომარი მდგომარეობის გამო რუსეთის ფედერაციასთან კავკასიონის გასწვრივ ფრენები ვერ განხორციელდა, შესაბამისად საქართველოს მცინვარებზე უახლესი აერო ფოტო მასალები არ მოიპოვება. ზემოთ აღნიშნულს დამატებით აქტუალურობას სძენს ცალკეულ მცინვართა ენებისათვის უპილოტო საფრენი აპარატით მაღალი გარჩევადობის დისტანციური ზონდირების მონაცემების გენერირება. ანალოგიური მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია დედამიწის შემსწავლელი მრავალდარგობრივ მეცნიერებებში ან მომიჯნავე მიმართულებებზე, მაღალი სამეცნიერო ღირებულების კვლევების წარმოება.

აერო ფოტოგრაფირების შედეგები დამუშავდა ფოტოგრამმეტრიულ პროგრამულ უზრუნველყოფის Pix4D საშუალებით. შედეგად მივიღეთ მაღალი გარჩევადობის აეროფოტო, რომლის საფუძველზეც მოვახდინეთ პერიგლაციალური ზონის შეფასება და ციფრული კარტოგრაფირება. მონაცემების სტატისტიკური და გეოგრაფიული გარემოს დინამიკის შეფასებისათვის გამოყენებულ იქნა მთელი რიგი გეოსაინფორმაციო, დისტანციური ზონდირების და ფოტოგრამმეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფები, ხელმისაწვდომი აერო ფოტომასალა, გეო მონაცემთა ბაზები, კლიმატური მონაცემები, სხვა თავისუფალი ინტერნეტ რესურსები: QGIS Desktop, Global Mapper, Google Earth, Pix4D; Grapher Software, GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) და WGI (World Glacier Inventory) მონაცემები, Sentinel-2, Spot, IKONOS, Quick bird, Korona, Rapid Eye, SRTM Dem – The Shuttle Radar

⁶ <https://napr.gov.ge/p/826> პროექტის ბიუჯეტი შეადგენდა 14.5 მლნ. ნორვეგიულ კრონს ≈ 4.4 მლნ. €

Topography Mission, 1:50000 Scale DEM-Digital elevation model, Bing Areal Maps, Landsat TM და სხვა ინფორმაციები.

ცხადია მცინვარების დინამიკის პროცესში მის ადვილად მისადგომ და ხილულ ნაწილებზე დაკვირვება შედარებით მარტივი პროცესია, მაგრამ კონკრეტული მცინვარის დინამიკაზე ან მთლიანად გამცინვარების არსებობას, ევოლუციასა და მათ დინამიკაზე უმთავრესი გავლენა იმ კლიმატურ პროცესებს აქვს, რომლიც მცინვარის აუზში მიმდინარეობს მრავალწლიურ რეჟიმში. მცინვარის დინამიკის უმნიშვნელოვანეს ასპექტს წარმოადგენს მცინვარის წონასწორობის (ELA-equilibrium line altitude) და ფირნის ხაზის მდებარეობის მრავალწლიური დინამიკა. საინტერესო არის მისი მრავალწლიური დინამიკაც. „ფირნის ხაზის“ სიმაღლის განსაზღვრისათვის გამოვიყენეთ უახლესი სატელიტური გამოსახულებები.

მცინვარების დეგრადაციის მასშტაბების სრულად შეფასებისათვის მნიშვნელოვანია მისი ფართობში ცვლილების, ენის უკანდახევის პარამეტრების, ენის ზღვის დონეზე მდებარეობის გადაადგილების, ფირნის ხაზის ვერტიკალური გადაადგილების, სიგრძის და სხვა პარამეტრების მონიტორინგი. მცინვარების ფორმები სიბრტყეზე ხშირად წარმოადგენენ საკმაოდ რთულ გეომეტრიულ ობიექტებს. განსაკუთრებით ხეობის და ხეობის რამდენიმე ნაკადისაგან შემდგარი მცინვარების მნიშვნელოვანი პარამეტრია მათი სიგრძეში ცვალებადობა. ვინაიდან მცინვარის ენიდან მის უკიდურეს წერილამდე მოცემული გვაქვს ერთი მანძილი ამან შეიძლება სრულყოფილად ვერ ასახოს მცინვარის სხეულის დეგრადაციის მასშტაბი. ამიტომ ჩვენს კვლევაში გამოვიყენეთ განსხვავებული მიდგომა, რომლიც ეფუძნება გეოინფორმაციულ სისტემებში მცინვარის, როგორც რთული მრავალკუთხედის სხვადასხვა მდგენელებს ცენტრალური გეომეტრიული ღერძების მანძილების ჯამების და მათი გადაადგილების შედარებას სხვადასხვა პერიოდისათვის.

კვლევისას გამოყენებულ იქნა სხვადასხვა პერიოდის კარტოგრაფიული მასალა: ა) რუსეთის იმპერიის პერიოდის (1890-1900 წწ.) ე.წ. „ვერსიანი“ რუკები (მასშტაბი 1:42000); ბ) 1:50000 და 1:25000 მასშტაბის ტოპოგრაფიული რუკები გ) საარქივო ლიტერატურული, დისტანციური ზონდირების და საველე საექსპედიციო მასალები

ხელმისაწვდომი დისტანციური ზონდირების მასალების (Landsat, Sentinel) დეშიფრირების და ციფრული კარტოგრაფიის პროგრამული უზრუნველყოფების

გამოყენებით დამუშავდა და ანალიზი ჩატარდა მყინვარულ ხეობებში მცენარეული საფარის დინამიკას და მის ვერტიკალურ მიგრაციას.

ნაშრომის სტრუქტურა

ნაშრომი შედგება 3 თავისაგან, რომლიც დაყოფილია ქვეთავებად. აქვს შინაარსი, შესავალი, დასკვნები, ფიგურების, ცხრილების და გამოყენებული ლიტერატურის სია. მისი საერთო მოცულობა 101 გვერდია.

გამოყენებული აკრონიმები

LGM – Last glacial maximum	ბოლო გამყინვარების მაქსიმუმი
LIA - Little ice age	მცირე გამყინვარების ეპოქა
The Medieval Warm Period (MWP)	შუა საუკუნეების კლიმატური ოპტიმუმი
ELA - Equilibrium line altitude	მყინვარის წონასწორობის ხაზი
MPT – Mid Pleistocene transition	შუა პლეისტოცენის გარდამავალი პერიოდი
EPICA - European Project for Ice Coring in Antarctica	ანტარქტიდის ყინულოვანი საფარის ბურღვის პროექტი
IPCC - Intergovernmental panel on climate change	საერთაშორისო სამთავრობოთაშორისი კლიმატის ცვლილების კომისია
MIS - Marine isotope stages	საზღვაო იზოტოპური ეტაპი
GIS - Geographical information system	გეოგრაფიული საინფორმაციო სისტემა
Remote Sensing	დისტანციური ზონდირება
GPS - Global positioning system	გლობალური პოზიციონირების სისტემა
GNSS - Global navigation satellite system	გლობალური ნავიგაციის სატელიტური სისტემა
Total Station	ელექტრონული ტაქიომეტრი
GCP - Ground control point	ზედაპირული საკონტროლო წერტილი
GeoCORS	საკოორდინატო ქსელის მუდმივმოქმედი სადგურების სისტემა საქართველოში

DEM – Digital elevation model	რელიეფის ციფრული მოდელი
SRTM - Shuttle radar topography mission	შატლის ტოპოგრაფიული მისია
GLIMS - Global land ice measurements from space	მიწისპირა ყინულის გლობალური დისტანციური ზონდირება
WGI - World glacier inventory	მსოფლიოს მყინვარების ინვენტარიზაცია
NSIDC - National Snow and Ice Data Center	თოვლისა და ყინულის მონაცემთა ნაციონალური ცენტრი
ArcGIS Desktop	გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფა
QGIS Desktop	გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფ
Pix4D	ფოტოგრამმეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფა
Point Cloud Data	X;Y;Z კოორდინატების წერტილოვანი სიმრავლე
Global Mapper	გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფა
Google Earth	ინტერნეტ გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფა
Grapher Software	გრაფიკული და სტატისტიკური პროგრამული უზრუნველყოფა
ESA - European Space Agency	ევროპის კოსმოსური სააგენტო
Sentinel-2, SPOT, IKONOS, Quick Bird, CORONA, Landsat TM, ASTER	დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი

1. სამეცნიერო, თეორიული და თემატური დებულებები

1.1. მთების მდგრად განვითარებასთან დაკავშირებული პრობლემები

ჩვენი ქვეყნის ტერიტორიის მნიშვნელოვანი ნაწილი საშუალო და მაღალმთიანი ტერიტორიაა, რომლის 76.4%, 500 მეტრზე⁷ მაღლა მდებარეობს. საქართველოს მთიანეთში, ადამიანი მრავალი საუკუნის მანძილზე სახლობდა და ბუნებასთან ურთიერთ ჰარმონიულ დამოკიდებულებაში ქმნიდა საზოგადოების თანაცხოვრების განუმეორებელ ფორმებს, კულტურას, ჩვეულებებს, არქიტექტურას. საქართველოს მთიანი ტერიტორია გამოირჩევა ჯანსაღი ეკოლოგიური გარემოთი, მტკნარი წყლის დიდი რესურსებით, ბიოლოგიური და ლანდშაფტური მრავალფეროვნებით, დამახასიათებელი სოფლის მეურნეობის, არქიტექტურის, ეთნო კულტურის განუმეორებელი ფორმებით და მათი მრავალფეროვნებით სხვადასხვა ისტორიულ-გეოგრაფიულ რეგიონებს შორის. ბუნებრივად მრავალფეროვანი და მის დიდ ნაწილში საცხოვრებლად მიმზიდველ ტერიტორიაზე საბჭოთა პერიოდიდან მოყოლებული მთიანი ტერიტორიების მდგრადი განვითარების გეგმის არარსებობის პირობებში მთა დაცარიელდა, რასაც ხელს უწყობდა საბჭოთა მმართველობაც. ამჟამად, ტურიზმის ზრდის პარალელურად, საქართველოს მაღალმთიან ზონაში ხდება მოსახლეობის დამაგრება და მათი ადგილობრივად დასაქმება, მიღებულია კანონი საქართველოს მაღალმთიანი რეგიონების განვითარების შესახებ⁸, შემუშავებულია პროექტი - საქართველოს მაღალმთიანი დასახლებების განვითარების სტრატეგია⁹ 2019-2023 და ა.შ. რაც უდავოდ მისასაღებელი ფაქტია. სტრატეგიაში აღნიშნულია თოვლ-ყინულოვანი რესურსის დადებითი მხარეები: მტკნარი წყლის მარაგების, მდინარეთა ჰიდროლოგიური ჩამონადენის დონე, ბუნებრივ-ლანდშაფტური მრავალფეროვნება, მისი ტურისტული პოტენციალი. აქვე აღნიშნულია ის საფრთხეები, რასაც ნივალურ-გლაციალური ზონა და თოვლის საფარი შეიცავს: ესენია მყინვარებიდან ყინულოვანი მასების მექანიკური ნგრევა¹⁰ ან მყინვარების პულსაციური გადაადგილება, რასაც

⁷ წყარო SRTM Digital elevation Model - ციფრული სასიმაღლო მოდელი

⁸ <https://matsne.gov.ge/ka/document/view/2924386?publication=3>

⁹ http://www.mrdi.gov.ge/sites/default/files/magalmtiani_dasaxlebebis_ganvitarebis_strategia_2019-2023_proekti_final.pdf

¹⁰ მსგავსი მოვლენას ჰქონდა ადგილი 2017 წ. მყინვარ ჭალაათის ენასთან, როდესაც მყინვარიდან დაგორებულმა ქვამ იმსხვერპლა ტურისტი. ამ მხრივ ტურისტულად აქტიურ მარშრუტებზე, რომელთა მიზანიცაა მყინვარების მონახულება განთავსებულ იქნას გამაფრთხილებელი ბანერები.

შესაძლოა მოჰყვეს ფლუვიო-გლაციალური დვარცოფი (დევოდარკის არაერთგზის გამოსვლა დარიალის ხეობაში; 2018 წ. მდ. ნენსკრას კატასტროფული წყალ მოვარდნა) და გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი ინფრასტრუქტურული ზარალი ან მსხვერპლი სამოქალაქო საზოგადოებაში. თოვლის ზვავები წარმოადგენს მთიანი ტერიტორიებისათვის ერთ-ერთ სახიფათო მოვლენას. იგი მნიშვნელოვან ზარალს აყენებს ქვეყანას როგორც ეკონომიკური¹¹, ინფრასტრუქტურული კუთხით, ასევე სამწუხაროდ პერიოდულად იწვევს ადამიანთა მსხვერპლსაც (სალუქვაძე, 2011). აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ დიდი ალბათობით მცირე გამყინვარების პერიოდში, ნივალურ-გლაციალური ზონაში, ყინულოვანი საფარის სიმტკიცე შედარებით მაღალი იყო. კლიმატის გლობალური ცვლილებების პარალელურად, დიდი ალბათობით სავარაუდოა, რომ მათი სიმტკიცე მნიშვნელოვნად შემცირდებოდა, რაც დიდი ალბათობით გააქტიურებს ამ ზონიდან მომდინარე ბუნებრივ საფრთხეებს. გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ პირველ ეტაპზე მყინვარების აქტიური დნობის პარალელურად მდინარეთა ჩამონადენი იზრდება, შემდგომ მათი დრამატული შემცირების ან მათი გაქრობის პირობებში კვლავ დაიკლებს. მყინვარების დეგრადაციის ამჟამინდელი ტემპის და ტემპერატურის პროგნოზული ზრდის პირობებში სვანეთში მყინვარული საფარი 2150-2060 წლებისათვის მთლიანად გაქრება (კლიმატის ცვლილების შესახებ საქართველოს მესამე ეროვნული შეტყობინება, 2015). კლიმატის გლობალური ცვლილების და მყინვარების უკანდახევის პირობებში შეინიშნება მცენარეული საფარის გავრცელების ვერტიკალური ზღვარის მატების ტენდენციებიც, განსაკუთრებით მყინვარებისაგან განთავისუფლებულ ტერიტორიებზე.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება მთიანი ტერიტორიების სამეცნიერო შესწავლას, მისი ბუნების შენარჩუნებასთან დაკავშირებულ პრობლემატიკის წარმოჩენას, მოსახლეობის ყოფა-ცხოვრების და ტრადიციების კვლევას, რეკრეაციული და რესურსული პოტენციალის განსაზღვრას, მდგრად ტერიტორიულ დაგეგმარებას და სივრცით მოწყობას. ტერიტორიული დაგეგმარების ეფექტურობა ეკოლოგიური პრობლემების პრევენციის საშუალებას უკავშირდება, რაც მხოლოდ

¹¹ ზვავსაშიშროების გამო მცირე ხნით პერიოდულად იკეტება როგორც საერთაშორისო (საქართველოს სამხედრო გზის კობი-გუდაურის მონაკვეთი) ასევე შიდა სახელმწიფოებრივი დანიშნულების გზები და უძელტეხილები. 1987 წლის მხოლოდ იანვრის თვეში დაიღუპა 80 ადამიანი.

ლანდშაფტური მიდგომის და ლანდშაფტური დაგეგმარების პრინციპების რეალიზებითაა შესაძლებელი (ნ.ელიზბარაშვილი, ჰ.მეესსენი, გ.მელამე, ა. ხოციანი, თ.კოლერი., 2018).

1.2. გამყინვარების გეოგრაფიული თავისებურებანი, კრიოსფეროს ცვალებადობა და მნიშვნელობა

გამყინვარების და გამყინვარებათშორისი დათბობის პერიოდების მონაცვლეობის გამომწვევ მიზეზებზე სამეცნიერო ლიტერატურაში მრავალი თეორიაა. მათ შორის გავრცელებული მოსაზრებები: მზის აქტივობის ვარიაციებს, დედამიწის ორბიტალური პარამეტრების და მზის ურთიერთგანლაგების ციკლოზობას, ატმოსფეროს ქიმიურ შედგენილობას, ვულკანიზმის აქტივობას უკავშირდება, რაც თავის მხრივ განაპირობებს დედამიწაზე მოსული მზის ენერჯის ცვალებადობას და იწვევს დედამიწის სითბური ბალანსის ვარირებას. პროცესი, დედამიწაზე აცივებისა და დათბობის პერიოდების მონაცვლეობით აღინიშნება და შესაბამისად გეოგრაფიულ გარსზე ეს აისახება გამყინვარებისა და გამყინვარებათ შორისი დათბობის პერიოდების მონაცვლეობით.

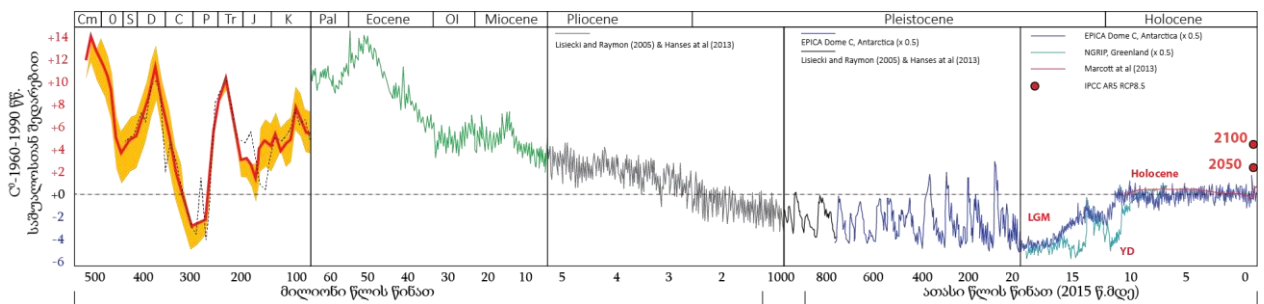
გამყინვარება ან გამყინვარებათ შორისი დათბობის პერიოდების მონაცვლეობა, მისი მასშტაბისა და ხანგრძლივობის თანაზომიერად, თითქმის მთლიანად ან ნაწილობრივ ცვლიდა და დღესაც ცვლის დედამიწის გეოგრაფიულ გარსს, მანამდე ბუნებრივ გარემოში ჩამოყალიბებულ მდგრადი წონასწორობის მოდელს. პროცესის პარალელურად, გლობალური მასშტაბით იცვლება გეოგრაფიული გარემო, გლობალური და რეგიონალური ლანდშაფტის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური სტრუქტურა, რელიეფი, კონტინენტების მოხაზულობა, მსოფლიო ოკეანის, შიდა ტბებისა და ზღვების დონეები, კლიმატური ზონების გადანაწილება დედამიწაზე. გარემოში მიმდინარე ცვლილებები იმდენად გლობალური ხასიათისაა, რომ მთლიანად იცვლება არსებული გეოგრაფიული გარსი და მანამდე მდგრადად ჩამოყალიბებული ბუნებრივი გარემო. ასევე მნიშვნელოვანია წინა პერიოდისათვის მომხდარი კლიმატის ძირეული ცვლილებები, რომელიც განაპირობებს გეოგრაფიული გარემოს შემდგომი განვითარების ხასიათს. გამყინვარებამდელ პერიოდთან შედარებით და მის შემდგომ, დედამიწაზე შესაძლოა მივიღოთ სრულიად

ახალი გეოგრაფიული გარემო, ფლორისა და ფაუნის განსხვავებული სახეობების დომინირება ან მათი გავრცელების არელების მნიშვნელოვანი ცვლილებები. გეოგრაფიულ გარსში მსგავსი მასშტაბური ხასიათის ცვლილებები (გამყინვარება და გამყინვარებათ შორისი დათბობის პერიოდები) ციკლური ხასიათისაა და განსხვავებული მასშტაბითა და ხანგრძლივობით დედამიწის ისტორიაში მრავალჯერ განმეორდა და კვლავაც არაერთხელ განმეორდება.

პირველ მძლავრ და ხანგრძლივ გამყინვარებას დედამიწაზე ადგილი ჯერ კიდევ კამბრიულის წინა ეონში - „Huronian/Makganyene glaciations“ $\approx 2,7-2,2$ მლრდ. წლის წინათ ნეო არქაულ და პალეო პროტეროზოულ ერაში ჰქონდა. მას წინ უძღოდა ადრეული სიცოცხლის მარტივი ფორმების ციანობაქტერიების სახით გავრცელება და ე.წ. „ჟანგბადის ციკლი“, რა დროსაც მოხდა ატმოსფეროში ჟანგბადის კონცენტრაციის მატება და მეთანის შემცირება (Roger G. Barry, Thian Yew Gan, 2011) (Tang & Chenbc, 2013). დედამიწის განვითარების შემდგომ ეტაპზე პროტეროზოული ეონის ნეო პროტეროზოულ ერაში გამყინვარების სამი: „The Sturtian, Marinoan, and Ediacaran glaciation“ ციკლი გვაქვს, რომლებიც შესაბამისად მოიცავენ $\approx 730-700$ მლნ. წ.; $\approx 665-635$ მლნ.წ.; $\approx 635-542$ მლნ. წლის წინათ პერიოდებს ნეოპროტეროზოული ერის დასასრულიდან ვიდრე კამბრიულამდე. 850-635 მლიონ წლებს შორის მონაკვეთი ცნობილია როგორც „კრიოგენული“ პერიოდი დედამიწის გეოლოგიურ ისტორიაში, ორი უფრო მძლავრი გამყინვარებით „Sturtian“ და „Marinoan“. პერიოდი ხასიათდება სუსტი ახალგაზრდა მზით, რომლიც დღევანდელთან შედარებით სითბური ენერჯის 0.97 ნაწილს ასხივებდა, CO₂ დაბალი შემცველობით ატმოსფეროში (Tajika, 2003), რაც შესაძლოა გამხდარიყო მიზეზი დედამიწაზე სრულმასშტაბიანი ხანგრძლივი გამყინვარების მრავალჯერადი ფაზებისა, რომელიც თითქმის მთლიანად მოიცავდა მთელს დედამიწას (Roger G. Barry, Thian Yew Gan, 2011). შემდგომ, ორდოვიციული ≈ 460 მლნ. წ. და გვიან დევონური ≈ 360 მლნ. წ.; პერმული პერიოდის გამყინვარება მოიცავს $\approx 325-320$ მლნ.წ.; ეოცენური გამყინვარებას კი ≈ 40 მლნ. წ. წინათ ჰქონდა ადგილი.

მყინვარული ნალექები, მყინვარული ლოდები, მყინვარული ნაკაწრები შემორჩენილია დედამიწის მთელს ზედაპირზე, როგორც დამადასტურებელი ფაქტი შემოთავაზებული ჰიპოთეზისა, რომლის მიხედვითაც ნეოპროტეროზოულ ხანაში დედამიწამ განიცადა მძლავრი გამყინვარების ფაზები. იგი ცნობილია, როგორც

„Snowball Earth“ ჰიპოთეზა, რომლის მიხედვითაც დედამიწის ოკეანე პრაქტიკულად სრულად იყო მძლავრი ყინულოვანი საფარით დაფარული, კონტინენტური ნაწილი კი შედარებით თხელი ყინულოვანი საფარით გამოირჩეოდა, პრაქტიკულად შეჩერებული ჰიდროლოგიური ციკლის არარსებობის პირობებში (Kirschvink, 1992). დედამიწის გლობალური საშუალო ტემპერატურა დაახლოებით -50°C ; ეკვატორული ზონაში -20°C . შემდგომი პერიოდის ძირეული ცვლილებები გამოიწვია მძალვრმა ვულკანურმა აქტივობამ, რამაც თავის მხრივ განაპირობა ატმოსფეროში სათბური გაზების თანამედროვე დონესთან 385 ჯერ მაღალი კონცენტრაცია (Paul F. Hoffman, 1998). წარსული გამყინვარების ცხადი ნიშნები მეზოზოურ ერაში (ტრიასული; იურული; ცარცული) $\approx 250-65$ მილიონი წლის წინ არ გხვდება. ცარცულ პერიოდში $\approx 140-65$ მლნ. წელი დედამიწის ტემპერატურა თანამედროვესთან შედარებით მნიშვნელოვნად მაღალი იყო (ფიგურა 1). ტროპიკული წყლების ტემპერატურა $+37^{\circ}\text{C}$ აღწედა. დედამიწის ისტორიაში ეს პერიოდი ცნობილია, როგორც ყინულოვანი საფარისაგან თავისუფალი პერიოდი. (Barry, R.G. Thian Yew Gan, 2002)



ფიგურა 1. დედამიწის ტემპერატურის დინამიკა ბოლო 500 მლნ. წლის მანძილზე¹²

ზემოთ აღნიშნული სამეცნიერო ჰიპოთეზები დედამიწაზე გამყინვარების და გამყინვარებათა შორის დათბობის პერიოდების მონაცვლეობას უკავშირებენ, პირველ რიგში მზისგან მიღებული ენერჯის ცვალებადობას, ატმოსფეროს ქიმიური შემადგენლობის ცვლილებებს, CO_2 და სხვა სათბური გაზების კონცენტრაციას ატმოსფეროში, ვულკანიზმის აქტივობას, დედამიწის ორბიტალურ პარამეტრებს, ქვეყნილი ზედაპირის ალბედოს უნარს, ხმელეთისა და ოკეანეების გადანაწილებას დედამიწის ზედაპირზე და სხვა.

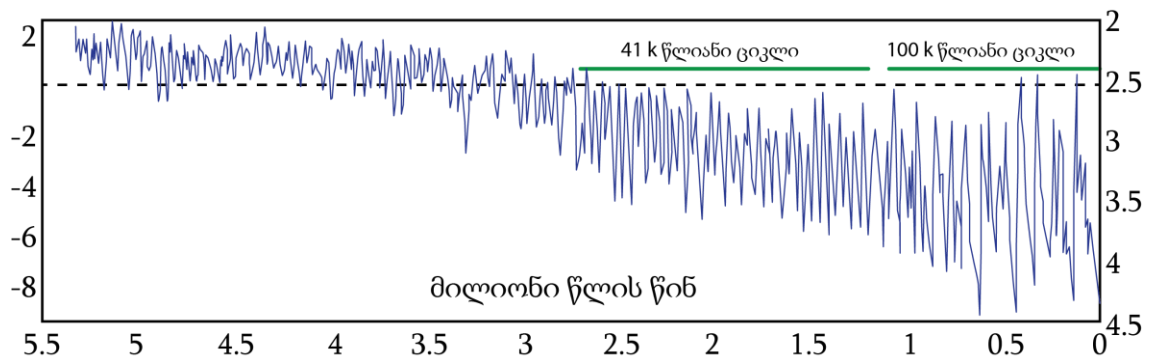
¹² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaeotemps.png

კრიოსფეროს როლი დიდია დედამიწის გეოგრაფიული გარსის ფორმირებაში, მის მდგრადობასა და დინამიკაში. მთავარი მდგენელებიდან; ყინულოვანი, თოვლის და მარადი მზრალობის საფარი დროში სხვადასხვა პერიოდით ცვალებადობს. თოვლის საფარს ახასიათებს სეზონური ცვალებადობა, მაშინ როდესაც ყინულოვანი და მარადი მზრალობის საფარი უფრო მდგრადია და დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში არსებობს. თოვლის საფარის სეზონური ცვალებადობა ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, ზამთარში ვარირებს (იანვარი) 46 მლნ.კმ²-დან 3.8 მლნ.კმ²-მდე (Roger G. Barry, Thian Yew Gan, 2011). მექანიზმი, რითაც თოვლისა და ყინულის საფარი მოქმედებს დედამიწის გლობალური ტემპერატურულ რეჟიმზე, ესაა მისი მაღალი არეკვლის (ალბედო) უნარი, რაც ტემპერატურის კლებას იწვევს. თოვლის საფარის და ღია ქვეფენილი ზედაპირის პირობებში მათ შორის განსხვავება შესაძლოა 10°C იყოს. თოვლ-ყინულოვანი საფარის შემცირება საწინააღმდეგოდ მოქმედებს და იწვევს გლობალური ალბედოს შემცირებას, შესაბამისად ტემპერატურის გლობალური მატებას.

1.3. მეოთხეული პერიოდი, პლეისტოცენი, ჰოლოცენი, თანამედროვე გამყინვარება

თანამედროვე გეოგრაფიული გარსის ფორმირების პროცესში ძირეული გავლენა, მეოთხეულ პერიოდში - პლეისტოცენურ ეპოქაში მრავალჯერადი გამყინვარებების ციკლურმა მონაცვლეობამ და შემდგომ ჰოლოცენში დათბობის ეპოქამ იქონია.

პლეისტოცენის პირველ ეტაპზე $\approx 2.6 - 0.8$ მლნ. წლებს შორის გამყინვარებათა ციკლურობა და ოკეანეების ზედაპირის ტემპერატურა კარგ კავშირს ავლენს დედამიწის ღერძის დახრის კუთხის ცვალებადობასთან (ნუტაცია) და ≈ 41 ათს. წლიან პერიოდს მოიცავს. ეს ციკლი ≈ 0.8 მლნ. წლის შემდეგ შეიცვალა, დაუკავშირდა დედამიწის ორბიტის ექსცენტრისიტეტის ცვალებადობას ≈ 100 ათასი წლიან პერიოდს (იხ. ფიგურა 2) (Raymo, Lisiecki, & Nisancioglu, 2006).



ფიგურა 2. დედამიწაზე ბოლო 5 მლნ. წ. განმავლობაში ტემპერატურის მსვლელობა¹³

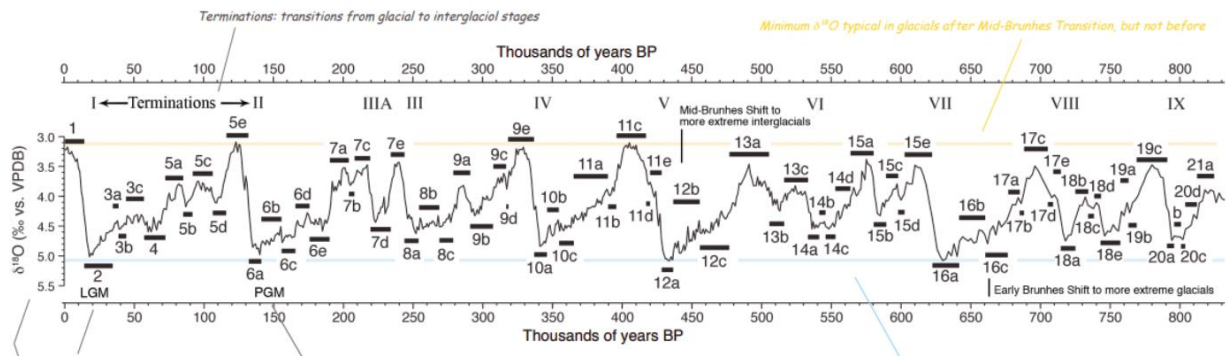
ციკლის ხანგრძლივობის ცვლილების ზუსტი მიზეზი და დადასტურებული სამეცნიერო თეორია ჯერჯერობით არ არსებობს. სამეცნიერო ლიტერატურაში იგი ცნობილია, როგორც შუა პლეისტოცენის გარდამავალი პერიოდი. (MPT-Mid-Pleistocene transition). არსებობს მოსაზრება, რომლის მიხედვითაც გვიან პლეისტოცენში გამყინვარების მასშტაბების ზრდის მასშტაბიდან გამომდინარე, მას უკვე შეეძლო მზის მაქსიმალური რადიაციის პერიოდების პერიოდში არსებობა (Bintanja, R.; Wal, R. S. W. van de, 2008). სულ მცირე ბოლო 6 გამყინვარების/გამყინვარებათა შორის ციკლის საშუალო პერიოდი 102 ათასი წელია \approx 85-დან 120 ათას წლამდე დიაპაზონით (Paillard, 2001) (Luthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, , 2008); (იხ. ფიგურა 4).

ევროკავშირის მიერ დაფინანსებული საერთაშორისო პროექტი EPICA¹⁴-ს პალეოკლიმატური მონაცემები, ცხად სურათს გვაძლევს მეოთხეულ პერიოდში კლიმატური პარამეტრების და მსოფლიო ოკეანის დონის დინამიკის შესახებ. მონაცემების ანალიზის საფუძველზე ირკვევა, რომ მეოთხეულში ყველაზე მძლავრი გამყინვარების პერიოდები MIS 2 – 35.6 - 11.6 ათასი წელი; MIS 12 – 451 - 425 ათასი წელი; MIS 16 – 651-621 ათასი წლის წინ გვექონდა, როცა CO₂ ის დონე ატმოსფეროში 180-200 ppm. ეცემოდა. 8 მყინვარული ციკლის დროს ატმოსფეროში მტვრის ნაწილაკების კონცენტრაცია 25-ჯერ მაინც მცირდებოდა (Roger G. Barry, Thian Yew Gan, 2011). მთიანი ტერიტორიების გამყინვარების ჯერადობისათვის მიღებულია ჩრდილოეთ ალპების პენკ-ბრუენერის სქემა, რომლიც მოიცავს გამყინვარების შემდეგ ფაზებს: Biber < 2.74 მლნ.წ.; Donau > 780

¹³ <http://ossfoundation.us/projects/environment/global-warming/natural-cycle>

¹⁴ პროექტი EPICA წარმოადგენს მრავალწლიან საერთაშორისო პროექტს, როლიც დაფინანსებულია ევროკავშირის საგრანტო დაფინანსების ფარგლებში. მასში მონაწილეობს ევროკავშირის წევრი ქვეყნები და კვლევის ძირითადი ამოცანაა ანტარქტიდის ყინულოვანი საფარის ღრმა ბურღვის მონაცემების ანალიზი კლიმატის წარსული ცვლილების ანალიზისათვის ჟანგბადის მდგრადი იზოტოპების - $\delta^{18}\text{O}$ და $\delta^{16}\text{O}$ საშუალებით

ათასი წ.; Günz (< 780 ათასი წ.); Haslach (< 780 – > 380 ka); Mindel (> 380 ათასი წ.); Riss (MIS 8–6) და Würm (MIS 4–2), მათგან Biber და Donau-ს ფაზები ჯერ კიდევ გაურკვეველი რჩება (იხ. ფიგურა 3.).

