

შოვის (საქართველო) კატასტროფის შესაძლო გამომწვევი მიზეზები

კერესელიძე ზ., ვარამაშვილი ნ.

*ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
მიხეილ ნოდიას სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი
nodar.varamashvili@tsu.ge*

კავკასიონის მყინვარებზე პირველი სისტემატური დაკვირვებები დაკავშირებულია მდინარე თერგის ხეობაში დევდორაკის მყინვარის პერიოდული მოძრაობების შედეგად მე-18 საუკუნის ბოლოს – მე-19 საუკუნის დასაწყისში ყინულის კატასტროფული გამოტყორცნების შესწავლასთან [12]. მყინვარი დევდორაკი, რომელიც მდებარეობს მყინვარწვერის აღმოსავლეთ კალთაზე, ცნობილია XIX საუკუნის ბოლოდან მდინარე თერგის კანიონში ყინულის კატასტროფული გამოყოფით. ე.წ. „ყაზბეგის ხერგილები“ კეტავდა მდინარის დინებას, რაც იწვევდა ტბის წარმოქმნას. ტბის გარღვევისას ადგილი ჰქონდა დიდ წყალდიდობას. ასეთი მოვლენების მტკიცებულება ხელმისაწვდომია 1776, 1785, 1808, 1817 და 1832 წლებში. ბლოკირება დიდი ხნის განმავლობაში აფერხებდა მოძრაობას საქართველოს სამხედრო გზაზე. შემდგომში ხანდახან ხდებოდა მყინვარული პულსაციები, მაგრამ ისინი ვერასოდეს აღწევდნენ მდინარე თერგამდე. წინა კატასტროფების შემდეგ, დევდორაკის მყინვარი არ წარმოადგენდა საფრთხეს დაახლოებით ორი საუკუნის განმავლობაში. XIX საუკუნის II ნახევრის მყინვარწვერის მყინვარების შესწავლისას, მეცნიერებმა, რომლებიც აკვირდებოდნენ ახალგაზრდა მოვლენებს, დაადგინეს, რომ მყინვარები უკან იხევენ და მათი ზომა მცირდება. დაასკვნეს, რომ დევდორაკის მყინვარმაც ამ პირობებში ძალა დაკარგა და მოძრაობისას თერგის ხეობას ვეღარ აღწევდა. ყაზბეგის ფერდობებზე ცნობილია სხვა პულსირებული მყინვარების მოძრაობაც – აბანოს, ჩაჩის, მნას – მეოცე საუკუნის დასაწყისში და შუა საუკუნეში. თუმცა, ნამდვილი კატასტროფები მოჰყვა მასივის ჩრდილოეთ ფერდობზე 2002 წლის უზარმაზარ კატასტროფას, პულსირებადი კოლკას მყინვარის საგებიდან ყინულის გამოტყორცნით. დარიალის ხეობაში, ყაზბეგის ძველი ხერგილების შემდეგ, სტიქიური უბედურება როდესაც მდინარე თერგის კალაპოტი სრულად გადაიკეტა, თითქმის ორი საუკუნის შემდეგ – 2014 წლის მაისში კვლავ მოხდა. კვლავ მოხდა ყინულისა და კლდის მოულოდნელი ნგრევა დევდორაკის მყინვარის ფირნის რეგიონში.

მყინვარ თბილისაზე განვითარებული მოვლენების რიგითობის დადგენა განსაკუთრებული მნიშვნელობის ამოცანას წარმოადგენს. ბუნებრივია, რომ მისი გადაწყვეტის გარეშე შეუძლებელი იქნება შოვის ტრაგედიის მიზეზების სრულფასოვანი ანალიზი, რომლის საფუძველზეც უნდა ჩამოყალიბდეს კატასტროფის ზუსტი ფიზიკური სურათი. სხვანაირად შეუძლებელი იქნება მსგავსი მასშტაბების მქონე ბუნებრივი კატასტროფებისაგან ადამიანების პრევენციის საიმედო სისტემის აგება და მისი რაციონალურად ფუნქციონირება.

დღევანდელი მოცემულობით, შოვის ღვარცოფთან დაკავშირებული სამეცნიერო ინფორმაცია მწირია და მისი მიზეზების სრულფასოვანი ანალიზის საშუალებას არ იძლევა. ინსტრუმენტული დაკვირვების მასალა ფაქტიურად არ არსებობს. გამონაკლისია მხოლოდ სეისმური მონიტორინგის ცენტრში მიღებული ინფორმაცია აკუსტიკური ტალღების დიაპაზონში დაფიქსირებული შემფოთების შესახებ, რომელიც მნიშვნელოვანია კატასტროფის მომენტის ფიქსაციის თვალსაზრისით. გარდა ამისა აღნიშნული ჩანაწერი უდავოდ ადასტურებს მცინვარქვემა წლის რეზერვუარის არსებობას. გვაქვს მოსაზრება, რომ ის ჩანაწერი შეიძლება სასარგებლო აღმოჩნდეს ჩამონადენი მცინვარქვემა წყლის მოცულობის საიმედოდ შეფასებისათვის, აუცილებელია მცინვარზე კომპლექსური გეოფიზიკური, გეოლოგიური და გეოგრაფიული ექსპედიციის ორგანიზაცია. ამკარაა, რომ ასეთი ღონისძიება ქვაკუთხედური მნიშვნელობისაა და მისი პირველი ეტაპი რაც შეიძლება სწრაფად უნდა განხორციელდეს.

ისმის კითხვა: რანაირად შეიძლება სეისმური მონიტორინგის მასალა გამოვიყენოთ მცინვარქვემა წყლის რეზერვუარის მოცულობის შესაფასებლად? კორექტული პასუხი ამ კითხვაზე შეიძლება მივიღოთ იმ შემთხვევაში, თუ მოხდება სეისმოგრაფის ჩანაწერის მაღალსიხშირული ნაწილის სპექტრალური ანალიზი, კერძოდ, განისაზღვრება სპექტრის ყველაზე დაბალი სიხშირე. ცნობილია, რომ ეს სიხშირე წარმოადგენს შემფოთებული მყარი სხეულის რხევის დისკრეტული სპექტრის საკუთარ სიხშირეს. ზოგადად, მცინვარისაგან განსხვავებული მახასიათებლების მქონე რაღაც სტრუქტურულ ნაწილს, მისი ლოკალური შემფოთების შემთხვევაში, შეიძლება ჰქონდეს საკუთარი რხევების სპექტრი შესაბამისი ძირითადი სიხშირით. მაგალითად, დიდი ალბათობით სავარაუდოა, რომ სწორედ მცინვარის ტანში არსებული წყლის რეზერვუარის კედლის ჩამოშლის დროს გენერირებული აკუსტიკური ტალღების სპექტრი აისახა სოფელ დარში, შოვისაგან დაახლოებით 25 კილომეტრის მოშორებით განთავსებული მაღალი მგრძნობიარობის მქონე სეისმოგრაფის ჩანაწერში. ამ ჩანაწერით პირველ რიგში დასტურდება, რომ კატასტროფის დროს ჰაერში არ გავრცელდა დარტყმითი ტალღა, რაც გარკვეულწილად მიუთითებს, რომ პროცესი მომენტალური ძლიერი მექანიკური იმპულსით არ დაწყებულა. ეს შეიძლება ნიშნავდეს, რომ კატასტროფა დაიწყო არა მცინვარის ენიდან ყინულის დიდი მასის მოწყვეტით, არამედ მცინვარქვემა წყლის რეზერვუარის მთლიანობის დარღვევით ლოკალურ უბანზე, რომლის ზომა სწრაფად, მაგრამ მაინც სასრული დროის განმავლობაში მკვეთრად გაიზარდა. შესაძლებელია, რომ სწორედ ამის გამო არ აღმოჩნდა ღვარცოფულ მასაში დიდი ზომის ყინულის ლოდები, რომლებიც უნდა წარმოქმნილიყვნენ მცინვარის ენის მასშტაბური მსხვრევის გამო. ამრიგად, შეიძლება დავუშვათ, რომ სწორედ რეზერვუარის კედლის დარღვევის თანადროულად დაიწყო აკუსტიკური ტალღების პაკეტის ემისია, რომელიც ყოველთვის თან ახლავს მექანიკური მსხვრევის პროცესს. ეს ტალღები გავრცელდა არამარტო ატმოსფეროში, არამედ დედამიწის ზედაპირულ ფენაშიც. საზოგადოდ, აკუსტიკური ტალღების ემისია სეისმური აქტივობის ზონიდან, ასევე უშუალოდ მიწისძვრის ჰიპოცენტრიდან, ჩვეულებრივი მოვლენაა. ამ ტალღების სპექტრი საკმაოდ მაღალსიხშირულია და მკვეთრად ემიჯნება სეისმური ტალღების სპექტრს. ბუნებრივია, რომ მათი გავრცელების არეალის ზომა დამოკიდებულია გარემოზე. მაგალითად, დედამიწის სიღრმეში გენერირებული აკუსტიკური ტალღების ფიქსაცია ჩვეულებრივ შესაძლებელია ემისიის წყაროდან დაახლოებით 30 კმ რადიუსის მქონე მანძილზე, რომელიც მაღალი მგრძნობიარობის მქო-

