

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი იოზიძე

ბექთაყარი-ბნელი ხევის მადნიანი კვანძის სტრუქტურულ-
გეოლოგიური პოზიცია და ფორმირების კანონზომიერებები

სადოქტორო პროგრამა გეოლოგია

შიფრი 0532.1.3

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამთო-გეოლოგიური და მთის მდგრადი განვითარების ფაკულტეტი
გამოყენებითი გეოლოგიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელები: პროფესორი დ. ბლუაშვილი

ასოც. პროფესორი (ა) თ. ლიპარტია

რეცენზენტები: *გმმკ ა. კვიციანი*

პროფ. ზ. ლაომეილი

დაცვა შედგება 2026 წლის „*7 ივლისს, 15:00*__ საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური და მთის მდგრადი
განვითარების ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე,

კორპუსი *III*, აუდიტორია *437*_____

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას №77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სწავლული მდივანი,

პროფესორი

დ. თევზაძე

შესავალი

ნაშრომის აქტუალურობა:

სახელმწიფოს ეკონომიკური განვითარების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ინდიკატორად მინერალური რესურსების, განსაკუთრებით ფერადი და კეთილშობილი მეტალების მოპოვება და მათი ეფექტური რეალიზაცია მიიჩნევა. რაციონალურ სოციალურ-ეკონომიკურ განვითარებას კი მნიშვნელოვნად განაპირობებს ადგილობრივი რესურსების პროდუქტიული გამოყენება. ოქროს მოპოვება საქართველოს ინდუსტრიის ერთ-ერთი ტრადიციული და მნიშვნელოვანი დარგია, რომელსაც განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ქვეყნის ეკონომიკის განვითარებისათვის.

ცხადია, ასეთ პირობებში, საქართველოს რესურსების, მათ შორის, ოქროს სამრეწველო პოტენციალის რაციონალური გამოყენების მიმართულებების დასახვა მეტად აქტუალური პრობლემაა, რომლის გადაჭრას დიდი სოციალურ-ეკონომიკური მნიშვნელობა აქვს როგორც ცალკეული რეგიონის, ასევე ქვეყნისათვის.

დისერტაცია აქტუალურია, რადგანაც გარდა ფუნდამენტური მეცნიერული ამოცანებისა, იგი მიზნად ისახავს თანამედროვე ტექნოლოგიების და ტრადიციული გეოლოგიური მეთოდების გამოყენებით გამოყოს დღემდე უცნობი სტრუქტურები და ჰიდროთერმულად შეცვლილი უბნები, რომლებიც ხელსაყრელია ოქროს მადანგამოვლინებებისათვის, ეს კი ხელს შეუწყობს რეგიონში ახალი საბადოების აღმოჩენას, რაც თავისთავად მოიცავს სამთომადნო მრეწველობის განვითარებას. ამ პროცესს თან ახლავს შრომითი რესურსების დასაქმების, ინფრასტრუქტურის გაუმჯობესებისა და ქვეყნის ეკონომიკური განვითარებისთვის დამატებითი შესაძლებლობების შექმნა, რაც კიდევ უფრო ამყარებს დისერტაციის კვლევითი საკითხის აქტუალურობას.

კვლევის მიზანი და ამოცანები:

სადისერტაციო კვლევის ძირითად მიზანს წარმოადგენდა ბექთაკარი-ბნელი ხევის მადნიანი კვანძის სტრუქტურულ-გეოლოგიური თავისებურებების გამოვლენა და შესწავლა დისტანციური ზონდირების, პეტროლოგიური, გეოქიმიური, გეოსტატისტიკური და კომპოზიციური ანალიზის თანამედროვე მეთოდების გამოყენებით.

დისტანციური ზონდირების შედეგად მიღებული მონაცემები ფართოდ გამოყენება გეოლოგიის სხვადასხვა მიმართულებაში, განსაკუთრებით კი მინერალური რესურსების ძიების პროცესში. აღნიშნული მეთოდი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ლითოლოგიური თავისებურებების იდენტიფიცირებაში, მინერალური ინდექსებისა და ინდიკატორების გამოვლენაში, სტრუქტურული ელემენტების დად-გენაში და ჰიდროთერმულად შეცვლილი უბნების გამოვლენაში.

ჰიდროთერმული სისტემების ანალიზმა, რომელიც გეოქიმიური და გეოსტატისტიკური მიდგომების საფუძველზე განხორციელდა, წარმოაჩინა მინერალიზაციის პროცესების კომპლექსურობა, რომელიც განპირობებულია ტექტონიკური, მაგმური და ჰიდროთერმული ფაქტორების ურთიერთქმედებით. მიღებული მონაცემებისა და გამოყენებული მეთოდების კომბინაცია ხელს უწყობს საძიებო გეოლოგიური კვლევების ეფექტიანობას, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს საბადოების ლოკალიზაციის დროში გაწელვას და უზრუნველყოფს მათ ოპერატიულ იდენტიფიცირებას.

კვლევის ერთ-ერთ მთავარ ამოცანას წარმოადგენდა ბექთაქარი-ბნელი ხევის მადნიანი კვანძის გეოდინამიკური რეჟიმის დადგენა და სტრუქტურულ-ტექტონიკური თავისებურებების განსაზღვრა, რაც საშუალებას იძლევა ერთ მნიშვნელოვნად და საფუძვლიანად აღვწეროთ მადნიანი კვანძის ფორმირების ევოლუცია და გენე-ზისი.

მეცნიერული სიახლე და გამოყენების სფერო:

წინამდებარე ნაშრომის ინოვაციურობა მდგომარეობს იმაში, რომ კვლევის ფარგლებში პირველად განხორციელდა ბექთაქარი-ბნელი ხევის რეგიონში დისტანციური ზონდირების მეთოდის გამოყენებით კომპლექსური გეოლოგიური ანალიზი. აღნიშნული მეთოდი მნიშვნელოვნად ამცირებს საძიებო სამუშაოების ფინანსურ დანახარჯს და ზრდის მათ ეფექტურობასა და მონაცემთა სანდოობას, რაც დიდ მნიშვნელობას ანიჭებს მის გამოყენებას მინერალური რესურსების ძებნას და ძიების დროს.

ნაშრომის გამოყენებითი ღირებულება ვლინდება იმაში, რომ დისტანციური ზონდირება სასარგებლო წიაღისეულის საბადოების პირველად გამოვლენაში წარმოადგენს მაღალრენტაბელურ და ტექნოლოგიურად თანამედროვე მიდგომას, რო-

მელიც გამოკვეთილად ამცირებს საძიებო პროცესის ხანგრძლივობას და მომხმარებელს შესაძლებელ შედეგამდე მისვლის ოპტიმალურ გზას სთავაზობს.

ნაშრომში დეტალურადაა განხილული დისტანციური ზონდირების მეთოდოლოგიის სრული სპექტრი. მონაცემთა დეშიფრირება განხორციელდა ASTER-ის ტექნიკური სპეციფიკაციების მიხედვით, რომლებიც ეფუძნება საერთაშორისო სტანდარტით დადგენილ აპრობირებულ მეთოდებსა და ციფრულ ტექნოლოგიებს.

ჩვენი კვლევის ერთერთი ინოვაცია მდგომარეობს იმაში, რომ გეოსტატისტიკური და კომპოზიციური ანალიზის ტექნოლოგიები ინტეგრირებულია ტრადიციულ გეოლოგიურ მეთოდებთან. აღნიშნული მიდგომა კი მნიშვნელოვნად ზრდის საძიებო სამუშაოების ეფექტიანობასა და შედეგების სიზუსტეს. გეოლოგებს შეუძლიათ უფრო შედეგიანად და ოპტიმალურად წარმართონ საძიებო კვლევები, რაც საბოლოოდ გამოიწვევს საბადოების აღმოჩენებს უმოკლეს დროში

ჩატარებულმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა გაგვენახა ზღვრა ბექთაკარი-ბნელი ხევის მადნიანი კვანძის სტრუქტურულ-გეოლოგიური პოზიცია და ფორმირების კანონზომიერებები, რამაც მეტალოგენური თვალსაზრისით რეგიონის სრულიად ახალი პერსპექტივები წარმოაჩინა.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა:

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს შესავლს, 6 თავს, 8 ქვეთავს, დასკვნებსა და გამოყენებული ლიტერატურის სიას. ლიტერატურის სიაში მითითებულია 134 დასახელების ნაშრომი ქართულ, ინგლისურ და რუსულ ენებზე. ნაშრომის საერთო მოცულობა შეადგენს 152 ნაბეჭდ გვერდს და ახლავს 5 ცხრილი, 4 ნახაზი, და 56 ფოტოსურათი.