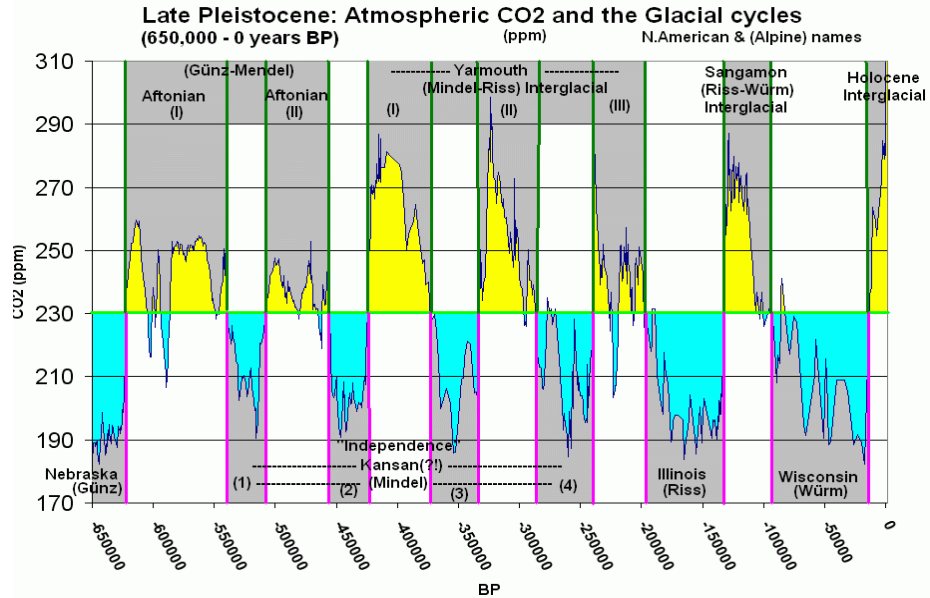


ფიგურა 3. უკანასკნელი 800 ათ. წლის განმავლობაში მიმდინარე კლიმატური ვარიაციები¹⁵

უკანასკნელი გამყინვარების ციკლი დედამიწაზე „ბოლო მყინვარული მაქსიმუმი“ (Last glacial maximum LGM) დაიწყო ≈ 115 ათასი წლის წინ და პირველ მაქსიმუმს 75 ათასი წლის წინათ მიაღწია (L. Bruce Railsback, Philip L. Gibbard, Martin, J. Head, Ny Riavo, G. Voarintsoa, Samuel Toucanne, 2015). ზღვის დონე, თანამედროვესთან შედარებით, 130 მეტრით დაბალი იყო. ამ პერიოდის გამყინვარება განსაკუთრებით შეეხო დედამიწის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს. ჩრდილოეთ ამერიკის კონტინენტზე გამყინვარების სიმძლავრემ 3000 მეტრს მიაღწია, მისი საზღვრები კი ჩრდილო განედის 37°-მდე გავრცელდა. ჯამში მძლავრი გამყინვარების მასშტაბმა 40 მლნ კმ² და საერთო მოცულობამ 50 მლნ. კმ³ მიაღწია. ხმელეთის $\approx 30\%$ ყინულის ფენით დაიფარა. გამყინვარების მეორე მაქსიმუმმა 26.5 და 19-20 ათასი წლის წინ მიაღწია (Roger G. Barry, Thian Yew Gan, 2011). ამ უკანასკნელი Würm¹⁶ „ვიურმული“ გამყინვარების დროს, კავკასიაში მძლავრი ხეობის ტიპის გამყინვარების კერები გავრცელებული იყო არა მხოლოდ კავკასიონის ქედზე, არამედ მის მიმდებარე პარალელურ და შტო ქედებზე¹⁷. კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე ხეობის ტიპის მყინვარების ზომები 17-35 კმ-ის ფარგლებში მერყეობდა. ზღვის დონიდან ყველაზე დაბალ ნიშნულზე დასავლეთ

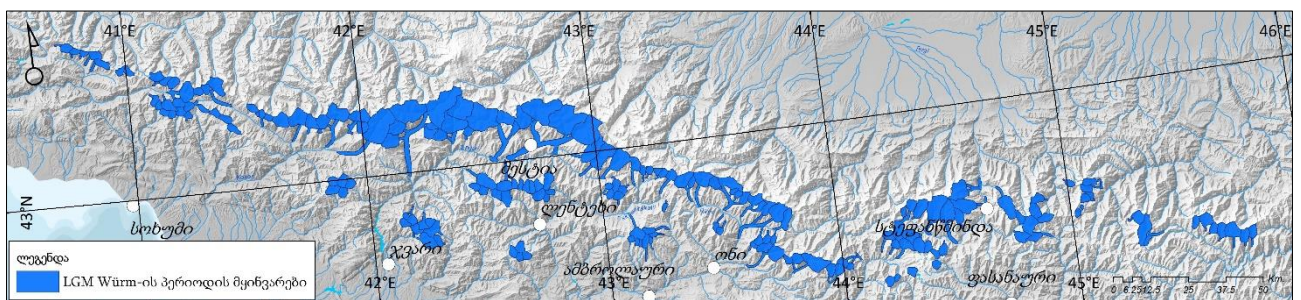
¹⁵ (L. Bruce Railsback, Philip L. Gibbard, Martin, J. Head, Ny Riavo, G. Voarintsoa, Samuel Toucanne, 2015)
¹⁶ Würm გამყინვარება ემთხვევა LGM და MIS 2 პერიოდს რომლის მაქსიმალური ფაზა 35-11 ათასი წლის წინ დადგა. იგი დაიწყო 115 ათასი და ≈ 11 ათასი წლის წინ დასრულდა
¹⁷ მცირე კავკასიონზე (აჭარა იმერეთის, ჯავახეთის, სამსარის, თრიალეთის, არსიანის ქედებზე) ამავე პერიოდის გამყინვარების არსებობა მეცნიერულად დადასტურებულია, თუმცა მისი მასშტაბები მსჯელობის საგანია და დამატებით კვლევებს მოითხოვს. საკითხს ართულებს შედარებით რბილი რელიეფის დომინირება რაც ძველი მყინვარული რელიეფის ნივთიერების კვალდაკვალ რთული აღსადგენია

კავკასიონის მყინვარებიდან მდ. ნენსკრას და პტიმის პალეო მყინვარების ენები ჩამოდიოდნენ $\approx 600-680$ მ. სხვა დიდი მყინვარის ენები ცენტრალურ კავკასიონზე ზღვის დონიდან 1200-1600 მეტრის ფარგლებში, დასავლეთ კავკასიონზე კი 2000-2500 მეტრის ფარგლებში მერყეობდნენ (R. gobejishvili, 2011).



ფიგურა 4. პლეისტოცენის კლიმატის ცვლილება, გამყინვარების და დათბობის პერიოდების ციკლები 800 ათასი წლის მანძილზე¹⁸

ამავე მონაცემებზე¹⁹ დაყრდნობით, ყველაზე დიდი მულხურას პალეო მყინვარი ფართობით 310 კმ²-ს და სიგრძეში 35 კმ-ს. აღწევდა. გამყინვარების ჯამური ფართობი ≈ 3400 კმ²-ს შეადგენდა (იხ. ფიგურა 5).

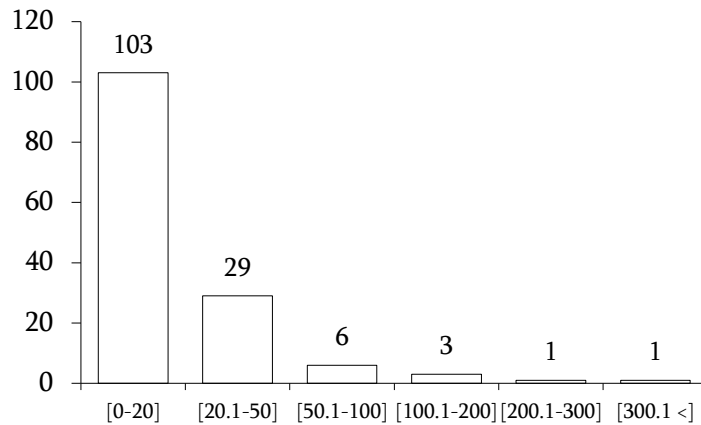


ფიგურა 5. უკანასკნელი გამყინვარების (Würm M2 – LGM) მაქსიმალური პერიოდის მყინვარები კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე (ავტ. რ. გობეჯიშვილი)

¹⁸ (Luthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, , 2008), doi:10.1038/nature06949

¹⁹ რიცხვითი ანალიზი ჩატარებულია ჩემს მიერ გეოსაინფორმაციო სისტემებში რ. გობეჯიშვილის მონაცემებზე დაყრდნობით

მონაცემების ანალიზის საფუძველზე, ცხადია რომ მეოთხეული პერიოდის მაქსიმალური გამყინვარების ფაზისათვის კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე გავრცელებული იყო ხეობის ტიპის მძლავრი მყინვარული საფარი, საფარული გამყინვარებით მხოლოდ ზოგიერთ მწვერვალებზე (იხ. ფიგურა 6).



ფიგურა 6. უკანასკნელი გამყინვარების მაქსიმალური პერიოდის (Würm M2 – LGM) მყინვარების განაწილება მათი ფართობების მიხედვით კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე (ავტ. რ. გობეჯიშვილი;)

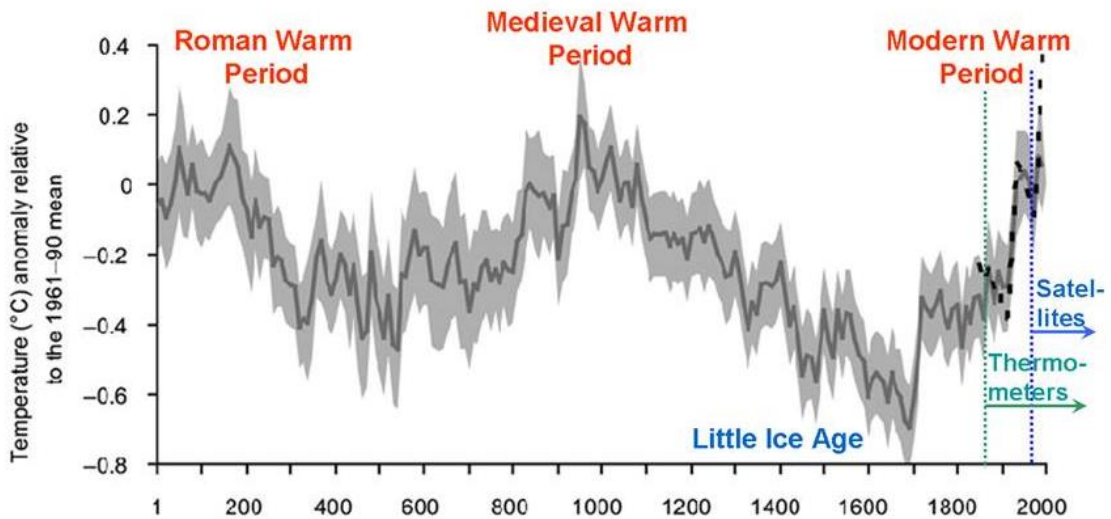
მყინვართა ენები ხეობებშივე წყვეტდნენ არსებობას და მათი ენები დაბლობ ზონაში აღარ ვრცელდებოდა (R. gobejishvili, 2011). მცირე გამყინვარების დადგომის პერიოდისათვის მყინვარების საერთო ფართობი უკვე შემცირებული იყო 78%-ით ≈ 3400 კმ²-დან ≈ 744 კმ²-მდე, საერთო მოცულობით ≈ 9000 კმ³.

1.4. მცირე გამყინვარების ეპოქა დედამიწის სითბური ბალანსის და გამყინვარების დინამიკა

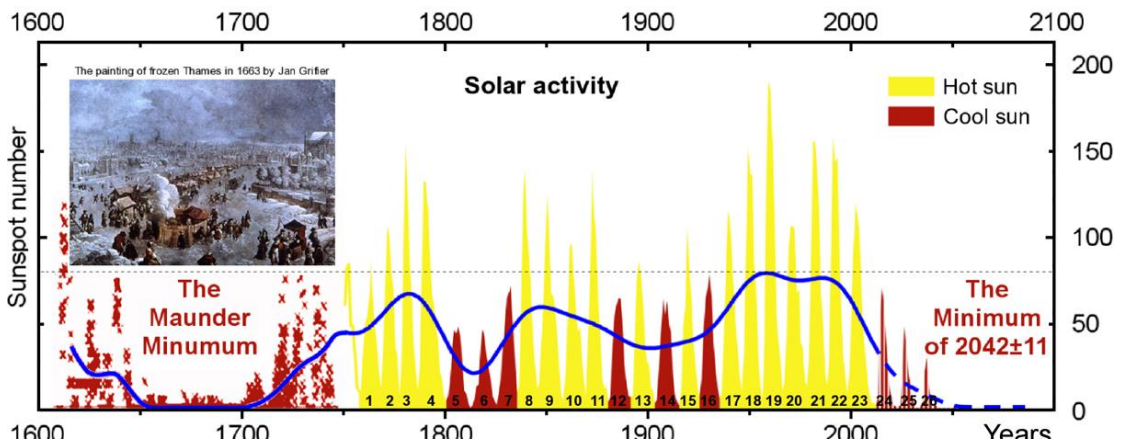
როგორც წინა ქვეთავებიდან ჩანს, დედამიწაზე თერმული ბალანსის ცვლილების ციკლორობას მრავალჯერ ჰქონდა ადგილი და მომავალშიც არაერთხელ განმეორდება, თუმცა ამჟამად ჩვენ განვიხილავთ კაცობრიობის ისტორიისათვის ყველაზე ხელშესახებ „მცირე გამყინვარების ეპოქას“, რომელიც დედამიწაზე თანამედროვე გეოგრაფიული გარემოს განვითარებაში და კაცობრიობის ისტორიაში უმნიშვნელოვანესი პერიოდი იყო. მცირე გამყინვარების პერიოდი დედამიწაზე $\approx 1300 - 1820$ წლებში შუა საუკუნეების კლიმატური ოპტიმუმის The Medieval Warm Period (MWP) $\approx 950-1250$ წწ. შემდეგ დადგა. ტერმინი მცირე გამყინვარება სამეცნიერო ლიტერატურაში 1939 წ. François Émile Matthes-მა შემოიტანა. ტემპერატურის კლებას თან ახლდა მრავალი

სახის ისეთი ცვლილება, რაც იქამდე განვითარებული ცივილიზაციისათვის ნაკლებ პრობლემური იყო და მან გლობალური ხასიათი მიიღო. მცირე მოსავლიანობა, მასობრივი შიმშილი, თანმდევი დაავადებების (შავი ჭირი) პანდემია ევროპის კონტინენტზე. ყოველივე ამან მნიშვნელოვანი დაღი დაასვა ევროპის კონტინენტზე მცხოვრები ადამიანების ეკონომიკურ საქმიანობას, კულტურას, დემოგრაფიულ მდგომარეობას და სხვა. სვანეთის ტერიტორიაზე აგებული კოშკების უმეტესობა ე.წ. სათემო კოშკებია, რომლებიც შუა საუკუნეების კლიმატური ოპტიმუმის დროსაა აგებული და არ აქვს საცეცხლური ადგილები რითაც შესაძლებელი იქნებოდა მათი გათბობა (გიგი თევზაძე, 2014). სავარაუდოა, რომ რომანული და შუა საუკუნეების კლიმატური ოპტიმუმის დროს, სვანეთის მცინვარებმა მნიშვნელოვნად დაიწიეს უკან, განთავისუფლდა ჩრდილო კავკასიაში გადასასვლელი, რამაც სამხედრო თვალსაზრისით შექმნა საფრთხე. სწორედ ამის გამოძახილი უნდა იყოს სათემო კოშკების ჩრდილოეთიდან მომავალი გზების ჩამკეტ ხეობებთან განთავსებაც (გიგი თევზაძე, 2014).

მცირე გამყინვარება დაიწყო 1300 წელს, რომლიც 1820-1850 წლამდე გაგრძელდა. პერიოდი ხასიათდება დათბობა აცივების ფაზების მონაცვლეობით. აცივების პირველი ფაზას $\approx 1300-1400$ წწ. მოჰყვა 1500-იან წლებში ტემპერატურის ოდნავმატება, რის შემდეგაც კლიმატი არსებითად შეიცვალა აცივების თვალსაზრისით. მათ შორის კი 1645-1715 წწ. იყო ყველაზე ცივი პერიოდი, რომლის დროსაც ევროპის კონტინენტზე, ზამთრის საშუალო ტემპერატურა 2°C -ით დაბალი იყო დღევანდელთან შედარებით (Environmental history resources, 2015). საწყის ეტაპზევე, 1315-1317 წლებში, კლიმატის ცვლილებას უკვე მოჰყვა პირველი დიდი შიმშილობა, რომლიც დროსაც მილიონობით ადამიანი დაიღუპა ევროპის კონტინენტზე. უკვე შემდგომი პერიოდისათვის, თეორიული გამოთვლებით, 1550 წლიდან დაიწყო მცინვარების საგრძნობი წინ წამოწევა, რასაც 1650 წელს თან მოჰყვა პირველი კლიმატური მინიმუმი. მცირე გამყინვარების ხანაში, ქ. ლონდონში მდ. ტემზა ხშირად იყინებოდა და ეწყობოდა ბაზრობა, უკანასკნელი ასეთი ბაზრობა ჩატარდა 1814 წ. იგი ემთხვევა კიდევაც მცირე გამყინვარების პერიოდის დასასრულს (N.A. Krivova, L.E.A.Vieira, S. K. Solanki, 2010). (იხ. ფიგურა 8).



ფიგურა 7. მცირე გამყინვარების პერიოდის კლიმატური ცვლილებები²⁰



ფიგურა 8. მცირე გამყინვარების პერიოდის მზის ლაქები²¹

აღნიშნული პერიოდიდან მოყოლებული, ამჟამად ვიმყოფებით მზის აქტიურობის თანამედროვე მაქსიმუმში, იგი კარგად აისახა მცირე გამყინვარების შემდგომი პერიოდიდან კლიმატის ცვლილებაში და შესაბამისად გეოგრაფიულ გარსში მიმდინარე სხვა მრავალ პროცესზე.

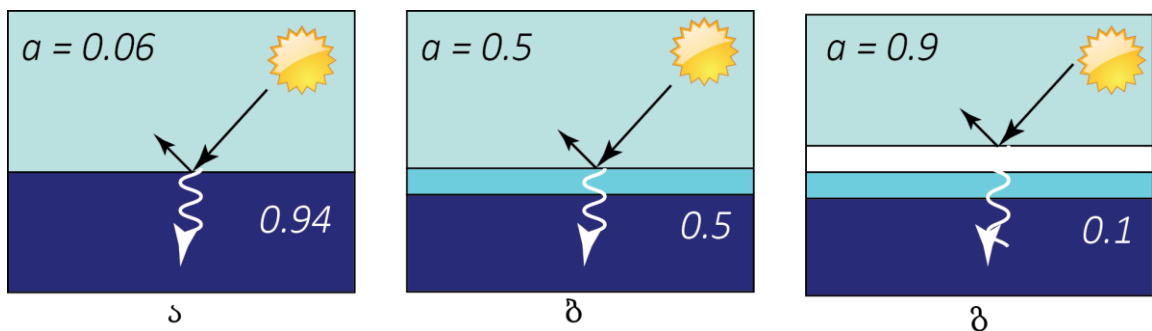
ამ მხრივ, ჩვენთვის საინტერესოა, გეოგრაფიული გარსის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ელემენტის, გლაციალური ზონის დინამიკა, განსაკუთრებით კი ჩვენი ქვეყნის მაგალითზე ხეობის ტიპის დიდი მყინვარების და ნივალურ გლაციალური ზონის დეგრადაციის დინამიკა, მათი მოცულობების და სხვა მორფო მეტრული პარამეტრების ცვლილებები, მათი ტემპი და რაობა.

²⁰ (B. Christiansen F. C. Ljungqvist, 2012)

²¹ (N.A. Krivova, L.E.A.Vieira, S. K. Solanki, 2010)

1.5. კრიოსფეროს ცვალებადობა მისი გავლენა გეოგრაფიულ გარემოზე გლობალურ და რეგიონალურ ჭრილში

კრიოსფეროს ელემენტებს მნიშვნელოვანი გავლენა აქვთ დედამიწის გლობალური კლიმატის ფორმირებაში. იგი დიდ როლს ასრულებს რეგიონალურ დონეზე მიკრო კლიმატური პარამეტრების ფორმირებაშიც. პირველი ძირეული ფაქტორი, რომელიც დედამიწის გლობალური სითბური ბალანსის ფორმირებაში იღებს მონაწილეობას, ეს არის მზის სხივური ენერჯის არეკვლის კოეფიციენტი - ალბედო. მისი სიდიდე 0-დან 1-მდე დიაპაზონში იცვლება და ახასიათებს ქვეფენილი ზედაპირის მიერ მზის სხივური ენერჯის არეკვლის უნარს. ქვეფენილი ზედაპირი რომელიც მთლიანად შთანთქავს მზის ენერჯიას, ალბედოს კოეფიციენტი 0 ტოლია, ხოლო ზედაპირი, რომელიც მთლიანად აირეკლავს მზის ენერჯიას 1-ის. დედამიწის ზედაპირზე არსებული თოვლ-ყინულოვანი საფარი და ჰიდროსფეროს სხვა კომპონენტები (ოკეანეები, ზღვები) სხვადასხვა არეკვლის უნარით ხასიათდებიან. მათ შორის ყველაზე მაღალი არეკვლის კოეფიციენტი α 0.9 აქვს ახალ მოსულ სუფთა თოვლს, მაშინ როდესაც სუფთა ყინულოვანი ზედაპირი აირეკლავს მზის სხივური ენერჯის ნახევარს. დედამიწაზე ერთერთი ყველაზე კარგი სითბოს მიმღები არის ზღვების და ოკეანეების ზედაპირი, რომელიც შთანთქავს მზის სხივური ენერჯის α 0.94 ნაწილს და შესაბამისად აირეკლავს მის მხოლოდ მცირე α 0.06 მეასედ ნაწილს (იხ. ფიგურა 9). ზღვის ყინულოვანი საფარიც მაღალი ალბედოს კოეფიციენტით ხასიათდება და 0.5 – 0.7 მდე ცვალებადობს (Barry, R.G. Thian Yew Gan, 2002).



ფიგურა 9. ქვეფენილი ზედაპირის ალბედოს კოეფიციენტი ა) ოკეანის, ზღვების და სხვა წყლის ობიექტების ზედაპირი; ბ) სუფთა ყინული; გ) თოვლ-ყინულოვანი საფარი

ცხადია, დედამიწის ზედაპირზე განსხვავებული ქვეფენილი ზედაპირის არეკვლის უნარი განაპირობებს დედამიწის გლობალურ სითბურ ბალანს და პირდაპირ

პროპორციულ კავშირშია ამ ზედაპირების თანაფარდობასთან. რაც მეტია მაღალი არეკვლის უნართან გამორჩეული ზედაპირების (ზღვის ყინულოვანი საფარი, მარადი თოვლ-ყინულოვანი საფარი, სეზონური თოვლი) თანაფარდობა, მით ნაკლებია დედამიწის გლობალური ტემპერატურა და პირიქით. დადგენილია, რომ თუ დედამიწის მთლიანი ზედაპირი დაფარული იქნება ყინულოვანი საფარით, მაშინ დედამიწაზე ალბედო იქნება 0.84. თუ მთლიანი დედამიწა დაფარული იქნებოდა ტყის საფარით, ამ შემთხვევაში 0.14. ამჟამად ქვეყნული ზედაპირის არსებული თანაფარდობის პირობებში, დედამიწის გლობალური ალბედოს კოეფიციენტი 0.3 ტოლია, რაც ნიშნავს რომ მზის სხივური ენერჯის ყოველ კვადრატულ მეტრზე მოსული 340 W ენერჯიდან დედამიწა შთანთქავს 240 W-ს, დანარჩენი კი აირეკლება ატმოსფეროს მაღალ ფენებში და ღია კოსმოსში²². კრიოსფეროს ცვალებადობა გრძელვადიან პერიოდში გამოიწვევს ოკეანის დონის მატებას, მისი მარილიანობის შემცირებას, მყინვარული კვების მდინარეების და შიდა წყალსატევების დონის შემცირებას.

რეგიონალურ დონეზე, მყინვარების დინამიკას მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს. მათ შორის მთავარია იმ მდინარეების ჰიდროლოგიური რეჟიმის ცვლილება, რომლებიც ნივალურ-გლაციალური ზონაში იღებენ სათავეს და განსაკუთრებით ზაფხულის განმავლობაში მყინვარული წყლებით იკვებებიან. მდ. ენგურის საშუალო წლიური ჩამონადენის 21% (ენგური - ჯვართან) და მდ. მულხურას საშუალო წლიური ჩამონადენის 53% (მულხურა - ლატალთან) მყინვარული წყლები შეადგენენ (კლიმატის ცვლილების შესახებ საქართველოს მესამე ეროვნული შეტყობინება, 2015). გააქტიურებული დნობის პარალელურად იზრდება მყინვარული წყლის წილი მყინვარული კვების მდინარეთა ჩამონადენში. მყინვარული საფარის შემცირების პარალელურად მაღალმთიან ზონაში თავისუფლდება ტერიტორიები. ტროგული ხეობების დაბალ ნაწილებში, ხდება პრიმიტიული ნიადაგ საფარის და მეტ-ნაკლებად კარგად განვითარებული მცენარეული საფარის ფორმირება. დედამიწაზე მიმდინარე კლიმატის გლობალური ცვლილებების პარალელურად მყინვარები უფრო მეტი საფრთხის შემცველი ხდება ფლუვიო-გლაციალური ღვარცოფების, მყინვარის

²² (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/84499/measuring-earths-albedo>)

მექანიკური ნგრევის, მორენულ ან ყინულოვან ხერგილებს შორის ტბების გაჩენის მხრივ.

1.6. კავკასიონის მყინვარების შესწავლის ისტორია, არსებული კვლევები და მასალები

კავკასიის გეოგრაფიულ რეგიონს და მათ შორის საქართველოს ბუნებრივი გარემოს სამეცნიერო შესწავლას ხანგრძლივი ისტორია აქვს. იგი სათავეს ანტიკური პერიოდიდან იღებს, თუმცა მნიშვნელოვანი წინგადადგმული ნაბიჯი და სამეცნიერო შეფასება კავკასიის რეგიონისათვის, პირველად დიდი ქართველი გეოგრაფის ვახუშტი ბაგრატიონის ნაშრომშია მოცემული. მიუხედავად იმისა, რომ ვახუშტის ძირითადი თხზულება ატარებს „საქართველოს ცხოვრების“ სახელწოდებას და თვით მას ბევრნი როგორც ისტორიკოსს ისე იცნობენ, მაინც მის მთავარ დამსახურებას საქართველოს და მასთან მოსაზღვრე მხარეების გეოგრაფიულ კვლევაში შეტანილი წვლილი შეადგენს. 1735-1745 წწ. ვახუშტიმ შექმნა კაპიტალური ნაშრომი საქართველოს ისტორიაზე, გეოგრაფიაზე, თანდართული ორი ატლასით. მასვე პირადად აქვს შესწავლილი და დახასიათებული საქართველოს ბუნება, ფლორა, ფაუნა, კავკასიონის მყინვარების გეოგრაფიული განლაგება, სისქე, ფერი, ტყის საფარის გავრცელების ზედა საზღვარი, ლანდშაფტთა ვერტიკალური ზონალობის საკითხები და მრავალი სხვა (მარუაშვილი, 1975). „კვალად არიან მთანი დიდროვანნი, რამეთუ ჩრდილოეთით უძევს კავკასი შავი ზღვიდამ ვიდრე კასპიამდე, რომლისა სიმაღლე დღე ერთისა სავალ, და მარადის მყინვარე უმაღლესთა ზედა, რომლისა სიზრქე ყინულისა არს კ-ლ მხარი²³, და ჟამსა ზაფხულისასა გასქდების და, თუ შთაუტეო კაცი, მცირე ჟამს ვერ ძალუცს დათემნად სიცივისა, და ქუეშე მისსა დის მდინარენი, და არს ყინული მწვანე და წითელი ვითარცა კლდე, სიძველის გამო“. (გობეჯიშვილი, თოვლ-მყინვარული საფარი ვახუშტი ბაგრატიონის შრომებში, 1997) ვახუშტი რეგიონების რელიეფის სიმაღლით ვერტიკალური ზონალობის დასახასიათებლად შემდეგ ნიშან თვისებებს იყენებს: მყინვარიანი; მუდმივ თოვლიანი; დროებით თოვლიანი; უთოვლო და საყინულეები. კავკასიის

²³ მყინვარის სისქის მითითებისას ვახუშტი იყენებს ძველ ქართულ სიგრძის საზომ ერთეულს „მხარი“ რაც დაახლოებით 2 მეტრის ტოლფასია. ვახუშტის მიხედვით „კ-ლ მხარი“ დაახლოებით 50-70 მეტრის ფარგლებშია. (გობეჯიშვილი, თოვლ-მყინვარული საფარი ვახუშტი ბაგრატიონის შრომებში, 1997)

გეოგრაფიული კვლევის ისტორიაში მნიშვნელოვანი სამეცნიერო მასალები დაგროვდა - აღორძინების პერიოდში²⁴ და განსაკუთრებით ეს საქმიანობა გაძლიერდა ახალი პერიოდიდან²⁵ მოყოლებული. საქართველოს რუსეთის იმპერიასთან შეერთების შემდეგ კავკასიას სწავლობდნენ რუსეთის იმპერიის სამეცნიერო საზოგადოებების ხელშეწყობით სხვადასხვა სამეცნიერო მიმართულების მოღვაწეები, სამხედროები, ტოპოგრაფები და ა.შ. მათ დიდ ნაწილს ყურადღება გამახვილებული აქვს კავკასიის გლაციალური სისტემის დახასიათებაზე და ხშირად კონკრეტული მყინვარების დეტალურ შესწავლაზე კი აქვთ აქცენტი გადატანილი. ამავე პერიოდს ემთხვევა პირველი ასვლები კავკასიონის და სამხრეთ კავკასიის უმაღლეს მწვერვალებზე (იალბუზი 5642 მ.; არარატი 5165 მ.; მყინვარწვერი 5033 მ.) კვლევებმა უფრო ფართო მასშტაბი XIX საუკუნის მეორე ნახევრიდან მიიღო, რასაც ბიძგი მისცა ევროპაში და რუსეთის იმპერიაშიც სამეცნიერო მუშაობის აღმავლობამ, კავკასიაში გზების გაყვანამ და პოლიტიკური სიტუაციის მეტნაკლებად მოწესრიგებამ. ამავე პერიოდში თბილისში იხსნება მთელი რიგი სამეცნიერო დაწესებულებები: 1844 წ. თბილისის ობსერვატორია, 1845 წ. ბოტანიკური ბაღი, 1851 წ. რუსეთის საიმპერატორო გეოგრაფიული საზოგადოების კავკასიის განყოფილება და სხვა.

ღირებული სამეცნიერო საფუძველი საქართველოს გეოგრაფიული გარემოს შეფასებაში მისცა კავკასიის სხვადასხვა მასშტაბის სამხედრო ტოპოგრაფიული რუკების შედგენამ. 1860 წლიდან საველე გეოდეზიურ, ტრიანგულაციის, ტოპოგრაფიულ და სანიველირო საქმიანობას კავკასიის მასშტაბით ახორციელებდნენ: ი. ხომკო; ი. სტებნიცკი²⁶; გ. ქავთარაძე²⁷; კ. პოდოზერსკი. მოგვიანებით კ. პოდოზერსკიმ მის მიერ ჩატარებული ტოპოგრაფიული აგეგმვების დროს მიღებული ცოდნით და ერთ ვერსიანი რუკების სრული რევიზიის საფუძველზე გამოსცა მაღალ სამეცნიერო დონეზე შესრულებული სამუშაო კავკასიის მყინვარების შესახებ

²⁴ ლ. მარუაშვილის სქემის მიხედვით საქართველოს გეოგრაფიული შესწავლის „აღორძინების პერიოდი“ ემთხვევა ევროპაში სამეცნიერო გეოგრაფიული აღმოჩენების ხანას XVI-XVIII საუკუნეებში. (მარუაშვილი, 1975)

²⁵ ავტორისვე სქემის მიხედვით „ახალი პერიოდი“ ესაა საქართველოს რუსეთის იმპერიასთან შეერთების დროიდან, XIX საუკუნის დასაწყისიდან (მარუაშვილი, 1975)

²⁶ მოგვიანებით ი. სტებნიცკიმ მოგვცა მონაცემები კავკასიაში მუდმივი თოვლის ხანის საზღვრის მდებარეობაზე, კავკასიაში მყინვართა გავრცელებაზე

²⁷ პირველი ქართველი მთამსვლელი (1861-1941 წწ.) იგი მაღალმთიანი ასვლების და რთულად მიუვალი ტერიტორიების აგეგმვაზე იყო დახელოვნებული. ხშირად მას „მყინვართა ტოპოგრაფისაც“ უწოდებდნენ. (მარუაშვილი, 1975)

(Подозерски, 1911). 1847-1880 წლებში თბილისში გადმოსახლდა და კავკასიის სამეცნიერო შეფასებას მრავალი სამეცნიერო ნაშრომი, მათ შორის მყინვარებზე მიუძღვნა ჰ. აბიხმა. იგი ასევე სწავლობდა ძველი გამყინვარების მასშტაბებს და თავისივე პირველადი მოსაზრება კავკასიაში წინა გამყინვარების არარსებობის შესახებ, შემდგომი დეტალური შესწავლის საფუძველზე თავადვე უარყო. საინტერესო გამოკვლევები აქვს ჩატარებული ინგლისელ ალპინისტ დუგლას ფრეშფილდს (1835-1934 წწ.). იგი კავკასიას XIX საუკუნის 60-80 წლებში სტუმრობდა და ევროპაში ითვლებოდა როგორც კავკასიონის მარად თოვლიანი სამყაროს პირველი აღმომჩენი. კავკასიონის მყინვარებს ასევე სწავლობდნენ გ. მერცხაბერი; მ. დეში; ვ. სელა; ნ. დინიკი; ნ. ბუში; ა. დუხოვსი; ა. რეინჰარდი; და მრავალი სხვა. (მარუაშვილი, 1975)

XX საუკუნიდან მოყოლებული კავკასიონის მყინვარებს სწავლობდნენ: დ. წერეთლი, ლ. მარუაშვილი; დ. უკლება; რ. ხაზარაძე; ვ. ცომაია; ო. დრობიშვილი; რ. შენგელია; ვ. გელაძე; გ. აბულაძე, თ. ლაშხი. გ. კურდღელაიძე; შ. ინაშვილი, ლ. ფულარიანი, დ. ტაბიძე; მ. ძაძამია, თ. ტბელიშვილი, გ. ბრეგვაძე და მრავალი სხვა. კავკასიონის ქედის ძველი გამყინვარების თაობაზე საინტერესო ნაშრომია რ. ხაზარაძის „კავკასიონის პლეისტოცენური გამყინვარება“, რომლიც დეტალურად აღწერს კავკასიონის როგორც სამხრეთი ასევე ჩრდილოეთი ფერდობის უკანასკნელი „ვიურმული“ გამყინვარების მასშტაბებს და მათ მახასიათებლებს, პალინოლოგიურ, პეტროგრაფიულ, არქეოლოგიურ და სხვა მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით. ამავე მიმართულებით მნიშვნელოვანი შრომა აქვს ჩატარებული რ. გობეჯიშვილს, რომელმაც მოგვცა კავკასიონის და მიმდებარე ქედებისათვის უკანასკნელი გამყინვარების მასშტაბები. ნაშრომს თან ერთვის გეოსაინფორმაციო სისტემებში დამუშავებული რუკა, მეთოდოლოგია და შესაბამისი ცხრილები (R. gobejishvili, 2011).

კავკასიონის ქედის თანამედროვე გამყინვარების შესახებ სხვა საინტერესო სამეცნიერო შრომები არსებობს. მცირე გამყინვარების პერიოდიდან მოყოლებული სრულმასშტაბიანი რევიზია კავკასიონის მყინვარებისა ეკუთვნის კ. პოდოზერსკის 1911 წ. (Подозерски, 1911); ლ. მარუაშვილის ხელმძღვანელობით (გ. კურდღელაიძეს; თ. ლაშხს; შ. ინაშვილს, დ. ტაბიძეს - Каталог ледников СССР (Том 9; Част 2-6); ვ. ცომაიას (Каталог ледников СССР (Том 9; Част 7) რ. გობეჯიშვილს 1989 (P.Г.Гобеджишвили, 1989); გ. კორძაბიას (გ. თვაური; ლ. შენგელია დისტანციური ზონდირების მეთოდოლოგიით) ლ. ტიელიძეს, რომლის ნაშრომიც ეხება კავკასიონის ქედის

მყინვარების დეგრადაციის საკითხებს დისტანციური ზონდირების მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით (ტიელიძე, 2016) (Levan G. Tielidze, Roger D. Wheate, 2018). თანამედროვე მონაცემებია განთავსებული თავისუფალი ინტერნეტ რესურსების სახით მსოფლიო მყინვარების მონიტორინგის ერთიან ვებ პორტალზე GLIMS - [Global Land Ice Measurements from Space](#). დისერტაციის შესრულებისას და მყინვარების სივრცე-დროთი ანალიზი უპირატესად ეყრდნობა XX საუკუნის დასაწყისისათვის შექმნილ კ. პოდოზერსკის; XX საუკუნის მეორე ნახევარში შექმნილ მყინვარულ კატალოგებს (Каталог ледников СССР; რ. გობეჯიშვილის კატალოგი, Ледники Грузии) და უკანასკნელი პერიოდის დისტანციური ზონდირების მასალების (2010-2017 წწ.) შედარებას კვლევის კარტოგრაფიული, გეოინფორმაციული მეთოდოლოგიის და პროგრამული უზრუნველყოფების გამოყენებას.

კავკასიონის ქედის თანამედროვე და ძველი გამყინვარება საინტერესო ბუნებრივ ფენომენს წარმოადგენს, უპირველესად, მისი მდებარეობის ზომიერი და სუბტროპიკული სარტყლების საზღვარზე და ამასთან დაკვირვებებსაც ხანგრძლივი ისტორია აქვს, როგორც მის ჩრდილოეთ, ასევე სამხრეთ ფერდობზე, პარალელურად ქედის ორივე მნიშვნელოვან მწვერვალზე განთავსებულია მაღალმთიანი მეტეოროლოგიური სადგურები (მ. იალბუზის და მ. მყინვარწვერის სადგურები). კავკასიონის ქედის გამყინვარების შესწავლა უფრო მეტ მასშტაბებს და კოორდინირებას მოითხოვს, როგორც რეგიონალურ ასევე საერთაშორისო დონეზე.

საქართველოში ამჟამად მყინვარების კვლევებს აწარმოებენ თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი ზუსტ და საბუნებისმეტყველო ფაკულტეტის გეოგრაფიის დეპარტამენტი, გარემოს ეროვნული სააგენტოს ჰიდრომეტეოროლოგიის დეპარტამენტი, ვახუშტი ბაგრატიონის გეოგრაფიის ინსტიტუტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი და ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი. აღნიშნული სამეცნიერო, სასწავლო და სახელმწიფო ორგანიზაციები სახსრების სიმცირის გამო ვერ აწარმოებენ სრულყოფილ დაკვირვებას მყინვარის ჩამონადენზე, თოვლის საფარზე, მყინვარულ აუზებში კლიმატის ელემენტებზე და რაც უმნიშვნელოვანესია ყოველწლიურ მყინვარის მასის ბალანსზე დაკვირვებას. სასურველია აღნიშნული ინსტიტუტების მჭიდრო თანამშრომლობა და გლაციოლოგიური კვლევების უფრო მაღალ სამეცნიერო დონეზე წარმოება სტუდენტების აქტიური ჩართულობა.