ნე აპარატურით დეტექტირების შემთხვევაში შეიძლება საკმაოდ გაიზარდოს. საინტერესოა, რომ აღნიშნული სეისმური მონაცემის მომწოდებელთა აზრით კატასტროფული ღვარცოფის ჩამოყალიბების პროცესში მონაწილეობდა მყინვარქვეშა წყლის ორი რეზერვუარი, რომლებიც გარკვეული დაყოვნებით დაიცალა. ასეთი რამ, ანუ მულტირეზერვუარების არსებობა ნამდვილად არ არის გამორიცხული. თუმცა, ასეთი მოსაზრება არ არის ცალსახა. არის ალტერნატიული ვარიანტი, რომ არსებობდა მხოლოდ ერთი რეზერვუარი. ასეთ შემთხვევაში შესაძლებელია, რომ მთლიანობა თავდაპირველად დაირღვა რეზერვუარის კედლის ზედა, ხოლო დაყოვნების შემდგომ, ქვედა ნაწილში. ასეთი სქემა შესაძლებელია ნაკლებად ალბათური იყოს, თუმცა მისი გამორიცხვა ჯერჯერობით არსებული მონაცემებით არაკორექტულად შეიძლება ჩაითვალოს. საეჭვოა, რომ ამ საკითხის გარკვევაში სიცხადე შეიტანოს მხოლოდ სატელიტური დაკვირვების მონაცემების ანალიზმა. მიგვაჩინია, რომ სარწმუნო სურათი შესაძლებელია აღვადგინოთ მხოლოდ მყინვარზე ექვიდენციის შემდეგ, მის არეში მომხდარი სტრუქტურული ცვლილებების გეომორფოლოგიური ანალიზის მონაცემებზე დაყრდნობით.

გარკვეული ალბათობით, აკუსტიკური ტალღების ჩანაწერში უნდა ჩანდეს კლდეზვავის ჩამოშლის შედეგად აღძრული აკუსტიკური ტალღების ნაწილი. ჩამოშლა სავარაუდოდ წინ უნდა უსწრებდეს წყლის რეზერვუარების მთლიანობის დარღვევას. ჩანაწერის ამ ნაწილით შესაძლებელია კლდეზვავის ხანგრძლივობის, მისი მოცულობის, ლოდების ზომების სპექტრის და პროცესის ენერჯის შეფასება [5]. ამ სტატიაში აღწერილი მეთოდით შესაძლებელია ქვათაცვენის ლოკაციის დადგენა 100 მეტრის სიზუსტით, თუმცა ამისათვის საჭიროა რამდენიმე ჩამწერი სადგური.

ცნობილია, რომ აკუსტიკური ტალღების გენერაცია ხშირ შემთხვევაში თან ახლავს მყინვარის, როგორც ერთი მთლიანი სხეულის ნელ მოძრაობას, აგრეთვე ყინულის სხვადასხვა ზომისა და ფორმის კლასტერების მსხვრევას. ამიტომ, აკუსტიკური ტალღების ემისიის მოვლენის, როგორც მყინვარული პროცესების ინტენსივობის ინდიკატორის, მონიტორინგისათვის იყენებენ სიხშირეთა დიაპაზონს /20-20000/ ჰერცი. გარდა ბუნებრივი დაკვირვებისა, აკუსტიკური ტალღების ემისია წარმოადგენს მყინვარების ლაბორატორიული მოდელირების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ელემენტს [1]. არსებობს ნაშრომი, რომელის მიხედვით მყინვარული პროცესების თანმდევი ხმაურის სპექტრის დაბალ სიხშირული ნაწილი /100-300/ ჰერცი დაკავშირებულია მთლიანად მყინვარის, ან ხაზოვანი მასშტაბით მისი თანაზომადი რომელიმე სტრუქტურული ნაწილის, საკუთარ მექანიკურ რხევებთან [2]. აქედან გამომდინარე, თუ გვეცოდინება სოფ. ღარში განთავსებული ხელსაწყოთი მიღებული აკუსტიკური ტალღების დისკრეტული სპექტრის ძირითადი სიხშირე, მარტივად შეიძლება შევაფასოთ მყინვარქვეშა წყლის რეზერვუარის ხაზოვანი მახასიათებელი ცნობილი კავშირის საშუალებით: $f_0 = v/d$, სადაც f_0 -სიხშირეა, v – ბგერის სიჩქარე დედამიწის გარემოში, d – მახასიათებელი ხაზოვანი ზომა. შესაბამისად, დისკრეტული სპექტრის ყველა მომდევნო სიხშირე შეიძლება მივიჩნიოთ ძირითადი სიხშირის ჰარმონიკებად. ჩვენს ამოცანაში მათ მხოლოდ ფონური ხმაურის ფუნქცია გააჩნიათ. თუმცა პიკური სიხშირეების მიმდევრობის დიაგნოსტიკა მაინც საინტერესოა, რადგანაც შემოწმდება რამდენად სამართლიანია მყარ დისპერსიულ გარემოში გავრცელებული აკუსტიკური ტალღებისათვის ჰარმონიული რხევების მიახლოება. სავარაუდოდ, ტალღური სპექტრი გადაგვარებული

უნდა იყოს მყარი ქანების ჩამოშლისა და ყინულის მცირე ზომის კლასტერების მრავლობითი წარმოქმნის გამო.

ამრიგად, წყლის რეზერვუარის მოცულობის შეფასება შესაძლებელი იქნება მხოლოდ მისი მახასიათებელი ხაზოვანი ზომის განსაზღვრის შემდეგ. აღვნიშნავთ, რომ სპექტრალური ანალიზის გარდა, აგრეთვე არსებობს მყინვარქვეშა წყლის რეზერვუარის (რეზერვუარების) მოცულობის მიახლოებითი შეფასების ირიბი შესაძლებლობა. ნაშრომში [2] მრავალრიცხოვანი განსხვავებული ხაზოვანი პარამეტრების მქონე მყინვარების დაკვირვების მასალის ანალიზის საფუძველზე მოცემული იყო f_0 -სიხშირის სიდიდის მახასიათებელი ინტერვალი /100-300/ ჰერცი. მყარ გარემოში აკუსტიკური და სეისმური ტალღების გავრცელების სიჩქარე ერთნაირია. ამიტომ, ამ პარამეტრის მახასიათებელ მნიშვნელობად მივიღოთ: $v \approx 5$ კმ/წმ. ფაქტიურად, ასეთი სიდიდე პირველადი და მეორადი სეისმური ტალღების საშუალოა. ამრიგად, სიხშირეთა ინტერვალის შესაბამისად გვექნება d პარამეტრის ცვლილების ინტერვალი: /50-17/ მ. მერხევი სხეულის მახასიათებელი ხაზოვანი ზომა 50 მ და 17 მ. რეზერვუარის მოცულობის შეფასებისათვის გამოვიყენოთ d რადიუსის ექვივალენტური სფერო. მაგალითად, სიხშირის ზღვრული მნიშვნელობებისათვის (100 ჰერცი და 300 ჰერცი) შესაბამისად გვექნება: $Q_1 \approx 500000$ მ³ და $Q_2 \approx 200000$ მ³ დაუზუსტებელი მონაცემებით, მდინარე ბუბასწყლის ხეობაში ჩამოტანილი ღვარცოფული მასის მოცულობა $Q \approx 1500000$ მ³. სავარაუდოდ, ამ მასის $\approx 20-30$ % იყო წყალი, რასთანაც Q_1 სიდიდე საკმაოდ კარგ თანხმობაშია. ამრიგად, სავარაუდოდ, თუ სეისმური ჩანაწერის მაღალსიხშირული სპექტრის ძირითადი სიხშირე, გარკვეულ ფარგლებში, 100 ჰერცის მახლობლად იქნება, ყინვარქვეშა რეზერვუარის (ან ორი რეზერვუარის) არსებობა ფაქტიურად ეჭვის გარეშე იქნება. ამ შემთხვევაში საჭირო იქნება სპექტრის ორი, ერთმანეთისაგან ცხადად განცალკევებული მონაკვეთის შესაბამისი ძირითადი სიხშირის განსაზღვრა.

