

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ეკა უჩენეიშვილი

ბუნებრივი ნედლეულის საფუძველზე ბიოაქტიური
ფოსფატური მასალების მიღება და შესწავლა

სადოქტორო პროგრამა- ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერია
შიფრი- 0410

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი ქიმიური და
ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი : პროფ. თეიმურაზ ჭეიშვილი

რეცენზენტები: -----

დაცვა შედგება ----- წლის ”-----” -----, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და
მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის
სხდომაზე,

კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში, ხოლო
ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი -----

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა: მიმდინარე საუკუნის ძირითად მახასიათებელ ნიშანს წარმოადგენს ადამიანის ყოფის სხვადასხვა სფეროების ჰუმანიზაცია, რაც პირველ რიგში უკავშირდება ადამიანის ჯანმრთელობას. ამ მხრივ, თანამედროვე მედიცინის მრავალი მიმართულება მოითხოვს ისეთი მარილების შექმნა-გამოყენებას, რომლებიც უზრუნველყოფენ ადამიანის კანის, კუნთოვანი ქსოვილის, სისხლძარღვების, ძვლოვანი ქსოვილის და სხვათა შეცვლა-აღდგენას. ამ მიმართულებით შექმნილია მრავალი სახეობის ფუნქციური დანიშნულების მასალა (ლითონი, პოლიმერი, კერამიკა, მინა და სხვ.), რომელთა მეშვეობით შესაძლებელი გახდა ადამიანის სხეულის ათეულობით შემადგენელი ნაწილის ჩანაცვლება ან რეგენერაცია. მათგან გამოყოფენ ბიოაქტიურ კერამიკას და მინას, რომლებმაც ფართო გამოყენება ჰპოვა ადამიანის ძვლოვანი ქსოვილის მკურნალობაში, აღდგენაში და ჩანაცვლებაში. მათი გამოყენების აქტუალურ მიმართულებებს წარმოადგენს: ენდიპროტეზები ტრავმატოლოგიაში და ორთოპედიაში, საბრჯენი მასალები სტომატოლოგიაში, ყბა-სახის აღდგენითი ქირურგია, სამედიცინო-კოსმეტიკური საშუალებათა (კრემები, პასტები) დამზადება და სხვა. ბიოკერამიკა და ბიომინა ფართოდ გამოიყენება ბიოლოგიურად აქტიური, ამავე დროს მექანიკურად მდგრადი და ტრავმატოლოგია-ენდოპროტეზირებაში გამოყენებული კომპოზიტების მისაღებად (ბიოინერტული კერამიკის და ლითონების საფარი). ძვლის ქსოვილის რეგენერაციაში განსაკუთრებით მოთხოვნადია „ბიოკერამიკა/ბიომინა – პოლიმერი/ბიოპოლიმერი“ სახეობის კომპოზიციური მასალები.

მიუხედავად იმისა, რომ დღეისათვის კარგადაა ცნობილი და მედიცინაში პრაქტიკულად გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდებით მიღებული გარკვეული სახეობის ბიოკერამიკა (ძირითადად ჰიდროქსიაპატიტური და სამკალციუმიანი ფოსფატის β-მოდდიფიკაცია) და ბიომინა/ბიოსიტალი (მი-

რითადად სილიკატური ფუძის $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ კომპოზიციაში მიღებული), ახალი შედგენილობის ბიოაქტიური მასალების, მათ შორის ბიოაქტიურობით გამორჩეული მინამასალების, შექმნის მიმართულებით, კვლევითი სამუშაოები აქტიურად მიმდინარეობს. ასეთ კვლევებში ორ ძირითად მიმართულებას გამოყოფენ – დანიშნულებიდან გამომდინარე სპეციფიკური თვისების მქონე ბიომასალის მიღება და ბიომასალების მიღება ახალ სანედლეულო ბაზაზე. ბოლო შემთხვევაში მიზანი ორია: გაუმჯობესებული თვისების მქონე და ამავდროულად ეკონომიკური ბიომასალის მიღება.

სამუშაოს მიზანი: კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მედიცინაში პრაქტიკულად გამოყენებული Na_2O , CaO , SiO_2 და P_2O_5 შემცველი ბიოაქტიური მინების შედგენილობაში წარმოდგენილი და ბიოაქტიურობის განმსაზღვრელი ორი ძირითადი ინგრედიენტის (CaO , P_2O_5) ჩანაცვლება კომპლექსური, კალციუმის ფოსფატების შემცველი ნედლეულით – ძვლის ნაცრით. ძვლის ნაცრის, როგორც კომპლექსური ნედლეულის, საფუძველზე მინების სინთეზის და მათი მინაკრისტალურ ბიოაქტიურ მასალაში (სიტალში) ტრანსფორმაციის შესაძლებლობის დადგენა. მიღებული მინამასალების ბიოაქტიურობის დადგენა მოთხოვნადი მახასიათებელი თვისებების შესწავლა-შეფასებით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა „კლასიკური“ სილიკატური ფუძის ფოსფორშემცველი ბიომინამასალების ($Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ სისტემა) მიიღება, როდესაც ძირითად და ამავე დროს ბიოლოგიური აქტიურობის განმსაზღვრელ ნედლეულად გამოყენება მსხვილფეხა საქონლის ძვლის გადამუშავებით მიღებული პროდუქტი - ე.წ. ძვლის ნაცარი.

ძვლის ნაცარი გამოირჩევა მზა კალიუმფოსფატური ნაერთების მაღალი შემცველობით (90%-მდე) და აქედან, მას უნდა ახასიათებდეს ბუნებრივი ძვლისათვის დამახასიათებელი ბიოაქტიურობის ნიშნებიც. აღნიშნულის

წინაპირობას წარმოადგენდა მედიცინაში კარგად ცნობილი იმპლანტის სახეობა – ალოგრაფი („მკვდარი“ ძვლის ქსოვილი).

ძვლის ნაცარი წარმოადგენს დეფიციტური ფოსფორის ანჰიდრიდის დიდი ოდენობით (40 %) შემცველ მასალა-ნედლეულს, რომელიც განვითარებულ ქვეყნებში დიდი რაოდენობით იწარმოება როგორც ფოსფორშემცველი ეკონომიკურად ხელმისაწვდომი ნედლეული ის ფართოდ გამოიყენება სოფლის მეურნეობაში მცენარეთა და ცხოველთა კვებაში, ხოლო სილიკატურ მრეწველობაში მის საფუძველზე იწარმოება უმაღლესი ხარისხის ე.წ. ძვლის ფაიფური და ა.შ.

საკვლევი შედგენილობის მინების შედგენილობაში წარმოადგენილია (მას. %): 20-25 Na_2O ; 20-25 CaO ; 45-60 SiO_2 და 5-10 P_2O_5 . მათი სინთეზის შედეგების საფუძველზე შეირჩა ძვლის ნაცრის შემცველი საბაზო მინები, დაიგეგმა მინის და კერამიკის ტექნოლოგიაში ცნობილი ხერხებით და მეთოდებით სილიკატური ფუძის ფოსფორშემცველი მინების და მათი იძულებითი დაკრისტალებით მიღებული მინაკრისტალური მასალების მიღება და მათი შემდგომი მიზნობრივი შესწავლა.

სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოთა შესასრულებლად გამოყენებული იქნა შემდეგი მეთოდები და ხელსაწყო-დანადგარები:

- საკვლევი კაზმებიდან მინის სინთეზი 1300 – 1400°C-ზე განხორციელდა ტემპერატურის მზომ-მარეგულირებელი სისტემით აღჭურვილ ღეროვანი გამახურებლიან (სილიტი) ლუმელში. მინის სახარშავ ჭურჭელს წარმოადგენდა 100-200 მლ ტევადობის ფაიფურის ან შამოტის ქოთნები;

- მინების თერმული დამუშავება (600 – 1000°C) და მინაკრისტალურ კომპოზიციაში (სიტალი) ტრანსფორმაცია ჩატარდა კამერულ ელექტროგამახურებლიან ლუმელში;

- მინებისა და მინაკრისტალური მასალების სიმკვრივე განისაზღვრა ჰიდროსტატიკური აწონვის მეთოდით;

- საკვლევ მინამსალათა ფხვნილების მიღება და ფრაქციებად დაყოფა - ლითონის სანაყში მსხვრევით, ფაიფურის ფილაში დაფქვით და საცრითი ანალიზით სასურველ ფრაქციებზე დაყოფით;

- ფხვნილოვანი მინამსალების წყალშთანთქმის განსაზღვრა ჩატარდა წყლით გაჯერებული და მშრალი ნიმუშების წონის ფარდობითი ცვლილების დადგენით;

- ქიმიური მდგრადობა განისაზღვრა ფიზიოლოგიურ ხსნარში ($37\pm 1^{\circ}\text{C}$) სხვადასხვა ხანგრძლივობით დამუშავებული საკვლევ მინამსალების ფხვნილის წონის დანაკარგით;

- მინების „დაგრძელება-ტემპერატურა“ გრაფიკული დამოკიდებულება მიღებული იქნა ДKB-4A ტიპის დილატომეტრზე;

- საკვლევ მინამსალების თერმულ/ქიმიურ დამუშავებისას წარმოქმნილი ნაერთების სახეობა დადგინდა რენტგენოფაზური ანალიზით (დიფრაქტომეტრი DPOH-3).

სამუშაოს საიხლე და ძირითადი შედეგები:

- $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ შედგენილობის კომპოზიციაში მიღებულია 6-10 მას. % ფოსფორის ანჰიდრიდის შემცველი მინები, რომლის სრული რაოდენობა დაკმაყოფილდა ძვლის ნაცარში წარმოდგენილი P_2O_5 -ით;

- დადგინდა მინაში წარმოდგენილი მინის წარმომქმნელი ოქსიდების (SiO_2 და P_2O_5) რაოდენობათა ფარდობის გავლენა საკვლევ მინის თვისებებზე და სტრუქტურული დიფერენციაციის დონეზე;

- ძვლის ნაცრის საფუძველზე მიღებული მინების მინაკრისტალურ მასალაში გადასვლას უზრუნველყოფს ნუკლეატორის სახით CaF_2 -ის გამოყენება და შედგენილობებში 3-4 % F-ის შეყვანა;

- დადგენილია, რომ ნუკლეატორის შემცველი მინების წმინდაკრისტალური აღნაგობის მასალაში გადასვლა მიიღწევა ორსაფეხურიანი თერმული დამუშავებით, რომლისთვის განისაზღვრა დაბალ- და მაღალტემპერა-

ტურული საფეხურების ტემპერატურები და „ტემპერატურა-დრო“ დამოკიდებულების ტექნოლოგიური რეჟიმი;

- მინების იძულებითი დაკრისტალება განსაზღვრავს თვისებათა მნიშვნელოვან ზრდას. დადგინდა, რომ დაკრისტალებული მინამასალის თვისებათა მკვეთრ ზრდას განსაზღვრავს მისი პოლიკრისტალური ბუნება. კრისტალური ფაზების სახით წარმოდგენილია ბიოაქტიური სამკალციუმინი ფოსფატი და მექანიკური სიმტკიცის ზრდის უზრუნველყოფელი ვოლასტონიტი, როდესაც თანმხლებ ფაზად რჩება ამორფული შემადგენელი.

სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს ეკონომიური, ძვლის ნაცრის 25 %-მდე შემცველი კაზიმებიდან ფოსფორშემცველი ბიოაქტიური მინების/მინაკრისტალური მასალების ტექნოლოგიის შექმნა, რაც უზრუნველყოფს მიღებული მასალების ISO-45175-3-2019 სტანდარტთან და ცნობილი ბიომინა/ბიომინაკრისტალური მასალების თვისობრივ თანხვედრას - მიზნობრივი გამოყენების პერსპექტიულობას.

სამუშაოს აპრობაცია: სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებული იყო ერთ საერთაშორისო კონფერენციაზე:

ე. უჩანეიშვილი, თ. ჭეიშვილი. ბუნებრივი ძვლის გამოყენებით ბიოაქტიური მინამასალების მიღების შესაძლებლობის დადგენა. სტუ, საერთაშორისო სამეცნიერო - ტექნიკური კონფერენცია „გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება“, მოხსენებითი თეზისები. 2019 წ. გვ. 73-75.

პუბლიკაციები: სამუშაოს ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო ნაშრომში.

სამუშაოს მოცულობა და სტრუქტურა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შემდეგი ნაწილებისაგან: შესავალი, ლიტერატურის მიმოხილვა (6 ქვეთავი), შედეგების განსჯა (6 თავი) და წარმოდგენილია 139 ფურცელზე. შეიცავს რეზიუმეს, 21 ნახაზს, 21 ცხრილს, დასკვნას, 113 ციტირებულ ლიტერატურას.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

ლიტერატურის მიმოხილვაში წარმოდგენილია მრავალფეროვანი მასალა, რომელიც ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას უკავშირდება – ბიომასალებს, რომელთა დანიშნულებაა მჭიდრო ურთიერთობაში შევიდეს ცოცხალი ორგანიზმების ცალკეულ ძვლოვან ქსოვილებთან და ამით მოხდეს მათი მკურნალობა/აღდგენა ან ჩანაცვლება.

ნებისმიერი მასალის ბიოაქტიურობას განსაზღვრავს მისი თავსებადობა ცოცხალი ორგანიზმის ძვლის ქსოვილთან, რომელსაც ახასიათებს რთული შედგენილობა, გამორჩეული მოწყობა და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები. აღნიშნულის გათვალისწინება აუცილებელი ხდება მიზნობრივად შექმნილი ბიომასალებით ძვლის ქსოვილის, სხვადასხვა დონით და დასახული მიდგომებით, ჩანაცვლება – რეგენერაციის წარმართვის განსახორციელებლად.

ლიტერატურის მიმოხილვაში მოყვანილია ძვლის ქსოვილის სტრუქტურული ორგანიზაციის დონეები, მისი ფაზური შედგენილობა, ზრდასრული ადამიანის ძვლის, კბილის დენტინის და მინანქრის შემადგენლობა, ადამიანის მკვრივი ძვლის მექანიკური თვისებები. წარმოდგენილია ცოცხალ ორგანიზმში ძვლის ქსოვილის უწყვეტი გარდაქმნა-განახლების ბუნებრივი პროცესის მექანიზმის სქემა და ძირითადი ეტაპები (თავი 1.1).

დღეისათვის ძვლის ენდოპროტეზირებაში გამოყენებული მასალების ნაირსახეობა, მათ გარშემო ჩამოყალიბებული შეხედულებათა და მოთხოვნათა ძირითადი არსი აღწერილია მომდევნო 1.2 თავში.

შემდგომ თავში მოყვანილია მედიცინაში ფართოდ გამოყენებული კალციუმის ორთოფოსფატების სახეობა, მათი დაბალ- და მაღალტემპერატურული კატეგორიები, მიღების „სველი“ და კერამიკული ტექნოლოგიები, კატიონ- და ანიონჩანაცვლებული ორთოფოსფატების მიღების მეთოდები და ბიოაქტიურობის განმსაზღვრელი თვისებები. აღინიშნება, რომ არსე-

ბული ორთოფოსფატებიდან დღეისათვის გამოყენება ჰპოვა სამმა ნაირსახეობამ: ჰიდროქსიაპატიტი, ფთორაპატიტი და სამკალცუმისანი ორთოფოსფატი (β - მოდიფიკაცია). ამავე თავში დახასიათებულია ბიომინა და ბიომინაკრისტალური მასალები, მათი შედგენილობები და მიღების ხერხები, ბიოაქტიურობის განმსაზღვრელი თვისებები (თავი 1.3).

კალციუმფოსფატების შემცველი ბიომინის და ბიოკერამიკის გამოყენების სფეროები და პერსპექტიულობა განიხილება მომდევნო 1.4 თავში.

დღეისათვის არსებული ბიოკერამიკული და მინა/მინაკრისტალური მასალების ფიზიოლოგიურ გარემოსთან ურთიერთქმედების მექანიზმთან მიმართებაში არსებული შეხედულებანი განხილულია 1.5 თავში.

ლიტერატურაში არსებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე ჩამოყალიბდა კვლევის ამოცანები და მათი განხორციელების გზები (თავი 1.6). კერძოდ, სამუშაოს ძირითადი მიზანი დაუკავშირდა ძვლის ნაცრის, როგორც კალციუმფოსფატური ნაერთების შემცველი ბუნებრივი ნედლეული, საფუძველზე ბიოაქტიური ფოსფატური მასალების მიღება-შესწავლას.

2. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები და მათი განსჯა

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევა მიემდგნა, ბუნებრივი ნედლეულიდან მიღებული საქონლის ძვლის ნაცრის მიზნობრივი გამოყენებით, ბიოაქტიური მინის და მინაკრისტალური მასალის მიღებას, რაც დაიგეგმა შესაბამისი მინამასალების მიღების არსებული მიდგომების საფუძველზე. ძვლის ნაცრის მიზნობრივ გამოყენების შესაძლებლობას განსაზღვრავს მისი ქიმიური და ფაზური შედგენილობა. მასში წარმოდგენილია CaO და P_2O_5 (ჯამურად 90%-ზე მეტი) და მზა კალციუმფოსფატური ნაერთები, რასაც უნდა განესაზღვრა ახალ სანედლეულო ბაზაზე ეკონომიურობით და ტექნოლოგიურობით გამორჩეული ბიომასალის მიღება.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, საქონლის ძვლის ნაცარი, როგორც კომპლექსური კალციუმფოსფატური ნაერთების შემცველი მასალა, ჩვენს მიერ შერჩეული იქნა მედიცინაში გამოყენებული ცნობილი შედგენილობის ბიომინის მისაღებად. აღნიშნულთან დაკავშირებით საჭირო გახდა და განხორციელდა ძვლის ნაცრის გამოყენებით $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ სისტემაში „კლასიკური“ შედგენილობის ბიოაქტიური მინების ახალ სანედლეულო ბაზაზე სინთეზი, მათი მინაკრისტალურ მასალაში გადაყვანის შესაძლებლობის დადგენა, მიღებული მინამასალების მახასიათებელი და ბიოაქტიურობის განმსაზღვრელი ძირითადი თვისებების შესწავლა.

2.1. ექსპერიმენტული კვლევის წინაპირობების განსაზღვრა

პირველი წინაპირობა – საბაზო მინების შედგენილობათა შერჩევა.

ბიოაქტიური მინების საბაზო შედგენილობად მიიჩნევენ $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$ სისტემაში მიღებულ მინებს. ყველა მათგანი სილიკატური კლასის მინებს მიეკუთვნება, მაგრამ ბიოაქტიურობის მიხედვით

გამოყოფენ შემდეგი შედგენილობის ბიომინებს (მოლ. %): 20 – 25 R_2O , 20 – 25 RO, 45 – 55 SiO_2 და 5 – 10 P_2O_5 . აღნიშნული ბიომინის მინაკრისტალურ მასალაში გადასაყვანად გამოიყენებენ კრისტალიზაციის ინიციატორებს (ნუკლეატობებს): TiO_2 , ZrO_2 , Na_2SiF_6 , Na_3AlF_6 , CaF_2 და სხვა.

მეორე წინაპირობა – ბიომინის მისაღები კალციუმფოსფატების შემცველი ნედლეულის და ტექნოლოგიის შერჩევა.

დღეისათვის ცნობილია ბიოაქტიური მინის და მინაკრისტალური მასალის მიღების ის ორი ძირითადი ხერხი, რომელიც შემოთავაზებული იქნა ლ. ჰენჩის მიერ ჯერ კიდევ დაახლოებით 60 წლის წინათ. მათგან პირველი ითვალისწინებს შესაბამისი ნედლეულის და ზოლ-გელ ტექნოლოგიის გამოყენებას, ანუ სასურველი მინის მისაღები დანალექის მიღების და მის შემდგომ შეცხობა-ლღობას. მეორე ხერხის მიხედვით, მინის მიღება უშუალოდ შესაბამისი მასალებიდან (SiO_2 , CaO, P_2O_5 და Na_2O შემცველი ნედლეული) შედგენილი კაზმის პირდაპირ მაღალტემპერატურულ სინთეზს უკავშირდება. ორივე შემთხვევაში საჭირო ხდება ძვირადღირებული ფოსფორშემცველი ნაერთების (ფოსფორმჟავა ან მისი მარილები) გამოყენება.

ამ მხრივ, ეკონომიკური და ტექნოლოგიური თვალსაზრისით მიზანშეწონილი იქნებოდა ისეთი ხელმისაწვდომი და ეკონომიკური P_2O_5 -ის შემცველი კომპლექსური მასალის შერჩევა, რომელიც სრულად დააკმაყოფილებდა მინამასალებში არა მარტო წარმოდგენილი P_2O_5 -ის შემცველობას, არამედ შეიყვანდა სხვა საჭირო ოქსიდებსაც (მაგ., CaO-ს).

თავისი ქიმიური (40 %-ზე მეტი P_2O_5) და მინერალოგიური (მზა კალციუმფოსფატები) შედგენილობიდან გამომდინარე, ძვლის ნაცარი ჩვენს მიერ მიჩნეულ იქნა, როგორც ბიომასალების მისაღებად გამოყენებადი პერსპექტიული ტექნოგენური ნედლეული.

მესამე წინაპირობა უშუალოდ უკავშირდება ერთ-ერთ ნედლეულად ძვლის ნაცრის გამოყენებით მიღებული მინამასალების მოსალოდნელ

ბიოაქტიურობას. აღნიშნულთან დაკავშირებით არსებობს მრავალი თვისობრივი მაჩვენებლები, რომლებითაც ზოგადად შეიძლება დადგინდეს ბიომინამასალის ბიოაქტიურობა. კერძოდ, განსაზღვრავენ ბიომასალის ფაზურ შედგენილობას, სატესტო რეაგენტში ხსნადობის შედეგად მის ზედაპირზე წარმოქმნილი სტრუქტურების სახეობას და სხვა მახასიათებელ თვისებებს (ძირითადად ISO-13175-3-2015 მიხედვით).