2. კავკასიონის მყინვარების არსებობის (საქართველოს ფარგლებში) გეოგრაფიული თავისებურებანი

2.1. რელიეფი და გამყინვარების ზოგადი ხასიათი

კავკასიონის ქედი მდებარეობს ევრაზიაში, ევროპისა და აზიის სუბკონტინენტების საზღვარზე, შავ და კასპიის ზღვებს შორის 145 ათას კმ²-ზე, ა.გ. 37°30'; ჩ.გ. 45°00' და ა.გ. 49°30'; ჩ.გ. 40°30'²⁸ განედებს შორის სუბ-მერიდიანული მიმართულებით დაახლოებით 1100 კმ-ზე. მისი სიგანე 32 კმ-დან 180 კმ-მდე დიაპაზონში მერყეობს (Efremov, 2001). საქართველოს ჩრდილოეთი საზღვრის გასწვრივ კავკასიონი სამ მსხვილ გეომორფოლოგიურ ერთეულად: დასავლეთ, ცენტრალურ და აღმოსავლეთ კავკასიონად იყოფა. მათ შორის საზღვარს მწ. იალბუჯისა და მწ. მყინვარწვერის მასივზე ავლებენ (იხ. ფიგურა 10). ქედის ამგვარი დაყოფა მორფო მეტრულ, გეომორფოლოგიურ და გეოლოგიურ ხასიათს ატარებს. რაც შეეხება თანამედროვე გამყინვარების ხასიათს, დასავლეთ კავკასიონზე უპირატესად გავრცელებულია კარული ტიპის მყინვარები, მაშინ როდესაც ცენტრალური კავკასიონის სვანეთის მონაკვეთზე ხეობის რთული და ხეობის, რაჭის მონაკვეთზე კი ხეობის ტიპის მყინვარები ჭარბობს. ცენტრალური კავკასიონის მონაკვეთზე, მამისონის უღელტეხილიდან აღმოსავლეთით, უპირატესად ისევ კარული ტიპის მყინვარები გვხვდება, ხოხის ქედის გარდა.



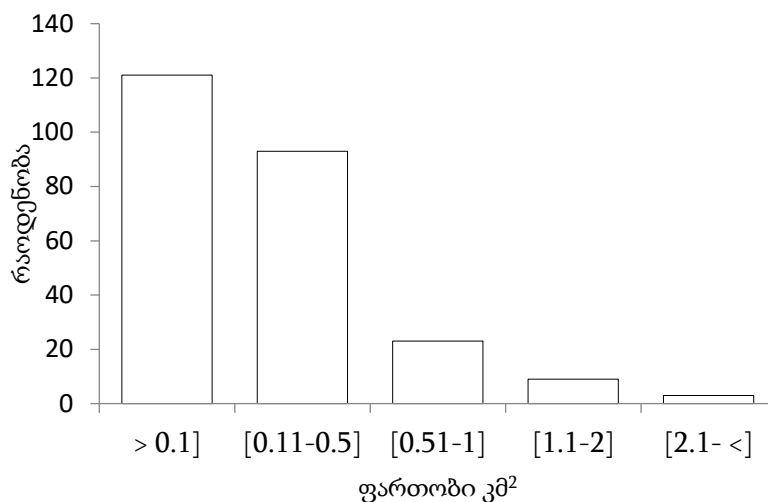
ფიგურა 10. საკვლევის რეგიონის სქემატური რუკა

კავკასიონის ქედის წყალგამყოფი ღერძული მონაკვეთი საქართველოს საზღვრის ფარგლებში მწ. ავადჰარადან (2960 მ) მწ. ტინოვროსომდე (3374 მ) 792 კმ სიგრძეზე შემოდის. მისი საშუალო სიმაღლე 3223 მ-ია. თანამედროვე გამყინვარება გავრცელებულია წყალგამყოფი ქედის დასავლეთ და ცენტრალურ ნაწილზე.

²⁸ ქედის ძირითადი მიმართულების მახასიათებელია, რომ იგი დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ გადაჭიმულია 1100 კმ-ზე $\approx 12^\circ$ და ჩრდილოეთიდან სამხრეთისაკენ 500 კმ-ის $\approx 4.5^\circ$ მანძილზე.

აღმოსავლეთ კავკასიონზე თანამედროვე გამყინვარება შესამჩნევად კლებულობს და ინაცვლებს უფრო მაღალ გვერდით ან შტო ქედებზე, თუმცა აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ კლიმატის კონტინენტურობის მატებასთან ერთად, გამყინვარების ზოგადი ხასიათი და მასშტაბები აღმოსავლეთ კავკასიონზე საერთო ჯამში მაინც მკვეთრად იკლებს დანარჩენ ნაწილებთან შედარებით. გამონაკლის ხოხის მაღლა აზიდული ქედი (საშუალო სიმაღლე 4376 მ) წარმოადგენს, სადაც თანამედროვე გამყინვარების ერთ-ერთი უძველესი კერაა მწ. ჯიმარასა და მწ. მყინვარწვერის ვულკანურ მასივზე.

ყველაზე უკიდურესი დასავლეთი ნაწილი კავკასიონზე, სადაც მყინვარებია გავრცელებული, დასავლეთ კავკასიონის ის მონაკვეთია, რომლიც საქართველოს საზღვრის ფარგლებში შემოდის მწ. ავადჰარადან (2960 მ) აზაუს უღელტეხილამდე (3291 მ) 206 კმ-ის სიგრძეზე, საშუალო სიმაღლე მთელს პერიმეტრზე 3031 მ-ია. რელიეფის აგებულებაში პალეოზოური და მეზოზოური ასაკის ქანები მონაწილეობენ, რომლებიც ზოლების სახით არიან გავრცელებულნი. კავკასიონის ანტიკლინორიუმის თაღს პროტეროზოული, პალეოზოური ასაკის პლაგიოგენისები, ამფიბოლიტები და კრისტალური ფიქლები აგებენ (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). რელიეფის 3000 მეტრს მაღლა აზიდული მონაკვეთი ტოტალური დენუდაციის ზონაა და წარმოდგენილია გლაციალური რელიეფის ფართო გავრცელებით და თანამედროვე გამყინვარებით. ქედის ამ მონაკვეთზე გლაციალური ზონა არ გვაქვს. უმაღლესი მწვერვალია დომბაიულგენი (4047 მ). ნივალური ზონაც საკმაოდ ფრაგმენტულია. თანამედროვე გამყინვარების მასშტაბებს აქ უპირატესად განსაზღვრავს ფირნის ხაზის ყველაზე დაბალი $\approx 2900-3200$ მ (საშუალო სიმაღლე 3150 მ) მდებარეობა, რაც უხვი ატმოსფერული ნალექებითაა (3000 მმ-ზე მეტი (ელიზბარაშვილი, საქართველოს ჰავა, 2017) გამოწვეული. თანამედროვე გამყინვარების ხასიათი უპირატესად კარული ზომის მცირე და მოზრდილი მყინვარებითაა წარმოდგენილი (იხ. ფიგურა 11), მხოლოდ რამდენიმე გამონაკლისია ხეობის ტიპის მყინვარი, კარგად გამოხატული ფირნის აუზითა და ჩამოყალიბებული ენით. თანამედროვე გამყინვარების ფართობი აქ ≈ 63.57 კმ²-ია, რაც მთლიანი ჯამური გამყინვარების ≈ 16.38 % შეადგენს.



ფიგურა 11. თანამედროვე მყინვარების განაწილება დასავლეთ კავკასიონზე მათ მიერ დაკავებული ფართობის მიხედვით (რ. გობეჯიშვილის მონაცემების დაყრდნობით)

გამყინვარების უმთავრესი კერა საქართველოში ცენტრალური კავკასიონია. ქედის ეს მონაკვეთი წარმოადგენს სუბგანედური მიმართულების ყველაზე მაღლა აზიდულ მეგა სტრუქტურას, რომლის შემადგენლობაში შედის ქანები პროტეროზოულიდან მოყოლებული მესამეული ასაკით დამთავრებული. მონაკვეთის სიგრძე იალბუზის მერიდიანიდან აზაუს უღელტეხილიდან (მდ. ნენსკრას სათავე) ჯვრის უღელტეხილამდე 311 კმ-ია, საშუალო სიმაღლე კი 3636 მ. ამგებელი წყებები ერთმანეთის პარალელურად არიან განლაგებულნი და ღერძული ზოლიდან პერიფერიებისაკენ ახალგაზრდავდებიან. ყველაზე ძველი პროტეროზოული ქანები მთავარ ღერძულ წყალგამყოფ ნაწილს აგებენ და წარმოდგენილია პლაგიოგრანიტებით, გნეისებით, ამფიბოლიტებით, გრანიტებით (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). ღერძული ზოლი დიფერენციალურ მოძრაობას განიცდის და მაღლა იწევს 10-15 მმ/წელიწადში, კარბონატული ფლიშით აგებული ინვერსიული და ნახევრად ინვერსიული ქედები კი 4-8 მმ/წელიწადში, მათ შორის კი შეფარდებითი დაძირვის ზონებია მოქცეული, რომელიც ხშირად მეოთხეული გამყინვარების ნაფენებითაა ამოვსებული. (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). ღერძული ზოლიდან პერიფერიული ზოლისაკენ ფართოდ ვრცელდება შედარებით რბილი იურული ასაკის ქანები. ცენტრალური კავკასიონის წყალგამყოფ ზოლზე გვხვდება საქართველოს ყველა 5000-იანი მწვერვალი (გამონაკლისია მხოლოდ მყინვარწვერი 5033 მ. რომელიც ხოხის ქედზე მდებარეობს) ცენტრალური კავკასიონის ღერძული და პერიფერიული ზოლი ტოტალური დენუდაციის ზონას წარმოადგენს. რელიეფის ტიპების

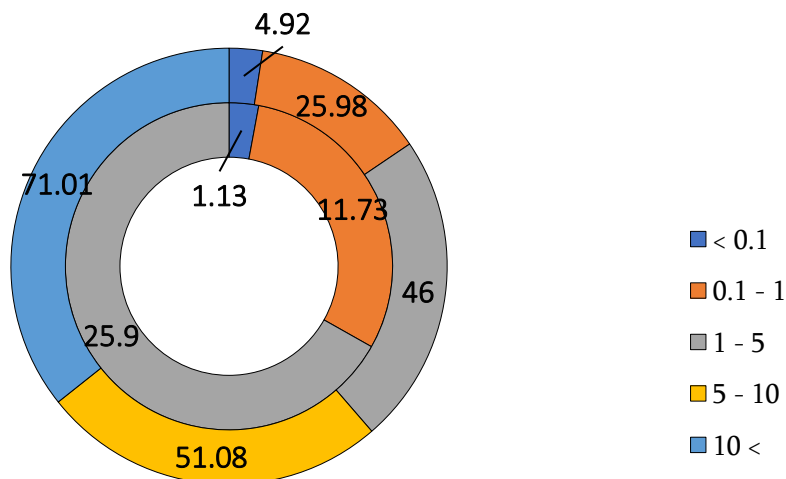
ჩამოყალიბებაში განსაკუთრებული როლი წყებების ლითოლოგიურ ზონალობას და ნეოტექტონიკურ მოძრაობებს აქვს. მასზე აქტიურად ზემოქმედებს ნივალურ გლაციალური პროცესები, როგორც თანამედროვე პერიოდში ისევე მთელი პლეისტოცენის განმავლობაშიც (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). ქედის მთელს პერიმეტრზე შეინიშნება მკვეთრად გამოხატული გეოგრაფიული კანონზომიერება, რაც შავი ზღვიდან დაშორების პარალელურად ნალექების კლებას, ჰაერის კონტინენტურობის ზრდასა და შესაბამისად გამყინვარების შემცირებაში გამოიხატება. კანონზომიერებას აძლიერებს იგივე მიმართულებით ქედის საშუალო სიმაღლის მნიშვნელოვანი (≈ 600 მ) კლებაც (იხ. ცხრილი 1).

ცხრილი 1. ცენტრალური კავკასიონის ღერძული ზოლის მორფო მეტრია და თანამედროვე გამყინვარების გავრცელება (მონაცემები დამუშავებულია ავტორის მიერ, SRTM, უახლესი სატელიტური მონაცემები)

ცენტრალური კავკასიონის ღერძული ზოლის მონაკვეთი	მონაკვეთის სიგრძე	საშუალო სიმაღლე	გამყინვარება კმ ²
სვანეთის მონაკვეთი (მდ. ენგურის აუზი)	128	3864	199.36
ქვემო სვანეთი-რაჭის მონაკვეთი	81	3726	44.4
სამაჩაბლოს მონაკვეთი	102	3275	7.31

თანამედროვე გამყინვარების უმთავრეს კერას საქართველოში, საერთო ფართობით ≈ 243.88 კმ², რაც მთლიანი გამყინვარების 62.8 %-ია, ცენტრალური კავკასიონის სვანეთის და რაჭის²⁹ მონაკვეთები წარმოადგეს. საიდანაც მდ. ენგურის აუზში მოქცეულია ამავე მონაკვეთის $\approx 81.7\%$ და რიონის აუზში $\approx 18.3\%$ მყინვარები. რაც შეეხება ცენტრალური წყალგამყოფი ქედის უკიდურეს აღმოსავლეთ ნაწილს (დიდი და პატარა ლიახვის სათავეები ჯვრის უღელტეხილამდე) გამყინვარება მკვეთრად იკლებს და ცენტრალური კავკასიონის ამავე მონაკვეთის საერთო გამყინვარების მხოლოდ $\approx 2.9\%$ შეადგენს, რაც ამავედროულად საქართველოს მთლიანი გამყინვარების მხოლოდ $\approx 1.8\%$ -ია.

²⁹ სვანეთის ქედის გამოკლებით



ფიგურა 12. სხვადასხვა ზომის მცინვარების მიერ დაკავებული ფართობები სვანეთის და რაჭის კავკასიონის მონაკვეთზე (შიდა წრე სვანეთის; გარე რაჭის მონაკვეთი)

სვანეთის მონაკვეთზე (ენგურის და ცხენისწყლის სათავეები) 2 კმ²-ზე მეტი ზომის 23 მცინვარს ჯამში უჭირავს ≈ 154.59 კმ² რაც ამავე მონაკვეთის 75.4% და საქართველოს მთელი გამცინვარების 39.8% შეადგენს. რაჭის მონაკვეთზე ანალოგიური 2 კმ²-ზე მეტი ზომის მქონე 7 მცინვარია, რომელთა მიერ დაკავებული ფართობი ჯამში 21.79 კმ²-ია. რაც რაჭის ამავე მონაკვეთის 56.2%-ს და საქართველოს მთლიანი გამცინვარების 5.6% შეადგენს. მონაცემებზე დაყრდნობით ცხადი ხდება, რომ სვანეთის კავკასიონის თანამედროვე გამცინვარება, სადაც ხეობის დიდი 10 კმ²-ზე მეტი ზომის მცინვარებიც კი გვაქვს წარმოდგენილი 5.3-ჯერ აღემატება რაჭის კავკასიონის თანამედროვე გამცინვარებას (იხ. ფიგურა 12). აღნიშნული სხვაობა, ნალექების დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ კლების პარალელურად გამოწვეულია რელიეფის ისეთი უარყოფითი ფორმების გავრცელების ნაკლებობით, რომლებიც გხვდება მდ. მესტია-ჭალისა და მულხურას სათავეებში და უზრუნველყოფენ წლის ცივ პერიოდში აკუმულირებული თოვლის მაქსიმალურ დაგროვებას.

დასავლეთ და ცენტრალური კავკასიონის ფარგლებში, წყალგამყოფი ქედის გარდა, გამცინვარების თანამედროვე კერები გავრცელებულია სვანეთის, სამეგრელოს, ხოჯალის, ლეჩხუმის, შოდა-კედელას და ხიმსას ქედებზე. გამცინვარების ჯამური ფართობი 30.26 კმ²-ია, მცინვარების რაოდენობა კი 137-ია. მათგან მეტ-ნაკლებად გამცინვარების მძლავრი კერა მხოლოდ სვანეთის ქედის ჩრდილოეთ ფერდობზეა, სადაც ხეობის ტიპის მცინვარებიც გვაქვს წარმოდგენილი. სვანეთის ქედზე ასევე

გვხვდება ნივალური ზონაც, რომლის ფართობი 10.98 კმ² უტოლდება, გამყინვარების საერთო ფართი კი ≈ 22.9 კმ²-ია, რაც ზემოთ აღნიშნული ქედების საერთო გამყინვარების 75.9%-ზე მეტია. დანარჩენ ქედებზე კარული და დაკიდული ტიპის მცირე ზომის 79 მყინვარია. მხოლოდ ერთი მათგანი, მყინვარი ხიმსა არის შედარებით დიდი 1.4 კმ² ფართობის მყინვარი, ამავე სახელობის ქედის ჩრდილოეთ ფერდობზე, აფხაზეთში. სვანეთის ქედის გარდა თანამედროვე გამყინვარება ზემოთ ჩამოთვლილ დანარჩენ ქედებზე სულ ≈ 7.36 კმ²-ია, რაც საერთო გამყინვარების მცირე ნაწილს ≈ 1.89 % შეადგენს. მათი უდიდესი ნაწილი 0.1კმ²-ზემცირე ზომის პატარა მყინვარებია. ისინი ნივალური ზონის ქვედა საზღვართან მდებარეობენ და იკვებებიან თოვლის ზვავებითა და ჭარბი უხვი ნალექით წლის ცივ პერიოდში. ყველა ეს მყინვარი გაქრობის ზღვარზეა.

ცენტრალური კავკასიონის გვერდითი ქედებიდან ცალკე უნდა გამოიყოს ხოხის ქედი, რომლიც თანამედროვე გამყინვარების ერთ-ერთ მძლავრ კერას წარმოადგენს. ეს არის იურული ასაკის შავი თიხა ფიქლებით, ქვიშაქვებით და ვულკანური ქანებით აგებული ქედი, სადაც შუა ჰოლოცენის პერიოდში დაფიქსირდა ბოლო ვულკანური აქტივობა ≈ 6000 წ. წინ ტყარშეტის ლავური ნაკადის სახით (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). ქედის სიგრძე (საქართველოს ფარგლებში) თერგის ხეობის ძირიდან მწ. სივერაუტი (3763 მ) სოფ. გველეთამდე 36.6 კმ-ია. საშუალო სიმაღლე კი 3905 მეტრია. მისი ყველაზე მაღლა აზიდული 15 კმ-იანი ცენტრალური მონაკვეთის (მყინვარებს სუათისსა და მყინვარ დევდორაკის ფერდობებს შორის) საშუალო სიმაღლე 4376 მეტრამდე მაღლდება. აქვე მდებარეობს საქართველოს ერთ-ერთი უმაღლესი მწვერვალები: მწ. ჯიმარა 4780 მ, მაილი 4597 მ, და მყინვარწვერი 5033 მ. მონაკვეთზე განვითარებულია კარგად ჩამოყალიბებული ნივალურ-გლაციალური ზონა. მის 4400 მეტრზე მაღლა აზიდულ 5.9 კმ² ფართობის მქონე გლაციალურ პლატოზე ყინულ წარმოქმნის პროცესი თოვლის რეკრისტალიზაციის და მრავალ წლიური ფენების დაგროვებით გზით ხდება. ცენტრალური კავკასიონის ამ მონაკვეთზე ჯამური გამყინვარება 37.8 კმ²-ია. აღნიშნული გამყინვარების არეალი ასაზრდოებს მდინარე თერგს, რომლიც კასპიის ზღვის აუზს მიეკუთვნება.

აღმოსავლეთ კავკასიონის ღერძული ზოლი საქართველოს ფარგლებში ჯვრის უღელტეხილიდან მწ. ტინოვროსომდეა (3374 მ) მისი სიგრძე 275 კმ-ია, საშუალო სიმაღლე 2894 მ. ქედი აგებულია იურული ასაკის ფიქლების და ქვიშაქვების წყებებით,

პალეოზოური მეტამორფული ქანებით, ლოკალური ინტრუზივებით დარიალის ხეობაში და დიაბაზების ჭაუხისა და ჭიმდის კლდეების მასივებზე. ქედის ღერძული წყალგამყოფი მონაკვეთი მდინარეთა ეროზიული მოქმედებების გამო ძლიერ დაკლავნილია (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). აღმოსავლეთ კავკასიონის წყალგამყოფ ღერძულ ზოლზე გამყინვარების მასშტაბი დრამატულად იკლებს და მხოლოდ ჭაუხის დიაბაზურ მასივზეა მცირე ზომის 2 მყინვარით წარმოდგენილი. აღმოსავლეთ კავკასიონის ფარგლებში გამყინვარება ინაცვლებს წყალგამყოფი ზოლის პარალელურ და მართობულ: შინოს, შავანას, არჯელომის, აწუნთის და პირიქითის (თუშეთის) ქედებზე და ასაზრდოებენ მდინარეებს ბროლისწყალი³⁰, ასა, არღუნი, პირიქითა ალაზანი. ყველა მათგანი განეკუთვნება კასპიის ზღვის აუზს და გაედინებიან საქართველოს ფარგლებს გარეთ. ჯამში აქ თანამედროვე გამყინვარების მხოლოდ 2.1 %-ია თავმოყრილი და უპირატესად გავრცელებულია მცირე ზომის კარული ან დაკიდული ტიპის მცირე საშუალოდ 0.1 კმ² ზომის მყინვარები, მხოლოდ 2 მათგანია 0.5 კმ²-ზე მეტი ზომის მქონე კარული მყინვარი. ეს მყინვარებიც, მსგავსად კავკასიონის ქედის გარდა, დანარჩენი ცალკეული ქედების მყინვარებისა, გაქრობის ზღვარზე დგანან.

როგორც გამყინვარების გავრცელების ზოგადი ხასიათიდან ჩანს, ყველაზე მნიშვნელოვანი კერა, რომელიც ამჟამად კავკასიონზე თანამედროვე გამყინვარების თვალსაზრისით გვაქვს წარმოდგენილი, ესაა მდ. ენგურის, მდ. რიონის და მდ. თერგის აუზები. აქედან მდ. თერგის აუზის მყინვარები მდინარეულ ჩამონადენზე საქართველოს ფარგლებში მხოლოდ დარიალის მონაკვეთამდე ახდენს გავლენას, რაც გვამღევს დამატებით მოტივაციას, რომ სწორი მენეჯმენტის, გარემოსდაცვითი ღონისძიებების სრული და მაღალი სტანდარტების დაცვით მაქსიმალურად იქნას ათვისებული ამ აუზის მყინვარული ჩამონადენი. რაც შეეხება დანარჩენ აუზებს მდ. რიონის აუზი შესამჩნევად ნაკლები რესურსის მატარებელია ვიდრე მდ. ენგურის აუზი. მყინვართა ენები, ჰიფსომეტრიულად მაღალ ნიშნულებზეა უკვე აწეული და მათგან მომდინარე ბუნებრივი კატასტროფების საფრთხე ამ ეტაპზე დიდი ალბათობით მინიმალურია და მხოლოდ ლოკალურ ხასიათს ატარებს. რაც შეეხება მდ. ენგურის აუზს, იგი რჩება თანამედროვე გამყინვარების მთავარ კერად საქართველოში.

³⁰ მდინარე ხდე; ხდისწყალი; იგივე Кистанка

კლიმატის გლობალური ცვლილებების ფონზე სწორედ მდ. ენგურის აუზის მყინვარები ატარებს მომეტებული საფრთხის შესაძლებლობას.

მყინვარული რესურსების კვლევისას, უმნიშვნელოვანესია ყინულოვანი საფარის სისქე, მყინვარის მოცულობა და მისი დინამიკა. ელექტრონულ წყაროებზე დაყრდნობით მყინვართა, მოცულობის მონაცემები დღეისათვის ხელმისაწვდომია 726.8 ათასი კმ² ფართობის მქონე მთიანი გამყინვარებისათვის. ხოლო პირდაპირი გაზომვების მონაცემები მხოლოდ მყინვარების საერთო რაოდენობის 0.13% შემთხვევაში. (S.S. Kutuzov, 2015). ერთეული გამონაკლისი³¹ შემთხვევის გარდა, 2014 წელს მყინვარწვერის მასივზე გეოფიზიკური ხელსაწყო გამოყენებით (Ground-penetration radar - GPR) მოხდა მყინვარის ფსკერის რელიეფის და ყინულოვანი მასის საფარის სისქის კვლევა. მსგავსი კვლევები საქართველოში არ ჩატარებულა. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით ირკვევა, რომ მყინვარწვერის პლატოზე (მყინვარ გერგეთის აკუმულაციის ზონა) ყინულის მასის სისქე საშუალოდ 150-160 მ-ის ფარგლებშია, მაქსიმალური კი 250 მეტრს აღწევს (Stanislav S. Kutuzov, 2016). კავკასიონის ჩრდილოეთ ფერდობზე, 2012-2013 წლებში 224 მყინვარზე, საერთო ფართობით 719 კმ², რაც საერთო გამყინვარების 64%-ია, განხორციელდა რადიო - ზონდირების მეთოდით მყინვარების სისქეების კვლევა, მათ შორის ყველაზე დიდი მყინვარ ბეზინგისათვის. მიღებული მონაცემებით ირკვევა, რომ კავკასიონის ქედის (რუსეთის ფედერაციის მხარეს) თანამედროვე გამყინვარების ჯამური მოცულობა 43.5 ± 5 კმ³ შეადგენს. ამ თვალსაზრისით მსგავსი, სამუშაოების ჩატარება აუცილებელია საქართველოს მაგალითზე.

2.2. კლიმატური ფაქტორები

კლიმატური და რელიეფური პირობების მრავალფეროვნებით, მათი ურთიერთ თავსებადობით და თანამედროვე გამყინვარების არსებობით, კავკასიონის მთიანი სისტემა საინტერესო გეოგრაფიული ფენომენია, როგორც კონტინენტური (პამირი, ტიან-შანი) და ტენიანი ზღვიური კლიმატის (ალპები) პირობებში არსებულ გამყინვარებებს შორის, სუბტროპიკული და ზომიერი კლიმატური სარტყლების

³¹ კვლევა ჩატარდა ვახუშტი ბაგრატიონის გეოგრაფიის ინსტიტუტის და მოსკოვის გეოგრაფიის ინსტიტუტის ერთობლივი სავლე ექსპედიციის ფარგლებში (ლ. ტიელიძე; ლ. გადრანი; რ. კუმლაძე, ს. კუტუზოვი და სხვები)

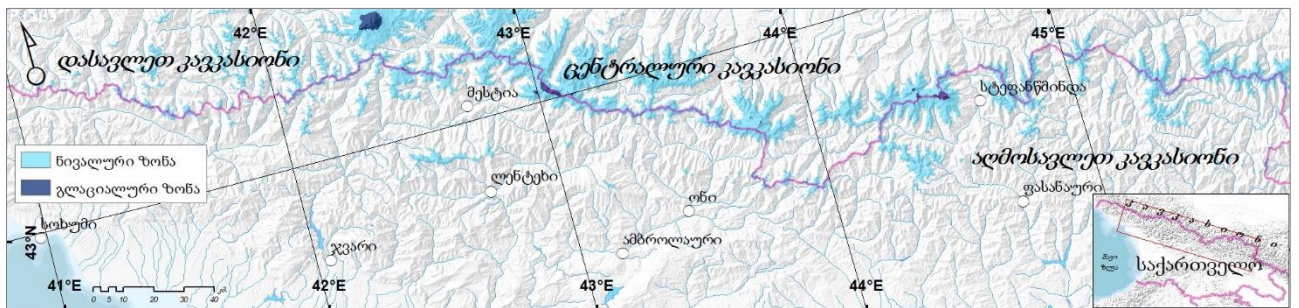
საზღვარზე არსებული, გამყინვარების თანამედროვე კერა ევრაზიის კონტინენტზე. - კავკასიონის ქედის გეოგრაფიული და კლიმატური პირობების ნაირგვარობით აქ გვხვდება ორივე მთიანი სისტემისათვის დამახასიათებელი - ტენიან პირობებში (დასავლეთ კავკასიონი), ზომიერად ტენიან (ცენტრალური კავკასიონი) და ზომიერად მშრალი კონტინენტური (დასავლეთ კავკასიონი) ჰავის პირობებში წარმოდგენილი გამყინვარება. თანამედროვე გამყინვარების არსებობა საქართველოში მაღალმთიანი რელიეფის და მათ შორის უარყოფითი ფორმების არსებობითაა განპირობებული, სადაც ზამთრის განმავლობაში მოსული მყარი ატმოსფერული ნალექების დაგროვება, ხანგრძლივი უარყოფითი ტემპერატურის პირობებში ხდება.

თავისუფალ ატმოსფეროში 0° იზოთერმა 45° მერიდიანზე, რომელიც საქართველოს თითქმის ცენტრალურ ნაწილშია, 4400 მეტრ სიმაღლეზეა. შესაბამისად ამ სიმაღლეზეა **მუდმივი თოვლის ხაზი**, რომლის მაღლაც ყინულ წარმოქმნის პროცესი მშრალი მეტამორფიზმის პირობებში უარყოფითი ტემპერატურის პირობებში ხდება. ასეთი ზონები, კავკასიონზე ყველაზე მაღლა აზიდულ პლატოებსა და მწვერვალების გარშემო გვხვდება ფრაგმენტულად (რ. გობეჯიშვილი, ვ. კოტლიაკოვი, 2006 ა) (რ. გობეჯიშვილი, ნ. ლომიძე, 2006 ბ). **ფირნის ხაზის** სიმაღლე კავკასიონზე, ადგილობრივი მიკრო კლიმატური და რელიეფური პირობების მიხედვით, მნიშვნელოვნად ცვალებადობს დასავლეთ, ცენტრალურ და აღმოსავლეთ კავკასიონს $\approx 2700-3400$ შორის. აღნიშნულ ნიშნულზე მაღლა, ზამთრის განმავლობაში მოსული მყარი ატმოსფერული ნალექი სრულად ვერ ასწრებს გადნობას და ყალიბდება ნივალური ზონა (რ. გობეჯიშვილი, ნ. ლომიძე, 2006 ბ). ფირნის ხაზის სიმაღლის განსაზღვრა მოხდა სატელიტური სურათების გამოყენებით, ხაზის საშუალო სიმაღლე კი განისაზღვრა მისი პროფილის სიმაღლეების გასაშუალოების გზით (იხ. ცხრილი 2)

ცხრილი 2. ფირნის ხაზის საშუალო სიმაღლე კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე

კავკასიონის მონაკვეთი	ფირნის ხაზის საშუალო სიმაღლე
დასავლეთ კავკასიონი	3150
ცენტრალური კავკასიონი	3370
აღმოსავლეთ კავკასიონი	3700

გლაციალური ზონა, მხოლოდ კავკასიონის ქედის გარკვეულ მონაკვეთებსა და მყინვარწვერის მასივზე (ხოხის ქედი) ფრაგმენტულად ვრცელდება. ზედაპირის ჯამური ფართი 23.45 კმ²-ია³². იგი გავრცელებულია ქედის ცენტრალური ღერძული მონაკვეთის გასწვრივ მწვერვალების დონღუზორუნის: - 0.26 კმ², უშბის - 0.87 კმ², გესტოლა-შხარის (≈ 15 კმ-იან მონაკვეთზე) 13.7 კმ² (მაქს. სიმაღლე 5203 მ საშ. სიმაღლე 4740 მ); მწ. თეთნულდის გარშემო - 1.87 კმ², შემდეგ მცირე ფრაგმენტების სახით მხოლოდ რამდენიმე მწვერვალის გარშემო და ბოლოს ხოხის ქედზე მწ. ჯიმარა და მწ. მყინვარწვერის 5.92 კმ² (5033 მ) მასივზე (იხ. ფიგურა 13; იხ. ცხრილი 3). კავკასიონზე ზონის ორი ძირითადი არეალი გესტოლა-შხარა და ჯიმარა-მყინვარწვერის მასივი გამოიყოფა, დანარჩენ შემთხვევაში კი, მხოლოდ ცალკეული მწვერვალების მაღალ ადგილებშია გავრცელებული ფრაგმენტულად, უმნიშვნელო მცირედი ფართობებით.



ფიგურა 13. ნივალურ-გლაციალური ზონის გავრცელება კავკასიონზე

გლაციალური ზონის ფართობი საერთო გამყინვარებასთან შეფარდებით ≈ 6%-ია რაც რელიეფური პირობებით (მუდმივი თოვლის ხაზის მაღლა ტერიტორიების ნაკლები არეალით), ქედის მაღალი დახრილობითაა განპირობებული. თოვლის სახით მოსული ატმოსფერული ნალექების ნაწილის გადაადგილება, ზვავების მეშვეობით უფრო დაბლა, ნივალურ ზონაში ხდება. გლაციალური ზონის გავლენა კავკასიონის სამხრეთ ფერდობის მყინვარებზე ნაკლებია. კავკასიონზე უპირატესად ყინულ წარმოქმნის პროცესი სველი მეტამორფიზმის პირობებში მიმდინარეობს. არათანაბარი მაგრამ უფრო ფართო გავრცელებით ხასიათდება ნივალური ზონა. დასავლეთ კავკასიონზე, მდინარეების ნენსკრას და ნაკრას ხეობებში (ცენტრალური კავკასიონი) მას ფრაგმენტული ხასიათი აქვს. რაც შეეხება მდ. დოლრას სათავიდან (მწ. დონღუზორუნი 4454 მ) მოყოლებული მდ. ცხენისწყლის სათავემდე (მწ. წურუნგალა 4249 მ.) ნივალური ზონა თითქმის უწყვეტად გრძელდება ≈ 94 კმ-ის მანძილზე.

³² წყარო SRTM; მონაცემში გათვალისწინებულია ზედაპირის დახრილობა

კავკასიონის ღერძულა მონაკვეთის საშუალო სიმაღლე აქ 4062 მ-ია. აღნიშნული მონაკვეთი წარმოადგენს თანამედროვე გამყინვარების ძირითად კერას საქართველოში, სადაც თავმოყრილია ხეობის ტიპის დიდი მყინვარების უმრავლესობა. რელიეფის სიმაღლის გარდა გამყინვარების მასშტაბის ზრდა ამ მონაკვეთზე გამოწვეულია ხელსაყრელი გეოლოგიური და ტექტონიკური პირობებით, რაც ასახულია რელიეფში პარალელური და მართობული შტო ქედების არსებობით, რომელთა სიმაღლე ხშირად 3200-3500 მეტრს სცილდება, მათ შორის კი ვრცელი შედარებით დაბალი არეალებია განვითარებული (შეფარდებითი სიმაღლე 500-1500 მეტრის ფარგლებში). მსგავსი რელიეფური დანაწევრება, კარგ საფუძველს ქმნის წლის ცივ პერიოდში მოსული მყარი ატმოსფერული ნალექების დაგროვებისათვის.

ცხრილი 3. ნივალურ-გლაციალური ზონის პარამეტრები და ამ ზონებში თანამედროვე გამყინვარების ხასიათი

ქედის მონაკვეთი	ზონის ფართობი სიბრტყეზე	ზონის ზედაპირის ფართობი კმ ²	საშუალო დახრილობა გრადუსი	გამყინვარებით დაკავებული ჯამური ფართობი
გლაციალური ზონა				კმ²
დასავლეთ კავკასიონი	-	-	-	63.5
ცენტრალური კავკასიონი	17.49	23.34	32.49	315.5
აღმოსავლეთ კავკასიონი ¹⁵	0.09	0.11	35.39	8.99
სულ	17.58	23.45	32.49	
ნივალური ზონა				კმ²
დასავლეთ კავკასიონი	6.14	8.31	29.3	63.5
ცენტრალური კავკასიონი	249.92	314.64	28.04	315.5
აღმოსავლეთ კავკასიონი ³³	85.75	106.09	25.6	8.99
სულ	341.81	429.04	27.64	388.1
ნივალურ-გლაციალური ზონა	359.39	452.49		

³³ გვერდითი და მართობული შტო ქედების ჩათვლით

ცენტრალური კავკასიონის ქვემო სვანეთის და რაჭის მონაკვეთზე, ნივალური ზონა (მდ. ცხენისწყლისა და რიონის აუზი) ვრცელდება კავკასიონის ღერძულ მონაკვეთზე. მონაკვეთის სიგრძე მწ. წურუნგალადან (მდ. ცხენისწყლისა და რიონის აუზები) მწ. ჭანჭახამდე 73 კმ-ია, საშუალო სიმაღლე კი 3714 მ. მონაკვეთზე შესამჩნევად იკლებს თანამედროვე გამყინვარება, განსაკუთრებით ცხენისწყლის აუზში, რისი მიზეზიც მყარი ატმოსფერული ნალექების დაგროვების რელიეფური პირობებია, რომლიც არ იძლევა შესაძლებლობას განვითარდეს ვრცელი ფირნის ველები, ამასთან გაზრდილია ჰავის კონტინენტურობაც. იქ სადაც რელიეფურად მეტნაკლებად ხელსაყრელი სივრცეები ჩნდება წარმოდგენილი გვაქვს მძლავრი თანამედროვე გამყინვარება და ძველი გამყინვარების ნიშნებიც (ფიგურა 13).