მყინვარის დინამიკის მოდელირების ამოცანის ერთ-ერთი საკვანძო ელემენტია ყინულის სისქის განსაზღვრა, რისთვისაც გამოიყენება საკმაოდ მარტივი ფორმულა [3]

$$h = \frac{\tau}{f \rho g \sin \alpha} c, \quad (1)$$

სადაც h – ყინულის სისქეა, τ – ძვრადობის დაძაბულობა მყინვარის კალაპოტში, f – მყინვარის განივი კვეთის ფორმის მახასიათებელი კოეფიციენტი, ρ – ყინულის სიმკვრივე, g – სიმძიმის ძალის აჩქარება, α – ზედაპირის დახრის კუთხე, c – რაოდენობრივი შესწორების კოეფიციენტი, რომლის სიდიდე განისაზღვრება გაზომვათა მონაცემების ანალიზის გზით.

მოდელურ გამოსახულებაში (1) შედის ორი ცვლადი პარამეტრი, ძვრის დაძაბულობა τ და მყინვარის ზედაპირის დახრის კუთხე α . ფორმის კოეფიციენტი f დაკავშირებულია ზედაპირული ხახუნის ეფექტთან მყინვარისა და მისი ჩამტევი მყარი გარემოს კონტაქტის არეში და შეიძლება იცვლებოდეს ინტერვალში /0,5-0,9/. ალპური მყინვარებისათვის, რომელთაც ალბათ მიეკუთვნება თბილისა, ეს კოეფიციენტი $\approx 0,8$. იმისათვის, რომ მოდელი (2) ფორმალურად თანხმობაში იყოს მოძრავი გარემოს იდეალური პლასტიკურობის მიახლოებასთან, ანუ დაკმაყოფილდეს ყინულის ძვრადობის მინიმუმაციის პირობა, აუცილებელია, რომ კუთხე α გასაშუალოდდეს გარკვეულ მანძილზე, რომელიც დაახლოებით ერთი რიგით აღემატება ამ მონაკვეთზე ყინულის სისქეს.

მცინვარის ძვრადობის დამაბულობისათვის არსებობს ემპირიული ფორმულა, განსაზღვრული მცირე გამცინვარების პერიოდის შემდეგ (მე14-18 საუკუნე) გამქრალი 62 მცინვარის მონაცემების სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე [3]

$$\tau = 0,005 + 1,598\Delta H - 0,435\Delta H^2 \quad (2)$$

სადაც ΔH -სიმაღლეთა სხვაობაა მცინვარის წვერსა და მის ფუძეს შორის.

(2) ფორმულიდან გამომდინარე, მსხვილი მცინვარებისათვის, რომელთა $\Delta H > 1,6$ კმ-ზე, ძვრის დამაბულობა შეადგენს დაახლოებით 150 კილოპასკალს (კპ). ერთი შეხედვით, თითქოს არ უნდა არსებობდეს ასეთი რთული დამოკიდებულება მცინვარის სიმაღლესა და ძვრის დამაბულობას შორის. თუმცა, [3]-ის ავტორების აზრით, ემპირიული კავშირი უბრალოდ ასახავს ყინულის მოძრაობის სურათის ზოგად ცვალებადობას. შესაბამისად, გამოსახულება (2) იძლევა დაახლოებით $\pm 30\%$ ცდომილებას, რომელიც ავტომატურად გააჩნია აგრეთვე მოდელს (2).

მცინვარი თბილისა საკმაოდ კარგად იყო შესწავლილი საბჭოთა გლაციოლოგების, მათ შორის ქართველების, მიერ გასული საუკუნის 70-80 წლებში. კერძოდ, ქართველებმა განახორციელეს რამდენიმე ექსპედიცია, რომელთა პროცესში მიღებული ნატურალური დაკვირვების მასალა განზოგადდა მონოგრაფიაში [4]. ეს მონოგრაფია დღესაც აქტუალურია, რადგანაც შეიცავს ისეთ რეტრო მონაცემებს, რომელთა ღირებულება მომავალში მხოლოდ მოიმატებს. დღეს ცხადია, რომ სასიცოცხლოდ აუცილებელია ახალი ინფორმაცია თბილისას მცინვარზე ამჟამინდელი გეოლოგიურ-გეოფიზიკური ვითარების შესახებ. ასეთი სურათის შესაქმნელად მარტო სატელიტური მონაცემების ვიზუალური ანალიზი საკმარისი არ არის, მით უმეტეს როცა ეს ინფორმაცია ფრაგმენტულია და არც თუ მაღალი გარჩევადობით ხასიათდება. ამჟამინდელ მდგომარეობაში თბილისას მცინვარის მდგრადობის შეფასების თვალსაზრისით აუცილებელია გვექნდეს ყინულის სისქის ცვლილების მაქსიმალურად წვრილმასშტაბოვანი სურათი. ყინულის სისქე დამოკიდებულია ორ მთავარ პარამეტრზე: მცინვარის ზედაპირის დახრის კუთხეზე და ძვრადობის მოდულზე მცინვარის კალაპოტში (ძვრადობის დამაბულობაზე). ამიტომ მიგვაჩნია, რომ სატელიტური მონაცემების დამუშავებასთან ერთად საჭიროა მიწისპირა გაზომვები, რათა მონაცემები იყოს უფრო სრული და გახორციელდეს მომხდარი და მოსალოდნელი მოვლენების კომპლექსური შესწავლა და ანალიზი. სწორედ ამ მიზნით, ჩვენ ვფიქრობთ, საჭიროა ექსპედიცია თბილისას მცინვარის მიდამოებში.

მიგვაჩნია, რომ მცინვარქვეშა წლის რეზერვუარის პრობლემის მსგავსად, რაციონალური იქნება მცინვარების პრობლემატიკასთან დაკავშირებული სხვა აქტუალური პუბლიკაციების ზოგიერთი შედეგი გათვალისწინებული იყოს თბილისას მცინვარზე ექსპედიციის დაგეგმარების პროცესში. პირველ რიგში, ეს ეხება ნაშრომს [3], რომელშიც წარმოდგენილია ჯანკუათის მცინვარის მრავალ ათწლიანი ექსპედიციის შედეგები. ამ ნაშრომში გამოთქმულია პრეტენზია, რომ მოხდა ცენტრალური კავკასიონის სხვა მცინვარების კვლევის თვალსაზრისით მნიშვნელოვანი შედეგების განზოგადება, ანუ ავტორებმა მიიჩნიეს ჯანკუათი მეთოდური თვალსაზრისით საყრდენ მცინვარად. ცხადია, რომ ასეთი განცხადების სამართლიანობა ვიწრო სპეციალისტების წრემ უნდა შეაფასოს. თუმცა, ნაშრომში [3] მართლაც არის მნიშვნელოვანი ინფორმაცია საშუალო ზომის მცინვარებზე მიმდინარე

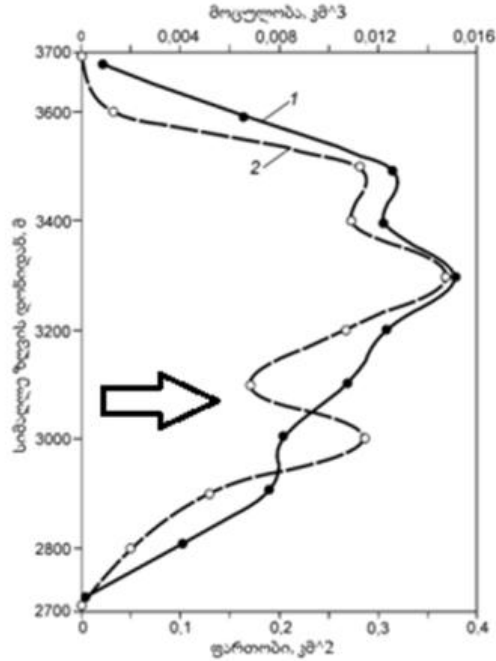
პროცესების მოდელირებასთან დაკავშირებით. ამ თვალსაზრისით განსაკუთრებით ღირებულად უნდა მივიჩნიოთ დასკვნა, რომელიც ეხება ჯანკუათის მცინვარის პარამეტრების ცვლილებას კლიმატური ცვლილებების ფონზე. მიგვაჩნია, რომ ამ დასკვნის ექსტრაპოლაცია სამართლიანი იქნება ჯანკუათის მახლობლად განლაგებული ყველა მცინვარისათვის. მის მიხედვით კლიმატური ცვლილებების გამო, ყინულის მოცულობა ჯანკუათის მცინვარის ზედა ნაწილში შემცირდა, მაგრამ 3000-3100 მეტრ სიმაღლეზე მცინვარის ზედაპირის ფართი გაიზარდა. ეს მოვლენა ახსნილია ყინულის სისქის შემცირების შედეგად მცინვარის სათავეში ყინულცვენის პროცესის გააქტიურებით. ბუნებრივია, რომ ასეთმა ეფექტმა უნდა გამოიწვიოს მცინვარის სათავეს მდგრადობის ზღურბლის დადაბლება. თუ ამ ფაქტს კერძო შემთხვევად არ ჩავთვლით და განვაზოგადებთ, მივალთ დასკვნამდე, რომ დათბობის ეფექტი განსაკუთრებით აქტიურად უნდა მოქმედებდეს მცინვარების სათავეში. იქ რელიეფის დახრა, როგორც წესი, უფრო დიდია ქვედა უბანებთან შედარებით. თბილისას მცინვართან მიმართებაში ეს ნიშნავს, რომ არსებობს რეალური წინაპირობა, რომ მომავალში ბუბასწყლის და ჭანჭახის ხეობაში კვლავ განვითარდეს კატასტროფული მოვლენა, რომელიც შეიძლება გამოწვეული იყოს ამჟამინდელისაგან განსხვავებული ბუნებრივი მექანიზმის მოქმედებით. გარდა ამისა, გასული საუკუნის 60-იანი წლების შემდეგ მცინვარ თბილისას მახასიათებელი პარამეტრების სავარაუდო რაოდენობრივ ცვლილებაზე გარკვეულ წარმოდგენას იძლევა ცხრილი, რომელიც ასახავს ჯანკუათის პარამეტრების რაოდენობრივ ცვლილებას დროის აღნიშნულ პერიოდში.