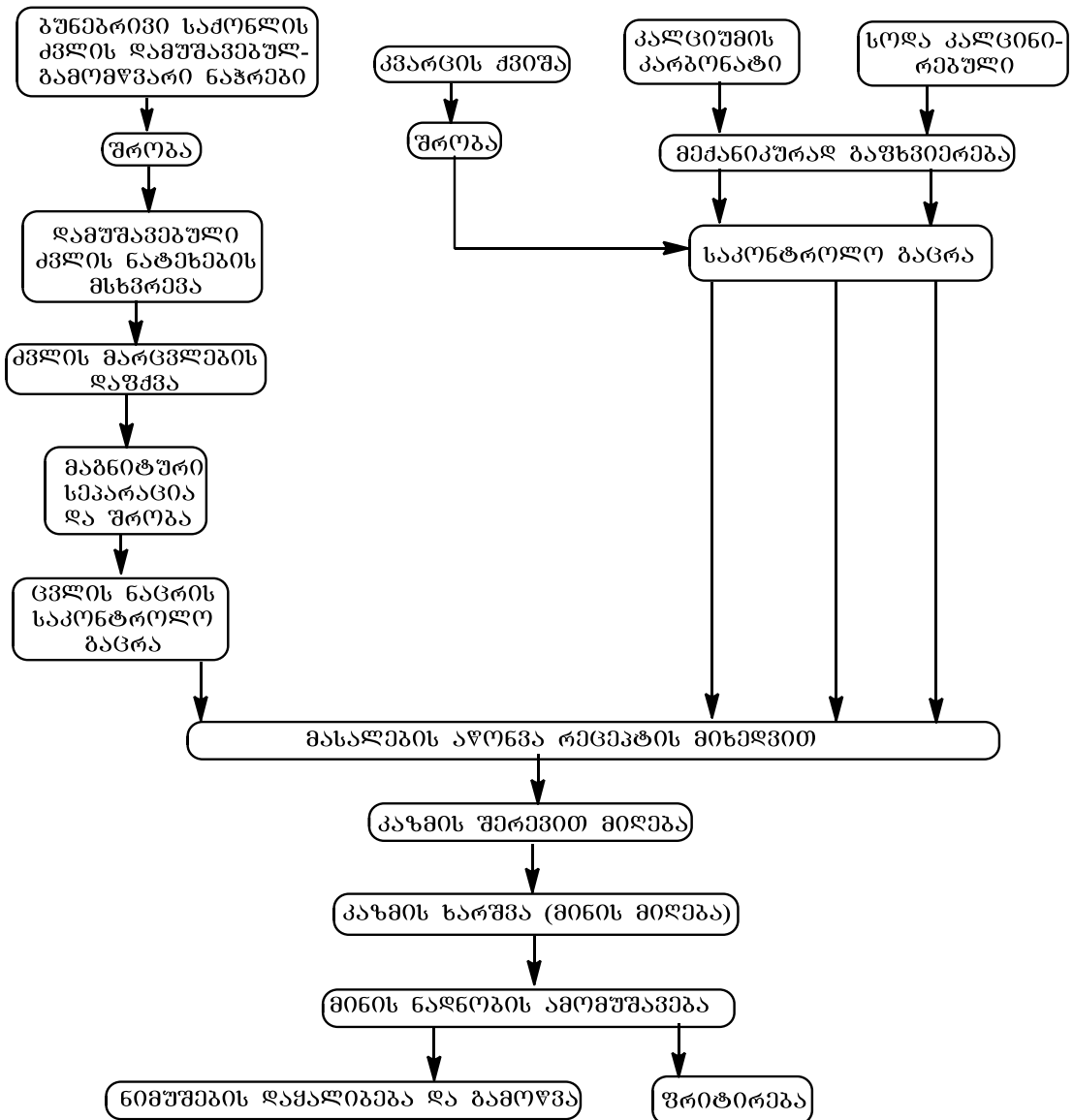
2.2 კაზმების მიღება, მინების სინთეზი და მათი თვისებათა შესწავლის მეთოდები

ჩვენს მიერ დაგეგმილი სამუშაოს უნდა გაეცა პასუხი კითხვაზე – საქონლის ძვლის ნაცრის გამოყენებით შედგენილი „კლასიკური“ $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ სისტემის მინების კაზმების საფუძველზე, შესაძლებელია თუ არა ბიომინის/ბიომინაკრისტალური მასალის მიღება.

ცხრილი 1. საკაზმე მასალების ქიმიური შედგენილობა

N	საკაზმე მასალის დასახელება	ოქსიდების შემცველობა, მას.%									ჯამი
		P_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	ხ.დ.	
1	ძვლის ნაცარი	40,3	0,4	0,3	0,1	53,2	2,8	–	–	3,3	100
2	კალციუმის კარბონატი ($CaCO_3$ „სუფთა“)	–	–	–	–	55,8	–	–	–	44,2	100
3	სოდა კალციონირებული (ტექნიკური)	–	–	–	–	–	–	–	58,4	41,6	100
4	კვარცის ქვიშა (ნოვოსილი)	–	99,30	0,13	0,08	–	–	0,05	0,02	0,45	100

აღნიშნულზე დასტურის მოპოვება შესაძლებელი გახდა მიზნობრივად ჩატარებული ექსპერიმენტულ კვლევით, როდესაც P_2O_5 რაოდენობა სრულად დაკმაყოფილდა ძვლის ნაცრის შემადგენლობაში შემავალი ფოსფორის ანჰიდრიდით.

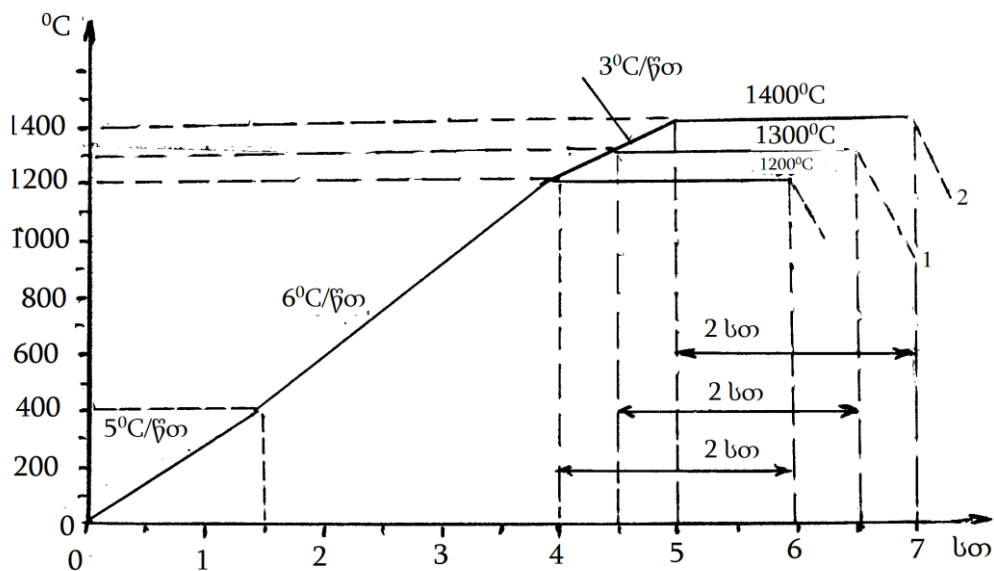


ნახაზი 1. ნედლეულის მომზადების, კაზმის მიღების და ბიომინის სინთეზის ტექნოლოგიური სქემა

RO(CaO)-ს საჭირო დამატებითი რაოდენობის კომპენსაცია განხორციელდა კალციუმის კარბონატით – „ქიმიურად სუფთა“ რეაქტივით, რომელშიც

$CaCO_3$ -ის შემცველობა 99,6 მას. %-ა. Na_2O -ს და SiO_2 -ის მინაში შესაყვანად შეირჩა, შესაბამისად, სოდა კალცინირებული (99,8 მას. % Na_2CO_3) და ნოვოსიულის საბადოს ქვიშა (მორეცხვით და მაგნიტური სეპარაციით გამდიდრებული), რომელშიც SiO_2 -ის შემცველობა 99,3 მას. %-ს შეადგენდა (ცხრილი 1). ლაბორატორიულ კვლევებში გამოყენებული ნედლეულის მომზადების, კაშმის მიღების და საკვლევი მინების სინთეზის ზოგადი ტექნოლოგიური სქემა მოყვანილია 1-ლ ნახაზზე.

ძვლის ნაცრის შემცველი საკვლევი შედგენილობის მინების ხარშვის პროცესის სქემა-გრაფიკი წარმოდგენილია მე-2 ნახაზზე



ნახაზი 2. საცდელი მინების ხარშვის სქემა - გრაფიკი
 1. ხარშვა 1300°C; 2. ხარშვა 1400°C

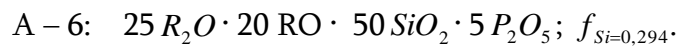
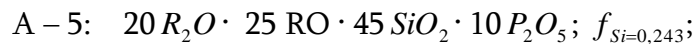
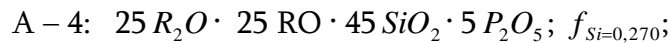
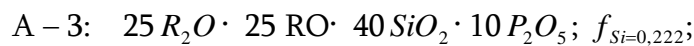
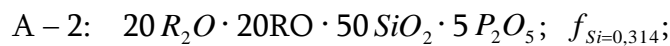
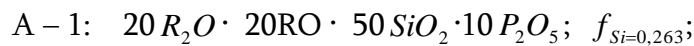
ხარშვისას წარმოქმნილი ნაღნობებიდან საკვლევი ნიმუშები მიიღებოდა ლითონის სხვადასხვა ფორმის ყალიბებში ჩამოსხმით და შემდგომი მოწვით (560-580°C). ნაღნობიდან ფრიტის მიღება ხდებოდა მშრალი (მასიურ ლითონის ფილაზე) ან სველი (წყლით გრანულირება) მეთოდით.

საცდელი ნიმუშების მოთხოვნადი თვისებების შესწავლა განხორციელდა მინის და კერამიკული მასალების შესწავლაში გამოყენებული მეთოდით (დადგენილია ქიმიური მდგრადობა, სიმკვრივე, მექანიკური სიმ-

ტკიცე, წყალშთანთქმა და სხვ.). მიღებული ბიომასალების კვლევაში გამოყენებული მეთოდების რიგი თავისებურება წარმოდგენილია სადისერტაციო ნაშრომის ექსპერიმენტის მსვლელობის და მიღებული შედეგების განხილვისადმი მიძღვნილ თავებში.