ნაშრომის მოკლე შინაარსი

თავი 1. მოცემულია ლიტერატურული მიმოხილვა. ბოლნისის მადნიანი რაიონის მინერალური ნედლეულის შესწავლის და გამოყენების ისტორიის მნიშვნელოვანი ეტაპებია გასული საუკუნის ორმოცდაათიანი-სამოციანი წლები, ეს პერიოდი დღემდე არ დასრულებულა, თუმცა დროის მცირე ინტერვალით შეწყვეტილი იქნა გასული საუკუნის ოთხმოცდაათიანი წლების ცნობილი პოლიტიკური და სოციალური მოვლენების გამო. აღნიშნული პერიოდის განმავლობაში გეოლოგიურ საძიებო სამუშაოებს აწარმოებდნენ „საქგეოლოგიის“ (შემდგომში გეოლოგიის სახელ-მწიფო დეპარტამენტი) ქვედანაყოფები, ტრესტი საქნახშირძიება; ყოფილი საბჭოთა კავშირის ფერადი მეტალურგიის და გეოლოგიის სამინისტროების, აგრეთვე მეცნიერებათა აკადემიის ორგანიზაციები - კავკასიის მინერალური ნედლეულის ინსტიტუტი (КИМС), ცენტრალური სამეცნიერო-კვლევითი გეოლოგიურ-საძიებო ინსტიტუტი (ЦНИГРИ), აეროგეოლოგია, იშვიათი მეტალების, მინერალოგიის, გეოქიმიის ინსტიტუტი (ИМГРЭ), სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტები: Гинал-маззолото, Рудгеофизика, Механобр, საპროექტო ინსტიტუტები: Грузгпрошахт, Кавказгипроц-ветмет, ВНИПИ-горцветмет, Унипромедь, აღ.ჯანელიძის სახელობის გეოლოგიის ინსტიტუტი, საქართველოს სამთო მექანიკის ინსტიტუტი, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტი და სხვა. აღნიშნული ორგანიზაციების სამუშაოების შედეგები მოყვანილია უამრავ ნაშრომებში. საბჭოთა პერიოდში, ბოლნისის მადნიანი რაიონის რიგ ობიექტებზე (მადნეული, დამბლუდი, დავით-გარეჯი, საყდრისი, წითელი სოფელი, ქვემო ბოლნისი) გამოთვლილი იქნა კეთილშობილი და ფერადი მეტალების რესურსები და მარაგები. უმეტესი მათგანი განხილულია სსრკ-ს მარაგების სახელმწიფო კომისიის მიერ (დავით-გარეჯი, მადნეული, დამბლუდი). დღეისათვის იმ პერიოდის მარაგები/რესურსები გადაფასებულია საბაზრო ეკონომიკის პირობების და სამთო მრეწ-ელობის მოთხოვნებიდან გამომდინარე.

2011-2025 წლებში შპს "კავკასიის სამთო ჯგუფი"-ს (CMG) მიერ ბოლნისის მადნიან რაიონში დაძიებული იქნა ბექთაკარის და ბნელიხევის ოქრო-პოლიმეტალური, მუშევანი 2-ის ოქრო-სპილენძის საბადოები; გეოლოგიურ-ძიებითი სამუშაოები ჩატარდა აგრეთვე კაზრეთის (დავით-გარეჯის) ოქრო-პოლიმეტალურ

მადნებზე, დარბაზის, მუშევანი 3-ის, ზვარეთის, შიხილო-სამღერეთის ოქრო-მცირესულფიდურ ობიექტებზე. ბექთაკარის საბადოს ოქრო-პოლიმეტალური მადნების მარაგები დამტკიცდა საქართველოს მსკ 27.05.2016 წელს (ოქმი№51), ხოლო მოპოვება დაიწყო 2019 წლის აგვისტოში მიწისქვეშა-მადაროს წესით; ბნელიხევის საბადოს მარაგები კი დამტკიცებული იქნა საქართველოს მსკ-ზე 23.12.-2016 წ. (ოქმი N56);

თავი 2. გადმოცემულია საკვლევი რაიონის ზოგადი გეოლოგიური დახასიათება. ბოლნისის მადნიანი რაიონი განთავსებულია ართვინ-ბოლნისის სტრუქტურის ფარგლებში, რომელიც წარმოადგენს მცირე კავკასიონის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილს. სამხრეთიდან იგი შემოფარგლულია ბაიბურთ-ყარაბაღის ქერცლოვანი სტრუქტურით, ხოლო ჩრდილოეთიდან აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-რღვევითი ზონით აღნიშნული ტექტონიკური ერთეულები ქმნიან იურულ-ეოცენურ ვულკანურ კუნძულთა რკალურ კომპლექსს, რომელიც წარმოიშვა ევრაზიის ფილის სამხრეთ საზღვარზე ოკეანე თეტისის ლითოსფეროს სუბდუქციის და შემდგომში ანატოლია-ირანის ფილასთან კოლიზიის შედეგად. არსებული მონაცემების მიხედვით (Yilmaz A., 2001.) აჭარა-თრიალეთის, ართვინ-ბოლნისის და ბაიბურთ-ყარაბაღის სტრუქტურები მეზოზოურის და ადრე კაინოზოურის განმავლობაში წარმოადგენდნენ (ჩრდილოეთიდან სამხრეთით) შესაბამისად: რკალსუკანა, კუნძულთა რკალურ და რკალისწინა აუზებს, რომლებიც ჩამოყალიბდნენ ჩრდილოეთისკენ დახრილი სუბდუქციის სისტემის თავზე.

ბოლნისის მადნიან რაიონში ყველაზე ძველი ვარისკული გრანიტ-მეტამორფული წარმონაქმნებია, რომლებიც შიშვლდებიან ლოქისა და ხრამის მასივების ფარგ-ლებში. ლოქის აზევება ძირითადად შედგება პალეოზოური გრანიტოიდებისგან. დამორჩილებულ როლს ასრულებენ მეტაბაზიტები და მეტაპელიტები, რომლებიც ხშირი ტექტონიკური ურთიერთ გადაადგილებების შედეგად, წარმოდგენილია ტექტონიკური ფირფიტების და ქერცლების სახით. ფუნდამენტის ხრამის აზევება განლაგებულია ლოქის მასივისგან ჩრდილოეთით და ასევე ძირითადად გრანიტებითაა აგებული. პლაგიოგნეისები, მიგმატიტები და მათთან დაკავშირებული მეტაბაზიტების, გრანიტ-პორფირების, რიოლითების, დაციტების, გრანოდიორიტების და სხვათა სხეულებს უკავიათ შედარებით მცირე ფართობები.

ბოლნისის მადნიანი რეგიონი ძირითადად წარმოადგენს გვიანცარცული ასაკის მაგმური აქტივობის არეალს და ხასიათდება რთული, ლატერალურად და ვერტიკალურად განსხვავებული, ფაციესური შედგენილობით. აღნიშნული ქანების კომპლექსი იყოფა: ვულკანოგენურ-ტერიგენულ-კარბონატულ, ვულკანოგენურ და კარბონატულ წყებებად. დღეისათვის ბოლნისის მადნიან რაიონში ექსპლუატაციაშია ხუთი საბადო. გარდა ამისა, რეგიონში ცნობილია ოქრო-სპილენძიანი, ოქრო-პოლიმეტალური და ოქროს შემცველი მეორადი კვარციტების რიგი ობიექტები, აგრეთვე პერსპექტიული ფართობები ახალი საბადოების გამოსავლენად, რომელთა გადაფასება და ძებნა მიმდინარეობს არსებული ლიცენზიის ფარგლებში.

2.1 ბექთაკარის საბადოს გეოლოგიური აგებულება. ბექთაკარის ოქრო-პოლიმეტალური საბადო მდებარეობს ბოლნისის მადნიანი რაიონის ცენტრალურ ნაწილში. საბადოს სტრუქტურული პოზიცია განპირობებულია ჩრდილო-აღმოსავლეთი და ჩრდილო-დასავლეთი მიმართულების რღვევითი სტრუქტურების ერთობლიობით, აგრეთვე ხელსაყრელი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე გარემოს არსებობით.

ბექთაკარის საბადოს მომცველი ტერიტორიის ფარგლებში, მის ამგებ კამპანური ასაკის (83.6-72.1 მლნ. წელი) ქანებს შორის, ყველაზე ძველია ტანძიის წყების (K_2tn) წარმონაქმნები ისინი წარმოადგენილი არიან ანდეზიტ-ბაზალტური შედგენილობის ვულკანიტებით: პიროკლასტოლითებით, ლავებით, გამკვეთი დაიკური და სილური სხეულებით, სადაც დომინირებს სხვადასხვანატეხოვანი ვულკანოკლასტოლითები.

ტანძიის წყების ქანებს აღმავალ ჭრილში მოსდევს გასანდამის წყების ქვედა ქვეწყება (K_2gn_1), რომელიც იწყება პოლიმიქტური ბრექჩია-კონგლომერატებით, ანდეზიტ-ბაზალტების და რიოდაციტების ნაგორები და დაუხარისხებელი ნატეხებით, შეცემენტებული ტუფოგენური მასალით. გასანდამის წყების ქვედა ქვეწყება აგებულია უპირატესად ფსეფიტური (ზოგან აგლომერატული) რიოდაციტური შედგენილობის ტუფებით, იმავე შედგენილობის წვრილნატეხოვანი ტუფების შუაშრეებით და ლინზებით.