სხვადასხვა პერიოდში ჯანკუათის მცინვარის გეომეტრიული პარამეტრები

წელი	ყინულის სისქე, მ (საშუალო/მაქსიმალური)	ფართობი კმ ²	ყინულის მოცულობა კმ ³
1968–1974	54/110	–	0,132
1996	42	2,99	0,106
2006	48	2,688	0,12
2012–2013	31/105*	2,448	0,077±0,002
მოდელი GlabTop, 2009	32,8/103*	2,448	0,081±0,02

*ჯანტუგანსკის პლატოს იმ ნაწილის გარეშე, საიდანაც ხდება მცინვარზე ყინულის შემოდინება

ჯანკუათის მცინვარზე ყინულის მოცულობის განაწილება სიმაღლის ზონების მიხედვით ნაჩვენებია ნახ. 1-ზე. ძირითადი ყინულის რესურსები კონცენტრირებულია კვების ზონაში 3200–3500 მ სიმაღლეზე. ენის ქვედა ნაწილში არსებული ყინულის მოცულობა მნიშვნელოვნად ნაკლებია. ორივე მრუდი იცვლება სინქრონულად, გარდა სიმაღლის ინტერვალისა 2900–3100 მ. ენის ზედა ნაწილში, 2900–3000 მ სიმაღლეზე, ყინულის მოცულობა მკვეთრად იზრდება, რადგან სწორედ იქ არის ყველაზე დიდი ყინულის სისქის მქონე მცინვარის ნაწილი. 3000-3100 მ სიმაღლეზე მცინვარის ფართობის ზრდის ფონზე მოცულობის შემცირება (მითითებულია ისრით) აიხსნება ყინულის შემცირებული სისქის მქონე ყინულცვენის არეების ფართო გავრცელებით [3].



ნახ.1. ჯანკუათის მყინვარის 100 მეტრიანი სიმაღლის ყინულის ზონების ფართობი (1) და მათში ყინულის მოცულობა (2) [3]

ძალზედ მნიშვნელოვანი და საინტერესო პრობლემაა ღვარცოფის ჩამოყალიბებისათვის საჭირო წყლის რაოდენობის შეფასება და მისი დაგროვების შესაძლო მექანიზმების განხილვა. ჩვენი შეფასებით 1.5 მილიონი კუბური მეტრი ღვარცოფული მასის ჩამოყალიბებისათვის, სავარაუდოდ რა მოცულობის ღვარცოფული მასაც წარმოიქმნა შოვის კატასტროფის დროს, დაახლოებით 0.5 მილიონი კუბური მეტრი წყალია საჭირო. კატასტროფის დაწყებისას დაახლოებით 10^6 მ³ კლდეზვავის პოტენციური ენერჯის უბეში შეფასებით შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ მას დაცემის და ჩამოსრიალების პროცესში შეუძლია საჭირო რაოდენობის წყლის წარმოქმნა, თუ მყინვარის კლდეზვავთან კონტაქტში მოსული მყინვარის ზედაპირი 0°C დნობის ტემპერატურასთან არის მისული. თუმცა, ამ შემთხვევაშიც, მხოლოდ წყალის რაოდენობა არაა საკმარისი, საჭიროა ღვარცოფის ჩამოყალიბება, რასაც გარკვეული დრო სჭირდება. ეს დრო კლდეზვავის ჩამოსვლასა და ღვარცოფის დამგრას შორის არ ჩანს. ხოლო იმ შემთხვევაში, თუ მყინვარის კლდეზვავთან კონტაქტში მოსული ზედაპირი -5°C ტემპერატურისაა, კლდეზვავის პოტენციური ენერჯია შესაბამისი მოცულობის ყინულის 0°C ტემპერატურამდე მიყვანისთვისაც კი არაა საკმარისი. როგორც ჩანს მორენებთან და მყინვარის სხეულში გარკვეული რაოდენობის წყალი უკვე იყო, ე.ი. გვექონდა წყლით გაჟღენთილი ინერტული მასა. მას კიდევ დაემატა გარკვეული რაოდენობის წყალი, აგრეთვე ინერტული მასაც და მოხდა პროცესის ტრიგერირება. ამის შემდეგ იწყება ღვარცოფული მასის მოძრაობა. ამიტომ, ნაშრომში დასმული ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მოძრაობის მათემატიკური მოდელირება, რომელიც საკმაოდ კარგადაა დამუშავებული სხვადასხვა ტიპის ღვარცოფებისათვის.

გლაციოლოგიური ღვარცოფის რეოლოგია. იდეალურ სითხეში სიბლანტის ეფექტი არ ვლინდება, ანუ ასეთი მხები ძაბვები სითხის შიგნით ან მყარ ზედაპირთან კონტაქტის არეში არ ვითარდებიან. მათემატიკურად ეს ნიშნავს, რომ დამაბულობის ტენზორის მდგე-

ნელები $\tau_{ij} = 0$ ($i \neq j$). იდეალური სითხისაგან განსხვავებით, რეალურ სითხეებში მხები ძაბვები არსებობენ, თუმცა მათი ხასიათი დამოკიდებულია რეოლოგიაზე, სპეციფიკურ მახასიათებელზე, რომელიც განსაზღვრავს სითხის დინების ხასიათს. ცნობილია, რომ რეოლოგიური მაჩვენებლის მიხედვით რეალური სითხეები იყოფიან ორ კლასად; ნიუტონურ და არანიუტონურ (ე.წ. ბინგამის) სითხეებად. მაგალითად, წყალი წარმოადგენს ბლანტ სითხეს, რომელიც მოძრაობის დროს ემორჩილება ნიუტონის ბლანტი ხახუნის კანონს. ასეთი გარემოსათვის სამართლიანია განტოლება: $\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)$, სადაც μ – დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი, $\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)$ – სიჩქარის წარმოებული სითხის მოძრაობის პერპენდიკულარული მიმართულებით. თუ შემოვიტანთ ვერტიკალური დეფორმაციის ხაზოვან ზომას ξ , ეს პარამეტრი შეიძლება შეიცვალოს დეფორმაციის სიჩქარით: $\beta = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)$.

არანიუტონური სითხისათვის დამახასიათებელია მის ფენებს შორის საწყისი მხები ძაბვის არსებობა: $\tau_0 \neq 0$. ასეთი სითხეების კლასი საკმაოდ მრავალფეროვანია. მათ შორის გლაციოლოგიურ-ღვარცოფულ ნაკადს რეოლოგიური თვისებებით ყველაზე უფრო უახლოვდება ე.წ. ბლანტი პლასტიკური (ან ფსევდოპლასტიკური) სითხე. მას გააჩნია საწყისი მხები ძაბვა და ახასიათებს ლოკალური (ეფექტური) სიბლანტის შემცირების ტენდენცია დეფორმაციის სიჩქარის ზრდის შემთხვევაში. ასეთი სითხისათვის დამახასიათებელია $\tau = f(\beta)$ ფუნქციონალური დამოკიდებულების ხასიათის ცვლილება β პარამეტრის ზრდის დროს, საწყის მონაკვეთზე არაწრფივიდან კარგად გამოხატული წრფივისაკენ, რითაც ის ემსგავსება ნიუტონურ სითხეს. ასეთ შემთხვევაში სამართლიანია შემდეგი განტოლება

$$\tau = \tau_0 + \eta \beta, \quad (4)$$

სადაც η წარმოადგენს ე.წ. პლასტიკურ სიბლანტეს, რომელიც ზღვარში, როცა დეფორმაციის სიჩქარე იზრდება, გადადის დინამიკურ სიბლანტეში.