2.3. საკვლევ კომპოზიციების შერჩევა და მათგან მინის მიღების შესაძლებლობის ანალიზი

საკვლევი ბიოაქტიური მინების შედგენილობიდან გამომდინარე, ჩატარდა მათი სტრუქტურული კარკასის ბმულობის ხარისხის შეფასება f_{Si} -კოეფიციენტით. ამისათვის აღებული იქნა ექვსი შედგენილობა (A-1...A-6), რომელთა შედგენილობა (მოლური ფორმულა) შემდეგია:



დადგინდა, რომ f_{Si} -ის სიდიდეების მნიშვნელობათა საფუძველზე მინის წარმოქმნისადმი მიდრეკილი უნდა იყვნენ A-2 ($f_{Si=0,314}$), A- 4 ($f_{Si=0,270}$) და A-6 ($f_{Si=0,294}$) შედგენილობები, რომელთა f_{Si} – მნიშვნელობა დაახლოებით 0,3-ს შეადგენს. მოყვანილ შედგენილობებში წარმოდგენილია: 40-45 მოლ.% მოდიფიკატორი ($R_2O + RO$) და 55-60 მოლ.% მინის წარმოქმნელი ($SiO_2 + P_2O_5$) ოქსიდი.

2.4. საბაზო მინების და მათი კაზმების შედგენილობა.

საბაზო მინების სინთეზის შედეგები

კვლევის საწყის ეტაპზე, ძვლის ნაცრის გამოყენებით $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ სისტემაში მინის მიღების შესაძლებლობის დასადგენად, შერჩეული იქნა 12 შედგენილობის მინა, რომელთა ოქსიდური ქიმიური შედგენილობა წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში, ხოლო თორმეტივე (B-1...B-12) შედგენილობის მინის კაზმების მატერიალური შედგენილობა მოყვანილია მე-3 ცხრილში. შესაბამისი კაზმებიდან მინების სინთეზი განხორციელდა მე-2 ნახაზზე მოყვანილი რეჟიმით.

ცხრილი 2. საკვლევი საბაზო მინების ქიმიური შედგენილობა

ოქსიდი	მინების ინდექსი და ოქსიდების შემცველობა (მას. %)											
	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-12	B-13
Na_2O	20	20	25	25	20	20	25	25	15	15	15	17
CaO	20	20	25	25	25	25	20	20	20	20	25	25
SiO_2	50	55	40	45	50	45	45	50	55	60	55	60
P_2O_5	10	5	10	5	5	10	10	5	10	5	10	5

ცხრილი 3. საბაზო მინების კაზმის მატერიალური შედგენილობა

მინის (კაზმის) ინდექსი	კაზმის კომპონენტების რაოდენობა (წ.ნ./100 წ.ნ. მინა)				
	ძვლის ნაცარი	კვარცის ქვიშა	ცარცი (შეტანილი CaO, %)	სოდა კალციონირებული	კაზმის წონა 100 წ.ნ. მინაზე
B – 1	22,4	50,5	10,4 (5,8)	35,5	118,3
B – 2	12,2	55,6	29,2 (12,9)	35,5	126,0
B – 3	22,4	56,4	19,4 (10,8)	35,5	133,2
B – 4	12,4	45,5	32,2 (17,9)	43,8	133,7
B – 5	12,2	50,5	32,2 (17,9)	35,0	129,9
B – 6	22,4	45,5	19,4 (10,8)	35,0	122,3
B – 7	22,4	45,5	10,4 (5,8)	43,8	122,1
B – 8	12,2	50,5	23,2 (12,9)	43,8	129,7
B – 9	22,4	55,6	10,4 (5,8)	26,3	114,7
B – 10	12,2	60,6	23,2 (12,9)	26,3	122,3
B – 11	22,4	55,5	19,4 (10,8)	26,3	103,6
B – 12	12,2	60,6	32,2 (17,9)	26,3	131,3

2.5. საკვლევი მინების და მათგან მიღებული დაკრისტალებული მასალების თვისებათა შესწავლა

ჩატარებული საკვლევად შერჩეული საბაზო მინების სინთეზის შედეგების ანალიზით შეირჩა სამი (C-1 ... C-3) შედგენილობა, რომლებიც უზრუნველყოფენ 1350 – 1400°C ტემპერატურულ ინტერვალში ერთგვაროვანი (ჰომოგენური) ნადნობების მიღებას. აღნიშნული მინების შედგენილობებში ძირითადი ოქსიდური ინგრედიენტების შემცველობა შეადგენს (მას. %): 20 – 25 Na_2O , 22-25 CaO , 45 – 47 SiO_2 და 6-10 P_2O_5 . სამივე მინაში შემავალი ოქსიდური ნაერთების შემცველობა შეესატყვისება ბიოაქტიური მინების ცნობილ შედგენილობებს იმ განმასხვავებელი პირობით, რომ 6-10 მას. % P_2O_5 -ის საკვლევი მინების შედგენილობაში შესაყვანად საჭირო გახდა კაზიმის შედგენილობაში დაახლოებით 13-დან 28 მას. %-მდე ძვლის ნაცრის შეყვანა.

მიღებულ მინებს ჩაუტარდათ მიზნობრივი კვლევა, რომელიც მოიცავდა ერთ-ერთი მინის ტექნოლოგიურობის განმსაზღვრელი თვისების - კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილების დადგენას. სხვა ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებიდან, მიღებული მინების ბიოაქტიურ მასალათა მიკუთვნებისა და მათი პერსპექტიულობის განსაზღვრისათვის, საჭირო გახდა და განისაზღვრა მიღებული მინის სიმკვრივე და სიმტკიცე კუმშვაზე. ასევე დადგინდა ფხვნილების ფრაქციულობის გავლენა წყალშთანთქმაზე და ქიმიურ მდგრადობაზე.

საკვლევად შერჩეული მინების შედგენილობის თვისებებზე გავლენის დასადგენად ჩატარდა C – 1, C – 2 და C – 3 შედგენილობების ანალიზი, მათში წარმოდგენილი მინის წარმომქმნელების (SiO_2 და P_2O_5) და სტრუქტურის მოდიფიკატორების (Na_2O და CaO) შემცველობებიდან და ცალკეულ ოქსიდს შორის არსებული თანაფარდობებიდან გამომდინარე.

ცხრილი 5. $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ კომპოზიციის საკვლევ მინებში
შემავალი ოქსიდების თაფარდობა

შედ- გენ- ილო ბა	მინების ოქსიდების შემცველობა, მას. %				მინებში ოქსიდების თანაფარდობა			
	Na_2O	CaO	SiO_2	P_2O_5	$\frac{\% (R_2O + RO)}{\% (SiO_2 + P_2O_5)}$	$\frac{\% CaO}{\% SiO_2}$	$\frac{\% CaO}{\% P_2O_5}$	$\frac{\% SiO_2}{\% P_2O_5}$
C - 1	25	22	47	6	0,89	0,49	3,7	7,8
C - 2	23	24	45	8	0,89	0,53	3,0	5.6
C - 3	20	25	45	10	0,82	0,56	2,5	4,5

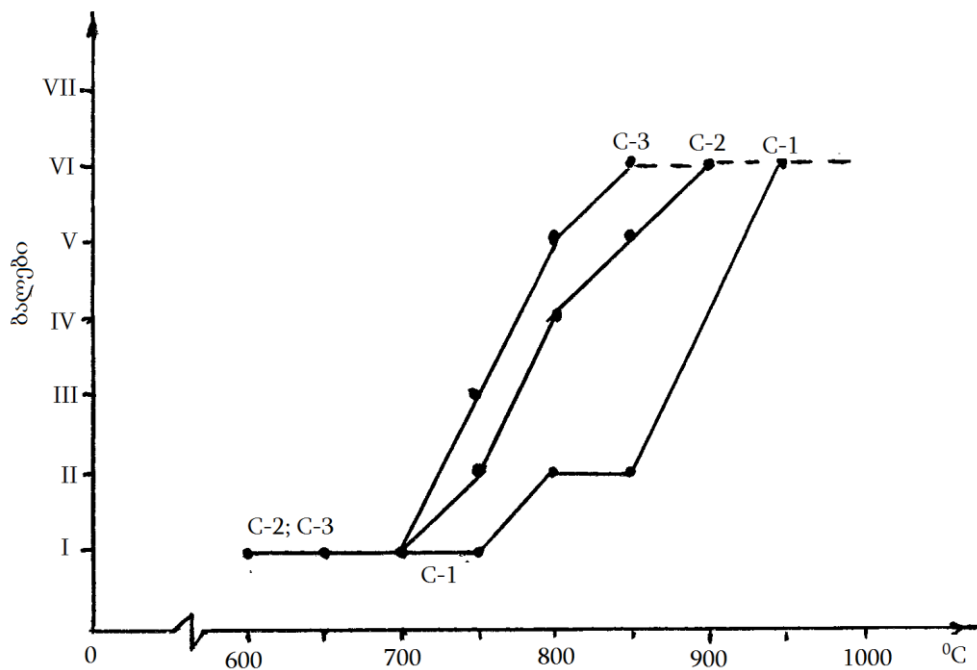
შესაბამისი გათვლებით დადგინდა, რომ ყოველგვარი თვისობრივი ცვლილება, რომელიც გამოწვეულია მინებში და მათი თერმული დამუშავებით მიღებულ დაკრისტალბულ მასალაში დამოკიდებული უნდა იყოს CaO/P_2O_5 და SiO_2/P_2O_5 ფარდობაზე. აქედან საკვლევ მინამასალებში (მინა, დაკრისტალბული მინა) შესწავლილ თვისებათა ცვლის ტენდენციები ჩვენ, შესაბამისი გრაფიკების სახით, დავაკავშირეთ მინის სტრუქტურული დიფერენციაციის ამსახველ SiO_2/P_2O_5 ფარდობასთან, რომლის მნიშვნელობა C-სერიის მინებში 4,5-დან 7,8-მდე იცვლება (ცხრილი 5).

სამივე (C-1, C-2, C-3) შედგენილობის მინის ნიმუშებს განესაზღვრა კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილების უნარი. კვლევის შედეგები წარმოდგენილია მე-3 ნახაზზე, ხოლო მინების კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილების უნარის შეფასების სკალა მოყვანილია მე-6 ცხრილში.

სამივე შედგენილობის მინის ნიმუშებისათვის კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილების უნარის შესწავლით დადგინდა, რომ კრისტალიზაციის პირველი ნიშნები (ნიმუშების ზედაპირზე თხელი კრისტალიზაციური აფსკის წარმოქმნა) $800^{\circ}C$ -ზე მხოლოდ C-3 შედგენილობის მინას ახასიათებს, როდესაც აღნიშნულ მდგომარეობას C-2 მინა $750^{\circ}C$ აღწევს. რაც შეეხება C-3 მინას - მის $800^{\circ}C$ -ზე დამუშავებისას ადგილი აქვს V ხარისხის დაკრისტალბებას და პირობითი შკალის მიხედვით მინის მოცულობით სანახევრო კრისტალიზაცია მიიღწევა.