გასანდამის წყების ქვედა ქვეწყებას მცირე უთანხმოებით მოყვება გასანდამის წყების ზედა ქვეწყება (K_2gn_2). ქვეწყება წარმოდგენილია რიოდაციტური შედგენილობის ფსეფიტური, ფსამიტური და ალევრო-პელიტური ტუფების მორიგეობით, რომელსაც ზოგან ფუძეში ახლავს მცირე სიმძლავრის ტუფოკონგლომერატ-ბრეჩიების ლინზები. ტუფოკონგლომერატ-ბრეჩიების მცირე შიდა-ფორმაციული გამოსავლები შეინიშნება ქვეწყების ზედა დონეებზეც.

ზემოთაღნიშნული ქანების კომპლექსი გაკვეთილია სხვადასხვა ფორმის, ზომისა და წოლის ელემენტების მქონე ანდეზიტების, დაციტების, რიოდაციტების და რიოლითების სუბვულკანური სხეულებით, სადაც ჭარბობს მათი რიოდაციტური შემადგენელი.

ბექთაკარის საბადოზე განვითარებულია ჩრდილო-დასავლეთი ($320-330^\circ$) და ჩრდილო-აღმოსავლეთი ($30-50^\circ$), ნაკლებად-მერიდიონალური და განედური მიმართულების დიზუნქტიური სტრუქტურები. მათგან ღრვევითი სტრუქტურები წარმოდგენილია მძლავრი, გათიხებული ზონების სახით.

ბექთაკარის საბადოზე გამოვლენილია მადნების ორი ტიპი: ოქრო-ლარიბსულფიდური და ოქრო-პოლიმეტალური. ოქრო-ლარიბსულფიდური მადნები გაშიშვლებულია საბადოს დასავლეთ ნაწილში. ოქრო-პოლიმეტალური მადნები ფიქ-სირდება საბადოს აღმოსავლეთ ნაწილში, ქვედა ჰიფსომეტრულ დონეებზე.

2. 2 ბნელიხევის საბადოს გეოლოგიური აგებულება. ბნელიხევის საბადო მდებარეობს ბოლნისის მადნიანი რაიონის ჩრდილოეთ ნაწილში. იგი განთავსებულია მდ. ხრამის მარცხენა ფერდზე, მის მარცხენა შენაკად მდ. ბნელიხევის აუზში. ბნელიხევის საბადო ლოკალიზებულია ზედაცარცული, სანტონური ასაკის გასანდამის ქვედა ქვეწყების (K_2gs_1) რიოდაციტური შედგენილობის ტუფებში, რომლებიც აქ იყოფა ორ ჰორიზონტად: ქვედა ჰორიზონტი წარმოდგენილია პროპილიტიზირებული მწვანე ფერის კრისტალოლითოკლასტური, ალევროლითური, ფსამიტური და ფსეფიტური ტუფებით (სიმძლავრე - 1-80 მ), აგლომერიტული და პელიტური ტუფების (0.5-43 მ) იშვიათი ლინზებით და შუაშრეებით. გასანდამის წყებას აღმავალ ჭრილში მოყვება კამპანური ასაკის შორშოლეთის წყების ქანები (K_2sr). მათი გამოსავლები აღინიშნება საბადოს ჩრდილოეთ, სამხრეთ და აღმოსავლეთ ნაწილებში. წყება წარმოდგენილია ანდეზიტ-ბაზალ-

ტური ლავებით, ლავური ბრექჩებით, ამავე შედგენილობის ტუფებით, ტუფოგრაველიტებით, ტუფოკონგლომერატებით, ტუფობრექჩებით, ასევე კირქვების და მერგელების დასტებით.

ბნელიხევის საბადო ლოკალიზებულია სუსტად დანაოჭებულ და მიკრონაოჭებით გართულებულ სტრუქტურაში. სავარაუდო შრეებრიობის შესაბამისი ნიშნები, რელიეფის ხასიათის გათვალისწინებით, დაბალი კუთხეებით შრეთა უპირატესად სამხრეთ-სამხრეთ-აღმოსავლურ დაქანებაზე უნდა მიუთითებდეს. საბადოს აგებულება გართულებულია ჩრდილო-აღმოსავლური, ჩრდილო-დასავლური, ახლომერიდიანული და სუბგანედური დიზუნქტიური სტრუქტურებით, რომლებიც გამოყოფილია ადგილზე გეოლოგიური დაკვირვებებით და დისტანციური ზონდირების მეთოდებით.

საბადოს ფარგლებში გამოიყოფა მადნების შემდეგი ტიპები: ოქროს შემცველი მცირესულფიდური დაჟანგული და დაუჟანგავი, ოქრო-პოლიმეტალური და პოლიმეტალური. ოქრო-მცირესულფიდური მადნები ძირითად სამრეწველო ტიპს მიეკუთნებიან. ისინი მადნების საერთო მოცულობის 95% შეადგენენ.

თავი 3. დისტანციური ზონდირების მეთოდით მიღებული კვლევის შედეგები

აღნიშნული კვლევა მოიცავს ბერთაკარი-ბნელიხევის საბადოების და მათი მიმდებარე ტერიტორიების დეტალურ შესწავლას. კვლევის ფარგლებში მოხდა ლითო-ლოგიური მახასიათებლების განსაზღვრა, მინერალური ინდექსებისა და ინდიკტორების იდენტიფიცირება, სტრუქტურული ნიშნების შესწავლა, ჰიდროთემულად შეცვლილი არეების გამოვლენა და მეტალური მინერალიზაციის ზონების იდენტიფიცირება.

ლითოლოგიური რუკების შექმნისას გამოყენებული იყო FCC (False Color Composite) და CRC (Composite Ratio Composite) ალგორითმების თანაფარდობის კომპოზიტური მიდგომა. გარდა ამისა, მონაცემთა დამუშავება განხორციელდა ძირითადი კომპონენტების ანალიზის (PCA) მეთოდის გამოყენებით. ჰიდროთემულად შეცვლილი ზონების იდენტიფიცირება განხორციელდა სპექტრული ინდექსების თანაფარდობრივი ანალიზით. დამატებით, კვლევისას გამოყენებულ იქნა კონტროლირებადი სპექტრული კლასიფიკაციის მეთოდები, როგორცაა

სპექტრული კუთხის საზომი (SAM) და სპექტრული ინფორმაციის დივერგენცია (SID), ასევე შეზღუდული ენერჯის მინიმიზაციის (CEM) ტექნოლოგია.

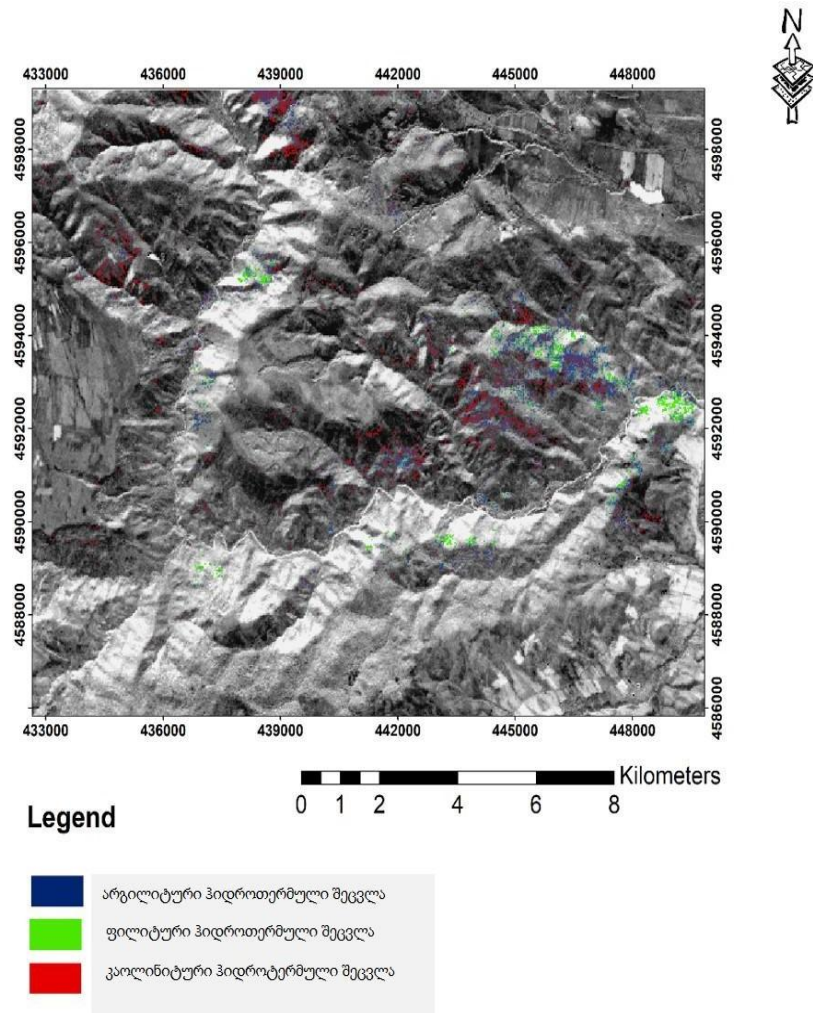
მიღებული მონაცემები ინტეგრირდა სტრუქტურულ ერთეულებთან, ჰიდროთერმულად შეცვლილი არეების უფრო ზუსტი განსაზღვრისთვის. PCA-ს საფუძველზე მიღებული სპექტრული ინდექსები დამატებით დამუშავდა ობიექტზე დაფუძნებული გამოსახულების ანალიზის (OBIA) და მანქანური სწავლის მხარდაჭერით ვექტორული მანქანის (SVM) ალგორითმებით, რამაც შესაძლებელი გახადა მეტალური მინერალიზაციის გამოვლენა ჰიდროთერმულად შეცვლილ ზონებში.