ცენტრალური კავკასიონის წყალგამყოფი მონაკვეთი, მწ. კოზიხოხიდან (3687 მ) ჯვრის უღელტეხილამდე (2379 მ) ნივალური ზონის გავრცელების კუთხით კიდევ უფრო ფრაგმენტულია. მონაკვეთის ჯამური სიგრძე 89 კმ-ია, საშუალო სიმაღლე კი 3290 მეტრამდე კლებულობს. მდ. თერგის სათავეებში, ცენტრალური კავკასიონის ღერძულა მონაკვეთის ჩრდილოეთით გადის თანამედროვე გამყინვარების უფრო მძლავრი კერა ვიდრე კავკასიონის მთავარ ქედზე. ხოხის ქედი კავკასიონის გვერდითი პარალელური ქედია, რომელიც მას ჩრდილოეთიდან მიუყვება, მყინვარ მიდაგრაზინის ფერდობებიდან მდ. თერგის ძირამდე, მისი სიგრძე 41 კმ-ია. ქედის ცენტრალური მონაკვეთის საშუალო სიმაღლე 4328 მეტრს აჭარბებს. შედარებით მოსწორებული მაღლა აზიდული რელიეფის ვულკანური გენეზისის ფორმები, სადაც მწ. მყინვარწვერის გარშემო ჩამოყალიბებულია ვრცელი ნივალურ-გლაციალური ზონა 70.35 კმ² ფართობით (79.25 კმ² ზედაპირის ფართობი დახრილობის გათვალისწინებით). მყინვარწვერის ე.წ. მაილის პლატო 4400 მეტრზე მაღლა მდებარეობს, საიდანაც სათავეს იღებენ ისეთი მყინვარები როგორცაა მნა, გერგეთი, დევდორაკი, ჩაჩი და სხვა.

ჯვრის უღელტეხილიდან აღმოსავლეთით, კავკასიონის წყალგამყოფ ქედზე, თანამედროვე მყინვარები თითქმის აღარ გხვდება. რაც განპირობებულია ჰავის კონტინენტურობის მატებით და წყალგამყოფი მონაკვეთის მცირე სიმაღლით. აღმოსავლეთ კავკასიონი, უპირატესად იურული ასაკის წყებებით, ზედა ლიასის ფიქლებით და ქვიშაქვებითაა აგებული. ქედის მორფოლოგია მნიშვნელოვნად განსხვავდება კავკასიონის წყალგამყოფი დასავლეთი და ცენტრალური

მონაკვეთებისაგან. იგი რბილი რელიეფით და ძლიერ კლაკნილი წყალგამყოფი ხაზით ხასიათდება (გობეჯიშვილი, საქართველოს რელიეფი, 2011). გამონაკლისებია ჭაუხის და ჭიმღის დიაბაზებით აგებული კლდოვანი მასივები. მცირედი გამყინვარების თანამედროვე კერაა მ. ჭაუხის (3842 მ) მასივი, სადაც მცირე ზომის <0.5 კმ² კარული მყინვარი გვაქვს. აღმოსავლეთ კავკასიონზე, თანამედროვე გამყინვარების მცირე კერები, კარული მყინვარებით, წყალგამყოფი ქედის მართობულ და პარალელურ აწუნთას, ხევსურეთის შანის, ყუროს, კიდეგანის ქედებზეა მხოლოდ ჩამოყალიბებული. გამყინვარების სიმცირე რელიეფის ფორმების გარდა, უპირატესად გამოწვეულია ნალექების მნიშვნელოვანი კლებითა და ჰავის კონტინენტურობის მკვეთრი ზრდით.

კავკასიონის ნივალურ ზონაში, ყინულწარმოქმნის პროცესი თბილი (ინფილტრაციულ-რეკრისტალიზაციური) ტიპისაა, რაც გულისხმობს, რომ წლის ცივ პერიოდში ჯამურად მოსული მყარი ატმოსფერული ნალექების $\approx 0.4-0.7$ ნაწილი დნება. ყინულ წარმოქმნა კი მყინვარის ზედაპირზე მოდნობილი თოვლის ჩაქონვის და მისი ხელახალი გაყინვით ხდება. ამ ზონაში მყინვარები თავიანთი არსებობის ზღვარზე არიან (რ. გობეჯიშვილი, ვ. კოტლიაკოვი, 2006 ა).

კავკასიონის ქედი წარმოადგენს რეგიონალური მასშტაბის უმნიშვნელოვანეს კლიმატურ ბარიერს. ცირკულაციური პროცესები, რომლებიც ჩვენს ტერიტორიაზე ატმოსფეროს მაღალ 3-6 კმ სიმაღლის ფენებშია გაბატონებული, საერთო ზომიერი განედებისათვის დამახასიათებელია: სამხრეთ-დასავლეთის, დასავლეთის და ჩრდილო-დასავლეთის მიმართულებები (ელიზბარაშვილი, საქართველოს კლიმატური რესურსები, 2007). ტროპოსფეროს უფრო დაბალ ნაწილში მკვეთრად იზრდება რელიეფის ბარიერული როლი, მაგრამ იგი მაინც უპირატესად დასავლეთურია. კლიმატის თავისებურებას კავკასიონზე ტერიტორიის მდებარეობა (საშუალო განედებზე - ჩ.გ. 43°30' 41°55' შორის³⁴), რელიეფის რთული დანაწევრება და მათი ბარიერული ფუნქციები განაპირობებენ. სინოპტიკური პროცესებიდან, რომლებიც საქართველოს კლიმატის ფორმირებას განაპირობებენ, შეგვიძლია გამოვყოთ: დასავლეთის, აღმოსავლეთის, ორმხრივი შემოჭრა, ანტიციკლონური მდგომარეობა და ამიერკავკასიის სამხრეთ მთიანეთში განვითარებული ტალღური აღრევაა (გ.

³⁴ საქართველოს ტერიტორიისათვის

გაგუა, დ. მუმლაძე, შ. ჯავახიშვილი, 2000). კავკასიონზე გაბატონებულია დასავლეთური ცირკულაციური პროცესები: ხმელთაშუა ზღვის დეპრესია ML, აზორის ანტიციკლონი AH, ისლანდიის დეპრესია IL. მათი განმეორებადობა წლის ყველა დროს მაღალია (ბერიტაშვილი, 2011). დასავლეთურ შემოჭრას თან ახლავს დასავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე 3-5-ჯერ მეტი ნალექიანობა, ღრუბლიანობის მატება და ტემპერატურის კლება, ამ დროს აღმოსავლეთ საქართველოში შესამჩნევად მცირე ნალექი და დასავლეთის ქარებია გაბატონებული (გ. გაგუა, დ. მუმლაძე, შ. ჯავახიშვილი, 2000). აღმოსავლეთიდან შემოჭრისას ჩრდილოეთიდან წამოსული ცივი ჰაერის მასები, კავკასიონის ბარიერული დაბრკოლების გამო პირდაპირ ვერ შემოდის, შემოუვლის ქედს აღმოსავლეთიდან და ისე აგრძელებს გადაადგილებას დასავლეთისაკენ. ამ პროცესს თან ახლავს აღმოსავლეთ საქართველოში ჰაერის ტემპერატურის დაწევა, ნალექები, ზამთარში თოვლის სახით, დასავლეთ საქართველოში კი მოწმენდილი და ქარიანი ამინდი (გ. გაგუა, დ. მუმლაძე, შ. ჯავახიშვილი, 2000).

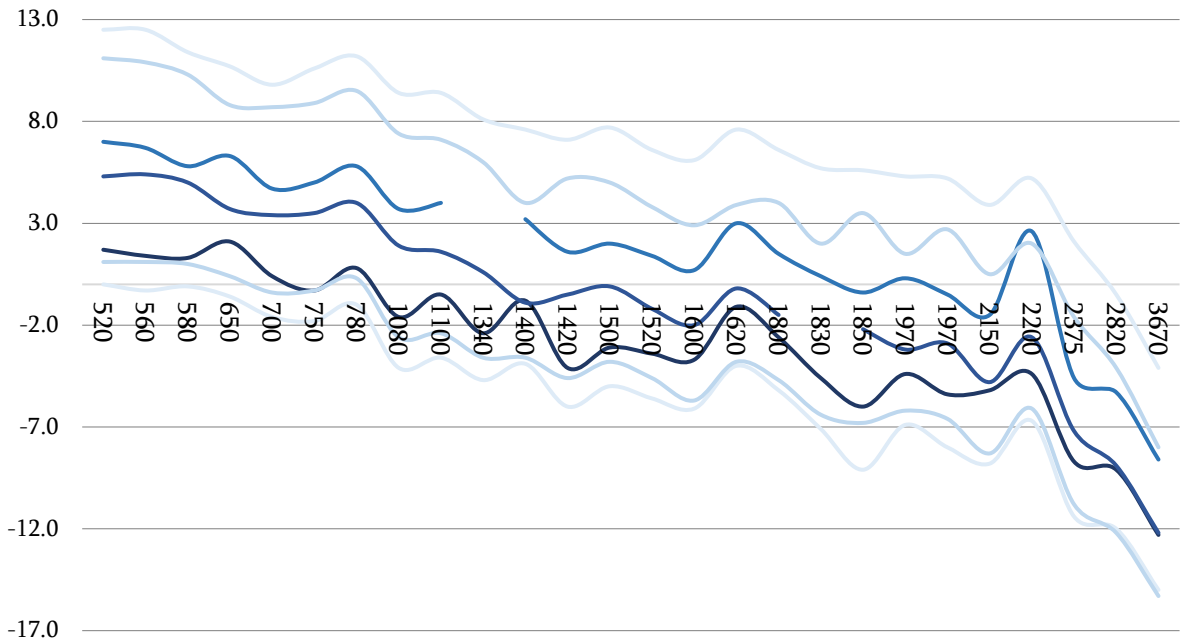
მზის რადიაცია წარმოადგენს დედამიწაზე არსებული პროცესების განმსაზღვრელ ფაქტორს. იგი მნიშვნელოვნად იცვლება განედების და ზღვის დონიდან სიმაღლის მიხედვით. გარდა ამისა მზის რადიაციაზე განსაკუთრებული გავლენა აქვს ქვეფენილი ზედაპირის არეკვლის უნარს - ალბედოს. კავკასიონის მაღალმთიან ზონაში მზის პირდაპირი ჯამური რადიაცია 140-160 კკალ/სმ²წუთის ფარგლებშია, მაშინ როდესაც წლიური რადიაციული ბალანსი 3.7 კკალ/სმ²წუთს უტოლდება მაღალმთიანი ყაზბეგის მეტეოროლოგიურ სადგურზე (გ. გაგუა, დ. მუმლაძე, შ. ჯავახიშვილი, 2000). სიმაღლის ზრდასთან ერთად რადიაციული ბალანსი კლებულობს და 4400-4500 მეტრის სიმაღლეზე უარყოფითი ხდება (იხ. ცხრილი 4).

ცხრილი 4. რადიაციული ბალანსის მნიშვნელობები სიმაღლის მიხედვით

სიმაღლე ზ.დ. მეტრებში	დასავლეთ კავკასიონი	აღმოსავლეთ კავკასიონი
რადიაციული ბალანსის წლიური მნიშვნელობები კკალ/სმ ² წუთი		
1000	50	47
2000	38	39
3000	23	28
4000	5	7
4400	-	-

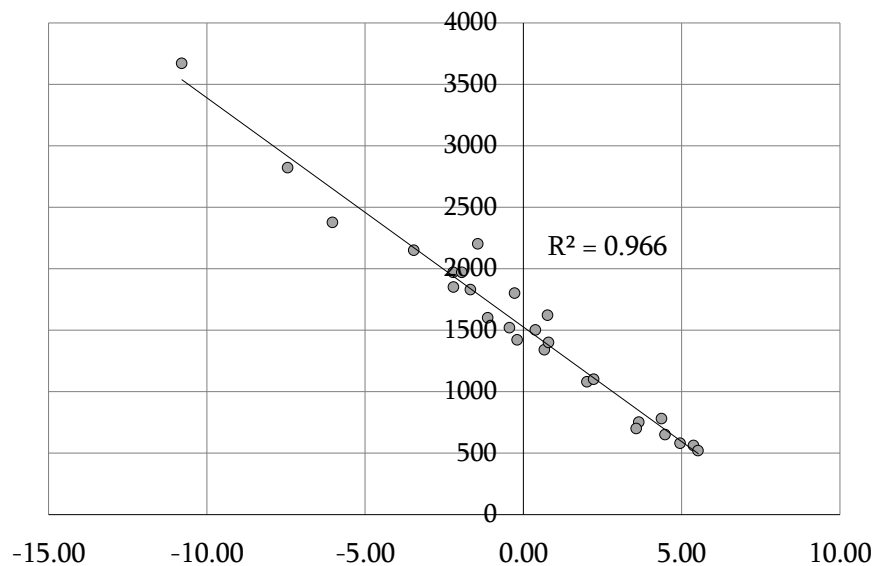
როგორც ცხრილიდან ჩანს, წლიური რადიაციული ბალანსი განსხვავებულია დასავლეთ და აღმოსავლეთ კავკასიონზე. იგი უარყოფითი დაახლოებით 4000-4500 მეტრის ზემოთ ხდება. ზღვის დონიდან 1000-4000 მეტრამდე, კი 50-5 დიაპაზონში კკალ/სმ²წუთი მერყეობს. ზამთარში რადიაციული ბალანსი 1000 მეტრის სიმაღლიდან უკვე - 0.3 -1.2 კკალ/სმ²წუთი, 1500 მეტრიდან კი -1.5 -2.3 კკალ/სმ²წუთის ფარგლებშია (ელიზბარაშვილი, საქართველოს კლიმატური რესურსები, 2007).

ჰაერის ტემპერატურა საქართველოს ტერიტორია მრავალფეროვანი კლიმატური პირობებით ხასიათდება. შედარებით მცირე ფართობზე მრავალი კლიმატური ზონა გვაქვს წარმოდგენილი. წლის ცივი პერიოდი ხელსაყრელია კავკასიონზე მოსული მყარი ატმოსფერული ნალექების დაგროვებისათვის მის მთელს პერიმეტრზე. ზამთრის განმავლობაში დაფიქსირებული აბსოლუტური მინიმუმი -42°C ყაზბეგის მაღალმთიან მეტეო სადგურზეა დაფიქსირებული, სადაც იანვრის საშუალო ტემპერატურა -15°C, თებერვლის -15.3°C-ია. საქართველოს მაღალმთიან ზონაში ორი მეტეოროლოგიური სადგურის: მამისონის უღელტეხილის (2820 მ) და ყაზბეგის მაღალმთიანი (3670 მ) სადგურებზე დაყრდნობით ირკვევა, რომ უცივესი თებერვლის თვეა (ჯავახიშვილი, საქართველოს ჰავის დახასიათება თვეების მიხედვით, 1988). ტემპერატურული ველის ფორმირებაზე განსაკუთრებული გავლენა აქვს რელიეფის მორფომეტრიას, მის ჰორიზონტალურ და ვერტიკალური დანაწევრების ხარისხს. თანაბარ პირობებში, ვიწრო ხეობები 0.5 - 1.5 °C-ით თბილია გაშლილ ველებთან მიმართებით და ეს უკანასკნელი, დამატებით კიდევ 0.5 - 1.5 °C-ით თბილია ქვაბულთან მიმართებით (ელიზბარაშვილი, საქართველოს ჰავა, 2017). მსგავსი რელიეფის უარყოფითი ფორმები, დიდი შეფარდებითი სიმაღლით და კარგად შემოფარგლული მაღალი ქედების ფართო გავრცელებით ხასიათდება მდ. დოღრა, მდ. მესტიაჭალა და მდ. მულხურას სათავეები, სადაც თავმოყრილია თანამედროვე გამყინვარების ძირითადი ნაწილი. წლის ცივ პერიოდში, თვის საშუალო ტემპერატურები უარყოფით ნიშნულს უკვე ოქტომბრის თვეში (საშუალოდ 2800 მეტრის ნიშნულზე) აღწევს. (ფიგურა 14). საშუალოდ, მთელი პერიოდისთვის, კი უარყოფით მაჩვენებელს 1500 მეტრის ნიშნულიდან გვაქვს (იხ. ფიგურა 15).



ფიგურა 14. წლის ცივი პერიოდის საშუალო თვიური ტემპერატურების მსვლელობა ზღვის დონიდან სიმაღლის (შ. ჯავახიშვილის) მიხედვით

მკაფიო კავშირია, კავკასიონის სამხრეთი ფერდობის გასწვრივ განლაგებული მეტეოროლოგიური სადგურების, ზღვის დონიდან მდებარეობასა და წლის ცივი პერიოდის (მცინვარულ ზონაში აკუმულაციის პერიოდი ოქტომბერი-აპრილი) საშუალო თვიურ ტემპერატურებს შორის



ფიგურა 15. წლის ცივი (აკუმულაციის, ოქტომბერი-აპრილი) პერიოდისათვის ჰაერის ტემპერატურების საშუალო მნიშვნელობებისა და ადგილის სიმაღლის კავშირი (ჯავახიშვილი, საქართველოს ჰავის დახასიათება თვეების მიხედვით, 1988)

ნალექები წლის ცივი პერიოდის ნალექები მცინვარების არსებობისათვის ერთ-ერთი უმთავრესი ფაქტორია. მისი მკვეთი არათანაბარი ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გავრცელება, გამოწვეული ატმოსფეროს რთული ცირკულაციური

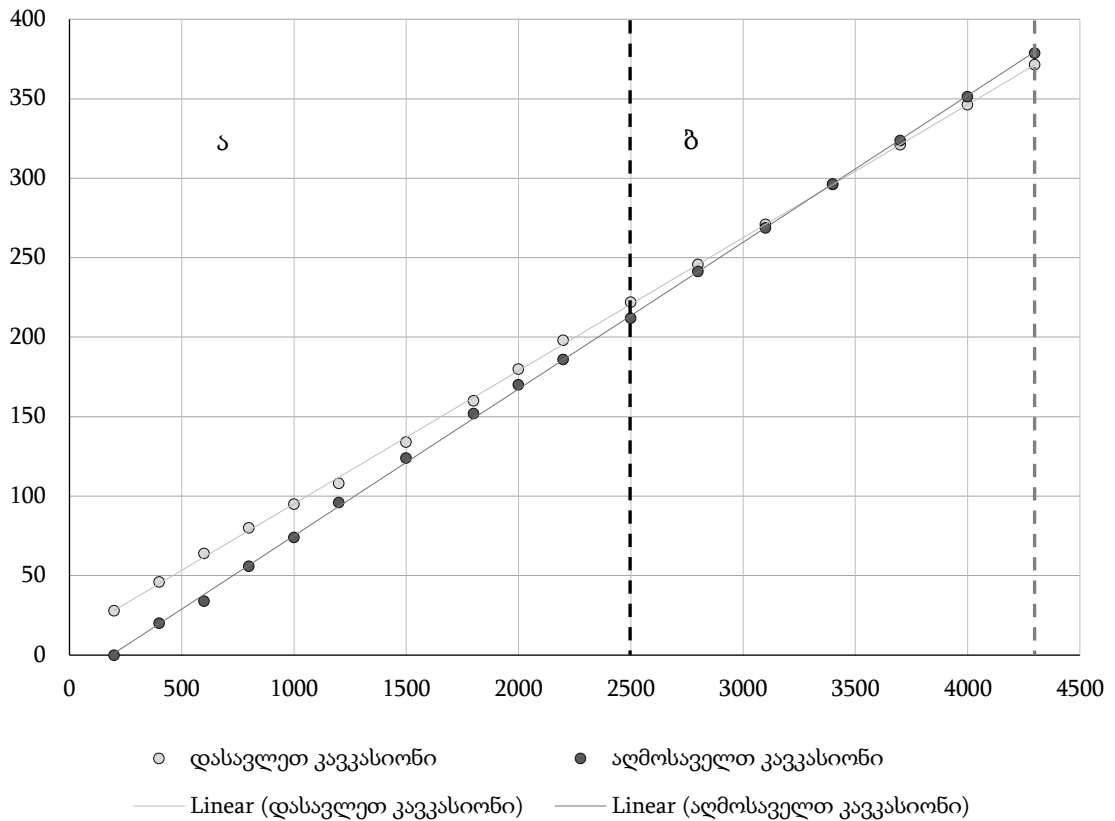
პროცესებითა და რთული ოროგრაფიული პირობებით განსაკუთრებით აისახება თანამედროვე გამყინვარების ხასიათზე და მასშტაბებზე. ნალექების განაწილების მკვეთრი არათანაბრობის პირობებშიც კარგად ჩანს მისი კლების ხასიათი დასავლეთ კავკასიონიდან აღმოსავლეთ კავკასიონისაკენ. საქართველოს ტერიტორიაზე მოსული ნალექების წლიური ჯამის დიდი ნაწილი სწორედ დასავლეთიდან შემოჭრილი ჰაერის მასების ხარჯზე მოდის. პროფესორ ო. დროზდოვის აზრით (1948 წ.) მაქსიმალური ნალექების მოსვლის ზონა ყოფილი სსრკ-ზე ტერიტორიაზე ამიერკავკასიაში, კერძოდ კი საქართველოში მდებარეობს 3000-5000 მეტრის სიმაღლეზე (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981). ნალექები მატულობს სიმაღლის ზრდასთან ერთად. პლუვიომეტრული გრადიენტების რიცხვითი მონაცემები კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე ყოველ 100 მეტრზე 50.4 მმ-ით (თბილისი-ჯვრის უღელტეხილი) ჩრდილოეთ ფერდობზე (სტეფანწმინდა-ჯვრის უღელტეხილი) 64.5 მმ-ით იზრდება.

თოვლის საფარი, დაბალი ტემპერატურები და რელიეფის უარყოფითი ფორმები, ქმნის მყინვარების არსებობის ხელსაყრელ პირობებს. პროცესთა ურთიერთქმედება განაპირობებს გამყინვარების გავრცელებას ვერტიკალურ ლანდშაფტურ ზონალურ სტრუქტურაში, მათ მიერ დაკავებული არეალის/მოცულობის მასშტაბებს და ა.შ. თოვლის ტიპი, მდგრადი საბურველის ხანგრძლივობა, ზვავები, მათი გეოგრაფიული გავრცელება, თოვლის სიმკვრივე და თოვლის საფარის სიმაღლე განაპირობებს მყინვარების კვებას მათი აკუმულაციის ზონებში, ფირნის ხაზის ზემოთ მდებარე ტერიტორიაზე. კვების არეალების ქვედა ზღურბლის ვერტიკალური სიმაღლე ზღვის დონიდან განპირობებულია, ყოველწლიურად მოსული თოვლის რაოდენობითა და მოცემულ სეზონზე ამინდის კონკრეტული პირობებით. შ. ჯავახიშვილის მონაცემების მიხედვით (იხ. ცხრილი 5) თოვლის მდგრადი საფარის ხანგრძლივობა დღეების მიხედვით სიმაღლის ზრდის პარალელურად იზრდება დასავლეთ და აღმოსავლეთ კავკასიონზეც. საშუალოდ ზღვის ზონიდან 2000 მეტრის ზემოთ, თოვლის საბურველი, ოქტომბრის თვიდან ჩნდება და 6-7 თვის არსებობს. სიმაღლის ზრდის პარალელურად იზრდება თოვლის საფარის არსებობის ხანგრძლივობაც და მისი სიმაღლე. საშუალოდ 3000-3200 მეტრიდან მუდმივი თოვლისა და მყინვარების ზონა იწყება, რომელიც კავკასიონის სამხრეთი ფერდობის დასავლეთ ნაწილში უხვი ნალექის და მაღალი ტენიანობის პირობებში 2700-3200 მეტრამდე დიაპაზონში იცვლება, მაშინ

როდესაც აღმოსავლეთ კავკასიონზე იგი 3200-3400 მეტრზეა (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981). აღნიშნული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე, მუდმივი თოვლის საბურველი მთელის წლის განმავლობაში \approx 4300-4400 მეტრზე გადის, რაც კარგად ეთანხმება რადიაციული ბალანსის უარყოფითი მაჩვენებლის პირველ (იხ. ცხრილი 4; იხ. ფიგურა 16) სიმაღლეს და 0°C მუდმივი უარყოფითი ტემპერატურების სიმაღლეს თავისუფალ ატმოსფეროში (რ. გობეჯიშვილი, ნ. ლომიძე, 2006 ბ). ზღვის დონიდან 2000 მეტრზე მაღლა, მდგრადი თოვლის საბურველი დაახლოებით ოქტომბრის თვიდან ჩნდება. მისი სიმაღლე და ხანგრძლივობა სიმაღლესთან ერთად მატულობს, მაქსიმალური სიმკვრივე მარტის ბოლოს, აპრილის დასაწყისშია და $0.35 - 0.45$ გრ/სმ³ უტოლდება (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981). დიდია დიფერენციაცია აგრეთვე ნალექების რაოდენობას შორის, ქედის სამხრეთ და ჩრდილოეთ ფერდობებს შორის.

ცხრილი 5. თოვლის საბურველის ხანგრძლივობა (დღეებში) (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981)

სიმაღლე ზ.დ. მ-ში	კავკასიონის სამხრეთი ფერდობი	
	დასავლეთი ნაწილი	აღმოსავლეთი ნაწილი
200	28	10
400	46	20
600	64	34
800	80	56
1000	95	74
1200	108	96
1500	134	124
1800	160	152
2000	180	170
2200	198	186
2500	222	212



ფიგურა 16. თოვლის საფარის ხანგრძლივობისა და ზღვის დონეზე სიმაღლის დამოკიდებულების მრუდი (X ღერძზე მოცემულია სიმაღლე ზღვის დონეზე; Y ღერძზე მდგრადი თოვლის საბურველის ხანგრძლივობა წლის განმავლობაში დღეების მიხედვით; ა) არსებული მონაცემები; ბ) მოდელირებული; (ჯავახიშვილი, ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე, 1981)

კლიმატური პირობების მსგავსი დიფერენციაცია განპირობებულია კავკასიონის ქედის მდებარეობით, ზომიერი და სუბტროპიკული კლიმატური სარტყლების საზღვარზე, როგორც კლიმატურ-გეოგრაფიული ბარიერი მათ შორის. კავკასიონის ქედი ასევე განიცდის ატლანტის ოკეანის და ხმელთაშუაზღვის თბილი და ტენიანი ჰაერის მასების გავლენას, ერთი მხრივ და ციმბირის, შუა აზიის და ირანის მთიანეთის კონტინენტური ჰაერის მასების გავლენას მეორეს მხრივ. უმნიშვნელოვანესი ფაქტორები კავკასიონის კლიმატის ფორმირებაში აქვს შავ და კასპიის ზღვებს. მსგავსი კლიმატური მრავალფეროვნების პირობებში თანამედროვე გამყინვარების ხასიათიც მეტად არაერთგვაროვანია კავკასიონის ქედის როგორც ჩრდილოეთ ფერდობზე, ასევე მის დასავლეთ, აღმოსავლეთ და ცენტრალურ ნაწილებში. კლიმატური პირობების და თანამედროვე გამყინვარების ძირითადი კანონზომიერება გამოიხატება დასავლეთიდან აღმოსავლეთისკენ ნალექების რაოდენობის კლებაში და კონტინენტური ჰაერის მასების გავლენის ზრდაში, რის პარალელურადაც იზრდება გამყინვარების წონასწორობის ხაზის (ELA-equilibrium line altitude) სიმაღლე 2500-2700 მ

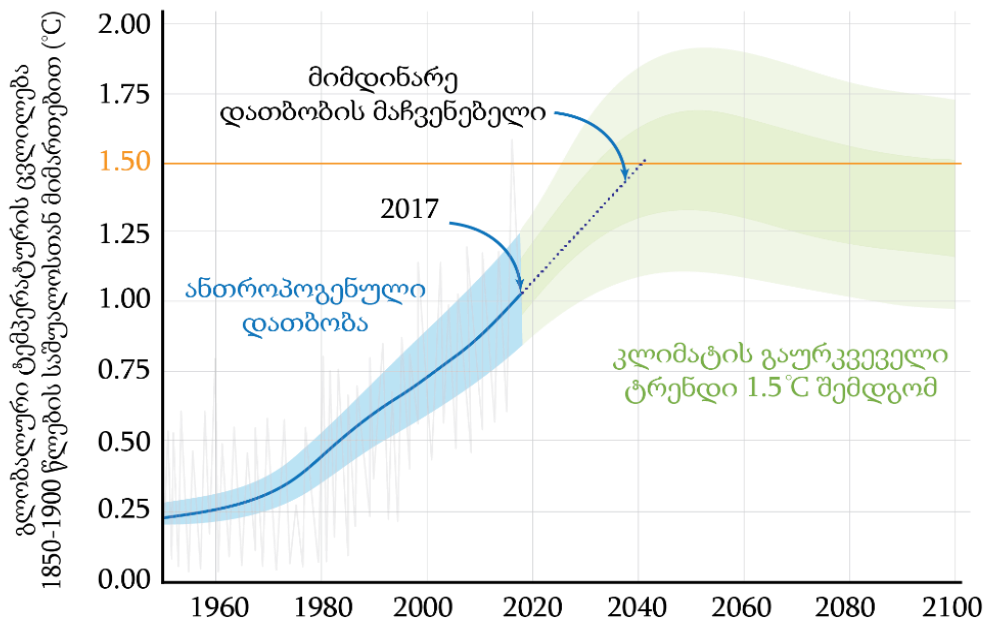
დასავლეთ კავკასიონზე, 3200-3400 მ ცენტრალურ კავკასიონზე და 3700-3950 მ აღმოსავლეთ კავკასიონზე (Shahgedanova, 2014).

მონაცემების ანალიზით ირკვევა, რომ კავკასიონის მთელს პერიმეტრზე არსებობს ხელსაყრელი კლიმატური პირობები ნალექების სიუხვის და დაბალი ტემპერატურების სახით. გამყინვარების ხასიათს და მოცულობებს შორის ასეთი მნიშვნელოვანი დიფერენციაციის განმაპირობებელი ფაქტორებიდან ნალექებთან ერთად უპირატესია რელიეფის მორფომეტრიული ფაქტორი, რომლიც ყველაზე ხელსაყრელი, მდ. ენგურის აუზში მდინარეების დოღრას, მესტიაჭალა, მულხურას აუზების სათავეებშია, სადაც წარმოდგენილია კიდევ თანამედროვე გამყინვარების უდიდესი ნაწილი.

2.3. კლიმატის თანამედროვე ცვლილება და მოსალოდნელი სცენარები 2100 წლისათვის

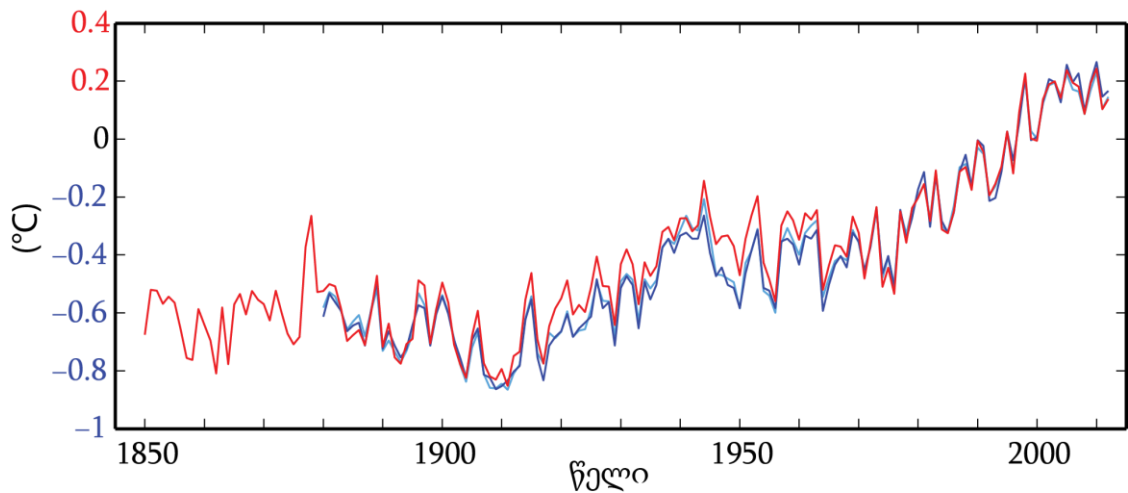
კაცობრიობის განვითარების დღევანდელ ეტაპზე ჩვენ არ გვაქვს ცხადად წარმოდგენილი და გააზრებული დედამიწის მომავალი კლიმატის მეტნაკლებად გრძელვადიანი პროგნოზი. ყველა ამ ეტაპზე არსებული კლიმატის ცვლილების საადაპტაციო დოკუმენტაციის უმრავლესობა, ბუნებრივი გარემოს მდგრადი განვითარების საჭიროებას აღიარებს, ასევე მოითხოვს სათბობ-ენერგეტიკული ან სხვა რესურსების გეგმა-ზომიერ ხარჯვას.

კლიმატის ცვლილებების საერთაშორისო სამთავრობათშორისო კომისიის სპეციალური დასკვნით, პრეინდუსტრიულ (1850-1900 წწ.) და თანამედროვე პერიოდს (2017 წ.) შორის გლობალური ტემპერატურა უკვე გაზრდილია საშუალოდ $+1^{\circ}\text{C}$ -ით ($+0.8 + 1.2^{\circ}\text{C}$ დიაპაზონი), საშუალოდ $+0.2^{\circ}\text{C}$ ყოველ სამ ათწლეულში ($+0.1 + 0.3^{\circ}\text{C}$ დიაპაზონი) და დამატებით ტემპერატურის აღნიშნული სიჩქარის ზრდის პირობებში $+1.5^{\circ}\text{C}$ 2040 წლისათვის (2030-2052 წწ. დიაპაზონი). (იხ. ფიგურა 17) (IPCC, 2018)



ფიგურა 17. გლობალური ტემპერატურის ტრენტი პრეინდუსტრიულ ხანასა და თანამედროვე პერიოდთან შედარებით (IPCC, 2018)

ადამიანის გავლენა კლიმატის ცვლილებაზე ცხადია, უკანასკნელი ანთროპოგენული წარმოშობის ამოფრქვევები მაღალია ატმოსფეროში და აღნიშნული ტემპით სათბური გაზების ემისიები მომავალში აუცილებლად გამოიწვევს მდგრადი კლიმატური სისტემის ფუნდამენტურ ცვლილებას, რასაც ცხადია თან მოჰყვება მრავალი თანმდევი პროცესის გააქტიურება (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), 2014). როგორც, დოკუმენტით ირკვევა, ბოლო სამივე კლიმატური პერიოდი (იგულისხმება 30 წლიანი შუალედი) თანამიმდევრულად ყველაზე ცხელი იყო 1850 შემდეგ. 1983-2012 წლებს შორის პერიოდი დიდი ალბათობით ყველაზე ცხელი იყო ბოლო 1400 წლის მანძილზე ჩრდილოეთ ნახევარსფეროსთვის (იხ. ფიგურა 18). ანთროპოგენული წარმოშობის სათბური გაზების ემისიები, რომელიც განუხრელად იზრდება პრეინდუსტრიული ხანიდან მოყოლებული, დემოგრაფიული და ეკონომიკის ზრდის პირობებში, უპრეცედენტოა ბოლო 800 ათასი წლის განმავლობაში. იგი განსაკუთრებული აღმავალი ტრენდით ხასიათდება 1970 წლიდან მოყოლებული, ხოლო 2000-2010 წლიდან იგი განსაკუთრებით სწრაფად გაიზარდა მიუხედავად გატარებული შემარბილებელი ღონისძიებებისა.