შოვის ღვარცოფული ნაკადის რეოლოგიური თავისებურებები. მცინვარების დნობით გამოწვეული გლაციოლოგიურ-მეწყერული ღვარცოფი განიხილება, როგორც გაწყლოვანებული ბლანტი მყარი მასა, რომლის მოძრაობა მთიან ხეობაში და გაშლილ ადგილზე ემორჩილება ჰიდროდინამიკის ფუნდამენტალურ კანონებს. საზოგადოდ, პრაქტიკულად ნებისმიერი მეწყერული ნაკადი, გარკვეულ პირობებში მოძრაობის პროცესში, იცვლის რეოლოგიას და იძენს ე.წ. ბინგამის (ფსევდოპლასტიკური ან ბლანტპლასტიკური) სითხის თვისებებს. ამიტომ, მცინვარული წარმოშობის მქონე ღვარცოფის სრულფასოვანი დინამიკური სურათის ჩამოყალიბებისათვის აუცილებელია მისი რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილების ეფექტის გათვალისწინება. კერძოდ, ბლანტპლასტიკურ სითხესთან ანალოგიიდან გამომდინარე, გლაციოლოგიურ-ღვარცოფულ მასას გააჩნია უნარი მოძრაობის პროცესში მოიქცეს ისე, როგორც ჩვეულებრივი სითხე, ან გამოავლინოს ბლანტპლასტიკური სითხის თვისებები. მაგალითად, მას გააჩნია უნარი ზედაპირზე დამუხრუჭების შემთხვევაში (უძრაობის მდგომარეობა) შეინარჩუნოს სივრცული სტრუქტურა იმ მომენტამდე, სანამ გარეგანი ფაქტორის გამო (მაგალითად, ზედაპირის ჰორიზონტისადმი დახრილობის კუთხის გაზრდა), მყარი მეწყერული მასის ამძრავი ძალა საკმარისი გახდება ზედაპირული ხახუნის დამაბულობის (ე.წ. ძვრის დამაბულობა) დასაძლევად.

საზოგადოდ, მთის მდინარეების კალაპოტებში და ველების ფერდებზე მეწყერული მასის გადატანის პროცესის თეორიული მოდელირება მოიცავს ორ ასპექტს: მეწყერის გამომ-

წვევი მიზეზების მორფოლოგიურ ანალიზს და მეწყერის მოძრაობის დინამიკური მახასიათებლების განსაზღვრას. ასეთი სქემა უნივერსალურია და საყოველთაოდ გამოიყენება მრავალრიცხოვან პუბლიკაციებში. კერძოდ, ცნობილია ფიზიკურ-გეოგრაფიულ-გეოლოგიური მახასიათებლების საფუძველზე აგებული სხვადასხვა რეგიონში, განსხვავებულ დროსა და ადგილზე მომხდარი მყინვარული ღვარცოფების ფიზიკური და მათემატიკური მოდელები, რომლებსაც ჰიდროდინამიკური მსგავსების ბევრი ელემენტი აერთიანებს. თუმცა, სიმულაციური მოდელირება, კვლევის თანამედროვე ეტაპზე, იძლევა მხოლოდ მეწყერული პროცესების ცალკეულ ფაზებს შორის ემპირიული კავშირების გამოვლენის საშუალებას, რის გამო მისი შესაძლებლობები კატასტროფული მოვლენების პროგნოზის პრობლემის თვალსაზრისით შეზღუდულია. ეს არ ნიშნავს რომ, მაგალითად, კოლკას მყინვარიდან წამოსული გრანდიოზული გლაციოლოგიური ღვარცოფის მოდელირების შედეგები სასარგებლო არ იქნება შოვის კატასტროფის ჰიდროდინამიკური პარამეტრების განსაზღვრისათვის. რიცხვითი მოდელი [6] გარკვეულწილად უნივერსალური ხასიათისაა, რადგანაც თემატურად ეხება ბლანტი სითხის ნაკადების მთის მდინარეთა კალაპოტებში მოძრაობის ზოგად პრობლემას. ამ მოდელის საშუალებით კიდევ უფრო დაზუსტდა კარმადონისა და გერალდონის ხეობებში ღვარცოფის დინების პარამეტრები და ერთიანი ჰიდროდინამიკური სურათი. ამ შედეგების ზოგიერთი ნაწილის ექსტრაპოლაცია შოვის ხეობაზე ფიზიკურად დასაშვებია განსაკუთრებით აქტიურად მოქმედი ნეგატიური ფაქტორის გამოვლენის მიზნით, რაც სასარგებლო იქნება სტიქიის შედეგების სრულფასოვანი ანალიზის შემთხვევაში. მაგალითად, როგორც სჩანს, შოვის ხეობაში, გერალდონის ხეობის მსგავსად, ღვარცოფის დინამიკას ძირითადად განსაზღვრავდა მდინარის კალაპოტის სტოქასტური ცვლილება. რიცხვითი მოდელირების სქემაში გათვალისწინებული იყო სწორედ ასეთი ეფექტის წვლილი, შემდეგი ფაქტორების წვლილთან ერთად:

- წყლის ნაკადებისა და მდინარის კალაპოტში ეროზიული შეჭრების აქტიურობა, დაკავშირებული ადრეულ პერიოდებში და ახლო წარსულში მომხდარ წყალმოვარდნებთან;
- მდინარის მყარი ჩამონატანის აქტიურობა, რაც დამოკიდებულია გეოლოგიურ აგებულებაზე, ქანების გეოფიზიკურ თვისებებზე და წყლის ნაკადის აქტიურობაზე;
- ღვარცოფული ნაკადის ტურბულენტური მახასიათებლების ცვალებადობა ხეობის ფერდების ზედაპირული და სიღრმული ეროზიის გამო;
- მდინარის კალაპოტის ხაოიანობის ეფექტი, მისი დახრა ჰორიზონტის მიმართ და დინების ჰიდრაულიკური რადიუსი;
- კლიმატური ფაქტორები.

ზოგადად, ყველა ეს ფაქტორი გარკვეულ გავლენას უნდა ახდენდეს ღვარცოფის დინამიკურ მახასიათებლებზე. ამიტომ, ცალკეული მათგანის ეფექტურობა და მათი მოქმედების ჯამური შედეგი შოვის კატასტროფის პროცესში აუცილებლად უნდა გახდეს მაქსიმალურად ზუსტი შეფასების საგანი. თუ რამდენად თანაბარძალოვანი იყო ცალკეული უარყოფითი ეფექტის მოქმედება, შეიძლება დადგინდეს მხოლოდ შოვის ხეობის პოსტ-ფაქტუმ დეტალური შესწავლის შემდეგ, შოვის ხეობის რეტრომონაცემებთან შედარებით ანალიზის გზით. სავარაუდოდ, ამას უნდა დაემატოს ახალი მონაცემები, მიღებული როგორც კოსმოსიდან, ასევე მოპოვებული მყინვარ თბილისაზე ექსპედიციის შედეგად.

კოლკას მყინვარზე მომხდარი გიგანტური კატასტროფის ზოგიერთი შედეგი და რიცხვითი მოდელირების ფიზიკური საფუძველი. 2002 წლის შემდეგ ჩატარებული ექსპედიცი-

ების მასალების გეოლოგიურ-გეოფიზიკური ანალიზის შემდეგ დადგინდა, გლაციოლო-გიურ-მეწყერული ნაკადს კოლკას მცინვარიდან კარმადონის ხეობამდე, ე.ი. გავრცელების პირველ მონაკვეთზე ახასიათებდა შემდეგი პარამეტრები: მანძილი 14 კმ, რომელიც ცინულოვანმა მასამ გაიარა 240 წამში; ნაკადის სიგანე 400-500 მ; ტალღების სიმაღლე 100-150; $\alpha \approx 14.5^\circ$; მცინვარს მოწყვეტილი ცინულის მოცულობამ შეადგინა $Q \approx 1.15 \cdot 10^8 \text{ მ}^3$ [7,8]. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით, აგრეთვე ცინულოვანი ღვარცოფის მახასიათებელი გეოფიზიკური პარამეტრების გამოყენებით, კარმადონისა და მდინარე გერალდონის ხეობებში ცინულოვანი ღვარცოფის მოძრაობის რიცხვითი მოდელირებისათვის შერჩეული იყო საწყისი პარამეტრები. კერძოდ, განისაზღვრა მეწყერული ნაკადის სიჩქარის ინტერვალი: $/37-80/ \text{ მწმ}^{-1}$ და საშუალო სიჩქარე: $V = 60 \text{ მწმ}^{-1}$, აგრეთვე მახასიათებელი დრო ცინულოვანი ღვარცოფის კარმადონის ხეობაში შემოსვლამდე $t \approx 260 \text{ წმ}$. ამ ხეობაში და მის გაგრძელებაზე, მდინარე გიზელდონის ხეობაში, ჯამში ჩამოვიდა $\approx 4 \cdot 10^6 \text{ მ}^3$ მოცულობის მასა, ხოლო ცინულოვან-ღვარცოფული ტალღის მაქსიმალურმა სიმაღლემ შეადგინა $\approx 30 \text{ მ}$. ორივე ხეობა ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მაჩვენებლით, ჰორიზონტისადმი დახრის კუთხის სიდიდით: $\alpha \approx 5^\circ$, აგრეთვე ოროგრაფიული მახასიათებლებით, შოვის ხეობის მსგავსია, რის გამო დასაშვებია, რომ აქ განვითარებული კატასტროფული მოვლენების შედეგებს შორის არსებობს გარკვეული თვისობრივ-რაოდენობრივი ანალოგია.