კვლევის ტექნიკური შესრულება განხორციელდა Google Earth Engine-ის პლატფორმის, QGIS-ის, გამოსახულების ვიზუალიზაციის სპეციალური პროგრამული პაკეტებისა და Python პროგრამირების ენის გამოყენებით.

ბოლო წლებში სატელიტური გამოსახულებების გამოყენება მნიშვნელოვნად გაიზარდა სხვადასხვა გეოლოგიური მიმართულებებისა და პლატფორმების განვითარების მიზნით (Abramovitz, 2017), (Gupta, 2012) განსაკუთრებით ეფექტიანია მათი გამოყენება ლითოლოგიური რუკების შედგენასა და ჰიდროთერმულად შეცვლილი უბნების გამოვლენაში (Sabins Jr, 1996) Pour და სხვების (Pour, 2011) მიხედვით, ჰიდროთერმულად შეცვლილი ზონები ხშირად შეიცავენ მეტალურ მინერალიზაციას და ხასიათდებიან მაღალი ეკონომიკური პოტენციალით, შესაბამისად, სამომავლო კვლევებსა და დეტალურ შესწავლას შეუძლია მათი გარდაქმნა საბადოებად.

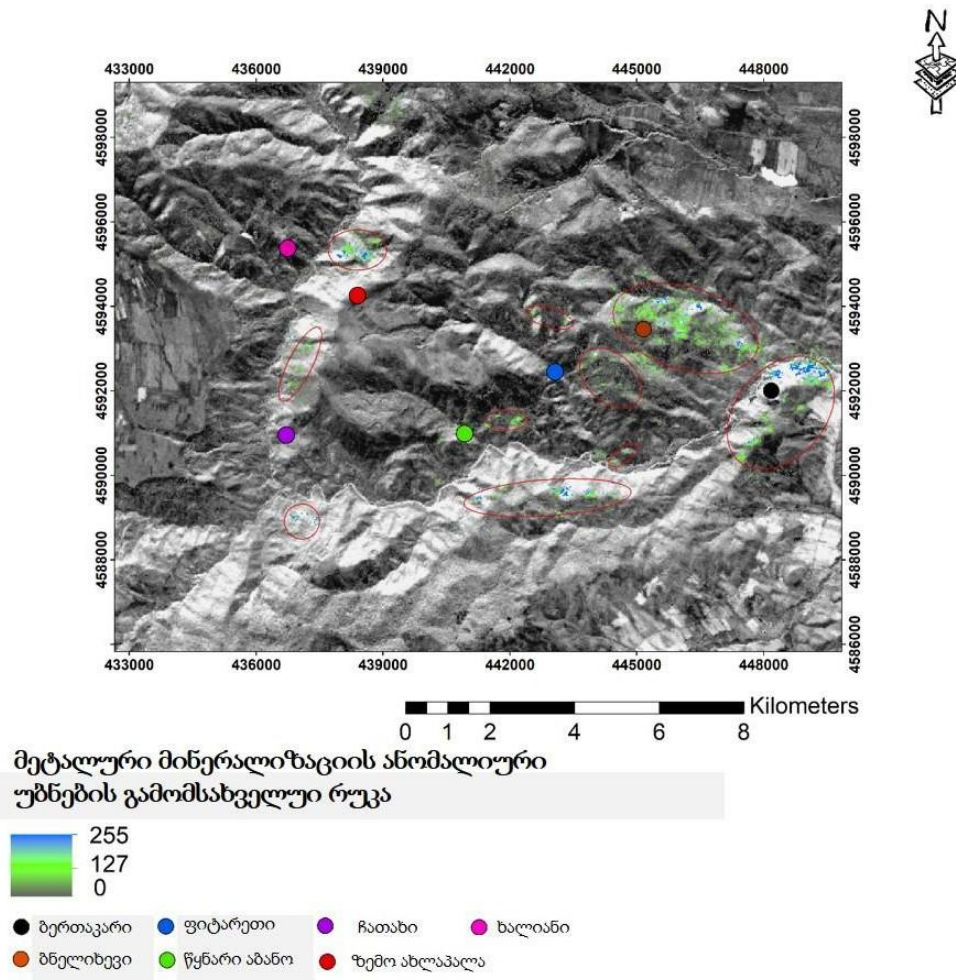
კვლევის ფარგლებში გამოყენებულია ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) მრავალსპექტრული სატელიტური მონაცემები ბერთაკარი-ბნელიხევის საბადოებისა და მიმდებარე ტერიტორიების შესასწავლად, რომლის მიზანს წარმოადგენდა ჰიდროთერმულად შეცვლილი ზონების აღმოჩენა და მეტალური მინერალიზაციის განსაზღვრა. ASTER-ის მონაცემების სპეციფიკისა და კვლევის ტერიტორიის თავისებურებებიდან გამომდინარე, შეირჩა დისტანციური ზონდირების საერთაშორისოდ აღიარებული მეთოდები [(Sabins Jr, 1996), (Abramovitz, 2017)]. კვლევისთვის გამოყენებული მეთოდოლოგია მოიცავდა ფერთა კომპოზიტურ თანაფარდობას (FCC, CRC), ძირითადი კომპონენტების ანალიზს (PC), სპექტრული ინდექსებისა და ინდიკატორების გამოყენებას, შეზღუდული ენერჯის მინიმიზაციის მეთოდს (Gupta, 2012), სპექტრული

მონაცემების კონტროლირებად კლასიფიკაციას (Pour, 2011), სპექტრული კუთხის საზომს (SAM) (Lu, 2004) და სპექტრული ინფორმაციის დივერგენციას (SID) (Singh, 1989). მიღებული შედეგები დამატებით ინტეგრირდა ობიექტზე დაფუძნებულ გამოსახულების ანალიზთან (Wadge, 1998) და მანქანური სწავლის ალგორითმთან (SVM) (Lillesand, 2014). მიღებული მონაცემები დამუშავდა CEM, SAM და SID ალგორითმების გამოყენებით, რამაც შესაძლებელი გახადა ჰიდროთერმულად შეცვლილი უბნების კლასიფიცირება მათი ქიმიური და მინერალოგიური მახასიათებლების მიხედვით. საკვლევ ტერიტორიაზე გამოვლინდა ჰიდროთერმული ცვლილების სამი ძირითადი ტიპი: არგილიტიზაცია, ფილიტიზაცია და კაოლინიზაცია (სურ.1).



სურ.1 საკვლევ არეალში გამოვლენილი ჰიდროთერმული ცვლილებების გავრცელების რუკა

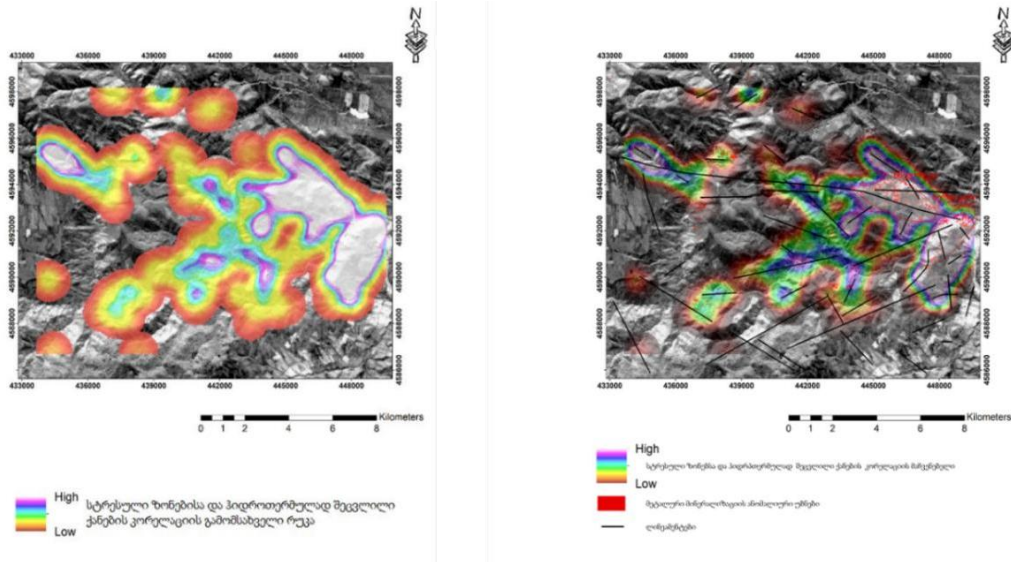
კვლევის შედეგად მიღებული ჰიდროთერმულად შეცვლილი ზონების რუკა, რომელიც დაფუძნებულია SAM და SID მონაცემების სპექტრული ანარეკვის მაჩვენებლებზე, გაანალიზდა SVM (Support Vector Machine) მეთოდით. აღნიშნული ანალიზის შედეგად, ჰიდროთერმულად შეცვლილ ზონებში გამოვლინდა მადნიანი მინერალიზაციის ანომალური შემცველობები (სურ. 2).