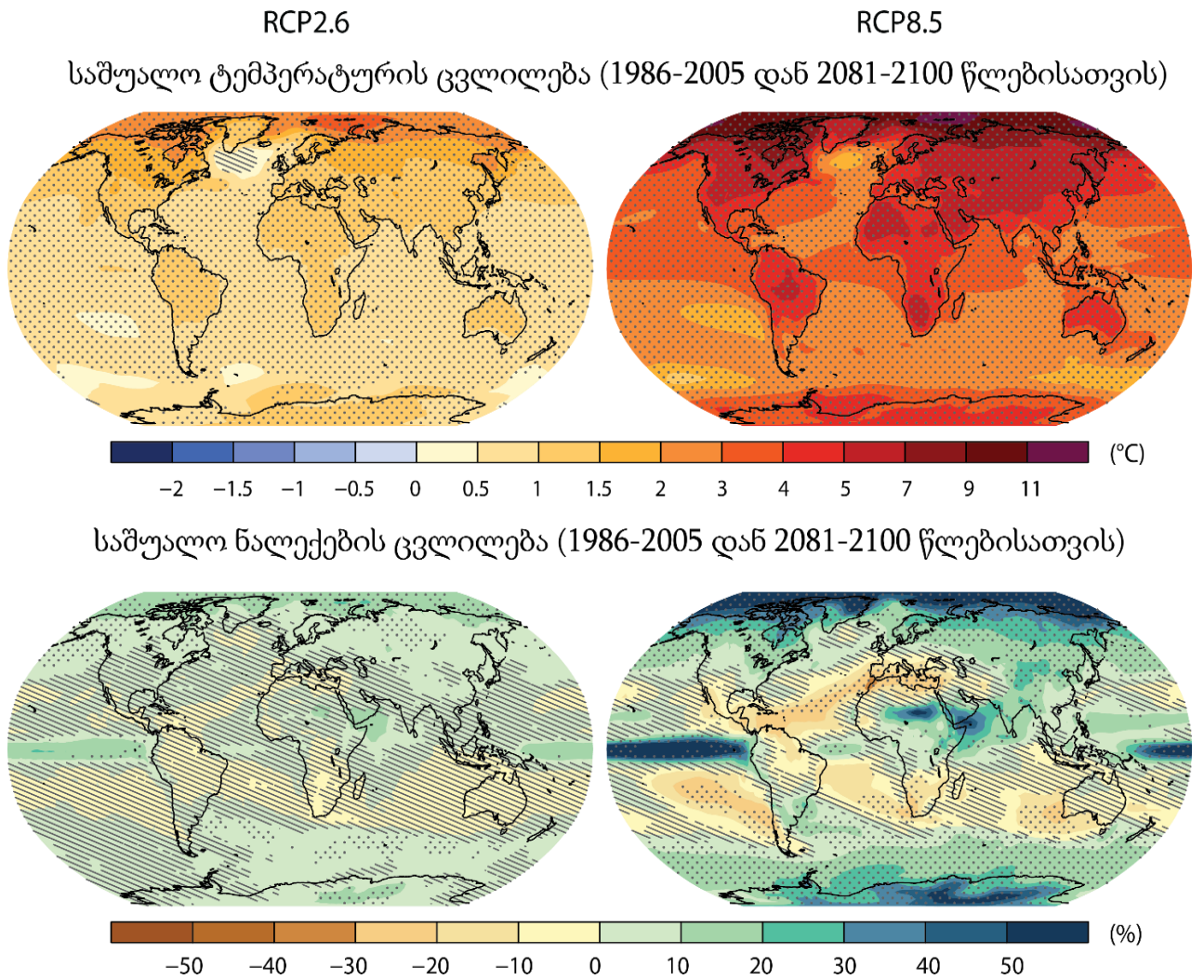


ფიგურა 18. ხმელეთის და ოკეანეების ზედაპირის ტემპერატურების ანომალიები (IPCC, 2018)

2010 წლისათვის ანთროპოგენული წარმოშობის ემისიებმა 49 ± 4.5 გტ. CO₂ ექვივალენტით მიაღწია ყოველწლიურად. მაღალი სანდოობით 1983-2012 წწ. 30 წლიანი პერიოდი ყველაზე ცხელი აღმოჩნდა უკანასკნელი 800 წლის განმავლობაში ჩრდილოეთ ნახევარსფეროსათვის. მეცნიერულად დადასტურებულია, რომ XX საუკუნის შუა პერიოდიდან მნიშვნელოვნად მცირდება ყოველწლიური თოვლის საფარი ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, იზრდება მარადი მზრალობის ტემპერატურა. 1901-2010 წლებისათვის მსოფლიო ოკეანის საშუალო წლიური დონის მატებამ 1.7 მმ. და 3.2 მმ. 1993-2010 წლებში (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), 2014).

ხაზი უნდა გაესვას იმ გარემოებას, რომ ეს სცენარები არ წარმოადგენენ მომავალი კლიმატის პროგნოზს, არამედ იძლევიან მომავალი კლიმატის სურათს გარკვეული დაშვებების პირობებში (კუტალაძე, 2007). გლობალური ცვლილებები ფუნდამენტურ გავლენას ახდენენ როგორც გლობალურ ისე რეგიონულ დონეზე. იგი გეოგრაფიული გარსში არსებულ მრავალ კომპონენტზე პირდაპირ აისახება და ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში ჩამოყალიბებული მდგრადი წონასწორობის რღვევას იწვევს. აღნიშნულის დამადასტურებელია ისეთი ბუნებრივი კატასტროფების რიცხვის ზრდა და მათი გეოგრაფიის გაფართოება, რომლებიც კლიმატური ცვლილებების მიმართ განსაკუთრებით სენსიტიურნი არიან: მთის და ზეწრული მყინვარების დნობა, ოკეანის დონის აწევა, დიდი წყალსატევების შემცირება, გლაციალური და ფლუვიო-გლაციალური ღვარცოფები, მყინვარების მექანიკური ნგრევა, მყინვარების სწრაფი დნობის შედეგად მორენულ მწკრივებს შორის ტბების გაჩენა, გვალვები, სიციხის

ტალღები, თოვლის და ყინულოვანი მასების სწრაფი და უეცარი დნობის შედეგად წარმოშობილი წყალდიდობები, თოვლის ზავები და მრავალი სხვა.



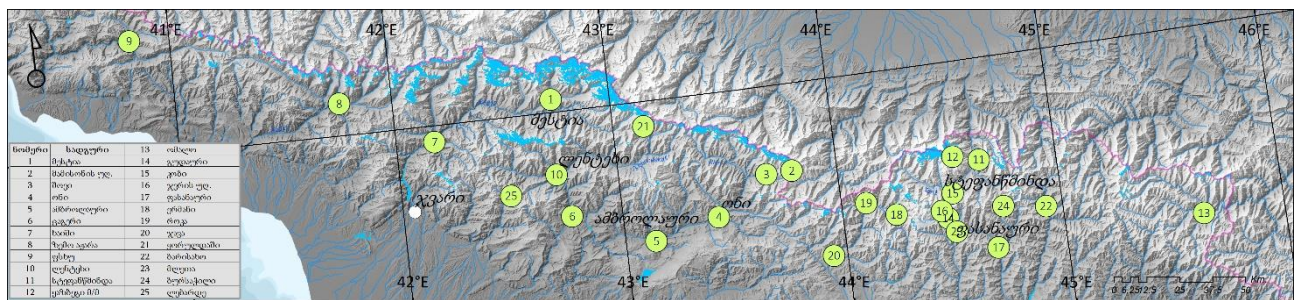
ფიგურა 19. დედამიწის ზედაპირის ტემპერატურის და ნალექების მოსალოდნელი ცვლილება 2100 წლისათვის (IPCC, 2018)

ცხადია კლიმატის გლობალური ცვლილებები, რომელიც ძირითადად გამოხატულია დათბობის ტენდენციით უარყოფითად მოქმედებს კრიოსფეროს საფარზე, სადაც მნიშვნელოვანი შემცირების ტენდენცია უკვე მეცნიერულად დასაბუთებულია უკანასკნელი 200 წლის მანძილზე. საქართველოშიც, საერთო გლობალური ტენდენციის პარალელურად გამოხატულია დათბობის ტენდენცია, მაგრამ იგი ჩვენი ქვეყნის მრავალფეროვანი კლიმატური პირობების კვალდაკვალ განსხვავებულია სხვადასხვა რეგიონში. მიმდინარე კლიმატის ცვლილება, კლიმატის ცვლილების შესახებ საქართველოს მესამე ეროვნული შეტყობინებაში, შეფასებულ იქნა საქართველოს 33 ჰიდრომეტეოროლოგიური სადგურის დაკვირვების

მონაცემებზე დაყრდნობით 1961-2010 წწ ხოლო საპროგნოზო მოდელი შედგენილ იქნა რეგიონალური RegCM4 გამოყენებით (კუტალაძე, 2007).

2.4. კავკასიონის სამხრეთი ფერდობის კლიმატი, მისი განვითარების სცენარი 2100 წლისათვის

საკვლევო რეგიონი წარმოადგენს კავკასიონის დერძული ზოლის და მიმდებარე შტო ან გვერდითი ქედების უშუალო ბუფერულ ზონას. დღეისათვის აღნიშნულ არეალში მეტეოროლოგიურ ელემენტებზე უშუალო დაკვირვება არ მიმდინარეობს³⁵. საკვლევო არეალის კლიმატური პარამეტრების შეფასება შესაძლებელია მის მიმდებარე მაღალმთიან და წინა მთების ზოლში არსებული მეტეოროლოგიური სადგურების მონაცემებზე დაყრდნობით (იხ. ფიგურა 20). სამწუხაროდ მოცემული მეტეოროლოგიური სადგურების ნაწილი დღეისათვის აღარ ფუნქციონირებს.



ფიგურა 20. მეტეოროლოგიური სადგურების განლაგება საშუალო და მაღალმთიან ზოლში

კლიმატური ელემენტების მსვლელობა საერთო ტენდენციის ანარეკლია და ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში მიმდინარე გლობალური დათბობის პარალელურად აქაც მრავალწლიან ჭრილში ჰაერი ტემპერატურის საგრძნობი მატება დაფიქსირებული. კლიმატის ცვლილების შესახებ საქართველოს III ეროვნული შეტყობინების მიხედვით, გლობალური დათბობის გავლენით მხოლოდ ბოლო 25 წლის განმავლობაში საშუალო წლიური ტემპერატურის ზრდამ. დასავლეთ საქართველოსათვის 0.3°C აღმოსავლეთ საქართველოსათვის კი 0.4-0.5°C შეადგინა. კლიმატის ცვლილება, საქართველოს ტერიტორიაზე დოკუმენტში შეფასებულია 33 მეტეოროლოგიური სადგურის მონაცემებზე დაყრდნობით 1961-2010 წწ. პერიოდისათვის. საპროგნოზო მოდელად კი 2021-2050, 2071-2100 წლებისათვის

³⁵ გამოწვევის წარმოადგენდა მამისონის (2820 მ.) და ყაზბეგის მათალ მთიანი (3670 მ.) მეტეოროლოგიური სადგურები, რომლებიც ამჟამად აღარ ფუნქციონირებს.

გამოყენებულია კლიმატის რეგიონული მოდელი RegCM4. დოკუმენტით ირკვევა, რომ ბოლო 50 წლის განმავლობაში საქართველოს მთელს ტერიტორიაზე საშუალო ტემპერატურა მხოლოდ ზრდის ტენდენციას ავლენდა, მაქსიმალური ნაზრდით აღმოსავლეთ საქართველოში, დედოფლისწყარო + 0.7°C; დასავლეთ საქართველოში ფოთი + 0.6°C (კლიმატის ცვლილების შესახებ საქართველოს მესამე ეროვნული შეტყობინება, 2015).

ცხადია ჰაერის ტემპერატურის ზრდა მნიშვნელოვან გავლენას მოახდენს გარემოს ერთ-ერთ ყველაზე სწრაფად ცვლად ისეთ ელემენტზე, როგორც მცენვარებია. თუმცა აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ტემპერატურის მატება ვერტიკალურ ჭრილში ერთნაირად არ იმოქმედებს ნივალურ გლაციალურ საფარზე. მისი უფრო აქტიური გამოვლინება იქნება ნივალურ და უფრო დაბალ ზონებში სადაც მცენვარის ენებია თავმოყრილი. დიდი ალბათობით მათი ენები მნიშვნელოვნად შემცირდება და ისინი კარული ან კარული-ხეობის ტიპის მცენვარებად გარდაიქმნებიან. რაც შეეხება მცენვარების სრულ გაქრობას ტემპერატურის ზრდის ფონზე, ეს უპირატესად შეეხება მცირე ზომის კარული და მხოლოდ ნივალური ზონის ქვედა ნაწილში არსებული მცენვარებს. მაგ: 1960-2015 წწ. პერიოდში ტემპერატურის მატების პირობებში სრულად გაქრა ჯამში 25 კმ² ფართობის მქონე 180 მცენვარი, საშუალო ფართობით 0.13 კმ². თანამედროვე მონაცემებით 0.13 კმ²-ზე მცირე ზომის კარული ტიპის 499 მცენვარია დარჩენილი, რომელთა მიერ დაკავებული საერთო ფართი 26 კმ² შეადგენს. მცირეა მათი ვერტიკალური გავრცელების დიაპაზონიც, საშუალოდ 200 მ. საშუალო სიმაღლე 3335 მეტრია. დიდი ალბათობით სავარაუდოა რომ ტემპერატურის მატების, ფირნის ხაზის აწევის ფონზე ეს მცენვარებიც ახლო მომავალში გაქრებიან ან მხოლოდ თოვლნარების სახით იქნებიან წარმოდგენილნი.

3. მცინვარების ფლუქტუაციების ანალიზი

3.1. საქართველოს მცინვარების გეოსაინფორმაციო სისტემა

ცალკეული მცინვარების და ნივალურ-გლაციალური ზონის დინამიკის შესწავლისას წინა პერიოდების მონაცემებს განსაკუთრებული ღირებულება აქვს და უმნიშვნელოვანესი ინფორმაციის მატარებელია. კომპიუტერული სისტემების განვითარებამდე მცინვარების კვლევისას გამოიყენებოდა გეოდეზიური, კარტოგრაფიული, აეროკოსმოსური სურათების დეშიფრირების, სტატისტიკური დამუშავების და საველე დაკვირვებების მეთოდოლოგია. XX საუკუნის შუა პერიოდიდან, როდესაც შესაძლებელი გახდა ობიექტის დისტანციური ზონდირება, აეროფოტოების დეშიფრირება ნახევრად ავტომატიზებულ სტერეო ავტოგრაფზე ხდებოდა, რომლის გამოყენებით მიმდინარეობდა მცინვარების დეტალური კარტოგრაფირება, შემდგომ მისი კატალოგიზაცია და სტატისტიკური მასალის შედგენა. ამ მხრივ ფასდაუდებელია რ. გობეჯიშვილის შრომა. იგი ვახუშტი ბაგრატიონის გეოგრაფიის ინსტიტუტის აეროკოსმოსური და გლაციოლოგიური კვლევის ლაბორატორიაში შესრულდა, რომლიც მოგვიანებით გამოიცა მონოგრაფიის სახით (P.Г.Гобеджишвили, 1989). კატალოგი სრულად ასახავს საქართველოს მცინვარების მორფომეტრიულ, მორფოლოგიურ და სტატისტიკურ მახასიათებლებს.

მცინვარების გავრცელების, ტიპების და მორფომეტრიის კვლევა მრავალ ავტორს აქვს ჩატარებული. მათგან ცალკე აღნიშვნის ღირსია კ. პოდოზერსკის, რ. გობეჯიშვილის, ვ. ცომაიას, ლ. მარუაშვილი გ. კურდღელაიძე; თ. ლაშხი; შ. ინაშვილი; დ. ტაბიძე (СССР კატალოგი) და ლ. ტიელიძის შრომები; კ. პოდოზერსკის, რ. გობეჯიშვილის და СССР³⁶ კატალოგები დამუშავებულია იმ პერიოდისათვის ხელმისაწვდომ ფორმატში³⁷, ლ. ტიელიძის მონაცემები ელექტრონული ფორმატისაა და განთავსებულია მცინვარების მონიტორინგის ერთიან ვებ პორტალზე GLIMS -

³⁶ СССР მცინვარების კატალოგი 9 ტომი, ნაწილი 2-6; ნაწილი 7.

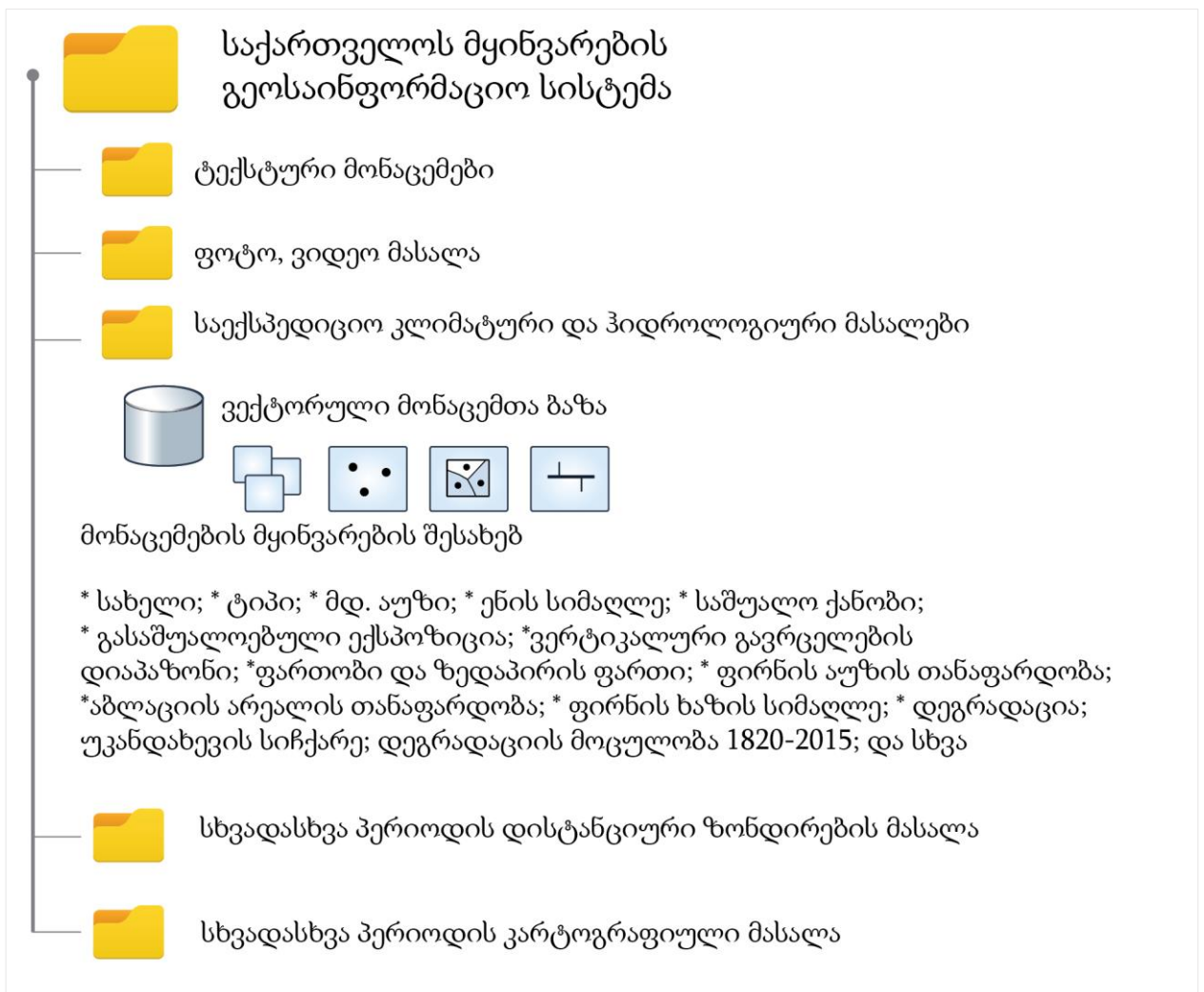
³⁷ მცინვარების შესახებ არსებული მონაცემები წარმოდგენილია ტექსტური ფორმატში, რუკებიც წარმოდგენილია ქალაქის ფორმატში. კვლევის ფარგლებში მოხდა მათი ელექტრონულ ფორმატში გადაყვანა

[Global Land Ice Measurements from Space](#). რომელიც უახლესი სატელიტურ მონაცემებს ეფუძნება.

ბოლო პერიოდში გეოსაინფორმაციო და დისტანციური ზონდირების კვლევის მეთოდოლოგიის ხელმისაწვდომობამ, ასევე მათმა შესაძლებლობებმა განაპირობა, რომ კვლევები, რომელიც გეო სივრცით მონაცემებს ეხება უპირატესად გეოსაინფორმაციულ პროგრამულ უზრუნველყოფების გამოყენებას ეფუძნება.

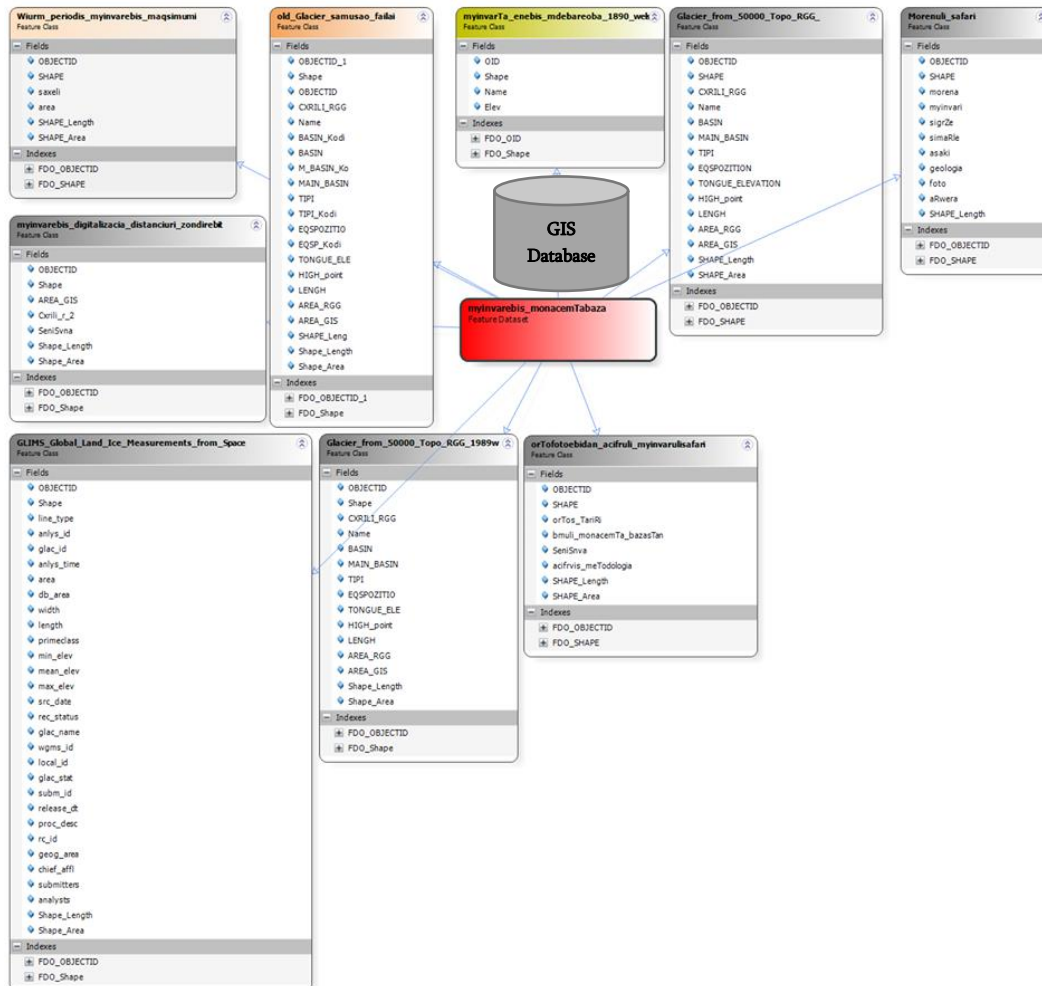
დისერტაციის ფარგლებშიც ჩემს მიერ, სხვადასხვა პერიოდის მასალებზე დაყრდნობით, შექმნილია - საქართველოს მცინვარების გეოსაინფორმაციო სისტემა.

საქართველოს მცინვარების გეოსაინფორმაციო ბაზა ეს არის სივრცული მონაცემების ელექტრონული სისტემა: ვექტორული, „რასტრული“, ცხრილურ და გრაფიკული მონაცემების (ელექტრონული რუკების სისტემა) ერთობლიობა (იხ. ფიგურა 21; იხ. ფიგურა 23; იხ. ფიგურა 22).



ფიგურა 21. საქართველოს მცინვარების გეოსაინფორმაციული სისტემის სტრუქტურა

უახლესი (2010-2015 წწ.) სატელიტური მონაცემების კარტოგრაფიული და გეოინფორმაციული დემონსტრირებით ქვემოთ ვიძლევიტ გარკვეულ რიცხვით სტატისტიკურ ანალიზს საქართველოს მყინვარების და მათი გეოგრაფიული განაწილების შესახებ (იხ. ცხრილი 6).



ფიგურა 22. მყინვარების მონაცემთა ბაზის სტრუქტურა

საქართველოს თანამედროვე გამყინვარების უმთავრესი კერა ცენტრალური კავკასიონის ღერძული ზოლია სვანეთის; რაჭის მონაკვეთზე და გამყინვარების კერით ყაზბეგი-ჯიშარას მასივზე. დანარჩენ არეალებს გამყინვარების საერთო სურათში მცირედი წვლილი აქვთ და მდინარეულ ჩამონადენზე დიდ გავლენას ვერ ახდენენ. მათი გამყინვარების ჯამური ფართი 100 კმ²-ზე ნაკლებია, საშუალოდ 0.22 კმ² ფართობის მცირე ზომის მყინვარებით. ზოგადად, თანამედროვე მყინვარების საერთო რაოდენობიდან 83.51% მცირე ზომის 0.5 კმ²-მდე ფართობის მქონე მყინვარებზე მოდის (იხ. ცხრილი 7). კლიმატის ცვილების მიმდინარე ტემპიდან გამომდინარე დიდი ალბათობით უახლოეს პერიოდში მოსალოდნელია მათი ნაწილის სრული გაქრობა.

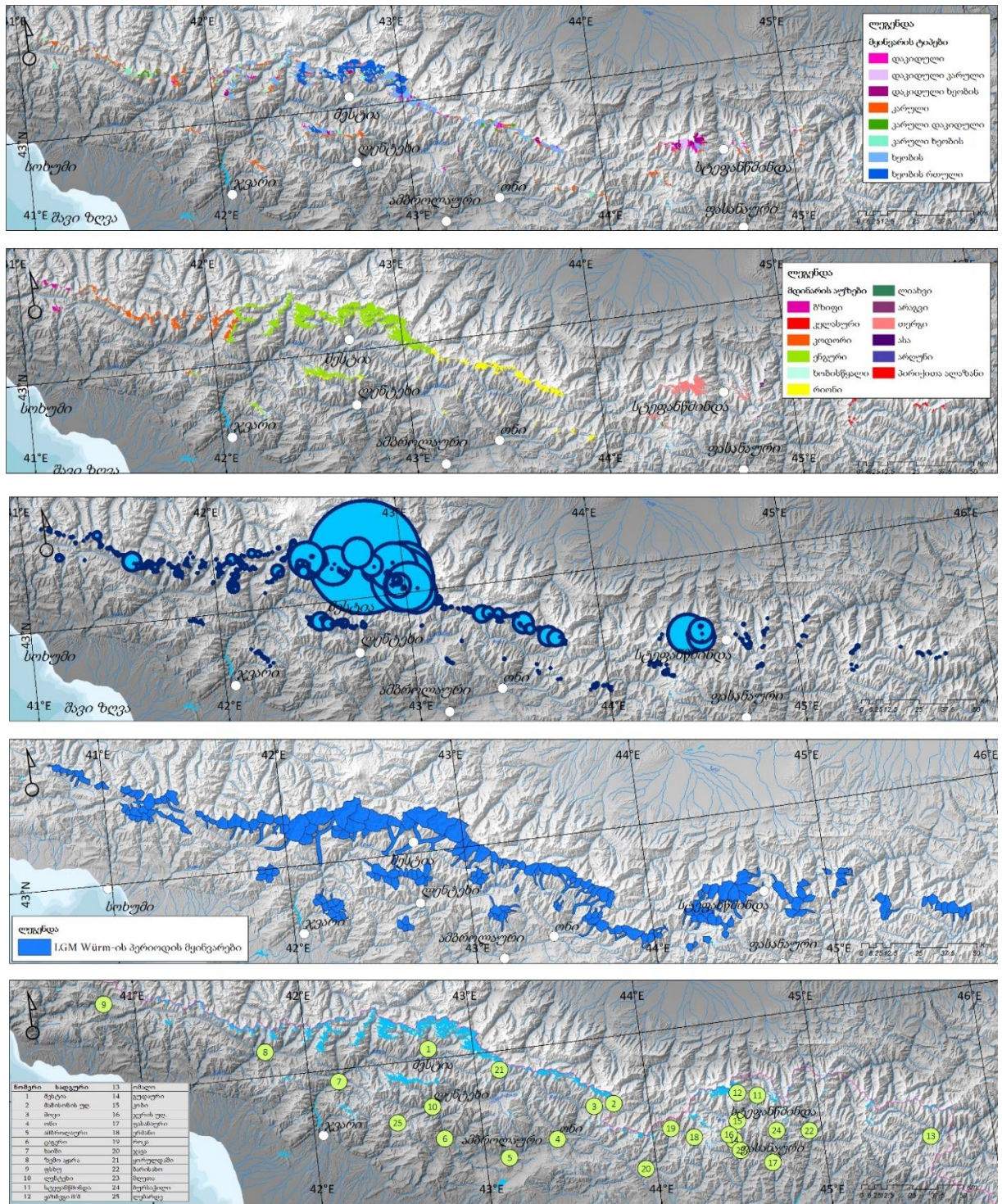
ამჟამად ყველაზე დიდი მყინვარის სტატუსს კვლავ მყინვარი ლეხზირი 24.67 კმ² ფართობით ინარჩუნებს.

ცხრილი 6. საქართველოს თანამედროვე მყინვარების ზომები და მათი გავრცელება გეოგრაფიული არელების მიხედვით

გეოგრაფიული არეალი	მყინვარის ფართობი კმ ²	მყინვარის საშუალო ზომა კმ ²	მყინვარის მაქსიმალური ზომა კმ ²	თანაფარდობა ჯამურ გამყინვარებასთან %
აღმოსავლეთ კავკასიონი	8.99	0.12	0.95	2.32
ცენტრალური კავკასიონი (ყაზბეგი-ჯიმარას მასივი)	37.87	0.58	8.46	9.76
ცენტრალური კავკასიონის ღერძული ზოლი	250.76	0.74	24.68	64.61
დასავლეთ კავკასიონი (ხიმსას და ხოჯალის ქედების ჩათვლით)	63.57	0.26	3.85	16.38
რაჭა-ლეჩხუმის და შოდა-კედელას ქედები	1.93	0.10	0.30	0.50
სამეგრელოს ქედი	1.98	0.05	0.24	0.51
სვანეთის ქედი	22.99	0.40	3.73	5.92
სულ	388.11	0.46	24.68	100.00%

ცხრილი 7. საქართველოს თანამედროვე მყინვარების რაოდენობები ზომების მიხედვით

მყინვარების ზომები კმ	რაოდენობა	Cumulative %
0.1-ზე ნაკლები	440	51.83%
0.1 - 0.5	269	83.51%
0.5 - 1	64	91.05%
1 - 2	36	95.29%
2 - 5	25	98.23%
5 -10	10	99.41%
10 -20	4	99.88%
20 მეტი	1	100.00%
სულ:	849	



ფიგურა 23. საქართველოს მყინვარების გეოგრაფიული განაწილება I.G.M Würm-ის პერიოდის მყინვარების გეოგრაფიული განაწილება

2018 წელს მყინვარზე ჩატარებული ექსპედიციის ფარგლებში გადაღებული აერო მასალებზე დაყრდნობით დგინდება, რომ მყინვარ ლეხზირს უკვე მოსწყდა მისი ჩრდილოეთი ნაკადი. ამჟამად, იგი პასიურ კონტაქტში მყოფი დასავლეთი და აღმოსავლეთი ნაკადებისაგან შესდგება, რომლებიც ერთიან ენას აღარც ქმნიან.

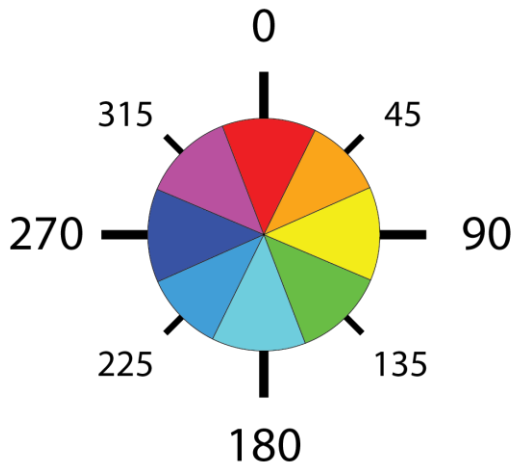
უახლოეს მომავალში მოხდება მათი ერთმანეთისგან დაშორება და მოსალოდნელია მისი ორ დასავლეთის და აღმოსავლეთის ნაწილებად დაიყოფა (იხ. ფიგურა 26).

სტატისტიკური და ნივალურ-გლაციალური საფარის რიცხოვრივი მონაცემების გენერირების შესაძლებლობის გარდა, საქართველოს მყინვარების გეოსაინფორმაციო მონაცემთა ბაზა საშუალებას გვაძლევს მყინვარების შეფასებისას და მათი დინამიკის განსხვავებული ხასიათის უკეთ ახსნისათვის გამოვიყენოთ რელიეფის ციფრული მოდელი. პირველ რიგში მყინვარი როგორც განსაკუთრებით სენსიტიური ბუნებრივი წარმონაქმნი კლიმატური პარამეტრების მიმართ უნდა შეფასდეს მის აუზში ფერდობთა ექსპოზიციის განაწილების მხრივ. აღსანიშნავია, რომ აქამდე ლიტერატურაში კონკრეტული მყინვარების ექსპოზიციების მახასიათებლად გამოიყენებოდა მხოლოდ ერთი აღმნიშვნელი, განზომილების გარეშე, რომელიც ახასიათებდა მყინვარის ენის ან მისი ტანის მიმართულებას ჰორიზონტის მხარის მიმართ. შესაძლოა ასეთი მიდგომა გამართლებული იყოს კარული მცირე ზომის მყინვარებისათვის, რომლებიც უპირატესად ერთი მიმართულებით ავითარებენ თავის ნაკადს. რაც შეეხება ხეობის ტიპის დიდ ან ხეობის რთულ მყინვარებს (ლექზირი, ტვიბერი, ჭალაათი) და სხვა, რომლებიც სხვადასხვა ფერდობებიდან ჩამოსული ნაკადების შეერთების შემდეგ ივითარებენ ერთიან ენას ან მათი ენის ნაწილი ხეობაში სხვადასხვა მიმართულებით ვითარდება, ასეთი მყინვარისათვის მხოლოდ მისი ენის მიმართულებით ექსპოზიციის მინიჭება არამართებულია. ამ შემთხვევაში გამოვიყენე გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფები რათა დაგვედგინა ხეობის ტიპის დიდი მყინვარების ექსპოზიციები გასაშუალოებული მნიშვნელობა და მყინვარის ტანზე ჰორიზონტის მხარეების განაწილების რაოდენობრივი ან პროცენტული გადანაწილება, ან მისი შესაძლო კავშირი მყინვარის დეგრადაციასთან.

ქვემოთ მოცემულია მყინვარ ლექზირის მაგალითი. საბჭოთა კავშირის კატალოგში მოცემულია როგორც საერთო სამხრეთული ექსპოზიციის მყინვარი (Л.И. Маруашвили, 1975). იგი ასევე ერთიანი სამხრეთული ექსპოზიციის მყინვარად არის მოხსენიებული რ. გობეჯიშვილის კატალოგშიც (Р.Г.Гобеджишвили, 1989).