მეწყერულ მასას მისი წარმოქმნის მომენტში გააჩნია ენერგიის უზარმაზარი მარაგი, რომელიც ნაწილობრივ იხარჯება ხეობაში ან ზეგანზე მოძრაობის დროს. თუ ზედაპირის დაქანება საკმაოდ დიდია, ღვარცოფის სიჩქარე მატულობს და მოძრავი უწყვეტი ტანის კინეტიკური ენერგია იზრდება. ამ დროს, განვითარებული აქტიური ტურბულენტობის გამო, მცინვარული წყლის, ცინულის, ქვის ლოდებისა და მყარი ქანების უფრო წვრილი ფრაქციების ნაზავი შეიძლება განხილოთ, როგორც პრაქტიკულად ერთგვაროვანი მასა. მდინარე გერალდონის ხეობა, რომელიც კარმადონის ხეობიდან გამოსვლის შემდეგ პრაქტიკულად მთლიანად დაფარა ცინულოვან-კლდოვანმა მასამ, ტოპოლოგიურად შოვის ხეობის მსგავსია. აქაც კანიონის სიგანე რამდენიმე ათეულჯერ ნაკლებია მის სიგრძეზე. ეს პირობა ღვარცოფული მასის მოძრაობის მათემატიკური მოდელირების დროს დასაშვებად ხდის ერთგანზომილებიანი ჰიდროდინამიკური ნაკადის მიახლოებას, რომელსაც შეესაბამება ნავიე-სტოქსის განტოლებათა შემდეგი სისტემა მოძრავი უწყვეტი ტანის იმპულსისა და სიმკვრივისათვის [9]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + F, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + S + G \quad (6)$$

სადაც $-F = w g \rho \sin \alpha$, x , t – სივრცული და დროითი კოორდინატებია, $0 \leq x \leq L$, $t \geq 0$; L – მეწყერული ღვარცოფის მახასიათებელი სიგრძე, $u = u(x, t)$ – სიჩქარე; $\rho = \rho(x, t)$ – მყარი ნაკადის პირობითი სიმკვრივე, ანუ, ცინულოვანი ღვარცოფის შემთხვევაში, ერთიანი ხვედრითი მასა, წყლის, ცინულისა და მთის ქანების გამოყოფის გარეშე (მეორე განმარტებით: ცინულოვან-წყლიან-ქვიანი სვეტის მასის გრადიენტი ფართის ერთეულზე-ღვარცოფის წყარო); $\mu = \mu(x, t)$ – ნაკადის დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი; F – მასური ძალა; w – მასური ძალის მოქმედების მაკორექტირებელი კოეფიციენტი, რომლის სიდიდე ზოგადად განისაზღვრება ემპირიული კავშირების საფუძველზე; g – სიმძიმის ძალის აჩქარება; $\alpha = \alpha(x, t)$ –

ნაკადის მოძრაობის ზედაპირის ჰორიზონტთან დახრის კუთხე; $S = S(x, t)$, $G = G(x, t)$ – დამატებითი წყაროები და განადენები ღვარცოფული ნაკადის დინების ტრასაზე; D – პირობითი დიფუზიის ცვლადი კოეფიციენტი. პარამეტრები u და p ერთდროულად მონაწილეობენ განტოლებებში (5) და (6), ანუ ისინი ურთიერთდამოკიდებულები არიან, რაც გათვალისწინებული იყო რიცხვითი მოდელირების პროცესში. ამიტომ გამოყენებული იყო უკვე აპრობირებული მათემატიკური მიდგომა, სამართლიანი მთიან ფერდებზე ჩამონადენი ნაკადების მოძრაობასთან დაკავშირებული ეროზიული პროცესების ანალიზის დროს [10]. როგორც ზოგადად არის მიღებული, მოცემულ შემთხვევაშიც რიცხვითი მოდელირების ამოცანა მდგომარეობდა სიჩქარისა და სიმკვრივის ისეთი ველების განსაზღვრაში, რომელებიც აკმაყოფილებდნენ პირობას

$$|A_p - A_j| / A_p \leq \varepsilon \quad (7)$$

სადაც A_p , A_j – საძიებელი ცვლადი პარამეტრების გამოთვლილი და დამზერილი მნიშვნელობებია, ε – წინასწარ მოცემული ცთომილება. შესაბამისი სასაზღვრო პირობების დაცვით (5) და (6) განტოლებების რიცხვითი ამონახსნების მოსაძებნად გამოყენებული იყო სასრულო სხვაობების მეთოდი, უპირობოდ მდგრადი არაცხადი სქემით, რომლის მგრძობელობა შემავალი პარამეტრების მიმართ შემოწმდა სტანდარტული მეთოდით [6]. საზოგადოდ, ჰიდროდინამიკური მოძრაობის რიცხვითი მოდელირების სქემებში, მათი შესაძლებლობების წინასწარი შეფასებიდან გამომდინარე, ჩვეულებრივ შედის პარამეტრების შეზღუდული რაოდენობა. ამ თვალსაზრისით აშკარაა, რომ დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი წარმოადგენს ქვაკუთხედურ პარამეტრს, რომელთანაც დაკავშირებულია ღვარცოფული მასის ძვრადობა, რაც განსაზღვრავს ნაკადის დამამუხრუჭებელი ძალის სიდიდეს. ასევე, ამ ძალის ეფექტურობა დამოკიდებულია კალაპოტისა და მასში მოძრავი ნაკადის ჰიდროდინამიკურ მახასიათებლებზე, კერძოდ მყარი მასის გაწყლოვანების დონეზე. ბუნებრივია, რომ ეს ფაქტორები, რომლებიც მოქმედებდნენ კარმადონისა და გერალდონის ხეობებში, ატიურად მოქმედებდნენ აგრეთვე შოვის ხეობაშიც. ამიტომ, გერალდონის ხეობის მსგავსად, შოვის ხეობაშიც სამართლიანია ერთგანზომილებიანი მეწყერული ნაკადის მიახლოება. [6]-ის მთავარი შედეგი არის მსხვილმასშტაბოვანი სურათი, რომელიც, ჰიდროდინამიკური მსგავსების ფაქტორის გათვალისწინებით, საკმაოდ კარგ წარმოდგენას იძლევა შოვის კატასტროფის თანმდევ მოვლენებზე. მაგალითად, შოვშიც ადგილი ჰქონდა ღვარცოფულ ტალღებს, რომელთა სიმაღლე ერთგანზომილებიანი მოძრაობის მიახლოებაში შეიძლება უკავშირდებოდეს მნიშვნელოვან მახასიათებელ ზომას, ხეობის სიგანეს. ამისათვის წარმოვიდგინოთ ჰიდროტექნიკური არხი, რომლის კედლები ამუხრუჭებენ ცვლადი რეოლოგიის მქონე ნაკადს. ე.ი. არხის გასწვრივ იცვლება ნაკადის კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი, პარამეტრი, რომელიც განსაზღვრავს ჰიდროდინამიკური სასაზღვრო ფენის სისქეს არხის კედლებზე. ასეთი სტრუქტურა გავლენას სითხის არხში სითხის ნაკადის სიჩქარის პროფილზე, რომლის ფორმა დამოკიდებულია არხის სიგანეზე. თუ არხი საკმაოდ ვიწროა, ხოლო წნევის გრადიენტი საკმარისი, შესაძლებელია მოხდეს ნაკადის ლოკალური ტურბულიზაცია ისეთი მასშტაბით, რომ მოხდეს საკმაოდ მაღალი ტალღების გენერაცია. თუ ასეთ თვისობრივ სქემას მივიღებთ, ცხადი იქნება, რომ არხში გენერირებული სპონტანური ტალღების სიმაღლე დამოკიდებულია არხის სიგანეზე. ამრიგად, თუ ხეობასა და არხს შორის ფიზიკურ ანალოგიას დავუშვებთ, ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპიდან გამომდინარე, სხვადასხვა ხეობებში შესაძლო ტალღების სიმაღლეთა ფარ-

დობა ამ ხეობების განივი ზომების ფარდობის თანაზომადია. შოვის ხეობის მახასიათებელი ხაზოვანი ზომა ($h \approx 50$ მ) მინიმუმ ერთი რიგით ნაკლებია კარმადონის ხეობის მახასიათებელ განივი ზომაზე ($h \approx 500$ მ). შესაბამისად, თუ ტალღის სიმაღლე კარმადონის ხეობაში $h \approx 100$ მეტრს აღწევდა, სავარაუდოა, რომ შოვის ხეობის ვიწრო მონაკვეთში, ანუ კემპინგის ზონამდე, ღვარცოფული ტალღის მახასიათებელი სიმაღლე შესაძლოა ყოფილიყო $h \approx 10$ მეტრი.