სურ. 2 ASTER-SVM ანალიზის საფუძველზე გამოვლენილი მადნიელი მინერალიზაციის ანომალური ზონები (DN = 128)

ბერთაკარი-ბნელიხევის საბადოებისა და მიმდებარე ტერიტორიაზე არსებული მადნგამოვლინებების ლოკალიზაციასა და ფორმირებაში გადამწყვეტი როლი შეასრულა ტექტონიკური პროცესებისა და ჰიდროთერმული რეჟიმის ერთდროულმა ზემოქმედებამ შესაბამის გეოდინამიკურ და თერმობარულ პირობებთან ერთად. ამას ადასტურებს საკვლევ ტერიტორიაზე გამოვლენილ ტექტონიკურ სტრუქტურებსა და ჰიდროთერმულად შეცვლილ ქანებს შორის მაღალი კორელა-

ციის მაჩვენებელი. აღნიშნული კორელაცია, რომელიც დადებით ვექტორულ მიმართულებას ემთხვევა, მიუთითებს გამადნებისათვის ხელსაყრელ ფიზიკურ-ქიმიურ გარემოზე, რომელიც განპირობებულია როგორც ტერიტორიის ლითოლოგიური, ისე სტრუქტურული თავისებურებებით (სურ. 3).



სურ. 3 ტექტონიკურ სტრუქტურებსა და ჰიდროთერმულად შეცვლილ ზონებს შორის არსებული სივრცობრივი კავშირის ანალიზი

თავი 4. ბექთაქარი-ბნელიხევის მადნიანი კვანძის პეტროლოგიური და გეოქიმიური შესწავლა.

ჩვენი კვლევის საფუძველს წარმოადგენს 212 ნიმუშზე ჩატარებული ანალიზის შედეგები, რომლებიც მიღებულია ISP AES მეთოდის გამოყენებით. ეს მონაცემები იძლევა შესაძლებლობას, სიღრმისეულად გავანალიზოთ ქანების ქიმიური შემადგენლობა და მათი მინერალური ტრანსფორმაციის მექანიზმები [(Zhao, 2008) (Meinert L. e., 2005)]. კვლევის ინტეგრირებული მიდგომა აერთიანებს კლასიკურ გეოქიმიურ მეთოდებს, როგორცაა ელემენტების კონცენტრაციების დიაგრამები და მინერალოგიური ტრენდების შეფასება, თანამედროვე გეოსტატისტიკურ, მათ შორის PCA (ძირითადი კომპონენტების ანალიზი), K-Means და DBSCAN ანალიზებთან ერთად. ამ მეთოდოლოგიით შესაძლებელია მინერალიზაციის სივრცითი და სიღრმითი განაწილების ძირითადი კანონზომიერებების დადგენა, მაღალ მინერალიზებული ზონების იდენტიფიკაცია და მათი კავშირის შეფასება ტექტონიკურ და მეტასომატურ პროცესებთან.

კვლევაში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ვერტიკალური მაკონტროლებელი სისტემების ფაქტორებს, რომლებიც განსაზღვრავენ მინერალიზაციის პროცესების სივრცით განაწილებას სიღრმეზე ტემპერატურისა და წნევის ცვლილებების პირობებში (Lowell, 1970). გარდამავალი ზონები, რომლებიც ტექტონიკურ აქტივობასა და მეტასომატურ პროცესებს შორის ინტენსიური კავშირის მაჩვენებელია, წარმოადგენენ კვლევის საკვანძო ელემენტს.

4.1 ელემენტების გეოქიმიური კონტროლი. ქანების გეოქიმიური ანალიზი მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტია მათი გენეზისის, მაგმური დიფერენციაციის, ჰიდროთერმული ცვლილებებისა და რეგიონალური ტექტონიკური გარემოს შესაფასებლად (Rollinson, 1993), თითოეული დიაგრამა გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ ქიმიური ტრენდები, რაც უზრუნველყოფს მინერალოგიური შემადგენლობის ფორმირებისა და ცვლილებების უკეთ გაგებას. დიაგრამების კომბინირებული ანალიზი ქმნის სრულყოფილ სურათს, რომელიც ასახავს ქანებში მიმდინარე მრავალფეროვან პროცესებს, დაწყებული მაგმური დიფერენციაციით და დამთავრებული ჰიდროთერმული ცვლილებებით. ჩატარებული კვლევები მკაფიოდ აჩვენებენ სუბდუქციური გარემოს ქიმიურ მახასიათებლებს, რაც მიუთითებს გეო-დინამიკური რეჟიმის მნიშვნელოვან გავლენაზე ქანების განვითარებაში. ტუტე ელემენტებით გამდიდრება მიგვანიშნებს მინერალური რესურსების არსებობის პოტენციალზე.

4.2 ნიმუშების გეოქიმიური და პეტროლოგიური ინტერპრეტაცია. ჩატარებული კვლევების ანალიზი ცხადყოფს, რომ სუბდუქციური გარემო დომინირებს, თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში MORB და OIB ზონების გავლენა ქანების გენეზის მრავალფეროვნებას უსვამს ხაზს. ეს მონაცემები მნიშვნელოვანი საფუძველია სუბდუქციური და მანტიური პროცესების გეოქიმიური და ტექტონიკური ინტერპრეტაციისთვის. ნიმუშების ანალიზი ცხადყოფს, რომ სუბდუქციური გარემო დომინირებს, თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში MORB და OIB ზონების გავლენა ქანების გენეზის მრავალფეროვნებას უსვამს ხაზს. ეს მონაცემები მნიშვნელოვანი საფუძველია სუბდუქციური და მანტიური პროცესების გეოქიმიური და ტექტონიკური ინტერპრეტაციისთვის.

4.3 მიკროელემენტების ანალიზი. მიკროელემენტების ნორმალიზაციის სპაიდერულ დიაგრამები, რომლებიც ეფუძნება პრიმიტიული მანტიის, ქონდრიტების,

E-MORB, N-MORB და OIB ნორმალიზაციას, გთავაზობენ დეტალურ ინფორმაციას ნიმუშების გენეზისისა და მაგმური პროცესების შესახებ. მათი სიღრმისეული ანალიზი წარმოაჩენს ქიმიური პროცესების და ტექტონიკური გარემოების მრავალფეროვნებას, რაც აისახება ქანების შემადგენლობაში. ნიმუშების ანალიზი მიუთითებს ქანების გენეზის მრავალფეროვნებაზე. სუბდუქციურ ვულკანურ რკალს ასახავს პრიმიტიული მანტიის და ქონდრიტების ნორ-მალიზაციები, რომლებიც აჩვენებენ LILE ელემენტების გამდიდრებას და HREE ელემენტების გაღარიბებას. E-MORB და N-MORB ნორმალიზაციები ასახავენ ოკეანური ქედების მაგმური პროცესებს, სადაც ქერქული კომპონენტების ზეგავლენა მინიმალურია. OIB ნორმალიზაცია მიუთითებს ღრმა მანტიური პროცესების გავლენაზე, რომელიც დამახასიათებელია ოკეანური კუნძულის ბაზალტებისთვის.

LILE და HREE ელემენტების თანაფარდობა, ტიტანისა და ნიობიუმის დეფიციტთან ერთად, გამოხატავს მაგმური დიფერენციაციისა და ტექტონიკური გარემოს მრავალფეროვნებას. ნიმუშების განაწილება ხაზს უსვამს როგორც სუბდუქციური პროცესების, ასევე მანტიური პლუმების გავლენას, რაც მნიშვნელოვანი ინფორმაციაა ქანების გენეზის გასაგებად და ტექტონიკური გარემოს დასახასიათებლად.

4. 4 ჰიდროთერმული შეცვლების ანალიზი. ჰიდროთერმული ცვლილებების დიაგრამები ქანების ქიმიური და მინერალოგიური შემადგენლობის სიღრმისეული ანალიზის საშუალებაა, რაც გადამწყვეტ როლს ასრულებს მათი წარმოშობისა და ჰიდროთერმული პროცესების უკეთ გაგებაში [(Best, 2003) (Winter, 2001) (Rollinson, 1993)] თითოეული დიაგრამა იძლევა ინფორმაციას ქიმიური ტრენდებისა და მინერალოგიური ტრანსფორმაციების შესახებ, რომლებიც დაკავშირებულია სუბდუქციურ და მაგმურ გარემოსთან. ჰიდროთერმული პროცესების ტიპების, ინტენსივობისა და ტრანსფორმაციების გაგება შესაძლებელს ხდის არამხოლოდ ქანების გენეზისის დეტალურ შეფასებას, არამედ რეგიონალური გეოლოგიური პირობების როლის გააზრებასაც. ნიმუშების განაწილების ტენდენციები და ქიმიური ტრენდები ნათლად წარმოაჩენს სუბდუქციური გარემოს სპეციფიკას და მის გავლენას ქანების ფორმირებაზე და განვითარებაზე.