ცხრილი 6. საკვლევი მინების კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილების შეფასების სკალა

პირობითი ბალები	მინის თერმული დამუშავების შედეგად დაფიქსირებული გარდაქმნის დონეები და ხარისხი	
	გარდაქმნის სახე	ხარისხი
I	მინის გარდაქმნას ადგილი არ აქვს	–
II	მინის ზედაპირმა შეიცვალა სახე	მრქალი აფსკი
III	მინის ზედაპირზე წარმოიქმნა კრისტალიზაციური თხელი ფენა (აფსკი)	ფენის სისქე 1 მმ-მდე
IV	მინის ზედაპირზე წარმოიქმნა დაკრისტალბული შრე მინის ნიმუშების ზედაპირზე არსებობს	შრის სისქე 3 მმ-მდე
V	დაკრისტალბული შრე და მოცულობაში ცალკეული კრისტალები;	მოცულობის 50%-მდე დაკრისტალდა
VI	მინის მოცულობის ძირითადი ნაწილი შევსებულია მსხვილი (ტლანქი) კრისტალებით	მოცულობის 70%-ზე მეტი დაკრისტალდა
VII	მინა მოცულობით სრულად დაკრისტალდა და ადგილი აქვს წვრილმარცვლოვან კრისტალიზაციას	მოცულობის 90 %-ზე მეტი დაკრისტალდა



ნახაზი 3. საკვლევი მინების დაკრისტალბების უნარი

კვლევის შედეგების შეფასებით - არც ერთი მინა წმინდაკრისტალურ მდგომარეობაში (VII საფეხური-ხარისხი) არ გადადის, ხოლო დაახლოებით 2/3 მოცულობითი (ტლანქი კრისტალები) კრისტალიზაცია სამივე მინისათვის მიიღწევა სხვადასხვა ტემპერატურაზე დაკრისტალებისას: C-3 მინა დაკრისტალების VI ხარისხის აღწევს 850°C-ზე, C-2 საჭიროებს 900°C, ხოლო C-1 უკვე 950°C-ზე თერმულ დამუშავებას.

დაკრისტალებისადმი მიდრეკილების დონეების მიხედვით სამივე მინა შემდეგი მწკრივის სახით შეიძლება ჩაიწეროს: C-3 > C-2 > C-1. მაშასადამე, რაც მეტია მინებში % CaO + % P₂O₅ ჯამური შემცველობა და SiO₂/P₂O₅ ფარდობის მნიშვნელობა, მით მეტია მინის კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილება და შესაბამისად ბიომინაკრისტალური მასალის მიღების პერსპექტივა.

მინებს და მინაკრისტალურ მასალებს ფიზიოლოგიურ ხსნარში ხსნადობა განესაზღვრათ 37±1°C ტემპერატურაზე, ხოლო რეაგენტში დაყოვნების დრო 6 სთ-ს შეადგენდა.

სამი შედგენილობის C - სერიის მინის და შესაბამისად მათი იძულებითი დაკრისტალებით მიღებული D-სერიის მინაკრისტალური მასალების მახასიათებელი თვისების განსაზღვრის შედეგები წარმოდგენილია მე-7 ცხრილში.

ცხრილი 7. საკვლევი და დაკრისტალებული მინების მახასიათებელი თვისებები

N	თვისება	განზ.	შედგენილობის ინდექსი და თვისებათა მნიშვნელობა					
			C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3
1	სიმტკიცე კუმშვაზე (P) ⁽¹⁾	მპა	510	480	470	390	410	480
2	ქიმიური მდგრადობა (Δg) ⁽²⁾	%	1,6	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1
3	სიმკვრივე (d) ⁽³⁾	გ/სმ ³	2,66	2,67	2,69	2,72	2,73	2,74
4	წყალშთანთქმა (w) ⁽⁴⁾	%	0,05	0,06	0,05	1,30	1,25	1,20

აღნიშვნა: (1) - კუბის ფორმის (10×10×10 მმ) მასიური ნიმუში;

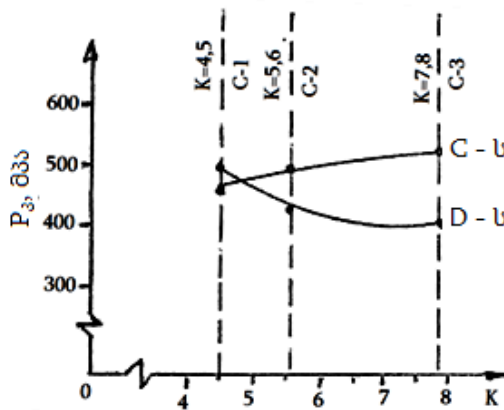
(2) - 0,1 ≤ d_{საშ} ≤ 0,5 მმ ფრაქციულობის მარცვლები (დაყოვნება 6 სთ);

(3) - მასიური წკირები (მასა 3 – 5 გ);

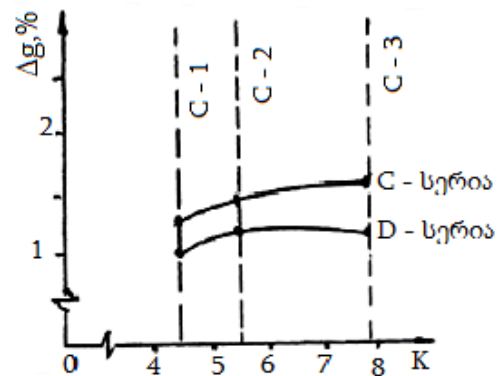
(4) - 0,5 ≤ d_{საშ} ≤ 2,0 მმ ფრაქციულობის მარცვლები.

თვისებათა შედარებითი კვლევის შედეგებიდან გამომდინარე: საკვლევ მინამასალათა თვისებებს განსაზღვრავს მათი შედგენილობა და რაობა, როდესაც მინაკრისტალური მასალები ხასიათდებიან საწყის მინასთან შედარებით განსხვავებული თვისებებით.

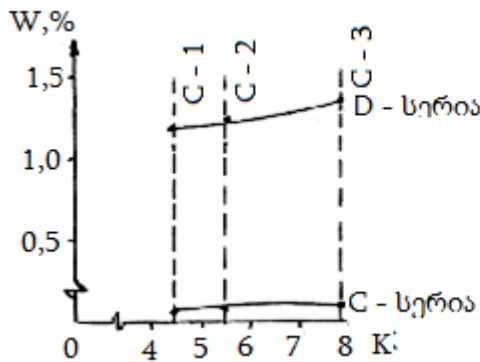
ამავე დროს, უკეთესი ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლებით ხასიათდება D – 3 მინამასალა, რომელიც მიღებულია C – 3 მინის დაკრისტალებით.



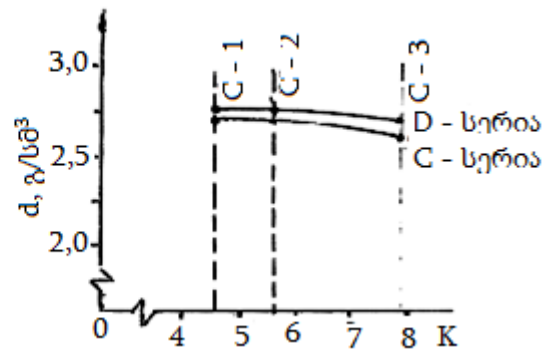
ა) სიმტკიცე კუმშვაზე



ბ) ქიმიური მდგრადობა ფიზიოლოგიურ ხსნარში



გ) წყალშთანთქმა



დ) სიმკვრივე

ნახაზი 4. შედგენილობის ($K = \% SiO_2 / \% P_2O_5$) გავლენა საკვლევი მინის (სერია C) და მისგან მიღებული დაკრისტალებული მასალების (სერია D) მახასიათებელ თვისებებზე

ოთხი შესწავლილი მახასიათებელ თვისებათა დამოკიდებულება მინის დიფერენციაციის ხარისხის შესაფასებელ $SiO_2 / P_2O_5 = K$ ფარდობასთან მიმართებაში წარმოდგენილია მე-4 ნახაზზე. ყველა თვისებათა მიმართე-

ბაში გამოიკვეთა ერთი საერთო კანონზომიერება - მინები (C-1, C-2, C-3) ხასიათდებიან უფრო მაღალი მექანიკური სიმტკიცით კუმშვაზე და ფიზიოლოგიურ ხსნარში ხსნადობით, ვიდრე მათი დაკრისტალებით მიღებული მასალები D-1, D-2, D-3. ამავე დროს, დაკრისტალებული მინების სიმკვრივე და წყალშთანთქმა უფრო დიდია, ვიდრე მათ საფუძვლად გამოყენებულ მინებს ახასიათებს. თვისებათა შედარებით ანალიზით შეიძლება გაკეთდეს თვისებათა თავისებური ცვლის მიზეზთა ახსნა. საკვლევი მინების კრისტალიზაციის პროცესი სრულად მოცულობაში არ მიმდინარეობს და ამავე დროს ადგილი აქვს ტლანქი და არა წმინდამარცვლოვან კრისტალიზაციას. აქედან მოსალოდნელია დაკრისტალებულ მინებში შიდა დაძაბულობის არსებობა, რაც განაპირობებს დაკრისტალებული ნიმუშების მექანიკური სიმტკიცის კლებას და ზედაპირული მიკრობზარების წარმოქმნის გამოწყალშთანთქმის ზრდას. ამავე დროს, თერმული დამუშავებით მიღწეული დაკრისტალება იწვევს კრისტალური ჩანართების წარმოქმნას, რომლის თვისობრივი მაჩვენებლები განაპირობებენ დაკრისტალების შემდეგ მიღებული მინამასალების ქიმიურ მდგრადობის და სიმკვრივის ზრდას.

კვლევით გამოვლინდა, რომ იძულებითი დაკრისტალებით და ასევე მინების შედგენილობით, შესაძლებელია ძვლის ნაცრის საფუძველზე მიღებული მინამასალების თვისებათა მიზნობრივი კორექტირება.

2.6. მინების ჰეტეროგენული დაკრისტალებით ბიომინაკრისტალური მასალის მიღება

სამუშაოს დასკვნითი ეტაპის ამოცანას წარმოადგენდა წინამორბედი კვლევებით მიღებული და პერსპექტიულად მიჩნეული C-3 შედგენილობის მინის გარდაქმნა წმინდაკრისტალური აღნაგობის მინამასალაში (ე.წ. სიტალში). ამ მიმართულებით კვლევის ჩატარება განაპირობა შემდეგმა ძირითადმა ფაქტორმა – ძვლის ნაცრის, როგორც P_2O_5 -ის შემყვანი ძირითადი ნედ-

ლეულის საფუძველზე ვერ იქნა მიღებული საჭირო და ბიოაქტიური მასალებისათვის აუცილებელი თვისებების მატარებელი მინამასალების მიღება. მაგრამ, დადგინდა რომ ახალ სანედლეულო ბაზაზე მიღებული მინები მიდრეკილნი არიან კრისტალიზაციისადმი და მათ შორის გამორჩეულად C-3 შედგენილობის მინა. ასეთი შედგენილობის მინის გარდაქმნა სიტალში/მინიკრისტალურ მასალაში და ამ გზით მისი თვისებების სრულყოფა ჩვენს მიერ პრაქტიკულად მიღწევად ამოცანად იქნა მიჩნეული.