შოვის გლაციოლოგიური ღვარცოფის დინამიკა. განტოლება (6) მოცემულია ისეთი ფორმით, რომელიც ითვალისწინებს ღვარცოფის თხევადი კომპონენტის დიფუზიას და მისი კალაპოტის გასწვრივ შენაკადებისა და ჩადინებების არსებობას. მარტივი წარმოდგენით, თხევადი კომპონენტი წყალია, თუმცა უფრო კორექტულია მისი გაიგივება ცვლადი სიმკვრივის მქონე რთულ ხსნართან, რომელშიც შეწონადებულია მცირე ზომის მყარი ნაწილაკები. ასეთი სუსპენზიის ძვრადობა წყალთან შედარებით უფრო დაბალი იქნება. იმ შემთხვევაში, როცა ღვარცოფული მასის ინერცია შემცირდება, მასში გააქტიურდება სუსპენზიის დიფუზიური პროცესი, რომელიც გამოიწვევს მყარი ნატანში გაწყლოვანების დონის ცვლილებას. კერძოდ, ღვარცოფული მასის ხეობის ზედაპირთან კონტაქტის არეში შეიძლება ჩამოყალიბდეს ჰიდროდინამიკური სასაზღვრო ფენა, რომელიც შეცვლის მყარი მასის ძვრადობის პირობას. ეს ნიშნავს, რომ სათანადო დაქანების შემთხვევაში პრაქტიკულად გაჩერებული ღვარცოფული მასა შეიძლება კვლავ ამოდრავდეს, რასაც ითვალისწინებს რიცხვითი მოდელირების სქემა პირობითი დიფუზიის ცვლადი კოეფიციენტით, გამოყენებული ნაშრომში [6]. სხვა შემთხვევაში, სავარაუდოდ, ცვლადი დიფუზიის კოეფიციენტის გათვალისწინება რიცხვითი მოდელირების სქემაში მნიშვნელოვანი რაოდენობრივი ეფექტის მომცემი არ უნდა იყოს. თუმცა, საზოგადოდ, რიცხვითი სქემების უმრავლესობა საკმაოდ მგძნობიარეა პირობითი დიფუზიის კოეფიციენტის მსგავსი პარამეტრების ჩართვაზე, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მათემატიკური მოდელირების შედეგების ცდომილებაზე [11]. უნდა აღინიშნოს, რომ ღვარცოფული ნაკადის წყლით გაჯერებულობის არაერთგვაროვნება მარტივად შეიძლება ახსნილი იყოს მოძრაობის პროცესში მყარი მეწყერული მასის ფოროვნების მექანიკური ცვლილებითაც. არსებული მონაცემებით იქმნება შთაბეჭდილება, რომ ასეთ ეფექტს შესაძლებელია ადგილი ჰქონდა შოვის ხეობის ქვედა მონაკვეთში, ე.წ. კოტეჯების ზონაში. აქ მეწყერული მასის მოძრაობის ბოლო ეტაპზე, კინეტიკური ენერჯის დაკარგვისა და გაწყლოვანების დონის შემცირების გამო, დინება ლამინარული ხასიათის იყო. ამიტომ სავარაუდოა რომ, ლამინარულმა მასამ, რომელიც მეტ-ნაკლებად თანაბრად განაწილდა, საგრძნობლად შეცვალა ზედაპირის დახრის კუთხე. კერძოდ, შესაძლებელია, რომ მოხდა α -ს შემცირება საკმაოდ დიდ ფართზე, რაც მომავალში, მოსალოდნელი წყალდიდობების შემთხვევაში გაზრდის ამ არის მასშტაბური დატბორვის რისკს.

ანალოგია რიცხვითი მოდელირების ზოგიერთ შედეგთან. კოლკას მყინვარზე მომხდარი კატასტროფის არე იყოფა ორ ზონად, ყინულოვანი ღვარცოფის მნიშვნელოვნად განსხვავებული გეოფიზიკური და ჰიდროდინამიკური პარამეტრებით. ზედა ზონა, მყინვარიდან კარმადონის ხეობამდე, სიგრძით $L \approx 14$ კმ, ყინულოვანმა ზვავმა გაიარა 260 წამში. ქვედა ზონა, ანუ მდინარე გერალდონის ხეობა კარმადონის ხეობიდან სოფელ გიზელამდე სიგრძით $L \approx 17$ კმ ყინულოვანმა ღვარცოფმა განვლო 690 წამში. ამ ზონაში ყინულოვანი ღვარცოფის რიცხვითი მოდელირებისათვის გამოყენებული იყო საწყისი პარამეტრების

შემდეგი ნაკრები: $\mu = 8 \cdot 10^2$ პა.წმ, $D = 10^{-5}$ მ² წმ⁻¹, $G = 10^2$ კგმ⁻³ წმ⁻¹, $\alpha = 5^\circ$, $w = 0.011$, საწყისი სიჩქარე $u(0, t) = 20$ მწმ⁻¹. საწყისი 166 წამის განმავლობაში პირობითი სიმკვრივე $\rho(0, t) = 2.05 \cdot 10^5$ კგმ⁻³, ჩვეულებრივი სიმკვრივე $\rho = 1.510^3$ კგმ⁻³ და ტალღა საწყისი სიმაღლით $h \approx 30$ მ. პროცესის ბოლო ეტაპზე ტალღის სიმაღლე შემცირდა $h \approx 3-1/$ მეტრამდე, ანუ მიიღო სუსტი მეწყრული ტალღის ფორმა. ამ შედეგიდან გამომდინარე, საკმაოდ ცხადია შოვისა და გერალდონის ღვარცოფების ინტენსივობის მსგავსება ამ ხეობების ბოლო მონაკვეთზე. ასევე, რიცხვითი მოდელის თანახმად, გლაციოლოგიური ღვარცოფის ქვედა ზონაში ჩამოვიდა $Q \approx 4.10^6$ მ³ მოცულობის ქვა-ტალახის გაწყლოვანებული მასა. რიცხვითი მოდელით მიღებული ეს შედეგი კარგ თანხმობაშია სიდიდესთან $3-5/$ მ³, რომელიც დააფიქსირეს კატასტროფის თანადროულად [7]. უნდა აღინიშნოს, რომ ეს სიდიდე შოვის ხეობაში ჩამოსული ღვარცოფული მასის მოცულობის: $Q \approx 1.5 \cdot 10^6$ მ³, თანაზომადია. ეს ფაქტი დამატებითი არგუმენტია ორ თვისობრივად მსგავს კატასტროფულ მოვლენას შორის ფიზიკური ანალოგიის დაშვების სამართლიანობის სასარგებლოდ.

დასკვნა

მოცემული ნაშრომი გარკვეულწილად მოწმობს, რომ, ინსტრუმენტული და ნატურალური დაკვირვების მასალის ნაკლებობის მიუხედავად, არსებობს შოვის ტრაგედიის გამომწვევი მიზეზის, გლაციოლოგიური ღვარცოფის, ჰიდროდინამიკური სურათის წარმოდგენისა და მისი მახასიათებელი პარამეტრების ირიბად შეფასების შესაძლებლობა არსებული პუბლიკაციების შედეგების ანალიზის საშუალებით. ამიტომ, მოცემულ ნაშრომში დასმული ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა ღვარცოფის მოძრაობის მათემატიკური მოდელირება შოვის ხეობის შემთხვევაში, რომელსაც შეიძლება ჰქონდეს გარკვეული ინდივიდუალური მახასიათებლები.