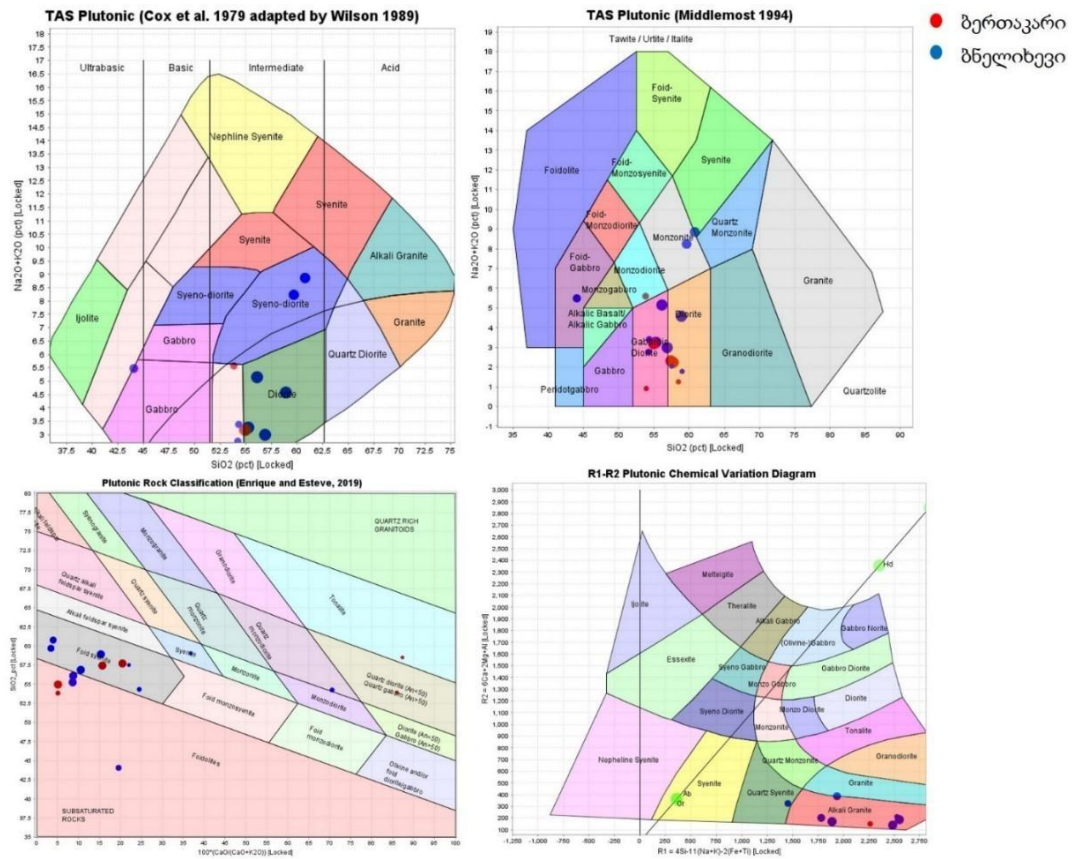
4. 5 მინერალოგიურ-გეოქიმიური სამკუთხა დიაგრამები. ჰიდროთერმული პროცესების კვლევისას გეოქიმიურ დიაგრამებზე მონაცემების ინტერპრეტაცია

წარმოადგენს ერთ-ერთ ეფექტურ ინსტრუმენტს, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დეტალურად შევისწავლოთ ქანების ქიმიური და მინერალოგიური თავისებურებები, შევაფასოთ მათზე მოქმედი ტექტონიკური, მაგმური და ჰიდროთერმული პროცესების გავლენა. წარმოდგენილი დიაგრამები ხაზს უსვამს ქიმიური ტენდენციების მრავალფეროვნებას, რომლებიც სხვადასხვა ტექტონიკურ გარემოში, ჰიდროთერმულ სისტემებში და მინერალოგიური გადრდაქმნის პროცესების დროს ვლინდება. მათი ინტერპრეტაცია ააშკარავებს არა მხოლოდ ქანების ქიმიური შედგენილობის დინამიკას, არამედ მინერალური სტრუქტურების ჩამოყალიბების პირობებსაც. დიაგრამებზე ნაჩვენებია სუბდუქციური გარემოს მახასიათებლები, სადაც ჰიდროთერმული ხსნარები აქტიურად ცირკულირებენ. ტრენდები ასახავენ ვულკანური რკალის ჰიდროთერმული და ტექტონიკური პროცესების გავლენას, რაც ანხორციელებს მინერალური სტრუქტურების დივერსიფიკაციას და ქანების ქიმიურ ტრანსფორმაციას.

4.6 ნიმუშების პეტროლოგიური და გეოქიმიური მახასიათებლების განსაზღვრა. პლუტონური ქანების TAS კლასიფიკაციის მიხედვით ნიმუშების უმეტესი ნაწილი თავმოყრილია დიორიტებისა და სიანო-დიორიტების არეალში, რაც მიუთითებს მაგმის დიფერენციაციაზე და დამახასიათებელია საშუალოდ მჟავე მაგმური კრისტალიზაციის პროცესებისთვის. აღნიშნული ტენდენცია აჩვენებს, რომ ნიმუშები, ძირითადად, ხასიათდებიან მაღალი $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ -სა და საშუალო SiO_2 -ს კონცენტრაციით, რაც მიანიშნებს მათი წარმოშობის გეოდინამიკურ გარემოზე, მაგალითად, სუბდუქციურ ზონებზე. ასეთ გარემოში ტექტონიკური ფილების შეჯახება და მაგმური აქტივობა ხელსაყრელ პირობებს ქმნის მსგავსი ტიპის ქანების წარმოქმნისთვის.

ამგვარად, ნიმუშების განაწილება შესაძლოა ასახავდეს სუბდუქციური გარემოს სპეციფიკას, რაც გულისხმობს მაგმური სისტემების კომპლექსურობასა და მათი გენეზისის ტექტონიკურ პირობებთან მჭიდრო კავშირს. დიორიტებისა და სიანო-დიორიტების გავრცელება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან ეს ქანები ხშირად ხასიათდება მდიდარი მინერალოგიური და მეტალოგენური პოტენციალით. ასეთი გარემოებები შეიძლება მიუთითებდეს იმ რესურსული შესაძლებლობების წარმოშობის პირობებზე, რომლებიც მნიშვნელოვნად ამდიდრებს კვლევის შედეგებს. დიაგრამებზე ნიმუშების განაწილება მიგვანიშნებს, რომ

ისინი ასახავენ მაგმური პროცესების მიმდინარეობას, სადაც ფრაქციული კრისტალიზაცია, ტექტონიკური გავლენები და მდნარის ქიმიური შემადგენლობა ურთიერთ-კავშირშია (სურ.4) .



სურ. 4 პლუტონური წარმოშობის ქანების გეოქიმიური დიფერენციაციისა და კლასიფიკაციის ამსახველი დიაგრამები: a. TAS სისტემაში ნიმუშების განაწილების სქემა; b. ტუტე და სილიციუმის შემცველობის მიხედვით გამოყოფილი კლასიფიკაციური ველები; c. პლუტონური კომპლექსების პეტროქიმიური იდენტიფიკაციის დიაგრამა; d. R1–R2 პარამეტრების გამოყენებით აგებული ვარიაციული მოდელი

თავი 5. სტატისტიკური ანალიზი და მანქანური სწავლების ალგორითმებით განხორციელებული კვლევა

ჰიდროთერმული ზონების კვლევა რთულ და მრავალფეროვან პროცესს წარმოადგენს, სადაც სივრცითი ჰეტეროგენულობა და მეტალების განსხვავებული განაწილება მნიშვნელოვან გამოწვევად რჩება (Pirajno, 2009). გეოსტატისტიკური ანალიზი, რომელიც მონაცემთა სტრუქტურირებისა და ინტერპრეტაციისთვის გა-

მოიყენება და ჰიდროთერმული სისტემების შესწავლისთვის მძლავრ ინსტრუმენტს წარმოადგენს.

ჰიდროთერმულ ზონებში მეტალების კონცენტრაციები ხშირ შემთხვევაში არაერთგვაროვანია. გეოსტატისტიკური მეთოდები, როგორცაა მონაცემთა დაჯგუფება და მოდელირება, ეხმარება ამ ჰეტეროგენულობის შესწავლას (Goovaert, 1997), რაც საშუალებას იძლევა დავადგინოთ, სად შეიძლება მაღალი კონცენტრაციები აღინიშნებოდეს.

ჰიდროთერმულ ზონებში მეტალების კონცენტრაციების შესწავლა არა მხოლოდ მეცნიერებისთვის მნიშვნელოვან კითხვებზე პასუხის გაცემის შესაძლებლობას იძლევა, არამედ პრაქტიკული სარგებელიც მოაქვს, რაც დაკავშირებულია რესურსების უფრო ეფექტურ მართვასთან. გეოსტატისტიკა წარმოადგენს იმ ხიდს, რომელიც მეცნიერებასა და მრეწველობას ერთმანეთთან აკავშირებს.

ჰიდროთერმულად შეცვლილი ზონების სტრუქტურული კონტროლის ანალიზმა გამოავლინა ოთხი ძირითადი დომენის (გარდამავალი, ეპითერმული, ფონური და ღრმა პორფირული) გეოქიმიური და მინერალოგიური თავისებურებები, რომლებიც განსაზღვრავენ მინერალიზაციის პროცესებსა და ინტენსივობას. თითოეული დომენი გამოირჩევა უნიკალური მახასიათებლებით, რომლებიც ასახავენ ჰიდროთერმული სისტემების გავლენის ვერტიკალურ და ლატერალურ კონტროლს. ამ ზონების ანალიზი საშუალებას იძლევა უკეთ გავიგოთ მინერალიზაციის გენეტიური და ეკონომიკური პოტენციალი.