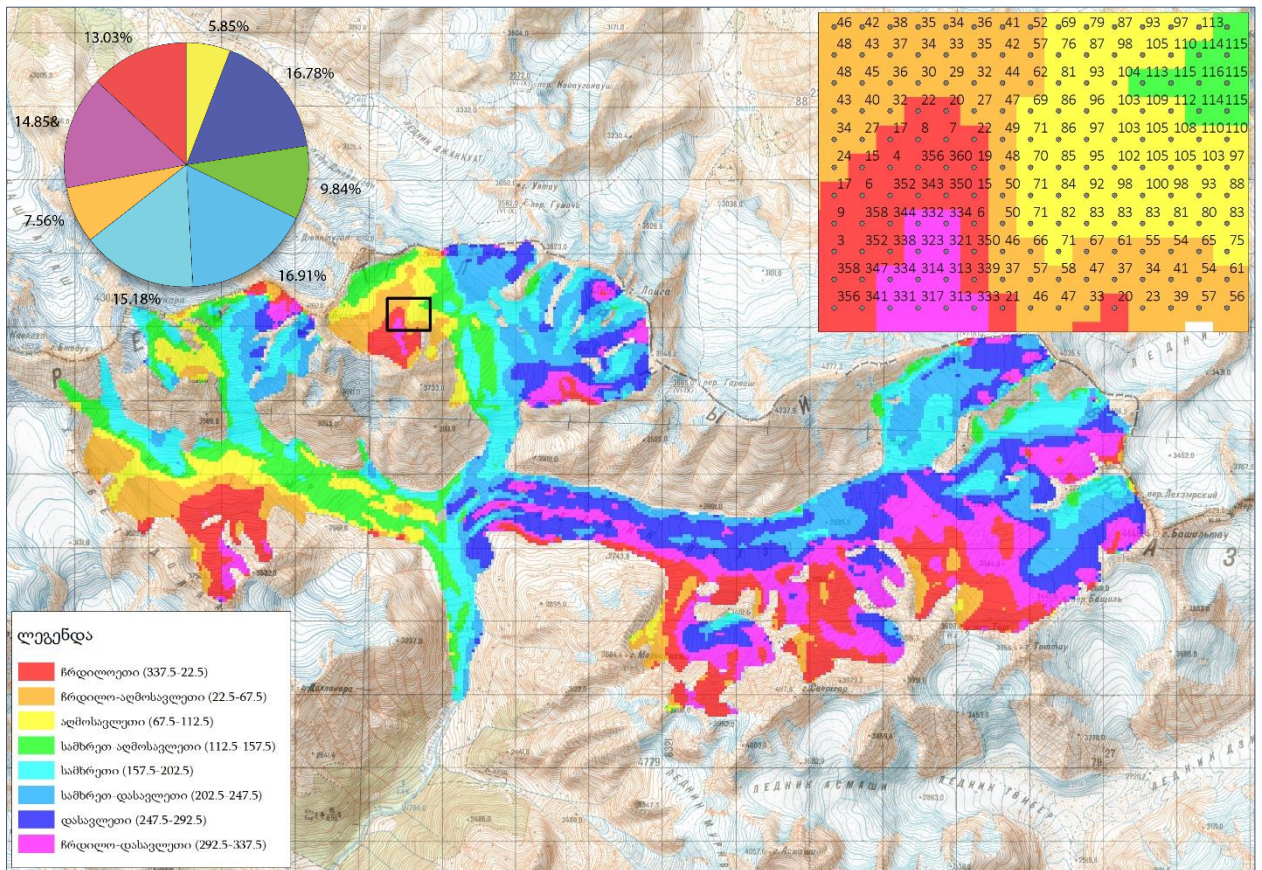
მყინვარის გასაშუალოებული ექსპოზიციის გაანგარიშებისათვის გამოყენებულ იქნა რელიეფის ციფრული მოდელი 1:50000 ტოპოგრაფიული რუკიდან, რომელიც დაიყო 10×10 მეტრიან უჯრებად და თითოეული უჯრისათვის განისაზღვრა

ფერდობის ექსპოზიცია, ჰორიზონტის მხარეების (აზიმუტი) მიხედვით და ჩაიწერა რიცხვითი მნიშვნელობით (იხ. ფიგურა 24, ფიგურა 25).



337.5 – 22.5	ჩრდილოეთი
22.5 – 67.5	ჩრდილო-აღმოსავლეთი
67.5 – 112.5	აღმოსავლეთი
112.5 – 157.5	სამხრეთ-აღმოსავლეთი
157.5 – 202.5	სამხრეთი
202.5 – 247.5	სამხრეთ-დასავლეთი
247.5 – 292.5	დასავლეთი
292.5 – 337.5	ჩრდილო-დასავლეთი

ფიგურა 24. ფერდობების ექსპოზიციების განაწილება აზიმუტის მხარეების მიმართულებით



ფიგურა 25. ფერდობების ექსპოზიციების განაწილება მყინვარ ლეხზირის შემთხვევაში

აზიმუტის 45°-ით ცვილებსას იცვლება ჰორიზონტის მხარეც: ჩრდილოეთი არის 337.5-22.5° შორის და ასე შემდეგ 0°-დან - 360°-მდე (იხ. ფიგურა 24).

შედეგად მივიღე გეოგრაფიული ობიექტისათვის უკვე რიცხვითი განზომილების მქონე მონაცემი, რომლიც ასახავს ობიექტის მთელი ზედაპირის ან მისი ცალკეული ნაწილების მაჩვენებლებს ფერდობების ექსპოზიციების მიმართ.

მყინვარ ლეხზირის მაგალითზე, რომელიც მოხსენიებულია როგორც სამხრეთული ექსპოზიციის მყინვარი, ზემოთაღნიშნულ მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით, მისი მთელი ზედაპირზე საერთო სამხრეთული მიმართულების ფერდობებს მხოლოდ \approx 30%-მდე ნაწილი უკავიათ. (იხ. ცხრილი 8)

ცხრილი 8. მყინვარ ლეხზირის ზედაპირზე ფერდობების ექსპოზიციების მიერ დაკავებული ფართობები და მათი პროცენტული განაწილება

ექსპოზიცია	ფართი კმ ²	ექსპოზიციის %
აღმოსავლეთი	5.08	14.32
დასავლეთი	11.59	32.65
სამხრეთი	10.35	29.15
ჩრდილოეთი	8.47	23.88

ექსპოზიცია	ფართი კმ ²	ექსპოზიციის %
აღმოსავლეთი	2.08	5.85
დასავლეთი	5.95	16.78
სამხრეთ-აღმოსავლეთი	3.49	9.84
სამხრეთ-დასავლეთი	6.00	16.91
სამხრეთი	5.39	15.18
ჩრდილო-აღმოსავლეთი	2.68	7.56
ჩრდილო-დასავლეთი	5.27	14.85
ჩრდილოეთი	4.63	13.03

ცხრილის ანალიზით ცხადია, რომ არსებული მიდგომა გეოგრაფიული ობიექტის ერთი რომელიმე ჰორიზონტის მხარის მინიჭება ვერ ასახავს რეალობას და არ პასუხობს თანამედროვე მოთხოვნებს.

აღსანიშნავია, რომ II პერიოდისათვის (1960-2015 წლები) გამქრალი ან თოვლნარებად გარდაქმნილი 180 მყინვარის, ჯამური 25 კმ² და საშუალო ფართობი 0.14კმ², მათი უმრავლესობა აღნიშნულ მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით, სამხრეთული ექსპოზიციის მყინვარი იყო. თანამედროვე პერიოდისათვის 0.1 კმ²-მდე ფართობის მქონე 440 მყინვარიდან, ჯამური ფართობით 19.28კმ², ასევე გასაშუალოებულად სამხრეთული ექსპოზიციისაა, რაც უახლოეს მომავალში მათი გაქრობის ალბათობას ზრდის.

საქართველოს მყინვარების გეოსაინფორმაციო მონაცემები, მცირე გამყინვარების შემდგომი პერიოდის მყინვარული საფარის სხვადასხვა პერიოდის სივრცული მონაცემებით, მათ მიერ დაკავებული ფართობების, ზედაპირის დახრილობის,

ფერდობთა ექსპოზიციის განაწილების, მდინარეთა აუზების, სიმაღლითი ზონალურობის, ნივალურ გლაციალური ზონების საზღვრების, აკუმულაციისა და აბლაციის არელების თანაფარდობების, მყინვართა მორფოლოგიური ტიპების, ენის და ფირნის ხაზების მდებარეობის დინამიკის და სხვა მრავალის შესახებ, საშუალებას იძლევა ერთიან კარტოგრაფიულ საფუძველზე სხვადასხვა პერიოდების მყინვარების მონაცემების შედარებისა და სწრაფი გეოგრაფიული და რიცხვით-სტატისტიკური ანალიზისათვის. მონაცემების მსგავსი ფორმატით შენახვის პირობებში მეტად მოსახერხებელია მასში შემდგომი მონაცემების დამატება ისე რომ ერთიანი სტრუქტურა და საკოორდინატო ქსელი არ დაირღვეს.



ა



ბ



გ

3.2. მყინვარებზე დაკვირვება უპილოტო საფრენი აპარატით

უპილოტო საფრენი აპარატების სამეცნიერო საქმიანობაში აქტიური გამოყენება, განაპირობა მრავალი ისეთი ტექნიკური შესაძლებლობის ან სადამკვირვებლო საშუალებების განვითარებამ, რაც უკანასკნელ პერიოდამდე თითქმის შეუძლებელი იყო ან დიდი ფინანსურ და ადამიანურ რესურსთან ასოცირდებოდა.

ობიექტის შესწავლისას დრონის და ფოტოგრამმეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფების გამოყენებას გააჩნია თვისობრივად და ხარისხობრივად აღმატებული მონაცემების გენერირების შესაძლებლობა, რომლიც წარმატებით გამოიყენება დედამიწის შემსწავლელი სხვადასხვა სამეცნიერო მიმართულებით (Oliver Wigmore, 2017). უკანასკნელ პერიოდში დრონებმა ფართო პოპულარობა მოიპოვეს. მრავალდარგობრივი სამეცნიერო მიმართულებების პარალელურად მათ შესაძლებლობებს აქტიურად იყენებს ბიზნეს და სახელმწიფო სექტორიც.

განსაკუთრებით ღირებულია მათი გამოყენება სამეცნიერო და სახელმწიფო სექტორის თანამშრომლობით, რასაც მნიშვნელოვანი შედეგები მოაქვს და ეხმარება საზოგადოებას ტყის ან სხვა ობიექტების ხანძრების მონიტორინგში, სამაშველო საქმიანობების წარმოებაში, პირველადი და გადაუდებელი სამედიცინო დახმარების საკითხებში და საზოგადოებისათვის მრავალი საჭირობო საკითხის გადაწყვეტაში. სამეცნიერო სფეროში მათი საშუალებით შესაძლებელია მთელი რიგი მაღალი მეცნიერული ღირებულების მქონე ინფორმაციის მიღება გარემოში მიმდინარე ბუნებრივი ან ანთროპოგენული პროცესების შესახებ. სამოქალაქო დრონების ტექნიკური შეზღუდვების პირობებში, დრონების უმრავლესობა, ერთი აფრენით შედარებით მცირე არეალის³⁸ კვლევის საშუალებას იძლევა, რის გამოც მისი დიდი არეალებისათვის გამოყენება გართულებულია.

ნაშრომის შესრულებისას, უპილოტო საფრენი აპარატით (DJI Phantom 4pro), ჩემს მიერ 2017-2018 წლებში განხორციელდა საქართველოს ხეობის ტიპის ზოგიერთ მყინვარის ენის მონაკვეთის და პერიგლაციალური არეალის აეროგადაღება (იხ.

³⁸ სამოქალაქო დრონების უმრავლესობას ტექნიკური პარამეტრებიდან გამომდინარე სხვადასხვა სიმაღლიდან ერთი აფრენით შეუძლია ≈ 2 -დან - 40 კმ²-მდე დიაპაზონში არეალის დაფარვა

ცხრილი 9; იხ. ფიგურა 27). აერო ფოტო მასალა დამუშავდა ფოტოგრამეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფის (Pix4D) გამოყენებით.

გრანტის ფარგლებში დასახული ამოცანების შესრულებისას, უშუალოდ საველე პირობებში მოხდა დრონით მცინვარზე დაკვირვების მეთოდოლოგიის ველზე აპრობირება მაღალმთიანი რელიეფის პირობებში. ჩატარებული სამუშაოების შედეგად შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მცინვარებზე მიმდინარე გლაციალურ პროცესზე დაკვირვებისათვის ძალზე ხელსაყრელია უპილოტო საფრენი აპარატის გამოყენება. მისი საშუალებით მოსახერხებელია მცინვარებთან დაკავშირებული სხვადასხვა საკითხების უკეთ გააზრება, შესწავლა და შეფასება, მათ შორის: მცინვარის ენის დინამიკის შესწავლა, ენის ზედაპირზე მიმდინარე გლაციო-გეომორფოლოგიური პროცესების ანალიზი, მცინვარის ენის ან ნაპრალების გადაადგილების სიჩქარის შეფასება, პერიგლაციალურ ზონაში მიმდინარე ლანდშაფტის ცვლილების დინამიკის ანალიზი და რაც განსაკუთრებით ღირებულია მცინვარის მასის ბალანსის კვლევა. დრონს, როგორც დამხმარე ტექნიკურ საშუალებას შეუძლია მაღალი სიზუსტის და დეტალურობის სამეცნიერო ღირებულების მონაცემების გენერირება, რომლის შემდგომი დამუშავება კამერალურ პირობებში ხდება სხვადასხვა გეოსაინფორმაციო და ფოტოგრამეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფების გამოყენებით. მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით შესაძლებელია მთელი რიგი ისეთი ტიპის, სიზუსტის და სიმჭიდროვის მონაცემების გენერირება, რომელიც აქამდე სამეცნიერო სფეროსათვის ნაკლებ ხელმისაწვდომი იყო. პირველ რიგში, მცინვარების შემთხვევაში აეროფოტოსურათების არარსებობის პირობებში შესაძლებელია ამ ხარვეზის აღმოფხვრა. ამასთან აეროფოტოსურათების დამზადების ხანგრძლივი და ფინანსურად ძვირადღირებული პროცესის საპირისპიროდ დრონით აეროფოტო ან ლიდარული³⁹ გადაღება შესაძლებელია განხორციელდეს დროის მცირე მონაკვეთში და ამასთან შესაძლებელია შეუზღუდავი განმეორებითი გადაღებები მცინვარების სივრცე-დროითი დინამიკის და ფლუქტუაციების ანალიზისათვის. აქვე აღსანიშნავია, რომ დრონით გადაღებული ორთოფოტოს გარჩევადობა⁴⁰ გაცილებით მაღალია,

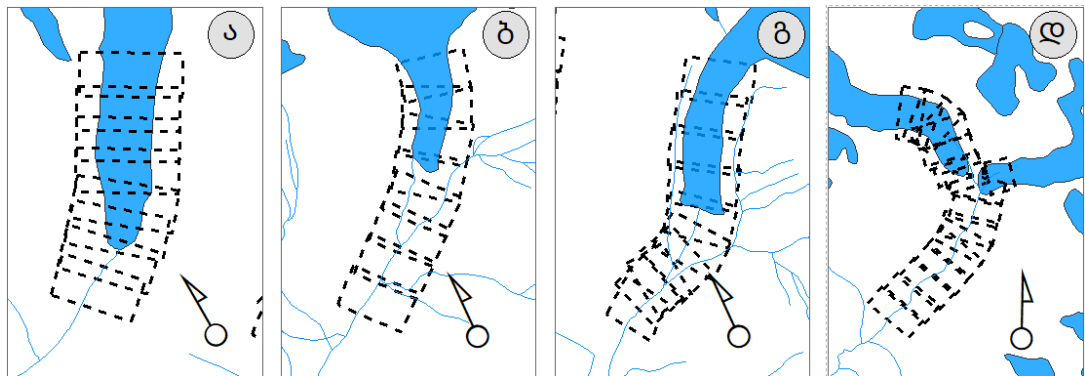
³⁹ LIDAR - light detection and ranging – მონაცემთა რეგულარული ქსელი რომლიც ლაზერული იმპულსის საშუალებით ზომავს მიზნამდე მანძილს.

⁴⁰ სხვადასხვა სიმაღლიდან (50-500 მ.) გადაღებული ზედაპირის გარჩევადობის ხარისხი ხშირად 1-20 სმ. პიქსელზე დიაპაზონში მერყეობს და საკოორდინატო მონაცემების ჩანაწერები ≈ 20 დან -1000 წერტილამდე ან მეტი (ლაზერული სკანირების შემთხვევაში) 1მ²-ზე.

ვიდრე ჩვეულებრივი აერო ფოტოს ან კოსმოსური სურათის შემთხვევაში (იხ. ფიგურა 29).

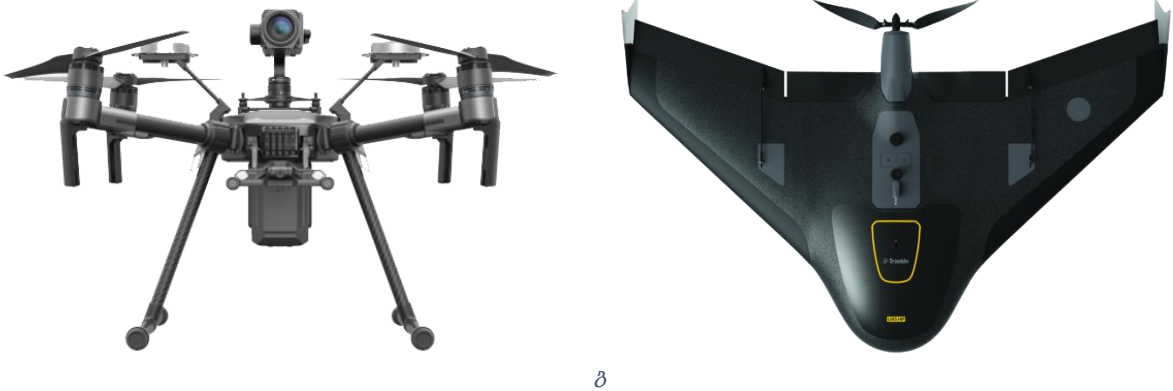
მყინვარების კვლევაში განსაკუთრებით ღირებულია მაღალი გარჩევადობის აეროფოტო, რომლის საფუძველზეც შესაძლებელია მრავალი გლაციაოლოგიური პარამეტრის დადგენა. პერიოდული გადაღებები კი საშუალებას გვაძლევს შევავსოთ მყინვარის ზედაპირზე მიმდინარე გლაციალური პროცესები, მათი ხასიათი, სიჩქარე და სხვა. ამასთან მყინვარის დინამიკის რეჟიმის სწორად შესაფასებლად აუცილებელია მყინვარის ზედაპირის ტოპოგრაფიული პირობების და მისი ცვალებადობის მაღალი სიზუსტით ანალიზი. უპილოტო საფრენი აპარატით გადაღებული აერო ფოტოების სპეციალური ფოტოგრამმეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფებით დამუშავებისას (Pix4D) საშუალება გვაქვს ტერიტორიაზე გეოდეზიური აზომვის გარეშე მივიღოთ მაღალი სიზუსტის და სიმჭიდროვის (≈ 10 -დან 1000 წერტილამდე ყოველ 1 მ^2 -ზე) X; Y; და Z კოორდინატების ელექტრონული ე.წ. წერტილოვანი ღრუბელი (Point Cloud data). საკოორდინატო მონაცემების პარალელურად აღნიშნული პროგრამული უზრუნველყოფების გარემოში ხდება აეროფოტოების საფუძველზე ორთოფოტოს გენერირება რაც სხვადასხვა სამეცნიერო ანალიზის და შედეგების ვიზუალიზაციის კარგი შესაძლებლობაა. განსაკუთრებით აღსანიშნავია მეთოდოლოგიის უპირატესობა ტრადიციულ გეოდეზიურ საქმიანობასთან მიმართებით იმ თვალსაზრისით, რომ დროის მცირე მონაკვეთში შესაძლებელია საკვლევი ობიექტის ტოპოგრაფიული ზედაპირის სრული მათ შორის მიუვალი ადგილების დაფარვა, მაღალი სიმჭიდროვის (≈ 1000 წერტილამდე 1 მ^2 -ზე) და სიზუსტის მონაცემების გენერირება და რაც განსაკუთრებით ღირებულია დროის ხანმოკლე პერიოდში შესაძლებელია საკვლევი ობიექტის სრულად შესწავლა. გეოსაინფორმაციო და ფოტოგრამმეტრიული პროგრამული უზრუნველყოფებით ხდება მიღებული ფაილების დამუშავება და საკვლევი ობიექტის ციფრული ტოპოგრაფიული ზედაპირის და ვიზუალური გამოსახულების (Dem – digital elevation model) მიღება. საკვლევი ობიექტის, ციფრული ზედაპირის მიღების პროცესი მართალია, კამერალურ სამუშაოებთანაც არის დაკავშირებული, მაგრამ პროცესის დიდი ნაწილი მაინც ავტომატიზებულია და მნიშვნელოვნად ამცირებს დროს, იძლევა შესაძლებლობას საკვლევი ობიექტის სრულად შეფასებისათვის.

დღეისათვის მრავალი განსხვავებული მოდიფიკაციის და ტექნიკური შესაძლებლობების უპილოტო საფრენი აპარატია სამოქალაქო ბაზარზე წარმოდგენილი. კორპუსის მოდიფიკაციის და ფრენის საპერო პლატფორმის მხრივ უპილოტო საფრენი აპარატები შესაძლოა ორ ძირითად ჯგუფად დავეყოთ. ერთი - არის საფრენი აპარატი ფიქსირებული ფრთებით და მეორე ერთი ან რამდენიმე როტორით, ვერტიკალური აფრენა დაფრენის შესაძლებლობით (იხ. ფიგურა 28). უპილოტო საფრენ აპარატს, როტორებით დროის გარკვეულ მომენტში ობიექტის თავზე უძრავ მდგომარეობაში დაფიქსირების დამატებითი შესაძლებლობა აქვს. ორივე ტიპის საფრენ აპარატებს გააჩნიათ თავისი უპირატესობები გამოყენების თვალსაზრისით. ფიქსირებულ ფრთებიანი საფრენი აპარატების ძირითადი უპირატესობა ფრენის მაღალი სიჩქარე და შესაბამისად ერთი აფრენით უფრო მეტი ფართობის მქონე ტერიტორიის დაფარვაა. თუმცა აქვე აღსანიშნავია, რომ მსგავს უპილოტო საფრენი აპარატებს ხშირად სჭირდებათ აფრენისას გამშვები კატაპულტის მოწყობილობა⁴¹ და დაფრენისას უსაფრთხო ზედაპირი, აპარატის დაზიანებისაგან თავის არიდების მიზნით.



⁴¹ უკანასკნელ ხანს ბაზარზე გამოჩნდა ისეთი ტიპის ფიქსირებულ ფრთებიანი საფრენი აპარატები რომელთა გამშვებისათვის გამშვები კატაპულტის მექანიზმი არ მოითხოვება და ამასთან დაფრენისას იხსნება პარაშუტი რაც საწყის პოზიციაზე მის უსაფრთხო დაბრუნებას უზრუნველყოფს

ფიგურა 27. უპილოტო საფრენი აპარატის გამოყენება სავლელ პირობებში; ფრენის ტრაექტორიები: ა) ადიში; ბ) შხარა; გ) ხალდე; დ) ზოფხიტო და ლაბოდა



ფიგურა 28. უპილოტო საფრენი აპარატის სახეობები ა) დრონი როტორებით; ბ) დრონი ფიქსირებული ფრთებით

კვლევის ფარგლებში, აერო ფოტო გადაღებები განხორციელდა უპილოტო საფრენი აპარატით DJI Phantom4Pro და ფრენის მართვისა და დაგეგმვის პროგრამული უზრუნველყოფის (Pix4D) გამოყენებით. ფრენების დაგეგმვის პირველ ეტაპზე შეფასდა მიმდებარე ტერიტორიის რელიეფი. მოხდა გასწვრივი და განივი პროფილების აგება კამერალურად, ტოპოგრაფიული რუკების, რელიეფის ციფრული მოდელების და სხვა ხელმისაწვდომი ინტერნეტ წყაროების გამოყენებით (Google Earth, SRTM – Shuttle Radar Topography Mission 30m), რაც აუცილებლობას წარმოადგენს ტერიტორიის რთული რელიეფის, მცირე მხედველობის და ბარიერების არსებობის პირობებში, რათა დრონის დაკარგვა ან შეჯახება თავიდან ავიცილოთ.

მყინვარი ადიში - მყინვარი ადიში მდებარეობს მდ. ენგურის მარჯვენა შენაკად მდ. ადიშის ხეობაში. იგი სათავეს იღებს კავკასიონის მთავარი წყალგამყოფი ქედის შედარებით მოსწორებულ მაღლა აზიდულ მონაკვეთზე, სადაც ≈ 6.4 კმ² ფართობის მქონე მყინვარის ფირნის ველია ჩამოყალიბებული. ესაა ერთ-ერთი ყველაზე მაღლა აზიდული ფირნის ვრცელი ველი რომელიც კავკასიონის სამხრეთი ფერდობის მყინვარებს გააჩნიათ. მისი საშუალო სიმაღლე უახლეს მონაცემებზე⁴² დაყრდნობით ≈ 4410 მ. შეადგენს და შემოსაზღვრულია კავკასიონის მთავარი წყალგამყოფი ქედის მაღალი მწვერვალებით: თეთნულდი (4858.5 მ.); ადიში (4306 მ.); კატინი (4859 მ.); შოთა რუსთაველი (4960 მ.); ლაქუცა (4321 მ.); გესტოლა (4860 მ.). ფირნის ველის საშუალო სიგრძე ≈ 2.2 კმ. შეადგენს, საშუალო $\approx 20^\circ$ დახრილობით. რაც შეეხება მიმდებარე

⁴² მონაცემების წყარო - ASTER GDEM, Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2) 17 ოქტომბერი, 2011 წ., პროგრამული უზრუნველყოფა Global Mapper

ფერდობებს მათ მაღალი დახრილობა ($30-40^\circ <$) და $\approx 200-400$ მეტრიანი შეფარდებითი სიმაღლე გააჩნიათ მიმდებარე ფირნის აუზთან.

ცხრილი 9. უპილოტო საფრენი აპარატით განხორციელებული აეროგადაღებების შედეგები

მყინვარი და მიმდებარე პერიგლაციალური ზონა	აერო სურათების რაოდენობა	ორთოფოტოს დაფარვის არეალი კმ ²	წერტილების რაოდენობა $\times 10^6$	12 მ-ზე X;Y;Z; წერტილების სიმჭიდროვე	ორთოფოტოს გარჩევადობა სმ-ში	\approx მასშტაბი
ადიში	1143	5.86	110.1	38	8.3	1:300
ხალდე	989	4.8	98.8	36	9.1	1:350
შხარა	818	3.9	92.7	36	8.1	1:400
ზოფხიტო	914	6.6	107.4	40	7.59	1:300
ლუხზირი ⁴³	60	1.12	5.08	5.8	11.3	1:430
ჭალაათი	436	3.2	60.2	41	9.8	1:350

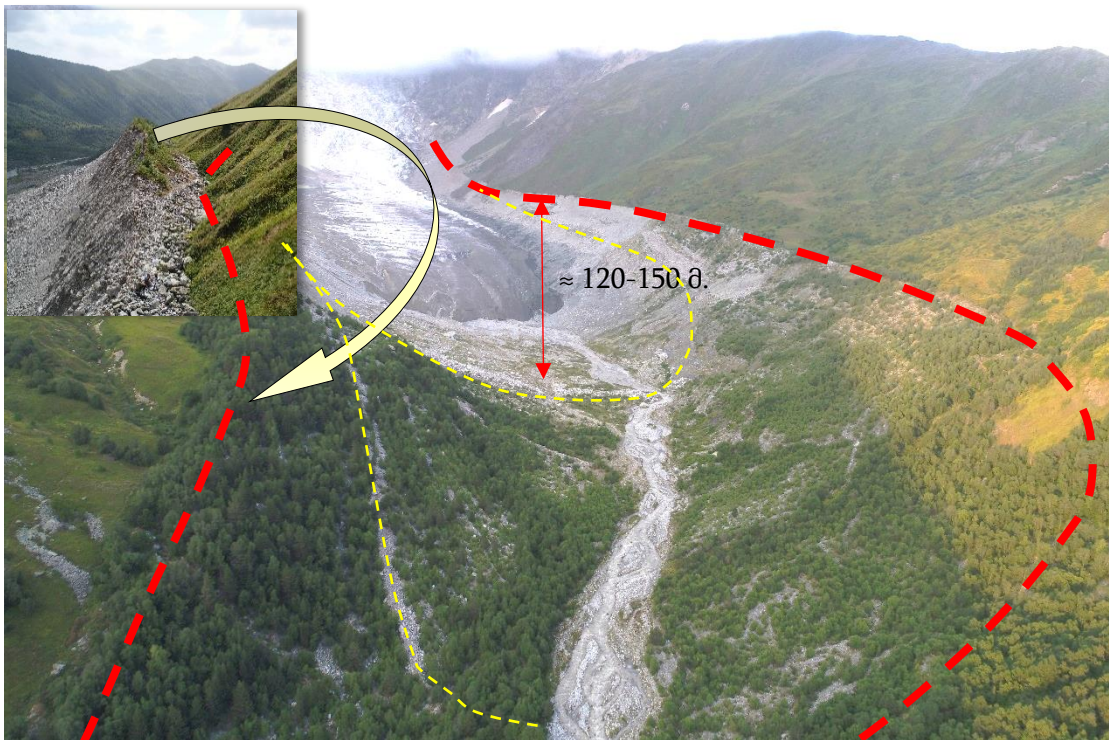
ეს ქედები მოსულ მყარ ატმოსფერულ ნალექებს გადაქარვისგან კარგად იცავენ. ამდენად, როგორც ზოგადი მორფო მეტრული პარამეტრებითაც ჩანს ფირნის აუზში კარგი პირობებია მყარი ატმოსფერული ნალექების დაგროვებისათვის, რაც თავის მხრივ ხელსაყრელ პირობას ქმნის მძლავრი მყინვარის ჩამოყალიბებისათვის (იხ. ფიგურა 29). საქართველოს ნალექიანობის მონაცემებზე დაყრდნობით მყინვარი ადიშის ფირნის აუზის სიმაღლეზე დაახლოებით 3000 მმ. ნალექი მოდის წელიწადში. აუზის სიმაღლითი მდებარეობა კი განაპირობებს რომ მყინვარის ფირნის აუზში ნალექები ძირითადად მყარი სახით მოდის და მთელი წლის განმავლობაში

⁴³ აეროგადაღება ლუხზირზე განხორციელდა ექსტრემალურ პირობებში, მყინვარის ენის წინა ნაწილში ჩამოყალიბებული ტბის საფრთხის შეფასებისათვის 500 მ სიმაღლიდან.

<http://nea.gov.ge/ge/news/detailed/778/myinvar-lexzirze-arsebuli-mdgomareoba/>

შენარჩუნებულია. ყინულ წარმოქმნის პროცესი მშრალი მეტამორფიზმით დაბალი ტემპერატურების პირობებში მიმდინარეობს. კავკასიონზე ყინულ წარმოქმნის რეკრისტალიზაციული ზონა 4300 მეტზე მაღლა მდებარეობს. (რ. გობეჯიშვილი, ვ. კოტლიაკოვი, 2006 ა). ფირნის აუზიდან ეშვება საკმაოდ მძლავრი ყინულ ვარდნილი, რომელიც იწყება 4200 \approx მ-ზე და მთავრდება 2700 \approx მ. ზე. ყინულ ვარდნილის საშუალო დახრილობა $\approx 30^{\circ}$ -ე მეტია, რომელიც ინტენსიურ მექანიკურ ნგრევას განიცდის, წარმოდგენილია სერაკებით და ძლიერ დანაპრალეებულია. ყინულვარდნილის სიგანე 800-დან 1200 მ-მდე მერყეობს და 2700 მეტრზე გადადის კლასიკურად ჩამოყალიბებულ მყინვარის ენაში. მყინვარის ენა სუსტი დახრილობით, საშუალოდ $\approx 8^{\circ}$. გამოირჩევა და მისი დიდი ნაწილი მორენული საფარისაგან თავისუფალია.

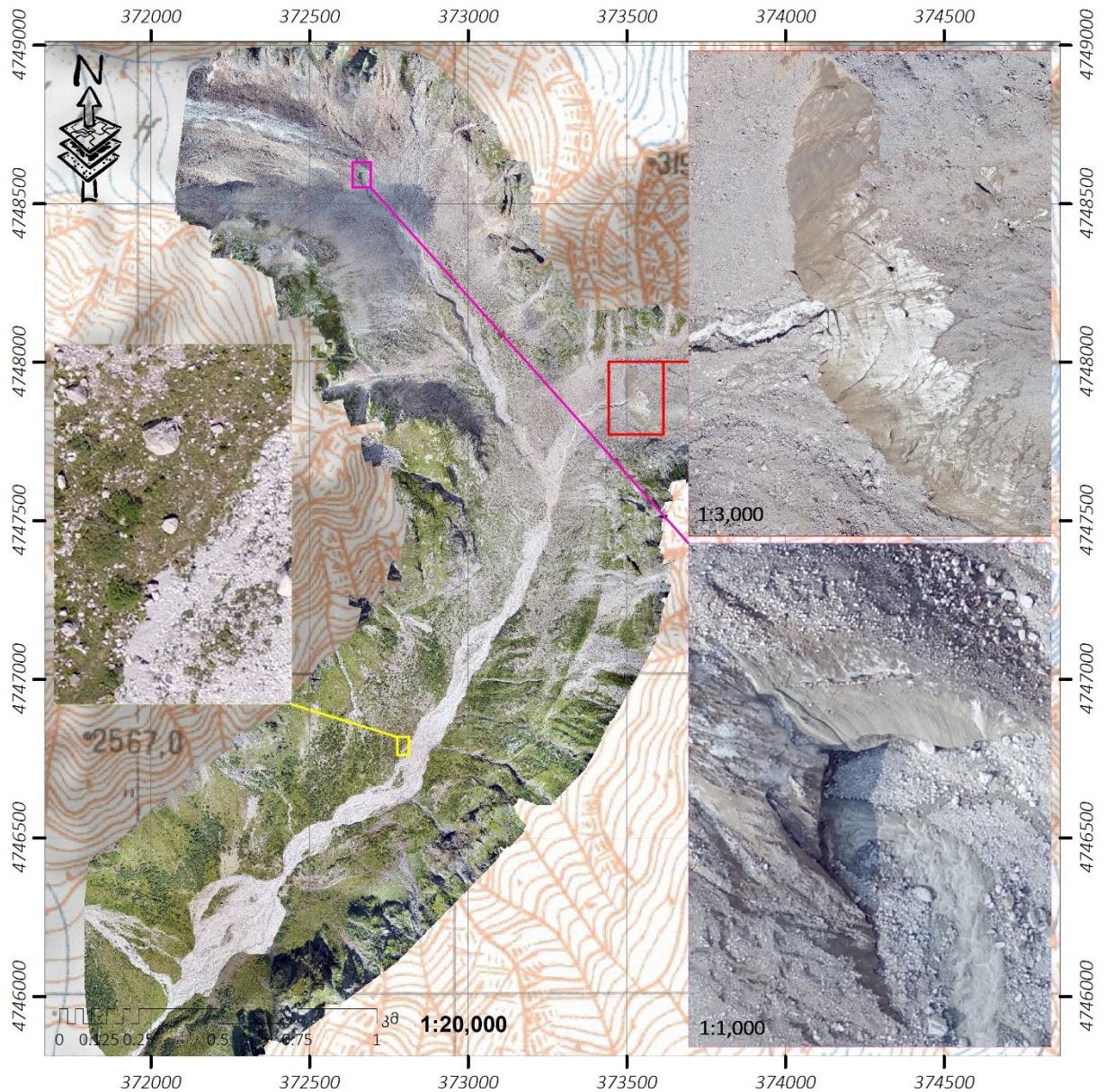
მყინვარი მცირე გამყინვარების პერიოდიდან ≈ 1820 წ. დეგრადაციის ფაზაშია და დროის სხვადასხვა მონაკვეთში სხვადასხვა ტემპით უკან იხევს. აღნიშნული ფაქტი დადასტურებულია მრავალი სამეცნიერო ნაშრომით და თვალნათლივ ჩანს ძველი და თანამედროვე ფოტოსურათების შედარებით. ჯამური უკანდახევა რაც მყინვარმა უკანასკნელი 200 წლის მანძილზე განიცადა 1326 მ. შეადგენს, რაც საშუალო წლიურად ≈ 6.7 მ/წ უდრის. ამავე პერიოდის განმავლობაში მყინვარის ენის ვერტიკალურმა გადაადგილებამ ზღვის დონეზე ≈ 145 მ. შეადგინა (0.7 მ. წელიწადში).



ფიგურა 29. მყინვარი ადიში და მცირე გამყინვარების პერიოდის მორენა

მყინვარი **ზოფხიტო** - მდებარეობს მდ. რიონის ხეობის ზემო წელში, მისი მარცხენა შენაკადის ზოფხიტურას სათავეებში.

2017 წელს ხეობაში ჩატარებული საველე ექსპედიციის ფარგლებში მოხდა მყინვარ ზოფხიტოს და ლაზოდას ტროგული ხეობის და მყინვართა ენების აეროგადაღება (იხ. ცხრილი 9). შედეგად მიღებულ იქნა მაღალი გარჩევადობის (7.5 სმ პიქსელის ზომა) ორთოფოტო (იხ. ფიგურა 30) გამოსახულება 6.6 კმ² ტერიტორიისათვის და ე.წ. წერტილოვანი ღრუბელი (Point Cloud Data).



ფიგურა 30. მყინვარ ზოფხიტოს ორთოფოტო გამოსახულება

ნივალურ-გლაციალური ზონის დინამიკის შეფასებისას მსგავსი მაღალი გარჩევადობის მქონე ორთოფოტო საშუალებას გვაძლევს მაღალი სიზუსტით გავიანგარიშოთ მყინვარის ენის დინამიკა. ორთოფოტოს პარალელურად (Pix4D) პროგრამული უზრუნველყოფა აგენერირებს ე.წ. წერტილოვან ღრუბელს, რომელიც წარმოადგენს რეგულარულ საკოორდინატო ჩანაწერების სიმრავლეს, რომელშიც დამატებით ინტეგრირებულია ობიექტის ტოპოგრაფიული ზედაპირის გამოსახულება მათ შორის 3D განზომილებიან სივრცეში. მონაცემი საშუალებას იძლევა ნახევრად ავტომატურ ან ავტომატურ რეჟიმში შეიქმნას ობიექტის ტოპოგრაფიული ზედაპირის მაღალი სიზუსტის ციფრული სასიმალო მოდელი. მისი საშუალებით შესაძლებელია მრავალი ისეთი მონაცემის გენერირება, რომელიც დაგვეხმარება მყინვარის ან

პერიგლაციალურ ზონაში მიმდინარე ბუნებრივი პროცესების უკეთ აღქმაში, მისი ინტენსივობის გაანგარიშებასა და სხვა ამოცანების გადაწყვეტისას.