მოსალოდნელია, რომ კავკასიის რეგიონში მდებარე მყინვარებზე კლიმატური ცვლილებების ეფექტის გავლენა თვისობრივად ერთნაირად უნდა აისახოს, რაც ნიშნავს, რომ სხვადასხვა გლაციოლოგიური კატასტროფების მსხვილმასშტაბოვანი სურათები თვისობრივად ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპმა უნდა გააერთიანოს. თუმცა არსებობს მოსაზრებები, რომ კოლკაზე და დევდორაკზე, 21-ე საუკუნეში მომხდარი კატასტროფების გამომწვევ მიზეზებს შორის შეიძლება ფიგურირებდეს ვულკანური აქტივობის უახლესი გამოვლინებები მყინვარწვერის სიღრმეში. მსგავსი დასკვნების გაკეთება არადაამაჯურებელია სათანადო მეცნიერული კვლევის გარეშე. ინფრაბგერა არის სასარგებლო ინსტრუმენტი ვულკანური პროცესების გამოვლენის, ადგილმდებარეობისა და დახასიათებისთვის, ასევე ვულკანური აქტივობის მონიტორინგისთვის როგორც ლოკალურ, ისე გლობალურ დისტანციებზე [13].

კლდეზავის მყინვარზე სავარაუდო დაცემით და მისი ნამსხვრევების მყინვარზე ჩამოსრიალებისას, ხახუნით მყინვარის დნობის შედეგად, 500 000 მ³ მოცულობის წყლის ძალზედ მცირე დროში წარმოქმნა ნაკლებად სავარაუდოა. დიდი ალბათობით, კატასტროფული პროცესის დაწყებამდე, წყლის დიდი ნაწილი უკვე აკუმულირებული იყო.

ნაშრომში წარმოდგენილია ჩვენთვის მაქსიმალურად სარწმუნო ინფორმაცია ამჟამად არსებული მონაცემების გათვალისწინებით. ვფიქრობთ, რომ აუცილებელია ექსპედიცია (ექსპედიციები) მყინვარ თბილისაზე და სხვა მყინვარებზე და ასევე აუცილებელია კავკასიის ქედის მუდმივი მონიტორინგი – როგორც სახმელეთო, ისე აეროკოსმოსური, რათა

უკეთესად შევისწავლოთ სხვადასხვა ბუნებრივი კატასტროფების გამომწვევი მიზეზები და მოვახერხოთ მათი შედეგების შერბილება.

ლიტერატურა – References – Литература

- [1] Епифанов В.П., Глазовский А.Ф., Осокин Н.И. Физическое моделирование контакта ледника с ложем. Лёд и Снег, № 1 (121), 2013, С. 43–52.
- [2] Roux P.-F., Marsan D., Metaxian J.-P., O'Brien G., Moreau L. Microseismic activity within a serac zone in an alpine glacier (Glacier d'Argentiere, Mont Blanc, France). Journ. of Glaciology. V. 54, № 184, 2008, pp. 157–168.
- [3] Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Петраков Д.А., Попов Г.А. Толщина, подледный рельеф и объем льда ледника Джанкуат. Лед и снег, № 4, 2014, с. 26–34.
- [4] Гигинеишвили Г.Н. Ледник Тбилиса. Монография, издательство «Мецნიერება», 1982, 116 с.
- [5] Hibert C., Mangeney A., Grandjean G., Baillard C., Rivet D., Shapiro N. M., Satriano C., Maggi A., Boissier P., Ferrazzini V., Crawford W. Automated identification, location, and volume estimation of rockfalls at Piton de la Fournaise volcano. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, pp. 1082-1105.
- [6] Буйских А.А. Россипеобразующие потоки и сели как вязкие потоки в речных долинах. Геология и геофизика, т.56, №12, 2015, с.2212-2221.
- [7] Поповин В.В., Вробышев В.Н., Алейников А.А., Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Изменения в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002-2010 гг. Криосфера земли, т.17, №1, 2013, с. 35-46.
- [8] Поповин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии. Криосфера Земли, т.7, №1, 2003, с.3-17.
- [9] Лыков А.В. Тепломассобмен. Справочник. М., Изд-во Энергия, 1978, 480 с.
- [10] Ларионов Г.А., Гендугов В.М., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях. Почвоведение, №3, 2008, с.330-337.
- [11] Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободно-конвективные течения, тепло и массообмен. Т.1, М., Мир, 1991, 678 с.
- [12] Асоян Д.С., Рототаева О.В. Девдоракский ледник, Казбек: к истории исследований природных катастроф в XIX и начале XXI в. Лёд и Снег, Т. 56, № 2, 2016, doi:10.15356/2076-6734-2016-2-253-264.
- [13] Watson L.M., Iezzi A.M. Volcano infrasound: progress and future directions. Bulletin of Volcanology, 202, 84: 44, <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01544-w>

შოვის (საქართველო) კატასტროფის შესაძლო გამომწვევი მიზეზები

კერესელიძე ზ., ვარამაშვილი ნ.

რეზიუმე

ნაშრომი დაკავშირებულია 2023 წლის 3 აგვისტოს შოვის კატასტროფულ ღვარცოფთან. გლაციალური ღვარცოფის ჩამოყალიბება მოხდა მყინვარ თბილისაზე. მყინვარზე განვითარებული მოვლენების რიგითობის დადგენა განსაკუთრებული მნიშვნელობის ამოცანას წარმოადგენს. საჭიროა მყინვართან არსებული წყლის რეზერვუარის მოცულობის შეფასება და ასევე ღვარცოფის გენეზისში მონაწილე წყლის წარმოშობის საკითხის შესწავლა. მყინვარის დინამიკის მოდელირების ამოცანის ერთ-ერთი საკვანძო ელემენტია ყინულის სისქის განსაზღვრა. განხილულია ღვარცოფული ნაკადის მოძრაობის მათემატი-

კური მოდელირების საკითხები. პრაქტიკულად ნებისმიერი მეწყერული ნაკადი, გარკვეულ პირობებში მოძრაობის პროცესში, იცვლის რეოლოგიას და იძენს ე.წ. ბინგამის (ფსევდოპლასტიკური ან ბლანტპლასტიკური) სითხის თვისებებს. კერძოდ, გლაციოლოგიურ-ღვარცოფულ მასას გააჩნია უნარი მოძრაობის პროცესში მოიქცეს ისე, როგორც ჩვეულებრივი სითხე, ან გამოავლინოს ბლანტპლასტიკური სითხის თვისებები. შეფასებულია შოვის ღვარცოფთან დაკავშირებული, საკმაოდ მწირი, სამეცნიერო მასალა. შოვის კატასტროფა შედარებულია კავკასიონის ქედზე მომხდარ სხვა მსგავს კატასტროფებთან.

საკვანძო სიტყვები: მყინვარები, შოვი, მეწყერი, გლაციალური ღვარცოფი, რეოლოგია.

POSSIBLE CAUSES OF SHOVI (GEORGIA) CATASTROPHE

Kereselidze Z., Varamashvili N.

Abstract

The paper is related to the August 3, 2023 Shovi (Georgia) Catastrophic debris-flow. Glacial landslides were formed on glacier Tbilisa. Determining the sequence of events on the glacier is a task of special importance. It is necessary to estimate the volume of the water reservoir by the glacier and also to study the issue of the origin of the water involved in the genesis of the Shovi debris-flow. One of the key elements in the task of modelling glacier dynamics is the determination of ice thickness. Issues of mathematical modeling of debris flow movement are discussed. Virtually any landslide flow, under certain conditions, changes its rheology and acquires the so-called Bingham (pseudoplastic or viscoplastic) fluid properties. In particular, the glaciological – debris-flow mass has the ability to behave like a normal fluid in the process of movement, or to exhibit the properties of a viscoplastic fluid. The rather scarce scientific material related to the Shovi debris-flow has been evaluated. The Shovi disaster has been compared to other similar disasters on the Caucasus Range.

Key words: glaciers, Shovi, landslide, glacial debris-flow, rheology.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ КАТАСТРОФЫ В ШОВИ (ГРУЗИЯ)

Кереселидзе З., Варамашвили Н.

Реферат

Статья посвящена катастрофическому селю в Шови (Грузия) 3 августа 2023 года. Ледниковый оползень образовался на леднике Тбилиса. Определение последовательности событий на леднике представляет собой задачу особой важности. Необходимо оценить объем воды у ледника, а также изучить вопрос происхождения воды, участвующей в генезисе сели Шови. Одним из ключевых элементов задачи моделирования динамики ледников является определение толщины льда. Обсуждаются вопросы математического моделирования движения селей. Практически любой оползневой поток при определенных условиях меняет свою реологию и приобретает свойства так называемой бингамовской (псевдопластичной или вязкопластической) жидкости. В частности, гляциолого-селевая масса обладает способностью вести себя в процессе движения как обычная жидкость или проявлять свойства вязкопластической жидкости. Был оценен достаточно скудный научный материал, связанный с селем в Шови. Катастрофа в Шови сравнивается с другими подобными катастрофами на Кавказском хребте.

Ключевые слова: ледники, Шови, оползни, ледниковые сели, реология.