6. კომპოზიციური ანალიზი. კომპოზიციური ანალიზის მეთოდოლოგია ფართოდ გამოიყენება გეოლოგიაში. იგი არის მრავალფუნქციური და წარმოადგენს ერთერთ ძირითად და საჭირო ინსტრუმენტს, რომელსაც დიდი როლი ენიჭება გეოლოგიური პროცესების შესწავლაში. აღნიშნული კვლევა ჩვენს მიერ განხორციელებული იყო გერმანიის ფედერაციულ რესპუბლიკაში, კერძოდ კი Inorganic and Isotope Geochemistry Section 3.1 electron microprobe labs Helmholtz Centre Potsdam - GFZ German Research Centre for Geosciences Telegrafenberg, 14473 Potsdam-ლაბორატორიაში.

ჩვენს მიერ აღნიშნულ ლაბორატორიაში გაიგზავნა 25 სინჯი, საიდანაც გერმანელ კოლეგებთან ერთად შეირჩა 12 ნიმუში, რომლებზეც განვახორციელეთ ქვემოთ აღნიშნული კვლევები.

ნიმუშების სივრცული ანალიზი (EDX-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), კვარცში ტიტანის რაოდენობრივი ანალიზი, Fe-ს შემცველობის რაოდენობრივი ანალიზი სფალერიტში და ფალორის თერმომეტრია.

ჩატარებულმა კვლევებმა საკმაოდ მნიშვნელოვანი დასკვნების გაკეთების საშუალება მოგვცა, კერძოდ ტიტანის კვარცში შემცველობასთან დაკავშირებული წნევისა და ტემპერატურის დამოკიდებულებები შეიძლება გამოყენებულ იქნას თერმობარომეტრად.

წნევისა და ტემპერატურის დამოკიდებულება ტიტანის შემცველობაზე კვარცში შეიძლება გამოყენებული იქნას, როგორც თერმობარომეტრი თუ იგი კომბინირებულია სხვა ბარომეტრთან მანამდე არსებულ მინერალებთან მიმართებაში, კვარცის კრისტალიზაციის დამოუკიდებელ წნევისა ან ტემპერატურის შეფასებასთან, ან კარგად განსაზღვრულ ფაზურ წონასწორობასთან.

ჩვენს მიერ მიღებული შედეგები ადასტურებს პირიტის, ქალკოპირიტის და ტენანტიტ-ტეტრაედრიტის თანაარსებობას, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ბექთაქარი-ბნელიხევის მადნიანი კვანძის ტერიტორიაზე პოლიმეტალური სტადიის დროს სითხეს ჰქონდა შუალედური სულფიდაციის მდგომარეობა. მადნის მინერალოგია ასევე შეესაბამება მადნის შემცველი სითხის შუალედურ სულფიდაციურ მდგომარეობას, რაც გამოიხატება FeS-ის ღარიბი, სფალერიტის, გალენიტის, ტენანტიტ-ტეტრაედრიტის და ქალკოპირიტის დომინირებით. ცვლილებებისა და მინერალიზაციის ასეთი სტილი ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი მახასიათებელია ეპითერმული საბადოებისათვის (200⁰-240⁰). ჩვენს შემთხვევაში მიღებულია 230-240°C ტემპერატურა. შეიძლება ითქვას, რომ ბექთაქარი-ბნელიხევის მადნიანი კვანძის ტერიტორია მიეკუთვნება შუალედური სულფიდაციის ეპითერმული მინერალიზაციის კლასიკურ ნიმუშს, რომელიც ლოკალიზებულია სუბერიალურ ლავასა და ვულკანოკლასტურ ქანებში.

დასკვნა

ამრიგად, თუ შევაჯამებთ ჩვენს მიერ ჩატარებულ კვლევებს, იგი შეიძლება ასე ჩამოვყალიბოთ:

- ბექთაკარი-ბნელიხევის რეგიონში განხორციელებულმა კვლევამ, რომელიც ეფუძნება ASTER-ის მულტისპექტრულ მონაცემებს და ინტეგრირებულია პეტროლოგიურ-გეოქიმიურ მონაცემებთან, გამოავლინა ტერიტორიის მრავალფეროვანი ლითოლოგიური აგებულება, ჰიდროთერმულად შეცვლილი ზონები და მინერალიზაციის მნიშვნელოვანი ინდიკატორები.
- დაადგინდა რამდენიმე გეოლოგიურად მნიშვნელოვანი სტრუქტურა, მათ შორის ტექტონიკურად დეფორმირებული ზონები და სტრუქტურული კონტაქტები, რომლებიც თამაშობენ დიდ როლს მინერალების ლოკალიზაციისა და დაგროვების პროცესში.
- დადასტურდა, რომ არსებობს მკაფიო კორელაცია ლითოლოგიურ ფენებსა და მინერალების განაწილებას შორის, რაც მიუთითებს მეტალოგენური პროცესების კონცენტრირებულ ბუნებაზე.
- დისტანციური ზონდირების საშუალებით იდენტიფიცირებული ანომალიური უბნები მნიშვნელოვან საწყის საფუძველს ქმნიან პერსპექტიული ლოკაციების განსაზღვრისათვის.
- ბექთაკარი-ბნელიხევის მადნიანი კვანძის მაგალითზე ჩატარებული კვლევამ ნათლად აჩვენა, რომ ვერტიკალური მინერალიზაციის კონტროლის მექანიზმების, ფონური და გარდამავალი ზონების გეოქიმიური მახასიათებლების, მიკროელემენტების გენეზისისა და ჰიდროთერმული პროცესების ინტეგრირებული ანალიზი ქმნის მყარ და სისტემატურად სტრუქტურირებულ მეთოდოლოგიურ ჩარჩოს. ეს მიდგომა ეფუძნება სხვადასხვა სახის მონაცემების სინთეზს, მათ შორის დისტანციური ზონდირების, გეოქიმიური და პეტროლოგიური მონაცემების, რაც საშუალებას იძლევა შეიქმნას ფენომენოლოგიური სურათი, რომელიც ეხმარება მინერალიზაციის პროცესების უფრო ღრმა გაგებას.
- ინტეგრირებული მეთოდოლოგია ქმნის შესაძლებლობას, რომ არა მხოლოდ არსებული საბადოების ეკონომიკური პოტენციალი შეფასდეს, არამედ განისაზღვროს მინერალიზაციის პროგნოზის ახალი პარადიგმები, რომლებიც მოიცავს ჯერ კიდევ აუთვისებელ ან ნაკლებად გამოკვლეულ ტერიტორიებს. ასეთი მიდგომები მნიშვნე-

ნელოვნად ამცირებს საძიებო რისკებს, ზრდის კვლევის მიზნობრიობას და აუმჯობესებს ეკონომიკური ეფექტიანობის პროგნოზებს.

➤ აღნიშნული ინტეგრირებული მიდგომა არ არის მხოლოდ კვლევითი მეთოდი, არამედ წარმოადგენს მნიშვნელოვან სტრატეგიულ ინსტრუმენტს, რომელიც აუცილებელია ბუნებრივი რესურსების ეფექტური და გააზრებული მართვისათვის. ამ მიდგომით მიღებული შედეგები ქმნის მყარ საფუძველს იმისათვის, რომ მომავალში დაგეგმილი კვლევები უფრო მიზანმიმართული იყოს, ხოლო საბადოების ეკონომიკური პოტენციალის შეფასება უფრო ზუსტი და საფუძვლიანი იყოს, რაც უზრუნველყოფს რესურსების რაციონალურ და მდგრად გამოყენებას.

➤ ჩატარებულმა კვლევებმა შესაძლებელი გახადა მნიშვნელოვანი თერმობარომეტრიული პარამეტრების დადგენა, რაც კვარცხი ტიტანის შემცველობის მიხედვით წნევისა და ტემპერატურის კავშირს ეფუძნება. მიღებული მონაცემები ადასტურებს, რომ კვარცი, ტიტანის შემცველობის მიხედვით, შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც თერმობარომეტრი, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, როდესაც იგი თანხვედრაშია სხვა მინერალებთან, ხოლო ტემპერატურისა და წნევის პირობები შედგება ფაზური წონასწორობის ფარგლებში. მიღებული მონაცემები მერყეობს 270°C-დან 453°C-მდე, ერთ მეგაპასკალზე მუდმივი წნევის პირობებში. 270°C ტემპერატურა მიუთითებს ჰიდროთერმული აქტივობის არსებობას, რომელიც ხელს უწყობს მინერალების ფორმირებასა და ცვლილებას. 453°C ტემპერატურა კი მიუთითებს მაღალტემპერატურულ ჰიდროთერმულ პროცესებზე, როდესაც სითხისა და მყარი ფაზის ურთიერთქმედება გარდაქმნის ქანის თვისებებს.