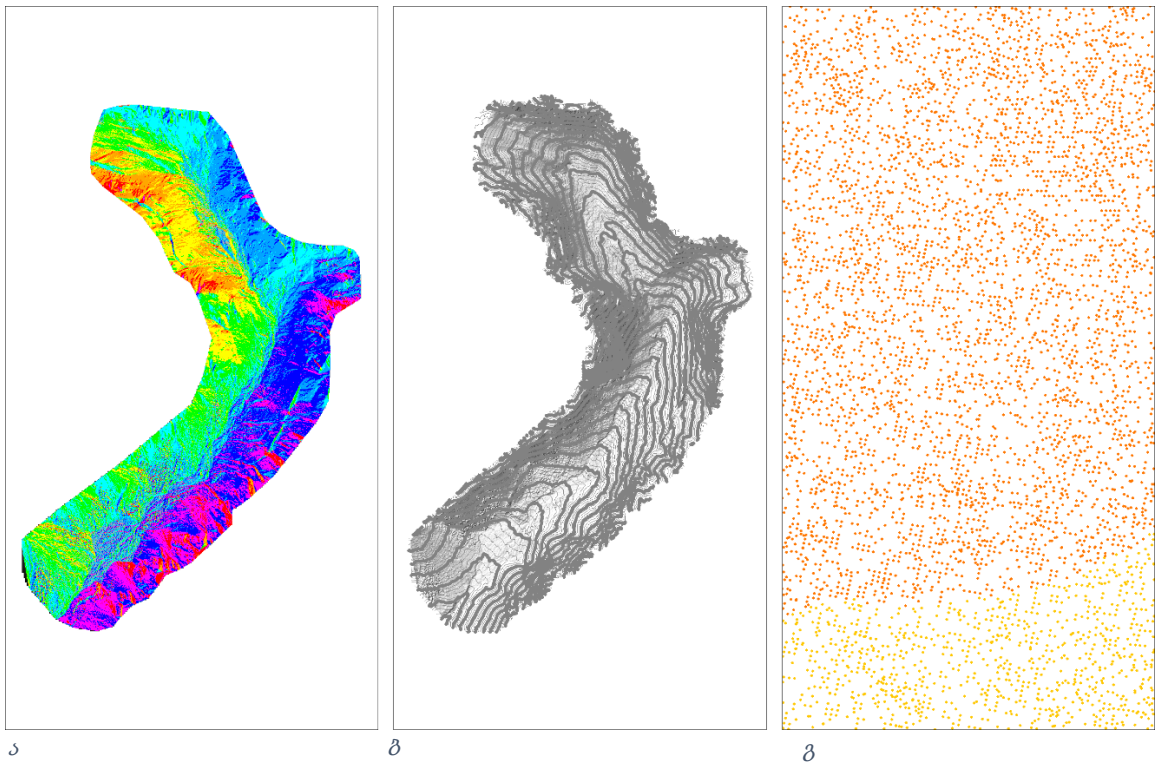


ა

ბ

ფიგურა 31. მყინვარ ზოფხიტოს ხეობის ციფრული 3D მოდელი, ა) მყინვარ ლაზოდას ენა, ბ) მყინვარ ზოფხიტოს ენა

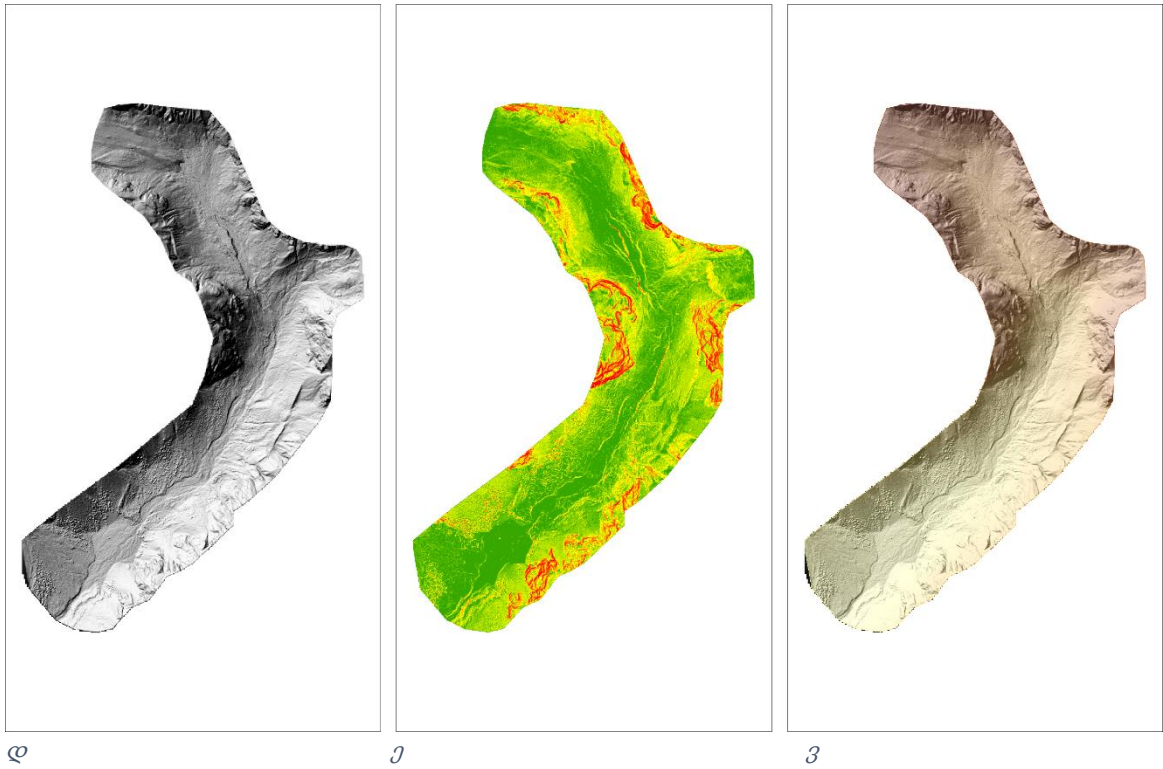
უპილოტო საფრენი აპარატის პერიოდული გადაღებებით შესაძლებელია ყოველი გადაღების პარალელურად შეიქმნას ობიექტის ზედაპირის ციფრული მოდელი და ისინი ერთმანეთს შედარდეს. დრონის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს მყინვარის ზედაპირზე შევისწავლოთ რთულად მისადგომი ან გადაულახავი ადგილებიც კი, შევაფასოთ დროის ინტერვალში მყინვარის ზედაპირზე მომხდარი ცვლილებები და მათი ინტენსივობა.



ა

ბ

გ



ფიგურა 32. მცინვარ ზოფხიტოს ხეობის ზედაპირის ციფრული მოდელი, ა) ფერდობების ექსპოზიციების მოდელი, ბ) ჰორიზონტალუბი 5 მ. ინტერვალით, გ) ე.წ. „წერტილოვანი ღრუბელი“, დ) რელიეფის დაჩრდილული მოდელი, ე) ზედაპირის დახრილობის მოდელი ვ) რელიეფის ციფრული მოდელი

მიღებულ მასალაზე დაყრდნობით გეოინფორმაციულ სისტემებში განხორციელებული კარტო მეტრული ანალიზით დგინდება, რომ მცინვარმა ზოფხიტომ, მცირე გამცინვარების პერიოდიდან მოყოლებული უკან დაიხია 2580 მ-ით. საშუალოდ წლიურმა უკანდახევამ მთელი პერიოდისათვის 13.1 მეტრი შეადგინა. აქედან I პერიოდისათვის უკანდახევის მაჩვენებელი 12.8 და II პერიოდისათვის 13.7 მეტრია წელიწადში. მცინვარი ლაბოდა კი შესამჩნევად ნაკლები 7.7 მ/წ ტემპით იხევს უკან რომელიც (1960 წ) გამოეყო ძირითად ნაკადს. ამის მიზეზი ადგილობრივი რელიეფის გარდა არის მკვეთრი სხვაობა მცინვარების ექსპოზიციებს შორის, გასაშუალოებული მონაცემით ზოფხიტო წარმოადგენს აღმოსავლეთი ექსპოზიციის მცინვარს, ლაბოდა კი დასავლეთი ექსპოზიციის მცინვარია (იხ. ცხრილი 10).

ცხრილი 10. მცინვარების ლაბოდას და ზოფხიტოს გასაშუალოებული ექსპოზიციების განაწილება

ლაბოდა		ზოფხიტო	
აღმოსავლეთი	0.17%	აღმოსავლეთი	38.50%
დასავლეთი	32.56%	სამხრეთ-დასავლეთი	26.03%
სამხრეთ-დასავლეთი	30.37%	სამხრეთი	11.65%
სამხრეთი	13.75%	ჩრდილო-აღმოსავლეთი	21.49%
ჩრდილო-დასავლეთი	19.55%	ჩრდილო-დასავლეთი	0.05%
ჩრდილოეთი	3.61%	ჩრდილოეთი	2.27%

დრონით დაკვირვებისას განსაკუთრებით მნიშვნელობა აქვს, იმას რომ მეთოდოლოგიის გამოყენება საველე კვლევებთან სინთეზში მოგვცემს მაღალი მეცნიერული ღირებულების ინფორმაციას, მცინვარის ზედაპირზე მიმდინარე პროცესების შესახებ. მისი გამოყენება ასვე შესაძლებელია, მცინვარის მასის ბალანსის კვლევისას და რაც მთავარია იძლევა მთლიანი მცინვარის მაღალი სიმჭიდროვით დაფარვის შესაძლებლობას, რაც ხშირად მიუღწეველ ამოცანას წარმოადგენს ადამიანური რესურსის, დროის და უსაფრთხოების თვალსაზრისით.

მსგავსი მეთოდის გამოყენება, შესაძლებელია ასევე სხვა გეოგრაფიული ობიექტების, მეწყერი, კლდე ზვავი, ზღვის სანაპირო ზონა, მდინარის ნაპირების გარეცხვის არეალები, მდინარის კალაპოტები და სხვა შეფასებისას.

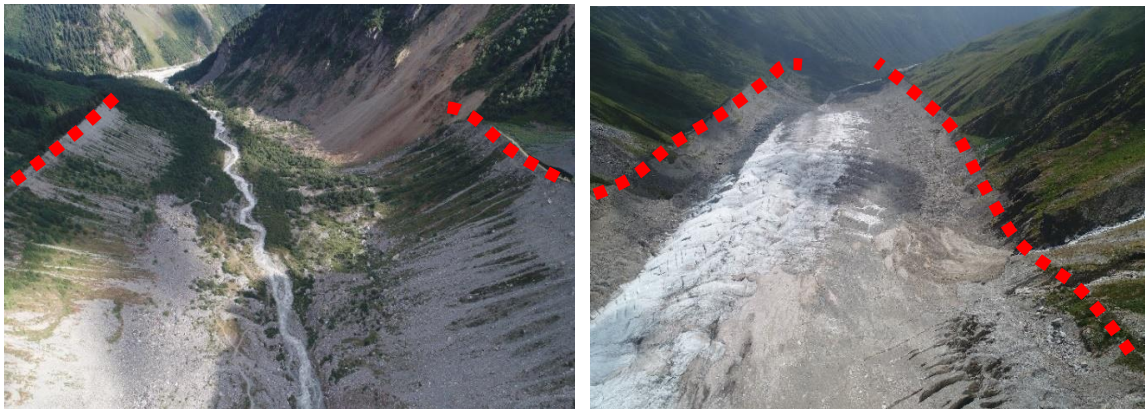
3.3. მცირე გამყინვარების და მისი შემდგომი პერიოდის მყინვარების დინამიკა

არსებული გამყინვარების შეფასებისათვის, მისი დინამიკის და სამომავლო განვითარების პროგნოზირებისათვის, უმთავრესია გლაციალური სისტემის თანამედროვე და წინა პერიოდის დინამიკის სივრცე-დროითი დინამიკის ანალიზი, გამყინვარების დეგრადაციის სიჩქარის დადგენა, მისი არსებითი ანალიზი.

მყინვარების დინამიკის შეფასება, საველე დაკვირვებების ან დისტანციური ზონრიდების მეთოდებითაა შესაძლებელი. რაც შეეხება წარსულ დინამიკას და გამყინვარების მასშტაბების აღდგენას აქ გამოყენება გლაცო-გეომორფოლოგიური, კარტოგრაფიული და კარტო მეტრული მიდგომები.

პალეოგეოგრაფიული გარემოს აღდგენისათვის ღირებულია თანადროული პერიოდის ლიტერატურული, კარტოგრაფიული, დისტანციური ზონდირების, ფოტო ან აეროფოტო, საველე ჩანაწერები თუ სხვა მასალები. მცირე გამყინვარების პერიოდის გამყინვარების მასშტაბების აღდგენისას ჩემს მიერ გამოყენებული მასალები დროით ჭრილში შემდეგ სურათს იძლევა (ფიგურა 35). ყველაზე ძველი რელევანტური ინფორმაციის წყარო, რომლის საშუალებითაც აღვადგინეთ ძველი გამყინვარების საზღვრები და მოცულობა ესაა თანადროული პერიოდის მორენული მწკრივების მძლავრი წყებები, რომლებიც რელიეფში საკმაოდ კარგად იკითხება და იმეორებენ მცირე გამყინვარების პერიოდის მყინვარის გავრცელების საზღვრებს და მისი

ზედაპირის მოხაზულობას, ხშირად მათი შეფარდებითი სიმაღლე 100-150 მეტრსაც აღწევს (იხ. ფიგურა 33).



ა

ბ

ფიგურა 33. მცირე გამყინვარების პერიოდის მორენული მწკრივები ა) ჭალაათი; ბ) ადიში

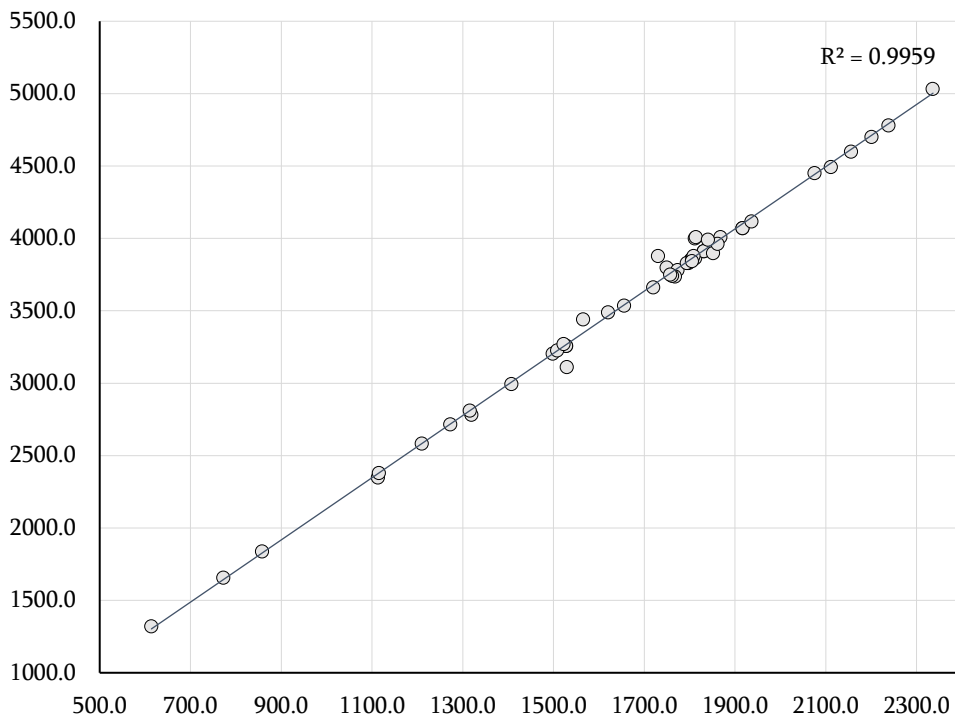
მომდევნო პერიოდის მნიშვნელოვან წყაროს რუსეთის იმპერიის პერიოდის (1890-1910 წწ.) პერიოდის სამხედრო ტოპოგრაფიული სამმართველოს მიერ მენზულური აგეგმვის ხერხით შესრულებული 1:42000 და 1:84000 მასშტაბის რუკები წარმოადგენს.

მათი შესრულებისას გამოყენებული მეთოდოლოგია და სიზუსტე საფუძველს იძლევა ჩატარდეს სხვადასხვა ტიპის კარტომეტრიული, მათ შორის ვერტიკალურ ჭრილშიც (იხ. ფიგურა 34). აღსანიშნავია, რომ ამ რუკებზე თითქმის ყველა მყინვარის ენის წინ დასმულია რელიეფის ზღვის დონიდან მდებარეობის აღმნიშვნელი ნიშნული⁴⁴. კარტოგრაფიული მასალის გარდა უმნიშვნელოვანესია ვ. პოდოზერსკის დეტალური ნაშრომი კავკასიის მყინვარების შესახებ. (Известия Кавказского отдела Императорского Русского географического общества, Т. 21; вып. 1; Тифлис, 1911, 200 с.) იგი გამოიცა რუსეთის საიმპერატორო გეოგრაფიული საზოგადოების კავკასიის განყოფილების მიერ, თბილისში 1911 წ. ავტორი წინასიტყვაობაში აღნიშნავს, რომ ბოლო პერიოდში დაგროვდა საინტერესო მასალები კავკასიონის ქედის გამყინვარებაზე, კონკრეტული მყინვარის შესახებ რამდენიმე ავტორთანაც კი ვხვდებით ინფორმაციას, თუმცა ისინი არ პასუხობდნენ შემდეგ კითხვებს: ა) მყინვარების საერთო რაოდენობა კავკასიონის ქედზე; ბ) მყინვარების საერთო ფართობი; გ) I რანგის⁴⁵ მყინვარების საერთო რაოდენობა; დ) II რანგის მყინვარების

⁴⁴ ზღვის დონიდან სიმაღლეები მოცემული ხაზის რუსული საზომი ერთეულით საჟენი; 1 საჟენი = 3 არშინს = 7 ფუტს = 2.1336 მეტრს

⁴⁵ I რანგის მყინვარებში ავტორს განხილული აქვს ხეობის და ხეობის რთული ტიპის მყინვარები

საერთო რაოდენობა; ე) ორივე ტიპის მყინვარების რაოდენობა სამხრეთ ფერდობზე; ვ) ორივე ტიპის მყინვარების რაოდენობა ჩრდილოეთ ფერდობზე; ზ) მყინვარების ფართობები, სიგრძეები, სიგანეები, ენის მდებარეობა ზღვის დონეზე.



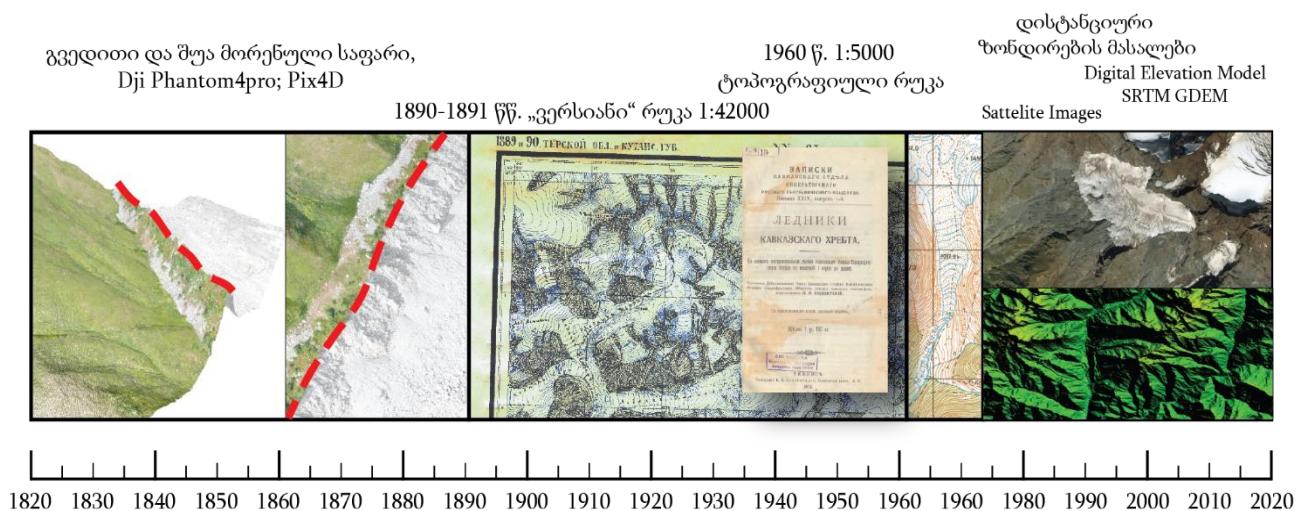
ფიგურა 34. რუსეთის იმპერიის 1890-1910 წწ. პერიოდის და თანამედროვე პერიოდის რუკების სიმალეების მონაცემების კავშირი

ხეობის ტიპის და ზოგიერთი სხვა დიდი ზომის მყინვარებისათვის ავტორს დამატებით მოყვანილი აქვს ინფორმაციები მათი ენების შეერთების, მორფომეტრიის და სხვა შესახებ. კატალოგში მყინვარების ნუმერაცია მოცემული კავკასიონის ქედის გასწვრივ მდინარეთა აუზების მიხედვით. 1 ნომრით მოცემულია ქედის უკიდურესი დასავლეთით მდებარე მყინვარი სამხრეთ ფერდობზე. ნუმერაციის ზრდა მიმდინარეობს სამხრეთ ფერდის გასწვრივ მდინარეთა აუზების გათვალისწინებით, რაც შეეხება ჩრდილოეთ ფერდობს, ნუმერაცია აქაც იწყება 1 დან უკიდურესი აღმოსავლეთით და იზრდება დასავლეთის მიმართულებით. კ. პოდოზერსკის მიხედვით კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე I რანგის 59 მყინვარია, 316.38⁴⁶

⁴⁶ ფართობის საზომი ერთეული რუსეთის იმპერიაში რომლიც 1835 წლის ბრძანებულებით განისაზღვრა და უდრიდა 1 კვადრატული ვერსი = 250000 კვადრატულ საჟენს = 1.138 კმ²; აქვე უნდა აღინიშნოს რომ ავტორის მიერ პრეამბულაში მითითებული მაჩვენებელი 316,38 კვადრატული ვერსი, მცირედით განსხვავდება მის მიერვე სამხრეთი ფერდობისათვის შედგენილი კატალოგის ბოლოს მოყვანილი ჯამური მაჩვენებლისაგან 440.45 (გვ. 46) კავკასიონის სამხრეთი ფერდობის ჯამური გამყინვარების შესახებ მცირედით განსხვავდება მის მიერვე სამხრეთ ფერდობის კატალოგის ბოლოს მითითებული ჯამური ფართობისაგან. პრეამბულაში მითითებულია, რომ კავკასიონს სამხრეთი ფერდობის გამყინვარება შეადგენს 316.38 კვადრატულ ვერსს

კვადრატული ვერსი საერთო ფართით, II რანგის მყინვარების რაოდენობა 348 შეადგენს, საერთო ფართით 124.18 კვადრატული ვერსი (Подозерски, 1911). ასევე მას მოცემული აქვს გამყინვარების საერთო ფართობი ცალკეული მდინარეთ აუზების და მათი შენაკადებისათვის, მყინვარების რაოდენობა და სხვა საინტერესო სტატისტიკური ინფორმაცია. როგორც აღვნიშნეთ ავტორი ნაშრომის შესრულებისას დაეყრდნო მენზულური აგეგმვის საფუძველზე შედგენილ კარტოგრაფიულ მასალებს, შესაბამისად აეროგადაღებების არარსებობის პირობებში ასეთი რუკების შედგენა მაღალმთიანი რელიეფის და გართულებული გადაადგილების პირობებში შეიცავდა დიდი რისკს იმასა, რომ ყველა მყინვარის ასახვა ვერ მომხდარიყო და გარდა ამისა მყინვარის ფირნის აუზები ხშირად გადაულახავი ყინულოვანი ბარიერების მიღმა მდებარეობს ამიტომ მათი სრულყოფილად ასახვაც საკმაოდ პრობლემურია (P.Г.Гобеджишвили, 1989).

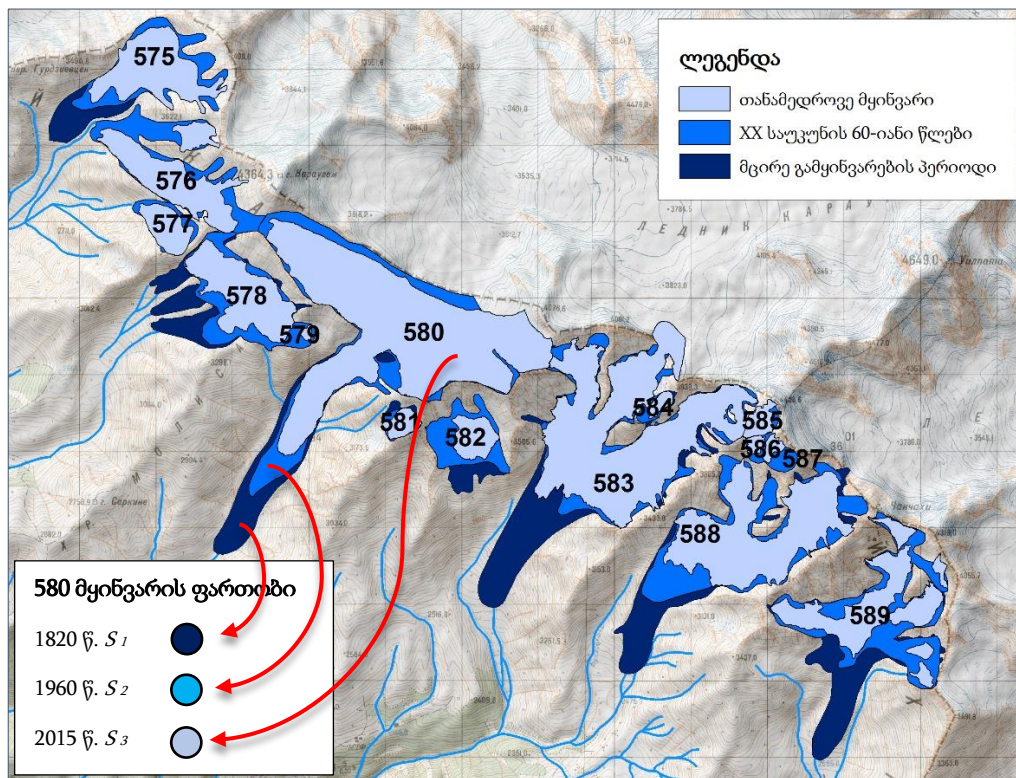
მიუხედავად გარკვეული უზუსტობებისა უნდა აღინიშნოს, რომ პოდოზერსკის კატალოგი დღესაც არ კარგავს აქტუალობას და იგი განსაკუთრებული მნიშვნელობის ინფორმაციის მატარებელია. დისერტაციის შესრულებისას, ძველი გამყინვარების მასშტაბების აღდგენისათვის ერთ-ერთ წყაროდ სწორედ აღნიშნული ნაშრომი გამოვიყენე. იმისათვის, რომ გვეხელმძღვანელა აღნიშნული ნაშრომით მყინვარების გეო მონაცემთა ბაზაში მოხდა კ. პოდოზერსკის მყინვარების კატალოგის ინტეგრირება. ამ მხრივ გარკვეული სირთულებები იყო, რადგანაც კატალოგს თან არ ახლავს მყინვარების ნუმერაციის ამსახველი რუკა.



ფიგურა 35. მყინვარების დინამიკის ანალიზისას გამოყენებული მასალები

იმისათვის, რომ განხორციელებულიყო ზემოთხსენებული ნაშრომის ელექტრონულ ფორმატში გადაყვანა, გამოვიყენეთ კვლევის გლაციო-

გეომორფოლოგიური და გეოინფორმაციული მეთოდები. XX საუკუნის შუა პერიოდის (P.Г.Гобеджишвили, 1989) კატალოგის ელექტრონული ვერსიის შექმნის შემდგომ, რომლიც ჩვენს კვლევაში გამოიყენება როგროც მცინვარების სქემის და ნუმერაციის საფუძველი⁴⁷, მცინვარებისათვის მინიჭებული შესაბამისად მიხედვით მოხდა კ. პოდოზერსკის კატალოგის მცინვარებთან იდენტიფიცირება.



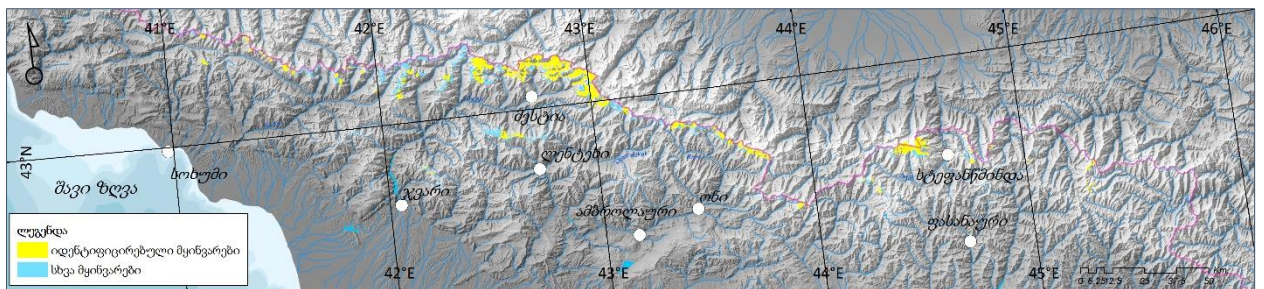
ფიგურა 36. საქართველოს სამი პერიოდის (1820 წ.; 1960 წ.; 2015 წ.) იდენტიფიცირებული მცინვარები გეოსაინფორმაციო სისტემებში (ფრაგმენტი)

ანალიზის შედეგად შესაძლებელი გახდა 143 დიდი და მცირე ზომის მცინვარის თანამედროვე კატალოგთან იდენტიფიცირება⁴⁸ (იხ. ცხრილი 11). მცინვარები დაჯგუფდა ნუმერაციის შესაბამისად და შედარებულ იქნა ერთმანეთთან ცალკეული მცინვარების ფართობის დინამიკა 1820-1960 წლიან პერიოდში. მონაცემების სტატისტიკური ანალიზის საიმედოობისათვის უნდა აღნიშნოს, რომ იდენტიფიცი-

⁴⁷ რ. გობეჯიშვილის (P.Г.Гобеджишвили, 1989) მცინვარების კატალოგი შედგენილია 1960-იანი წლების 1:25000 და 1:50000 მასშტაბის ტოპოგრაფიული რუკების და აერო სურათების დამუშავების გზით ვახუშტი ბაგრატიონის გეოგრაფიის ინსტიტუტის გლაციოლოგიის ლაბორატორიაში. მცინვარების ნუმერაციის სქემა აქაც იწყება დასავლეთ კავკასიონის სამხრეთი ფერდობიდან და მდინარეთა აუზების მიხედვით იზრდება დასავლეთისაკენ. კატალოგი მაღალი სიზუსტით ასახავს თანადროული პერიოდის ნივალურ-გლაციალური საფარს და მოყვანილია ცალკეული მცინვარების შესახებ მრავალი პარამეტრი

⁴⁸ ძველი კატალოგის თანამედროვე კატალოგთან იდენტიფიცირების პროცესში ხშირად ვიყენებდით მცინვარის დახასიათებაში მოცემულ ინფორმაციებს: მცინვარის სახელი, რომლი მწვერვალიდან ეშვება მცინვარი და რომელი მიმართულებით, რომლი მდინარე გამოედინება მცინვარიდან, რომელ ხეობაში მცინვარი და ა.შ

რებული მცინვარები გეოგრაფიულად ქედის მთელს პერიმეტრზეა განლაგებული (იხ. ფიგურა 37), რაც კარგ საფუძველს იძლევა იმისათვის, რომ რიცხვითი მონაცემები, ანალოგიის გზით გამოყენებულ იქნას მის მეზობლად მდებარე მცინვარისათვის, რომლიც ვერ მოხვდა პოდოზერსკის კატალოგში, იმ დაშვებით, რომ თუ თუ XX საუკუნის შუა პერიოდის კარტოგრაფიულ წყაროებზე (1:50000 მასშტაბის ტოპოგრაფიული რუკა) და რ. გობეჯიშვილის კატალოგში მოცემულია მცინვარი, ცხადია მცირე გამცინვარების პერიოდისათვის იმავე ადგილას მცინვარი დიდი ალბათობით იქნებოდა და თან შედარებით დიდი ზომითაც წარმოდგენილი.



ფიგურა 37. კ. პოდოზერსკის კატალოგთან იდენტიფიცირებული მცინვარების გეოგრაფიული განაწილება

როგორც, ცხრილის ანალიზიდან ჩანს იდენტიფიცირებული მცინვარების რაოდენობა ზომების მიხედვით, მათი რაოდენობები, საშუალებას იძლევა დავეყრდნოთ ამ მონაცემებს.

ცხრილი 11. კ. პოდოზერსკის კატალოგით იდენტიფიცირებული მცინვარების განაწილება მათი ზომების; რაოდენობების ზომების და დაკავებული ფართობის მიხედვით

მცინვარის ზომები კმ ² -ში	პოდოზერსკის კატალოგიდან იდენტიფიცირებული მცინვარები			
	რაოდენობა	მცინვარების % რაოდენობა	ჯამური ფართობი კმ ²	ფართობის % თანაფარდობა
0.1-მდე	6	4.20%	0.52	0.13%
0.1 - 0.5	36	25.17%	9.80	2.44%
0.5 - 1	25	17.48%	18.08	4.49%
1 - 2	34	23.78%	47.82	11.88%
2 - 5	25	17.48%	76.21	18.94%
5 - 10	6	4.20%	39.60	9.84%
10 - 20	7	4.90%	85.24	21.18%
20 - 50	4	2.80%	125.11	31.09%
სულ:	143	100.00%	402.38	100.00%

მცინვარების ფართობების სტატისტიკური ანალიზი განხორციელდა პირსონის კორელაციის კოეფიციენტის საშუალებით. მონაცემთა საიმედოობისათვის

კორელაციის კოეფიციენტები და მათ შორის წრფივი კავშირის გაანგარიშება სხვადასხვა გეოგრაფიული არელებისა და მყინვარების მორფოლოგიური ტიპების მიხედვით, ცალ-ცალკე განხორციელდა (იხ. ცხრილი 12). ყველა შემთხვევაში მივიღეთ მაღალი კორელაციური კავშირი რაც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ მცირე გამყინვარების პერიოდის ნივალურ გლაციალური ზონის საერთო ფართობის აღდგენა წრფის განტოლების გამოყენებით.

ცხრილი 12. კ. პოდოზერსკის და თანამედროვე კატალოგის იდენტიფიცირებული მყინვარების ფართობების კორელაციური კავშირების შედარება მყინვარების გეოგრაფიული განაწილების და მორფოლოგიური ტიპების მიხედვით

გეოგრაფიული რეგიონი	იდენტიფიცირებული მყინვარების რაოდენობა	კორელაციის კოეფიციენტი R ²	წრფის განტოლება
ყველა მყინვარი	143	0.9703	$y = 1.1129x + 0.1485$
ცენტრალური კავკასიონი	79	0.9691	$y = 1.1148x + 0.142$
დასავლეთ კავკასიონი	34	0.8351	$y = 0.8992x + 0.1578$
აღმოსავლეთ კავკასიონი	30	0.7853	$y = 1.3823x + 0.2115$
სამხრეთი ფერდობი	100	0.9705	$y = 1.1227x + 0.0997$
ჩრდილოეთი ფერდობი	43	0.9743	$y = 0.9738x + 0.3724$
ხეობის ტიპის მყინვარები	65	0.9674	$y = 1.1143x + 0.2269$
კარული ტიპის მყინვარები	78	0.9572	$y = 0.9879x + 0.1792$

1960-იანი წლების გეოინფორმაციული კატალოგის საფუძველზე რ. გობეჯიშვილს კატალოგით აღწერილი აქვს 786 მყინვარი ჯამური ფართობით 563 კმ². რეგრესიის განტოლებების საფუძველზე ჩემს მიერ აღდგენილი მყინვარების საერთო აღდგენილმა ფართობმა მოცემული 786 მყინვარისათვის შეადგინა 744 კმ² მცირე გამყინვარების პერიოდისათვის.