ცნობილია, რომ მინის გარდაქმნა სიტალში (წვრილკრისტალურ მინამასალაში ანუ მინაკრისტალურ კომპოზიტში) მოითხოვდა C-3 მინისაგან სიტალის მიღების პროექტირებას ანუ მინის სიტალში გარდაქმნის წინაპირობების დადგენას, რაც ითვალისწინებს: მინის შედგენილობის შერჩევას; ეფექტური ნუკლეატორის შერჩევას; ნუკლეატორის შემცველი მინის სინთეზი, ნუკლეატორიანი მინის სიტალში გარდაქმნის ოპტიმალური თერმული რეჟიმის დადგენას.

მოთხოვნადი ოთხი ფაქტორიდან ცნობილი იყო მხოლოდ **პირველი ფაქტორი**: C-3 მინის შედგენილობა, რომელიც შეესატყვისება ცნობილ ბიოაქტიური მინების შედგენილობას და ხასიათდება ტექნოლოგიურობით.

მეორე ფაქტორი ითვალისწინებს ისეთი ნუკლეატორის შერჩევას, რომელიც C-3 მინის წმინდაკრისტალური სტრუქტურული აღნაგობის მინაკრისტალურ მასალაში გადაყვანას უზრუნველყოფს. ლიტერატურის წყაროებში არსებული მონაცემებზე დაყრდნობით, C-3 შედგენილობის იდენტური $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ სისტემის მინების დასაკრისტალებლად (მაგ. „სერაბონი“, „ბიოვერიტი“ და სხვა სიტალების მისაღებად) რეკომენდირებულია ნუკლეატორად ფტორის (3-5 %) გამოყენება, რომელიც შესაბამისი ფტორშემცველი ნაერთების სახით შეიყვანება კაზმში. ფტორშემცველ საკაზმე კომპონენტად ჩვენს მიერ შერჩეული იქნა CaF_2 .

მლღობელი შპატის მონაწილეობით შედგენილი იქნა E - სერიის სამი კაზმი, რომელშიც საბაზო C-3 მინის კაზმის დანამატად შეყვანილი იქნა CaF_2 :

<u>მინა E – 1(3% F)</u>	<u>მინა E – 2(4% F)</u>	<u>მინა E – 3(5% F)</u>
C – 3 მინის კაზმი	C – 3 მინის კაზმი	C – 3 მინის კაზმი
+ 6,2 CaF_2	+ 8,2 CaF_2	+ 10,8 CaF_2

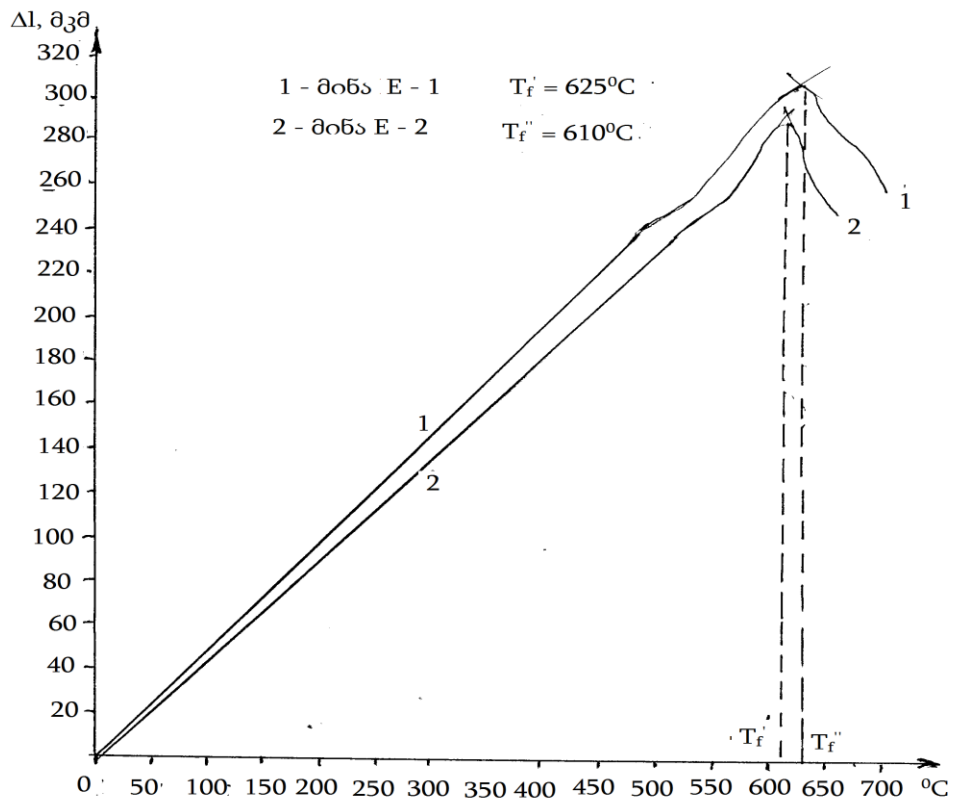
შესამე ფაქტორი E-სერიის კაზმების ხარშვა განხორციელდა უფრო დაბალ ტემპერატურებზე, ვიდრე C-3 მინისათვის იყო საჭირო ($1360 \pm 10^\circ C$). ფტორშემცველი კაზმებიდან მიღებულია ერთგვაროვანი ნადნობები ($1270-1320$) $\pm 10^\circ C$ -ზე, როდესაც F-ის რაოდენობის ზრდა ამცირებს ხარშვის ტემპერატურას. E-1 და E-2 შედგენილობები ნადნობები იძლევა ერთგვაროვან მინას, როდესაც E-3 ნადნობიდან მიღებული მინა-განფენადია. შემდგომი კვლევები ჩატარდა E-1 და E-2 შედგენილობის მინების საფუძველზე.

მეოთხე ფაქტორი მოითხოვდა ნოკლეატორის შემცველი E-1 და E-2 მინისათვის ჰეტეროგენული დაკრისტალებისათვის საჭირო თერმული დამუშავების დაბალტემპერატურულ პირველი (I) და მაღალტემპერატურული მეორე (II) საფეხურის ტემპერატურის დადგენას.

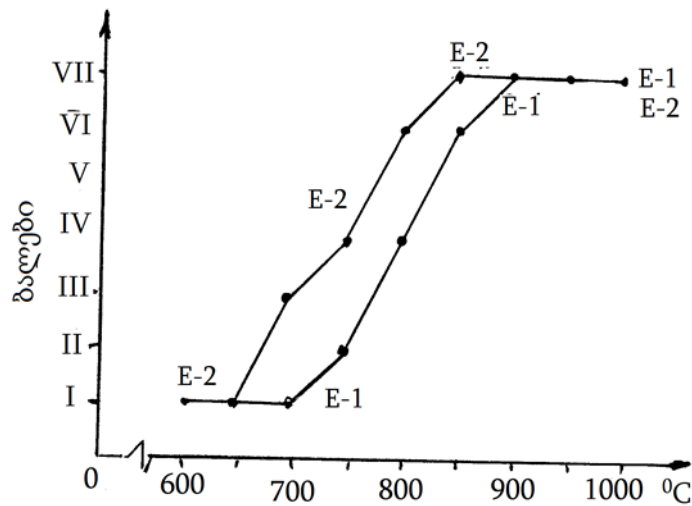
პირველი საფეხურის შესატყვისი ტემპერატურა განისაზღვრა E-1 და E-2 მინისათვის „დაგრძელება-ტემპერატურა“ დამოკიდებულების მრუდიდან, შესაბამისი დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურის (T_f) მნიშვნელობები (610 და $625^\circ C$), რაც წარმოდგენილია მე-5 ნახაზზე.

საკვლევი E-1 და E-2 მინების დაკრისტალების II საფეხურის დასადგენად საჭირო გახდა E-1 და E-2 შედგენილობის მინების კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილების დადგენა რაც, განხორციელდა მასობრივი დაკრისტალების მეთოდით და შეფასების პირობითი 7 ბალიანი სკალით (ნახაზი 6).

კრისტალიზაცია ჩატარდა $600-1000^\circ C$ ტემპერატურულ ინტერვალში, როდესაც ტემპერატურული ბიჯი შეადგენდა $50^\circ C$. E-1 და E-2 მინების კრისტალიზაციით მიღებული შედეგები მოყვანილია მე-6 ნახაზზე.



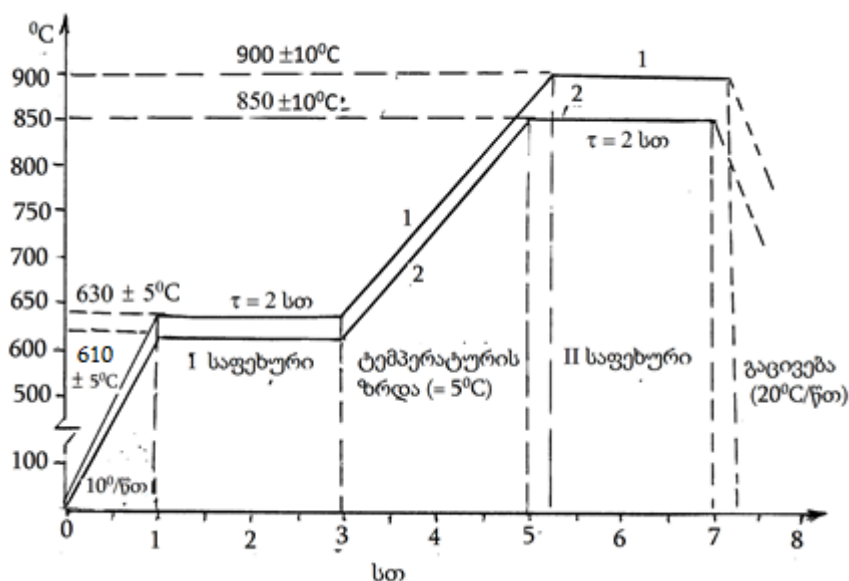
ნახაზი 5. ფტორშემცველი E-1 და E-2 მინის „ $\Delta l - t$ ” დამოკიდებულების გრაფიკები და მათი დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურების (T_f) განსაზღვრა



ნახაზი 6. ფტორშემცველი E - 1 და E - 2 შედგენილობის მინების კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილება

ჩატარებული კვლევით დადგინდა, რომ E-1 და E-2 შედგენილობის მინების ჰეტეროგენული ორსაფეხურიანი დაკრისტალების პროცესის განსახორციელებლად, საჭიროა მათი თერმული დამუშავება შემდეგ დადგენილ ტემპერატურებზე:

	<u>მინა E – 1</u>	<u>მინა E – 2</u>
• პირველი საფეხური:	625 ± 5 °C;	610 ± 5°C;
• მეორე საფეხური :	900°C ან მეტი	850°C ან მეტი



ნახაზი 7. E – 1 და E – 2 მინის ჰეტეროგენული ორსაფეხურიანი დაკრისტალების პროცესის სქემა-გრაფიკი

ორივე შედგენილობის მინების სიტილიზაციის ანუ ორსაფეხურიანი თერმოდამუშავებით, მინების დაკრისტალების პრაქტიკულად გამოყენებულ სქემა-გრაფიკი წარმოდგენილია მე-7 ნახაზზე.