➤ გეოქიმიური და მინერალოგიური ანალიზის შედეგად დადასტურდა პირიტის, ქალკოპირიტის და ტენანტიტ-ტეტრაედრიტის თანაარსებობა, რაც მიუთითებს, რომ ჰიდროთერმული სითხე მინერალიზაციის პროცესის დროს შუალედური სულფიდაციის პირობებში იმყოფებოდა. სფალერიტის, გალენიტის, ტენანტიტ-ტეტრაედრიტის და ქალკოპირიტის დომინირება, ხოლო FeS-ის დაბალი შემცველობა ამ ჰიპოთეზას კიდევ უფრო ამყარებს.

➤ ასეთი მინერალოგიური ასოციაციები დამახასიათებელია ეპითერმული სტილის საბადოებისთვის, სადაც ტემპერატურული დიაპაზონი ჩვეულებრივ 200–240°C ფარგლებში მერყეობს. ჩვენს შემთხვევაში დაფიქსირებული 230–240°C ტემპერატურა სრულად შეესაბამება ამ სტანდარტს და ცხადყოფს, რომ ბექთაკარი-

ბნელიხევის მადნიანი კვანძი წარმოადგენს შუალედური სულფიდაციის ტიპის ეპითერმული მინერალიზაციის კლასიკურ მაგალითს, რომელიც ლოკალიზებულია სუბერიალური ლავებისა და ვულკანოკლასტური წარმონაქმნების ფარგლებში.

აპრობაცია

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი საკითხები მოხსენების სახით გაშუქდა საქართველოს მინერალოგიური საზოგადოების მე-8 და 10 საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ კონფერენციაზე (2022 -2024 წ.), „მსოფლიო მეცნიერების პრიორიტეტები, XIV საერთაშორისო სამეცნიერო და პრაქტიკული კონფერენციის მასალები, ვენა, ავსტრია“ -2024 წ, ISSN 3124-1123, ტომი 1, ჟურნალი „Znanstvena misel“, №102/2025 და კოლოკვიუმებზე.

პუბლიკაციები

1. გიორგი მინდიაშვილი, გიორგი იობიძე, თორნიკე ლიპარტია, ნინო ჯაფარიძე, ქეთი ბენაშვილი, ილია ბლუაშვილი, მათე კვიციანი, დავით მეკვიციანი, დავით ბლუაშვილი. დისტანციური ზონდირების მეთოდით მიღებული მონაცემების ინდეტიფიკაცია ბექთაკარი-ბნელიხევის მადნიანი კვანძის ფარგლებში. <https://doi.org/10.36073/1512-407X/2024-48-62>, სამთო ჟურნალი 1(47), 2024 წ. გვ. 48-2.
2. Giorgi Iobidze, Tornike Lipartia, Mineralogical composition of gold-polimetallic ores in the Bektakari-Bnelixevi oer node (Georgia, Bolnisi Region), DOI <https://-doi.org/-10.5281/zenodo.14285355>, World science priorities, Proceedings of the XIV Inter-national Scientific and Practical Conference, Vienna. Austria-2024, pp. 33-42.
3. გ. იობიძე - ბექთაკარისა და მისი მიმდებარე ტერიტორიის ხაზოვანი სტრუქტურა. „სამთო საქმისა და გეოლოგიის განვითარება ეკონომიკის აღორძინების წინაპირობაა“, მე-10 საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია, 27-28 სექტემბერი, თბილისი 2024.
4. Iobidze G. Characteristics of intermediate sulfidation in the Bektakari-Bnelikhevi ore knot based on compositional analysis. ISSN 3124-1123, VOL.1, Znanstvena misel

journal №102/2025. pp.9-24, www.znanstvena-journal.com, Slovenska cesta 8, 1000 Ljubljana, Slovenia

5. გ. იობიძე - ბექთაკარი-ბნელიხევის მადნიანი კვანძის პეტროლოგიური და გეოქიმიური შესწავლის ანალიზი. <https://doi.org/10.36073/1512-407X>, სამთო ჟურნალი 1(48), 2025 წ. გვ. 68
6. Giorgi Mindiashvili , David Bluashvili , Giorgi Iobidze, Tornike Lipartia, Nino Jafaridze, Keti Benashvili. Application of Machine Learning to Hydrothermal System Analysis: Geochemical Insights from the Bektakari–Bneli Khevi Ore Knot, Southern Georgia. Bulletin Of The Mineral Research and Exploration. September 2025, DOI: 10.19111/bulletinofmre.1768420.
7. G. Iobidze – Petrology and Geochemical Study of the Bektakari-Bnelixevi Ore Knot. Book of Abstracts, The Development of Mining and Geology is the Condition for the Revial of Ecomomy. 11 the International Scientific -Practical Conference on Up-to-date Problems of Mining and Geology. 25-26 September, 2025. Tbilisi

Summary

Structural-Geological Position and Formation Patterns of the Bektakari–BneliKhevi Ore Knot

Ensuring Georgia's supply of non-ferrous metals, particularly strategic gold reserves, represents one of the nation's most important tasks. In this context, particular interest is focused on the Bolnisi district, where the Bektakari–BneliKhevi ore knot constitutes a significant portion of the country's gold resources.

Based on interpretations of the origin of deposits in the Bolnisi ore district, various authors have proposed alternative genetic models. According to the studies of V. Gugushvili (2014), the Madneuli deposit is classified as a porphyry-type deposit. R. Migi-neishvili, on the other hand, attributes the Madneuli deposit to a transitional volcano-genic-sedimentary–epithermal type and distinguishes six stages of its formation, which represents an important contribution to the differentiated interpretation of its genesis.

An international group of authors (Gialli, 2013; Moritz et al., 2016) considers the Madneuli deposit as a complex VMS–porphyry–epithermal system, indicating the coexistence of multiple geodynamic processes. In the case of the Sakdrisi and Bertakari deposits, modern literature classifies them as low-sulfidation epithermal types (Lavoie J., 2015; Moritz et al., 2016).

Detailed geological mapping and drilling investigations of the Bertakari and Bneli Khevi deposits have revealed the significant role of hydrothermal, in situ epigenetic breccias in ore formation, as well as the leading role of subvolcanic and post-volcanic fracture structures in controlling hydrothermal mineralization (Lavoie, 2015; N. Gelashvili, April 22–23, 2015; Adamia et al., 2016, 2017; Gialli, 2013).

From an exploration perspective, the primary indicator of precious and base metal mineralization in the Bolnisi district is its genetic, temporal, and spatial association with rhyodacitic (felsitic) magmatism. Practically all economically significant deposits are linked to felsic magmatic suites—such as the Mashavera suite (e.g., Madneuli and Sakdrisi) and the Gasandami suite (e.g., Bertakari)—and the related hydrothermal processes. Similar trends are also observed in prospective areas, including Davit Gareji (Kazreti), Darbazi, Mushevani, Kvemo Bolnisi, and Khatisopeli (Mashavera suite), as well as Bertakari and Bneli Khevi (Gasandami suite). This further confirms the crucial role of magmatic–tectonic activity in the genesis of regional mineralization (Adamia et al., 2016, 2017)

The comprehensive studies we carried out revealed significant and interesting results. As a result of processing ASTER multispectral data and subsequent geological interpretation, the following geological features were identified in the vicinity of the Bektakari–Bneli Khevi area: lithological structures, mineral indices and indicators, hydrothermally altered zones, anomalous sites of metallic mineralization, contact zones, and tectonically deformed segments.

Anomalous areas identified through remote sensing methods represent a significant economic interest. These findings not only enhance our understanding of the region's geological characteristics but also provide a solid foundation for planning and conducting subsequent exploration and assessment activities.

Special attention should be given to further investigating anomalies to more accurately determine their geological significance and evaluate the area's mineral resource potential.

The study of hydrothermal systems conducted using geochemical and geostatistical methods revealed significant complexity in mineralization processes. Research findings indicate that vertical (depth-related) controlling mechanisms, spatial distribution of trace elements, mineral transformations, and selective differentiation of chemical elements play a decisive role in the formation of hydrothermal systems.

The integrated analysis of the obtained data is not limited solely to theoretical significance. It serves as a practical tool that ensures more efficient planning and management of mineral resources. Results from the study of hydrothermal systems demonstrated that an in-depth understanding of these systems is essential for the rational and optimal utilization of mineral resources.

The integrated application of geochemical and geostatistical methods provides a solid foundation for predicting mineralization and identifying anomalous zones, which, in turn, are directly linked to strategic directions of economic development. The study demonstrated that mineralization processes are characterized by high complexity, driven by the complex interplay of tectonic, magmatogenic, and hydrothermal activities.

This integrated approach to studying hydrothermal systems represents an innovative tool that significantly enhances the accuracy of mineral resource forecasting and facilitates the optimal realization of their economic potential.

The data obtained by us confirm the coexistence of pyrite, chalcopyrite, and tennantite-tetrahedrite, indicating that during the polymetallic stage in the Bektakari–BneliKhevi ore knot, the hydrothermal fluid was in an intermediate-sulfidation state. The mineralogical associations, including sphalerite, galena, tennantite-tetrahedrite, chalcopyrite, and the relatively low content of FeS, further confirm the conditions of intermediate sulfidation.

The described style of mineralization and hydrothermal alterations is characteristic of epithermal deposits and serves as their diagnostic feature. In our case, the mineralization temperature ranges between 230–240°C, aligning with the temperature interval typical of intermediate-sulfidation epithermal systems.