ამ შემთხვევაში, 1820-1960 წლებში 140 წლის განმავლობაში ნივალურ-გლაციალური ზონის დეგრადაციის მაჩვენებელმა 24.33 % შეადგინა. მთლიანად განხილული ორივე პერიოდისათვის ნივალურ გლაციალური ზონის ფართობმა განიცადა 47.8%-იანი კლება, წლიურად საშუალოდ 1.82 კმ², 744 კმ²-დან 388 კმ²-მდე.

1960-2015 წლებში ნივალურ გლაციალურმა საფარმა დამატებით 563 კმ²-დან 388 კმ²-მდე შემცირება განიცადა, რაც 55 წლიან პერიოდში დამატებით 175 კმ²-ია, განხილულ მეორე პერიოდში, პირველ პერიოდთან მიმართებით, მყინვარების

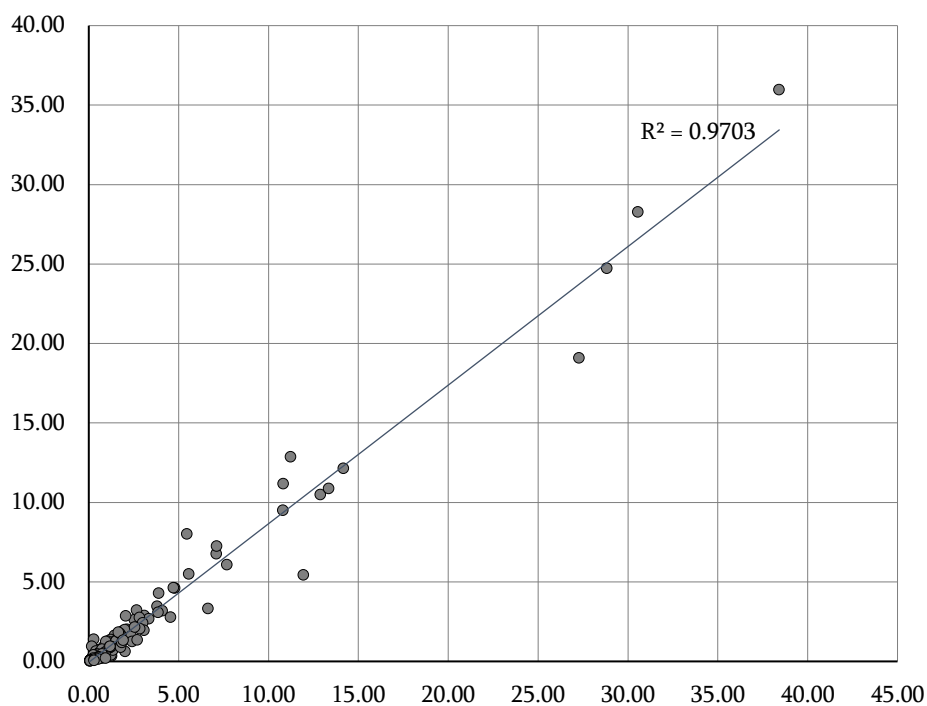
დეგრადაციის ინტენსივობა გაზრდილია 1.29 კმ²-დან 3.18²-მდე წელიწადში, თითქმის 2.5-ჯერ (იხ. ცხრილი 13).

ცხრილი 13. მცირე გამყინვარების პერიოდიდან 1820 წ. თანამედროვე პერიოდამდე 2015 წ. ნივალურ გლაციალური სისტემის დეგრადაცია

პერიოდი	წლები		გამყინვარების საერთო ფართობი კმ ²	ჯამური კლება	კლება %	ინტენსივობა კმ ² /წელი
			744	0		
I	1820-1960	140	563	181	-24.3	1.29
II	1960-2015	55	388	175	-31	3.18
მთელი განხილული პერიოდი	1820-2015	195	388	356	-47.8	1.82

ნივალურ-გლაციალური ზონა, მისი ცალკეული მყინვარების ენების უკანდახევის და გამყინვარების ფართობების გარდა მნიშვნელოვან ცვლილებებს განიცდის აკუმულაციის და აბლაციის ზონაში ვერტიკალურ ჭრილშიც. გამყინვარების ფართობების შეფასების გარდა უმნიშვნელოვანესია მათი მოცულობების შემცირების შესწავლა. როგორც ზემოთ აღვნიშნე ვინაიდან ერთეული გამონაკლისის გარდა საქართველოს მყინვარების სისტემების და მოცულობების კვლევა არ განხორციელებულა ჩვენ შეგვიძლია მხოლოდ თეორიული გათვლების შედეგებს დავეყრდნობთ ნივალურ-გლაციალური ზონის არსებული მოცულობების და მათი ცვლილებების შესახებ. მცირე გამყინვარების პერიოდიდან თანამედროვე პერიოდამდე მყინვარების სისტემაში შემცირებას, ამ საკითხის კვლევისას ჩემს მიერ გამოყენებულ იქნა გლაციალ-გეომორფოლოგიური, ფოტოგრამმეტრიული, გეოინფორმაციული მეთოდები. მცირე გამყინვარების პერიოდის მყინვარების მოხაზულობების აღდგენისათვის გამოვიყენე მაღალი გარჩევადობის დისტანციური ზონდირების მასალები, სადაც კარგად იკითხება მორენული მწკრივები. მათი საშუალებით აღდგენილ იქნა თანადროული პერიოდის მყინვარის გარშემოწერილობა. რაც შეეხება მყინვარის ზედაპირის ვერტიკალურ მდებარეობას, მორენული საფარის გარდა გამოვიყენე 1890-1910 წლების მენზულური აგეგმვის საფუძველზე შედგენილი კარტოგრაფიული მასალა, სადაც მყინვარის ზედაპირებზე მოცემულია ცალკეული ვერტიკალური ნიშნულები და ჰორიზონტალები. ცალკეული მყინვარებისათვის ხელით აციფვრის საშუალებით, შეიქმნა ზედაპირის ციფრული

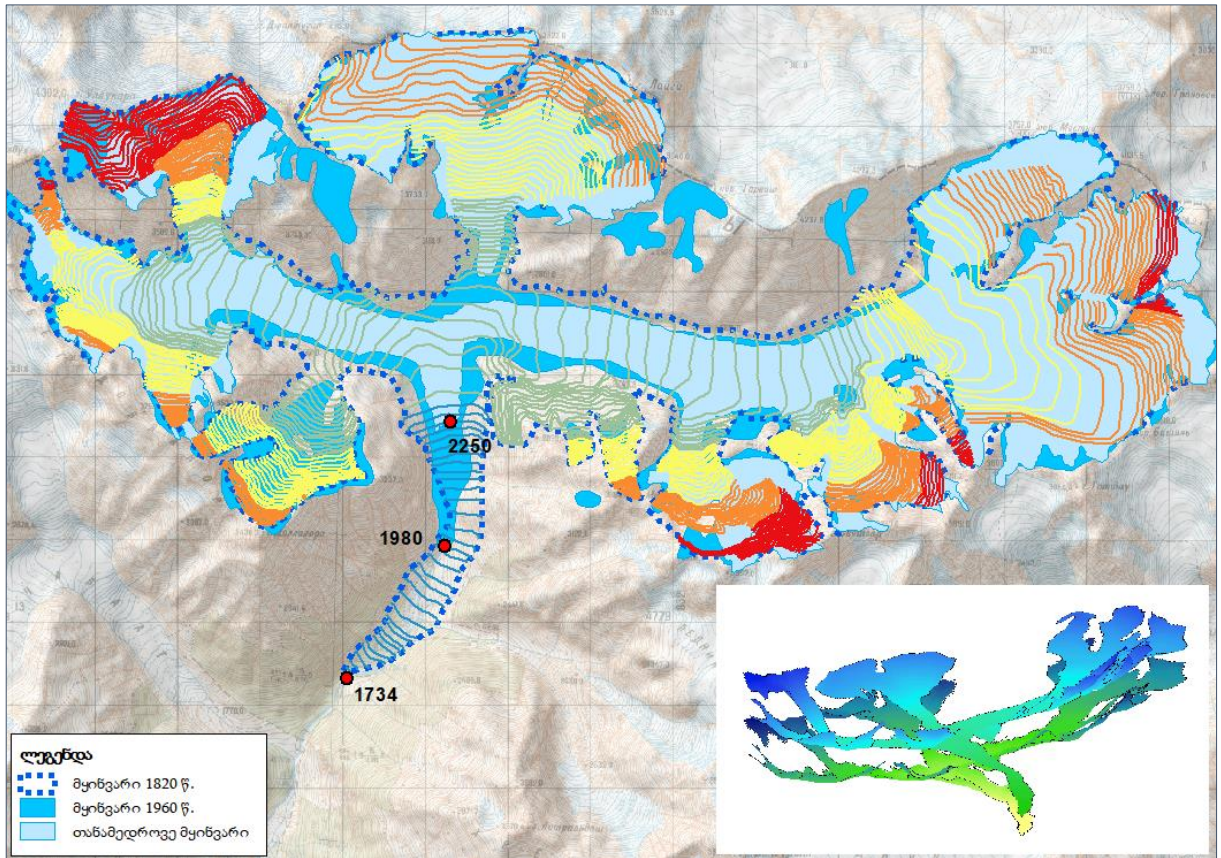
მოდელი - DTM₁. ამავე მეთოდით და 1960 წლების 50000 მასშტაბის ტოპოგრაფიული რუკების გამოყენებით - DTM₂. ორივე წინა ზედაპირის მოდელი შედარებულ იქნა, იაპონიის ეკონომიკის, ვაჭრობის, ინდუსტრიის (METI) სამინისტროს და ამერიკის აერონავტიკის და კოსმოსის ეროვნული ადმინისტრაციის (NASA) ერთობლივი პროდუქტ - Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2)⁴⁹ (იხ. ფიგურა 39) მოდელს - DMT₃. ნივალურ-გლაციალური ზონის ზედაპირის დინამიკის გამოთვლის მაღალი სიზუსტის მისაღებად სამივე რელიეფის მოდელის ე.წ. პიქსელები გაორიენტირებულ იქნა GDEM V2-ის პიქსელის ზომასა (38×38 მეტრი) და მდებარეობაზე.



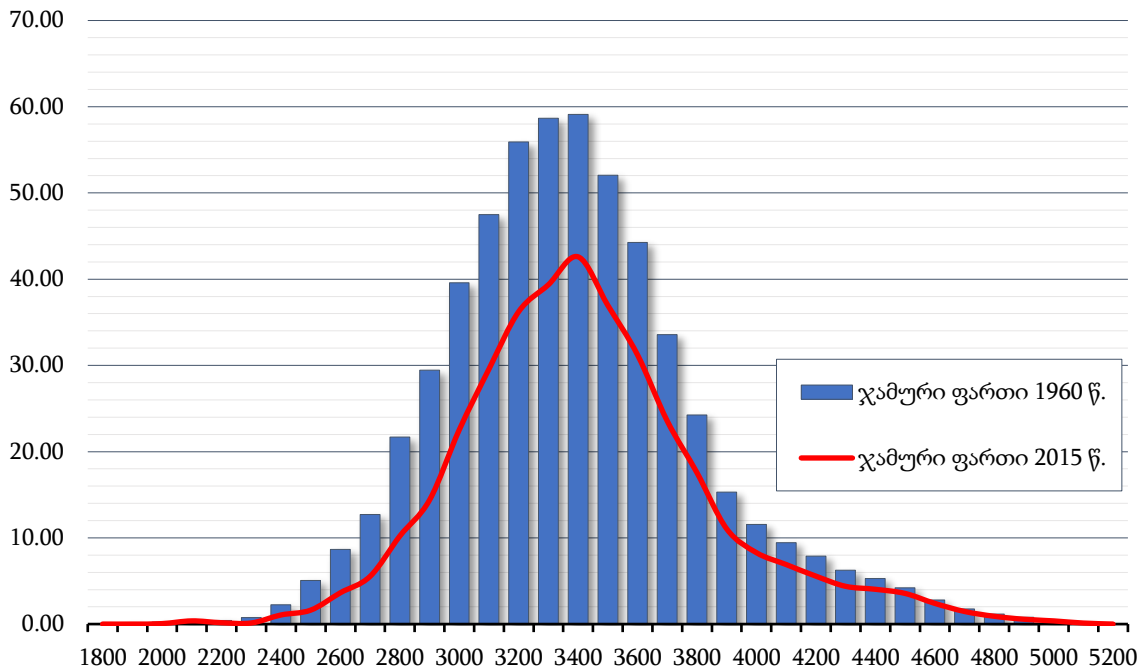
ფიგურა 38. კ. პოდოზერსკის კატალოგის (1911 წ.) და 1960-იანი წლების ტოპოგრაფიული რუკებზე ასახული მყინვარების ფართობების კავშირი (ქედის მთელს პერიმეტრისათვის)

მონაცემებზე დაყრდნობით გაანგარიშებული იქნა ნივალურ-გლაციალური ზონის დეგრადაციის ორი მნიშვნელოვანი მახასიათებელი: ყინულის ზედაპირის ზღვის დონეზე მდებარეობის ცვლილება მითითებული (1820-2011 წწ.) პერიოდისათვის, თოვლ-მყინვარული რესურსის დეგრადაციის ჯამური მაჩვენებელი და ინტენსივობა; და ცვლილებების მნიშვნელობების განაწილება ვერტიკალური ჭრილში, მყინვარის ენის სიმალიდან კვების არეალის სიმაღლემდე. ცალკეული მყინვარებისათვის გამოთვლილ იქნა დეგრადირებული ყინულოვანი მასის მოცულობები.

⁴⁹ <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>



ფიგურა 39. მცინვარი ლეხზირის უკანდახევა და ზედაპირის დეგრადაცია



ფიგურა 40. გამცინვარების მიერ დაკავებული ფართობის ცვლილება ვერტიკალურ ჭრილში 1960-2011 წწ.

მცირე გამცინვარების შემდგომ საქართველოს ნივალურ-გლაციალური ზონა მნიშვნელოვანი ცვლილებების ფაზას გადის. ხდება მისი ძირეული ცვლილებები, რაც აისახება არა მხოლოდ მცინვარების ენების უკანდახევასა და გამცინვარების ფართობის

საერთო შემცირებაში, არამედ მნიშვნელოვნად მცირდება თოვლ-ყინულოვანი რესურსის მოცულობაც. მნიშვნელოვანი ცვლილებები ხდება ასევე მყინვართა მორფოლოგიურ ტიპებში. ბევრი ხეობის და ხეობის რთული ტიპის მყინვარი რომელიც კავკასიონის სამხრეთი ფერდობზე არსებობდა დაიშალა ხეობის მარტივი და ზოგ შემთხვევაში კარული ტიპის მყინვარებად. მცირე გამყინვარების პერიოდისათვის არსებული კარული ტიპის მყინვარებმაც განიცადეს დაშლა და ამასთან მათგან მნიშვნელოვანი ნაწილი უკვე საერთოდ გამქრალია.

მყინვარების დეგრადაციის დადგენილი ინტენსივობის პირობებში მაღალი ალბათობით სავარაუდოა რომ ამჟამად არსებული კარული მყინვარებიც უახლოეს მომავალში გაქრება ან თოვლნარის სახით იქნება წარმოდგენილი. რაც შეეხება ხეობის ტიპის დიდ მყინვარებს მათი ენები მნიშვნელოვნად შემცირდება და ზოგიერთი მათგანი მოსცილდება კიდევაც კვების არეალს და არსებობას შეწყვეტს.

ჯამში 1960-2010 წლიან პერიოდში 260 კმ² ფართობის მქონე 106 მყინვარმა განიცადა დაშლა. ეს მყინვარები დღეისათვის უკვე 297 ერთეულ 97 კმ² ფართობის მყინვარს შეადგენს. საინტერესოა მისი გეოგრაფიული განაწილებაც. რაოდენობრივად და ფართობითაც უფრო მეტად დაიშალა ცენტრალური კავკასიონის მყინვარები. ყველაზე ნაკლები ცვლილება ამ მხრივ აღმოსავლეთ კავკასიონს შეეხო (იხ. ცხრილი 14)

ცხრილი 14. 1960-2010 წ. მყინვარების დეგრადაცია და მათი გეოგრაფიული განაწილება

გეოგრაფიული ადგილმდებარეობა	რაოდენობა	ფართობი კმ ²
დასავლეთ კავკასიონი	26	28.12
ცენტრალური კავკასიონი	74	228
აღმოსავლეთ კავკასიონი	6	3.68
სულ	106	259.8

3.4. მაღალმთიანი ლანდშაფტის (ტყის საფარის) დინამიკა პერიგლაციალურ ზონაში

ხანგრძლივი გეოლოგიური პერიოდის განმავლობაში საქართველოს ტერიტორიაზე გავრცელებულმა მცენარეულმა საფარის გაბატონებულმა ტიპებმა არაერთი ცვლილება განიცადა. პალეოზოური ერიდან მოყოლებული, კლიმატური პირობების კვალდაკვალ იგი ტროპიკული, მარადმწვანე სუბტროპიკული ტიპის გაბატონებული მცენარეულობიდან იცვლებოდა მეზოფილური ბორეალური ტიპის მცენარეული საფარისაკენ უკვე პლიოცენურ პერიოდში. ამ დროს უკვე გამოიკვეთა ჰავის ვერტიკალური სარტყლოვნობა, განსხვავებები აღმოსავლეთ და დასავლეთ საქართველოს ფლორისტულ რაიონებს შორის.

ჰოლოცენში, როცა მცინვარები უკან დაიხიეს, მაგრამ ჰავა ჯერ კიდევ მკაცრი იყო, ბორეალური ფლორისტული ელემენტების სხვა სახეობებთან ერთად ფართოდ გავრცელდა ფიჭვისა (*Pinus sosnowsky*) და არყის ტყეები (*Betula Litwinowi*; *B. pendula*). ბორეალური ელემენტების სხვა სახეობებთან ერთად აღნიშნული სახეობების ტყის მცენარეულობის პირველ ცენოზებს ქმნიდნენ, მცინვარების მახლობლად ან მათ მიერ განთავისუფლებულ ტერიტორიებზე (ქვაჩაკიძე, 2009). მცირე გამცინვარების შემდგომ საქართველოს მცინვარება მნიშვნელოვნად დაიხია უკან. გამოთავისუფლდა ხეობის ტიპის მცინვართა მიერ დაკავებული ტერიტორიები, სადაც აქტიურად ხდება ფიჭვისა და არყის ფიტოცენოზების ჩამოყალიბება (იხ. ცხრილი 15).

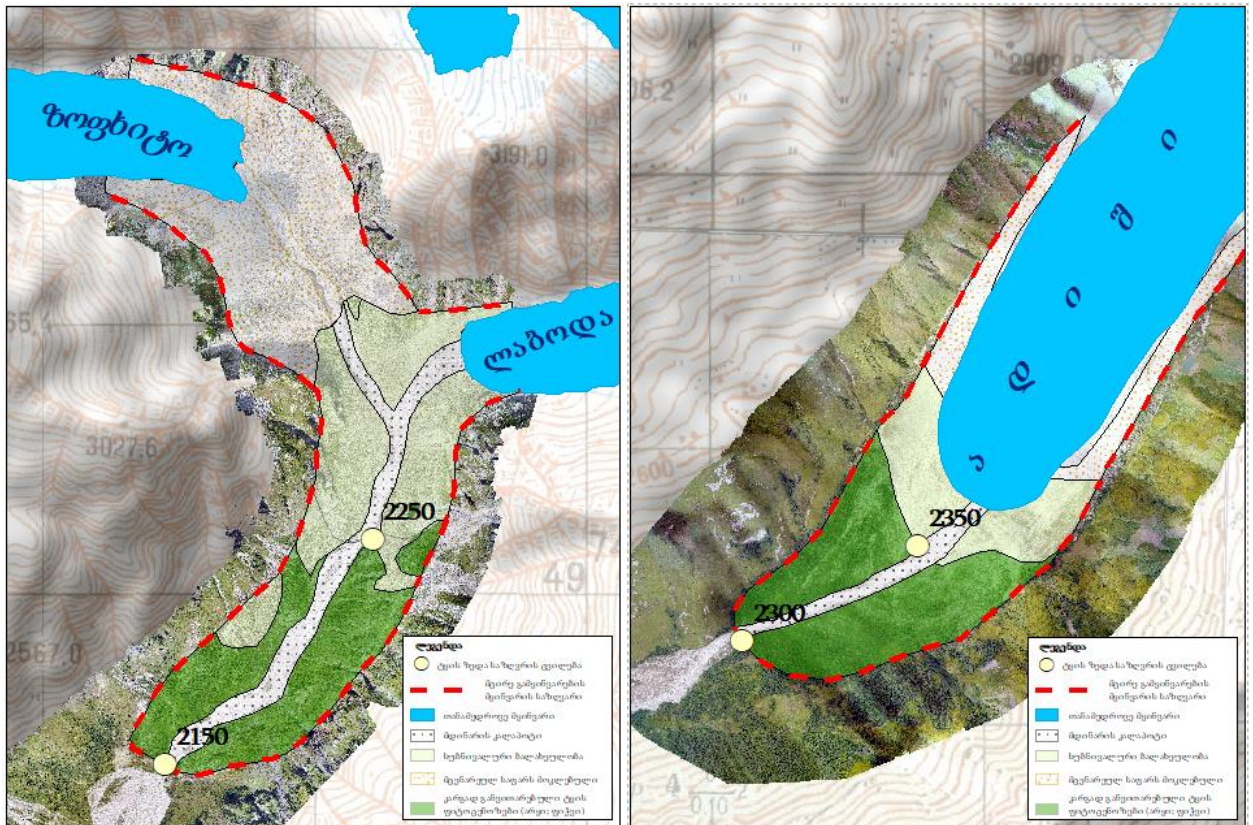
პერიგლაციალურ ზონაში მიმდინარე პროცესის ინტენსივობის და მასშტაბის შეფასებისათვის გამოყენებულ იქნა ჩემს მიერ გადაღებული მაღალი გარჩევადობის აეროფოტო, დისტანციური ზონდირების თავისუფალი ინტერნეტ რესურსები (Sentinel-2; Landsat 8) გეოსაინფორმაციო პროგრამული უზრუნველყოფები. უნდა აღინიშნოს, რომ მცინვარებისაგან განთავისუფლებულ ტერიტორიებზე ფიტოცენოზებს შორის ხშირად არსებობს მკვეთრი საზღვრები (ე.წ. დისკრეტულობა კონტინუუმში) რაც მრავალი ფაქტორითა გამოწვეული: ფიტოცენოზთა საარსებო გარემო; ფერდობების დაქანება; მზით განათებულობის ინტენსივობა; რელიეფის ფორმები; ნიადაგის საფარი და სხვა (ქვაჩაკიძე, 2009).

ცხრილი 15. პერიგლაციალურ ზონაში (მცინვარის მიერ განთავისუფლებული) მცენარეული საფარის დინამიკა მცირე გამცინვარების (~ 1820 წ.) შემდგომ

მცინვარი	განთავისუფლებული ტერიტორია		სუბალპური ტყის ფიტოცენოზებით დაკავებული არეალი		ფიტოცენოზების გავრცელების ცვლილება ადგილის აბსოლუტურ სიმაღლეთა შორის		
	კმ ²	%	კმ ²	%	1820 წ.	2017 წ.	სხვაობა
ზოფხიტო	1.54	100	0.37	24.0	2150	2250	100
ადიში	0.92	100	0.40	43.4	2300	2350	50
ხალდე	0.71	100	0.47	66.2	2330	2400	70
შხარა	0.50	100	0.21	42.0	2310	2400	90
ჭალაათი	1.15	100	0.55	47.8	1620	1850	230

პერიგლაციალური ზონის მიკრო კლიმატური და ბუნებრივი პირობების განსხვავებულობის მიუხედავად ყველა ამ ზონაში (სვანეთის, რაჭის მონაკვეთზე კავკასიონის მონაკვეთზე), შეინიშნება მცენარეული საფარით ტერიტორიის დასახლების მაღალი მაჩვენებელი. არყის (*Betula Litwinowi*; *B. pendula*) ფიტოცენოზები ხშირად 3-6 მეტრის, ზოგ შემთხვევაში 10 მ, ცალკეულ შემთხვევებში 1.5 მ საშუალო სიმაღლის ცალკეული ინდივიდების ან მათი ჯგუფების სახითა წარმოდგენილი.

ცალკეული ინდივიდების ან იშვიათად ფიტოცენოზის სახით გვხვდება ფიჭვი (*Pinus sosnowsky*) უპირატესად 2-3 მეტრამდე სიმაღლის.



ფიგურა 41. პერიგლაციალურ ზონის მცენარეული საფარი და მათი გავრცელება

მყინვარის მიერ განთავისუფლებულ ტერიტორიაზე აღნიშნული სახეობების გარდა ბორეალური მცენარეული საფარის სხვა ელემენტებიც ფართო გავრცელებით სარგებლობს. როგორც ცხრილის ანალიზიდანაც ირკვევა ტყის ფიტოცენოზებით ტერიტორიის ათვისების პროცესი მნიშვნელოვნად გასხვავდება ადგილობრივი მიკრო კლიმატური და ბუნებრივი პირობების მიხედვით, თუმცა შეინიშნება საერთო ტენდენციაც. პერიგლაციალურ ზონაში მაქსიმალური გატყიანების ხარისხი საშუალოდ 50 % აქვს იმ მყინვარებს რომლებმაც ყველაზე ნელა დაიხიეს სვანეთის კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე. მყინვარ ზოფხიტოს ხეობაში მართალია თითქმის 2 ჯერ დიდი ტერიტორია გამოთავისუფლდა ყინულოვანი საფარისაგან და იგი ≈ 100 მეტრითაც დაბალია სვანეთის მყინვარების პერიგლაციალურ ზონასთან შედარებით, მაგრამ მიუხედავად ამისა ტყის ფიტოცენოზებით ტერიტორიის ათვისების მაჩვენებელი 2 ჯერ მცირეა და 24% შეადგენს.

დასკვნები

- საქართველოს კავკასიონის სამხრეთ ფერდობზე, ნივალურ-გლაციალური ზონის დეგრადაციამ, კვლევის ორ პერიოდს (I - პერიოდი 1820-1960 წწ. II - პერიოდი 1960-2011 წწ.) შორის 47.8% შეადგინა, რაც წლიურად 1.82 კმ²-ია.
- დეგრადაციის მასშტაბის მნიშვნელოვანი განსხვავებები შეიმჩნევა I და II - პერიოდებს შორის. მაშინ, როდესაც I პერიოდის ჯამური მაჩვენებელი 24.32 % 140 წლის განმავლობაში, მომდევნო მეორე პერიოდში იმ დროისათვის უკვე 24.3%-ით შემცირებულმა მყინვარულმა საფარმა კიდევ დამატებით 31.08 % - იანი დეგრადაცია განიცადა თითქმის 2.5-ჯერ მცირე დროში
- II პერიოდისათვის პირველ პერიოდთან შედარებით, დეგრადაციის ინტენსივობა გაზრდილია 1.29 კმ²-დან 3.18 მკ²-მდე წელიწადში თითქმის 2.5-ჯერ მთლიანი ნივალურ გლაციალური-ზონისათვის
- მნიშვნელოვანი შემცირება განიცადა მყინვარების ვერტიკალურის გავრცელების სტრუქტურამაც. ყველაზე დიდი ცვლილებების შეეხო 3400 მეტრამდე ზონას. საშუალოდ ამ არეალში II პერიოდისათვის არსებული მყინვარული საფარის 50% გაქრა. რაც შეეხება უფრო დაბალ ზონას 2400 მეტრამდე ყინულოვანი საფარის 60% გაქრა. 3400 მეტრის მაღლა ყინულოვანი საფარის ფართობის შემცირების კლება შეინიშნება 15-20%-მდე.
- ამჟამად საქართველოს საზღვრებში მოქცეულია 849 მყინვარი, საერთო ფართობით 388 კმ² ფართობით
- გამყინვარების ძირითად კერად რჩება ცენტრალური კავკასიონის მონაკვეთი აზაუს და მამისონის უღელტეხილებს შორის, მყინვარების საერთო რაოდენობით 308 და ფართობით 62.8%-ით.
- თანამედროვე გამყინვარების რაოდენობრივად დიდი ნაწილი 440 მყინვარი 0.1 კმ²-მდე მცირე ზომის კარული და დაკიდული ტიპის მყინვარია
- ციფრული რელიეფზე დაყრდნობით გაანგარიშებული ფერდობთა ექსპოზიციის მოდელი, მისი ფარდობითი მნიშვნელობების და პროცენტული განაწილება მნიშვნელოვნად განსხვავდება აქამდე არსებულ უგანზომილებო

მონაცემისაგან და სრულყოფილ სურათს იძლევა ნივალურ-გლაციალური საფარის დეგრადაციის რაობაზე

- დადგენილია სუბალპური ტყის მცენარეული საფარის ფიტოცენოზებით პერიგლაციალური ზონების დაფარვის ხასიათი. რაჭის რეგიონში მიუხედავად ზონის ზღვის დონეზე უფრო დაბალი მდებარეობისა 2 - 3-ჯერ ჩამორჩება სვანეთის მონაკვეთს
- უპილოტო საფრენი აპარატების გამოყენება მთიანი რეგიონის მონიტორინგისათვის ადრეული შეტყობინების სისტემების პარალელურად შესაძლოა წარმატებით იქნას გამოყენებული გარკვეული სახის ბუნებრივი კატასტროფების თავიდან აცილების საკითხში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. (2015 წლის 5 June). მოპოვებული Environmental history resources: <https://www.eh-resources.org/little-ice-age/>-დან
2. B. Christiansen F. C. Ljungqvist. (2012). The extra-tropical NH temperature in the last two millennia: reconstructions of low-frequency variability. *Climate of the Past*, 765-786.
3. Barry, R.G. Thian Yew Gan. (2002). *The role of snow and ice in the global climate system*. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK: Cambridge University Press.
4. Bintanja, R.; Wal, R. S. W. van de. (2008). North American ice-sheet dynamics and the onset of 100,000-year glacial cycles. *Nature*, 869-872.
5. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). (2014). *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.
6. Efremov, U. (2001). *Xrebt bolshogo Kavkaza i ix vlianie na klimat(in russian), Ranges of the great Caucasus and their influence on the climate*. Krasnodar: Prosveshenie-ug.
7. IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C*. IPCC. მოპოვებული <https://www.ipcc.ch/>-დან
8. Kirschvink, J. (1992). Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: The Snowball Earth. J. W. Schopf-ში, *The Proterozoic biosphere* (გვ. 51-52). Cambridge: Cambridge University Press.
9. L. Bruce Railsbacka Philip L. Gibbardb Martin, J. Headc Ny Riavo, G. Voarintsoaa Samuel Toucanned. (2015). An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and. *Quaternary Science Reviews*, 94-106.
10. Levan G. Tielidze, Roger D. Wheate. (2018). Inventory, The Greater Caucasus Glacier (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*, 81-94.
11. Luthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, . (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 . *Nature*, 379-382.
12. N.A. Krivova, L.E.A. Vieira, S. K. Solanki. (2010). Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum. *Journal of Geophysical research*, 1-11.
13. Oerlemans, J. (2001). *Glaciers and Climate Change*. Lisse, Abingdon, Exton, Tokyo: A.A. Balkema Publishers.

14. Oliver Wigmore, B. M. (2017). Monitoring tropical debris-covered glacier dynamics from high-resolution unmanned aerial vehicle photogrammetry, Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 2463–2480.
15. Oosthoek, O. K. (2015 წლის 5 June). *Environmental history resources*. მოპოვებული Little ice age: <https://www.eh-resources.org/>-დან
16. Paillard, D. (2001). Glacial cycles: Toward a new paradigm. *Reviews of Geophysics*, pages 325-346.
17. Paterson, W. (1994). *The physics of glaciers*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
18. Paul F. Hoffman, * A. (1998). A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 1342-1346.
19. Qinghua YE, S. K. (2006). Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 537-545.
20. R. gobejishvili, N. L. (2011). Late Pleistocene (Wurmian) Glaciations of the Caucasus. P. G. J. Ehlers-მო, *Quaternary Claciations - Extent and chronology* (გვ. 141-147). Amsterdam: Elsevier.
21. Raymo, M. E., Lisiecki, * L., & Nisancioglu, K. H. (2006). Plio-Pleistocene Ice Volume, Antarctic Climate, and the Global d18O Record. *Science*, 492-495.
22. Roger G. Barry, Thian Yew Gan. (2011). *The Global Cryosphere*. New York: Cambridge University Press.
23. S.S. Kutuzov, I. L. (2015). Estimation of the greater Caucasus glaciers volume, using radio-echo sounding data and modeling. *Earth's Cryosphere*, 69–78.
24. Shahgedanova, M. G. (2014). Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography. *The Cryosphere*, 2367–2379.
25. Stanislav S. Kutuzov, V. N. (2016). First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier, Caucasus Mountains. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1488.
26. Tajika, E. (2003). Faint young Sun and the carbon cycle:. *Earth and Planetary Science*, 443-453.
27. Tang, H., & Chenbc, Y. (2013). Global glaciations and atmospheric change at ca. 2.3 Ga. *Geoscience Frontiers*, 583-596.
28. Vries, J. d. (2014). The Crisis of the Seventeenth Century: The Little Ice Age and the Mystery of the “Great Divergence”. *Journal of Interdisciplinary History*, 369–377.
29. Л.И. Маруашвили, Г. К. (1975). *Каталог Ледников СССР*. Ленинград: Гидрометеоиздат.

30. Подозерски, К. И. (1911). *Ледники Кавказского Хребта*. Тифлис: Записки Кавказского отдела Императорского русского географического общества.
31. Р.Г.Гобеджишвили. (1989). *Ледники Грузии*. Тбилиси: მეცნიერება.
32. ბერიტაშვილი, ბ. (2011). *კლიმატი და მისი ცვლილება*. თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი.
33. გ. გაგუა, დ. მუმლაძე, შ. ჯავახიშვილი. (2000). *საქართველოს გეოგრაფია*. თბილისი: მეცნიერება.
34. გიგი თევზაძე, ნ. ვ. (2014). *სვანური კომპლექსის საიდუმლო*. თბილისი.
35. გობეჯიშვილი, რ. (1997). თოვლ-მყინვარული საფარი ვახუშტი ბაგრატიონის შრომებში. ს. მ. ინსტიტუტი-ში, *ვახუშტი ბაგრატიონი გეოგრაფი* (გვ. 96-101). თბილისი: თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა.
36. გობეჯიშვილი, რ. (2011). *საქართველოს რელიეფი*. თბილისი: უნივერსალი.
37. ელიზბარაშვილი, ე. (2007). *საქართველოს კლიმატური რესურსები*. თბილისი: ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.
38. ელიზბარაშვილი, ე. (2017). *საქართველოს ჰავა*. თბილისი: საქართველოს ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.
39. *კლიმატის ცვლილების შესახებ საქართველოს მესამე ეროვნული შეტყობინება*. (2015). თბილისი: სამინისტრო, საქართველოს ბუნებრივი რესურსებისა და გარემოს დაცვის.
40. კუტალაძე, ნ. (2007). *კლიმატის ცვლილებების პროექტებში 2006 წელს მიღებული შედეგები*. თბილისი.
41. მარუაშვილი, ლ. (1975). *კავკასიის ფიზიკური გეოგრაფია*. თბილისი: მეცნიერება.
42. ნ.ელიზბარაშვილი, ჰ.მეესენი, გ.მელაძე, ა. ხოეციანი, თ.კოლერი. (2018). *მთიანი ტერიტორიების მდგრადი განვითარება და რესურსების მართვა*. თბილისი: დანი.
43. რ. გობეჯიშვილი, ვ. კოტლიაკოვი. (2006 ა). *გლაციოლოგია*. თბილისი: უნივერსალი.
44. რ. გობეჯიშვილი, ნ. ლომიძე. (2006 ბ). *ატმოსფეროში 0-იანი იზოთერმის (ზაფხულის თვეებში) მდებარეობის მიხედვით თოვლის ხაზის დადგენა*. თბილისი: უნივერსალი.
45. სალუქვაძე, მ. (2011). *ზემო სვანეთის ზვავსაშიშროება*. თბილისი: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

46. ტიელიძე, ლ. (2016). *კავკასიონის მყინვარების გლაციო-გეომორფოლოგიური კვლევა თანამედროვე კლიმატის ცვლილების ფონზე და გამყინვარების ევოლუცია გვიან პლეისტოცენსა და ჰოლოცენში*. თბილისი: სადოქტორო დისერტაცია.
47. ქვაჩავიძე, რ. (2009). *საქართველოს მცენარეულობა*. თბილისი: საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის სტამბა.
48. ჯავახიშვილი, შ. (1981). *ატმოსფერული ნალექები საქართველოს ტერიტორიაზე*. თბილისი: თბილისის უნივერსიტეტის გამოცდილება.
49. ჯავახიშვილი, შ. (1988). *საქართველოს ჰავის დახასიათება თვეების მიხედვით*. თბილისი: განათლება.