მინის იძულებითი დაკრისტალება და მისი მინაკრისტალურ მასალაში ტრანსფორმაცია განაპირობებს თვისებათა მნიშვნელოვან ცვლილებას და ამ გზით შესაძლებელი ხდება გარდაქმნის ხარისხის შეფასება. შეიქმნა ორი საკონტროლო თვისება - სიმკვრივე და მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე.

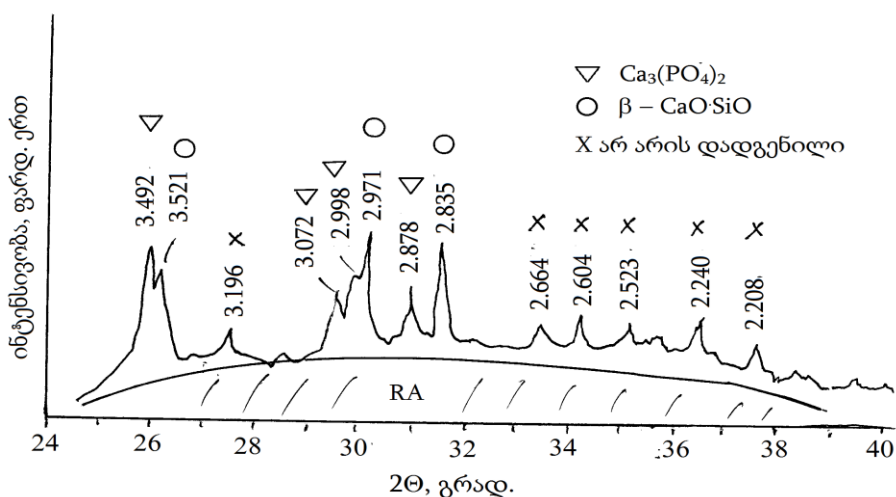
სატესტო თვისებათა ცვლილებათა ანალიზით დადგინდა, რომ საბაზო C – 3 შედგენილობაში CaF_2 -ის შეყვანით და მინაში 3 და 4 % F-ის არსებობა (შესაბამისად E-1 და E-2 შედგენილობები) უმნიშვნელოდ ამცირებს რო-

გორც სიმკვრივეს, ასევე მექანიკურ სიმტკიცეს კუმშვაზე. ამავე დროს, ორსაფეხურიანი თერმული დამუშავება რადიკალურად ზრდის ორივე სატესტო თვისებების მაჩვენებლებს, როგორც საბაზო (C-3), ასევე ფთორშემცველი E-1 და E-2 შედგენილობის მინებთან შედარებით. მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე, დადგინდა რომ ორსაფეხურიანი დაკრისტალეზით მიიღწევა ფტორშემცველი მინების გარდაქმნის მაღალი ხარისხი (ცხრილი 8).

ცხრილი 8. საბაზო (C – 3), ფთორშემცველი (E – 1, E – 2) მინების და მათი ორსაფეხურიანი თერმული დამუშავებით მიღებული მინაკრისტალური მასალების (G – 1, G – 2) სატესტო თვისებები

N	სატესტო თვისების დასახელება	განზომილება	საბაზო C – 3 მინა	ფთორშემცველი E - სერიის მინები		დაკრისტალეზული E - სერიის მინამასალები	
				E - 1	E - 2	G - 1	G - 2
1	სიმკვრივე (d)	გ/სმ ³	2,67	2,64	2,63	2,73	2,79
2	მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე (P)	მპა	470	440	420	680	710

ვინაიდან ორსაფეხურიანი დაკრისტალეზით მიღებული G-1 და G-2 მინამასალებიდან დაკრისტალეზისადმი უფრო მაღალი მიდრეკილება დაუდგინდა G – 2 მინამასალას, შესაბამისი რენტგენოფაზური ანალიზი მას ჩატარდა. მიღებული დიფრაქტოგრამის ფრაგმენტი წარმოდგენილია მე-8 ნახაზზე.



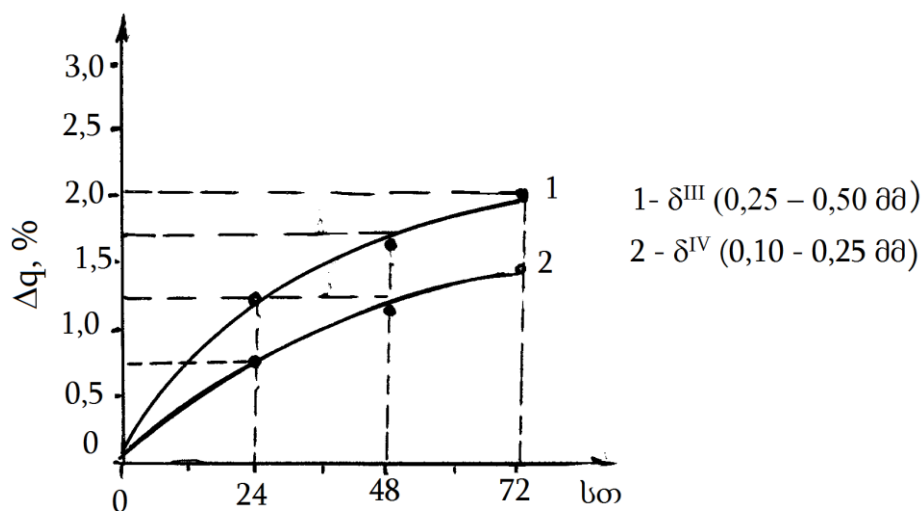
ნახაზი 8. G – 2 შედგენილობის იძულებითი დაკრისტალეზით მიღებული მინამასალის დიფრაქტოგრამის ფრაგმენტი

რენტგენფაზური ანალიზის შედეგებიდან გამოვყოფთ ორ ძირითად გარემოებას. მათგან პირველი უკავშირდება G-2 მინაკრისტალური კომპოზიტის პოლიკრისტალურ შედგენილობას - დადგენილია მასში სამკალციუმიანი ფოსფატის $Ca_3(PO_4)_2$ და ვოლასტონიტის $-CaO \cdot SiO_2$ კრისტალების არსებობა. მათგან კალციუმის ორთოფოსფატი მიჩნეულია ბიოაქტიური მასალების შემადგენელ აუცილებელ ფაზად, რაც დასტურდება შესაბამისი ლიტერატურული წყაროებით და ISO 13175-3-2015 სტანდარტით. მიღებულ კომპოზიტში დასტურდება ვოლასტონიტის არსებობა - შესაბამისად მას უნდა გამოეწვია მინაკრისტალური მასალის სიმტკიცის ზრდა, რაც დადასტურდა ექსპერიმენტით (ცხრილი 8).

მეორე შედეგი უკავშირდება მინაკრისტალურ მასალაში ამორფული შემადგენლის არსებობას, რომლის შემადგენლობაში დიდი ვარაუდით წარმოდგენილია Na_2O , SiO_2 და გარკვეული რაოდენობით (კრისტალურ ფაზათა წარმოქმნიდან ნარჩენი) CaO . ამორფულ მდგენელში არ გამოირიცხება P_2O_5 -ის მცირეოდენი რაოდენობით არსებობაც.

საკვლევი G-2 კომპოზიტის მიმართებაში, მისი კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი თვისების- ქიმიური მდგრადობის განმსაზღვრელ რეაგენტად აღებული იქნა ფიზიოლოგიური ხსნარი, (ტემპერატურა შეადგენდა $37 \pm 1^\circ C$), ხოლო ნიმუშების რეაგენტში დაყოვნება განხორციელდა ISO 13175-3-2015 სტანდარტის მოთხოვნათა შესაბამისად: 24, 48 და 72 სთ-ის განმავლობაში. მაკონტროლებელ სიდიდეს წარმოადგენდა ფხვნილის წონის დანაკარგები %-ში. ორი განსხვავებული ფრაქციულობის ფხვნილების ხსნადობა ფიზიოლოგიურ ხსნარში განსაკუთრებით მაღალია პირველი 24 საათის განმავლობაში. შემდგომ პერიოდში დანაკარგების ზრდა შენარჩუნებულია, მაგრამ წონის ფარდობითი დანაკარგების ცოტაოდენი კლება შეიმჩნევა. ამავე დროს, ფრაქციულობის შემცირება მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ხსნადობის ხარისხზე - მარცვლების ზომის შემცირება ზრდის ხსნადობას (ნახაზი 9).

ფიზიოლოგიურ ხსნარში G-2 კომპოზიტის სხვადასხვა ფრაქციულობის ფხვნილების ხსნადობის შესწავლით დადგინდა, რომ დასაშვებ ზღვარს (72 სთ-ანი დამუშავებით სატესტო რეაგენტში არა უმეტესი 2 %) აკმაყოფილებს 0,1 – 0,5 ფრაქციულობის მარცვლების შემცველი G-2 კომპოზიტის ფხვნილები.

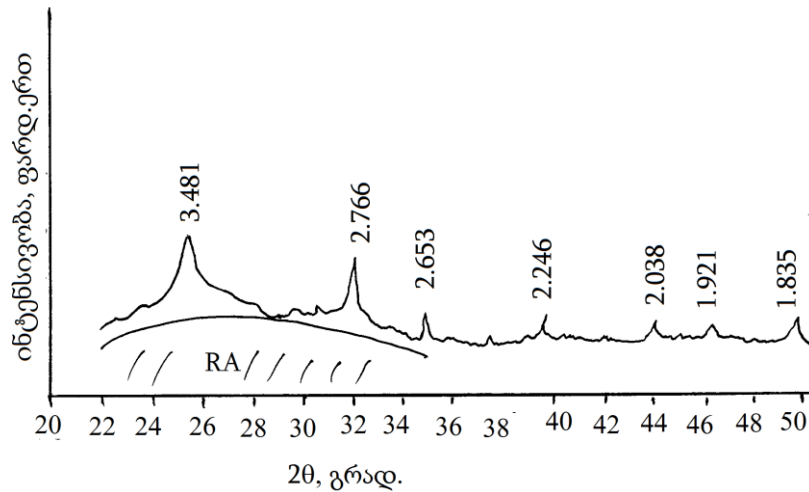


ნახაზი 9. ფიზიოლოგიურ ხსნარში ($37 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) G – 2 კომპოზიტის ფხვნილების ხსნადობა (წონის დანაკარგები)

როდესაც განიხილება ბიოაქტიური მინების და მინაკრისტალური მასალების მოსალოდნელი ქცევა ისეთ ხსნარებში, როგორცაა ფიზიოლოგიური ხსნარი (მიიჩნევა სისხლის პლაზმის იმიტატორად), მნიშვნელოვანი ხდება მათ ზედაპირზე წარმოქმნილი ნაერთების რაობა. აღნიშნულის საბოლოო სასურველ შედეგს წარმოადგენს მინამასალის ზედაპირზე აპატიტის მაგვარი ნაერთების წარმოქმნა.

საცდელად აღებულ G-2 მინამასალის დისკოების დაყოვნება ფიზიოლოგიურ ხსნარში ხდებოდა 7 დღის განმავლობაში. დაყოვნების შემდეგ დისკოები ამოიღებოდა ფიზიოლოგიური ხსნარიდან, შრებოდა ოთახის ტემპერატურაზე და დისკოების ორივე ზედაპირზე წარმოქმნილი ფენა ფრთხილად ჩამოიფხიკებოდა ლანცეტით. ამ გზით დაგროვებულ მასალას

ჩატარდა რენტგენოფაზური ანალიზი. ჩატარებული გამოკვლევით მიღებული დიფრაქტოგრამის ფრაგმენტი მოყვანილია მე-10 ნახაზზე.



ნახაზი 10. ფიზიოლოგიურ ხსნარში 7 დღიანი დამუშავებით G – 2 მინამასალის ზედაპირზე წარმოქმნილი შრის დიფრაქტოგრამის ფრაგმენტი

დიფრაქტოგრამაზე წარმოდგენილი რეფლექსების ინტენსიურობა დაბალი და არამკაფია. გამოკვეთილად შეიძლება მივიჩნიოთ d_{hkl} : 3,481, 2,766 და 2,633 სიბრტყეშორისი მანძილები. მათი იდენტიურობის დასადგენად ჩატარდა მიღებული სიბრტყეშორისი მანძილების იდენტიფიკაცია, მათი შედარებით ლიტერატურაში არსებული ჰიდროქსიაპატიტის, ფთორდა ქლორაპატიტის მახასიათებელ სიბრტყეშორის მანძილებთან. შესაბამისი შედარებითი მონაცემები წარმოდგენილია მე-9 ცხრილში.

შეიძლება გამოითქვას ვარაუდი, რომ ფიზიოლოგიურ ხსნარში G-2 მინამასალის დამუშავებით, მის ზედაპირზე წარმოიქმნება არასტექიომეტრიული აპატიტმაგვარი ნაერთები. დარგობრივი ლიტერატურული წყაროებიდან ცნობილია, რომ ასეთი ნაერთები თავისი ბუნებით ბიოაქტიურია.

კვლევის შედეგებიდან გამომდინარე, ძვლის ნაცრის სანედლეულო მასალად გამოყენებით, შესაძლებელია საჭირო თვისებათა კომპლექსის მატარებელი ბიოაქტიური მინაკრისტალური მასალის მიღება.

**ცხრილი 9. დიფრაქტოგრამაზე არსებული ძირითადი რეფლექსების
საიდენტიფიკაციო სიბრტყეთაშორისი (dα/n) მანძილები
და შესატყვისი ფარდობითი ინტენსიურობა (I)**

G-2 მინამა- სალის ზედ- აპირული შრე (ექსპერ.)		ჰიდროქსი- აპატიტი ⁽¹⁾		ჰიდროქსი- აპატიტი ⁽¹⁾		ქლორაპატიტი ⁽²⁾		ფტორაპა- ტიტი ⁽²⁾	
dα/n	I	dα/n	I	dα/n	I	dα/n	I	dα/n	I
<u>3,481</u>	<u>10</u>	<u>3,47</u>	10	<u>3,66</u>	6	<u>2,798</u>	<u>10</u>	<u>2,800</u>	<u>10</u>
<u>2,766</u>	<u>6</u>	<u>2,76</u>	4	3,37	2	<u>2,702</u>	<u>4</u>	<u>2,712</u>	<u>5</u>
2,673	2	2,61	2	<u>2,90</u>	10	<u>2,838</u>	4	1,841	3
2,441	1	1,83	1	<u>2,82</u>	8				
2,038	1	1,74	1	2,54	3				
1,921	1								

შენიშვნა: (1) - სხვადასხვა ლიტერატურის წყაროდან; (2) - კატალოგიდან

აღნიშნულის დასტურის მოსაპოვებლად განხორციელდა მიღებული მასალის მახასიათებელი თვისებების შედარება არსებულ ბიომინაკრისტალურ მასალათა რიგ წამყვან მახასიათებლებთან, (ცხრილი 10).

**ცხრილი 10. ცნობილი ბიომინაკრისტალურ მასალებისა და ძვლის ნაცრის
საფუძველზე მიღებული G-2 მინაკრისტალური მასალის თვისებათა
შედარება**

N	მოთხოვნილი თვისებები (ISO 13175-3- 2015)	ცნობილი ბიომინაკრისტალური მასალების თვისებათა მნიშვნელობები			ძვლის ნაცრის საფუძველზე მიღებული მინაკრისტალუ- რი (G-2) მინამა- სალა (სიტალი)
		Cerabone	Bioceramics	საშუალო	
1	სიმკვრივე, გ/სმ ³	2,64	2,68	2,56	2,79
2	სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა	1060	720	890	710
3	ხსნადობა ფიზიოლოგიურ ხსნარში (37±1°C, 72 სთ) %	1,7	1,9	1,8	1,75*
4	კრისტალური ფაზების სახეობა	აპატიტი ვოლასტონიტი	კალციუმის დიფოსფატი	-	Ca ₃ (PO ₄) ₂ ვოლასტონიტი

შენიშვნა: (*) ნაჩვენებია 0,1 ≤ δ_{საშ.} ≤ 0,5 მმ ფრაქციულობის ფხვნილებისათვის მიღებულ სიდიდეთა საშუალო არითმეტიკული.

ცხრილში მოყვანილი შედარებითი მონაცემების მიხედვით, ძვლის ნაცრის საფუძველზე (კომპლექსური, P_2O_5 და CaO-ს შემცველი ნედლეული) $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ კომპოზიციაში მინების და მისგან თერმული ორსაფეხურიანი დაკრისტალებით (I საფეხური $630^{\circ}C$, II საფეხური $900^{\circ}C$) შესაძლებელია ბიომინაკრისტალური მასალებისათვის დამახასიათებელი თვისებების მატარებელი, ორი კრისტალური ფაზის შემცველი მასალის მიღება.

მიღებული მინამასალის თვისებებიდან გამომდინარე, ისინი შეიძლება ჩაითვალოს პერსპექტიულ ბიომასალებად ძვლის დეფექტების და დეფორმაციათა აღმოსაფხვრელად, ასევე არამზიდი ძვლოვანი და ხრტილოვანი (ყბასახის და ორიენტოლოგიური ფუნქციების მატარებელი) სტრუქტურების შესაქმნელად.

დასკვნა

1. ჩატარებული კვლევებით მიღებული იქნა შინაარსობრივად ახალი და ექსპერიმენტით დადასტურებული შედეგი – $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ კომპოზიციაში მაღალტემპერატურული სინთეზით მიღებულია ბიომინები, როდესაც P_2O_5 -ის მინაში შემყვან ძირითად ინგრედიენტად გამოიყენება ძვლის ნაცარი.
2. დადგინდა, რომ CaO და P_2O_5 -ის შემცველი კომპლექსური ნედლეულის – ძვლის ნაცრის 25 %-მდე კაზმებში შეყვანით შესაძლებელია 6–10 % P_2O_5 -ის შემცველი მინების სინთეზი, რომელთა ხარშვის ტემპერატურა $1300^{\circ}C$ -დან $1400^{\circ}C$ -მდე შეადგენს. პრაქტიკულად მიღებულია მინები, რომლებიც შეიცავენ (მას.%): 20–25 Na_2O , 22–25 CaO , 45–47 SiO_2 და 6–10 P_2O_5 .
3. ოპტიმალური შედგენილობის მინებს დაუდგინდა დაკრისტალეზის უნარი ($600 - 1000^{\circ}C$ ტემპერატურული ინტერვალი) და განისაზღვრა მაქსიმალური კრისტალიზაციის შესატყვისი ტემპერატურები ($800 - 900^{\circ}C$). დადგინდა, რომ ერთსაფეხურიანი დაკრისტალეზისას წარმოიქმნება ტლანქი კრისტალური ჩანართების შემცველი მინამასალა.
4. საწყის და დაკრისტალეზულ მინებს დაუდგინდათ მახასიათებელი თვისებები: მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე (390-დან 510-მდე მპა), სიმკვრივე ($2,66 - 2,74$ გ/სმ³), ქიმიური მდგრადობა ფიზიოლოგიურ ხსნარში $37 \pm 1^{\circ}C$ -ზე (1,1 – 1,6 %) და წყალშთანთქმა (0,05 – 1,2 %).
5. დადგინდა, რომ საკვლევი მინების შედგენილობიდან გამომდინარე თვისებათა ცვლა კარგ შესატყვისობაშია მათი სტრუქტურული დიფერენციაციის ხარისხთან, რაც მინის შედგენილობაში წარმოდგენილი ორი მინის წარმომქმნელის (SiO_2 და P_2O_5) შემცველობათა ფარდობით (SiO_2 / P_2O_5) განისაზღვრა. იძულებითი დაკრისტალეზა აძლიერებს მინის სტრუქტურული გარდაქმნის ხარისხს და არაერთგვაროვნად ცვლის თვისებას: დაკრისტალეზით მიიღწევა მიღებული მინამასალების სიმკვრივისა და წყალშთან-

ნთქმის ზრდა, სიმტკიცისა და ქიმიური მდგრადობის შემცირება.

6. სინთეზირებული მინების „თვისება-შედგენილობა“ დამოკიდებულებათა ანალიზის საფუძველზე შერჩეული იქნა საბაზო მინები და მიზნობრივად განხორციელდა მათი იძულებითი ტრანსფორმაცია წმინდაკრისტალურ მინამასალაში. აღნიშნულისათვის საჭირო ჰეტეროგენული კრისტალიზაციის პროცესის ჩასატარებლად, შერჩეული იქნა მინების კრისტალიზაციის ინიციატორი (მინებში 3-5 % F-ის შეტანა CaF_2 -ით), განხორციელდა კრისტალიზაციის ნუკლეატორის შემცველი მინების სინთეზი 1300 – 1320°C-ზე და ექსპერიმენტული გზით შეირჩა მათი ორსაფეხურიანი თერმული დამუშავების რეჟიმები.
7. დადგინდა, რომ ჰეტეროგენული ორსაფეხურიანი კრისტალიზაციით მიიღწევა ფთორშემცველი მინის წმინდაკრისტალურ მასალაში გადაყვანა: რენტგენოფაზური ანალიზით დადასტურდა მისი პოლიკრისტალური ბუნება – ორი ძირითადი განსხვავებული კრისტალური ფაზის არსებობა: სამკალციუმიანი ფოსფატი (ბიოაქტიური ნაერთი) და ვოლასტონიტი (მაღალი სიმტკიცის მქონე ნაერთი).
8. სინთეზირებული ფთორშემცველი მინების მიმართული ჰეტეროგენული კრისტალიზაცია იწვევს მახასიათებელ/მოთხოვნად თვისებათა მკვეთრ გაუმჯობესებას (სიმტკიცე კუმშვაზე 710 მპა; სიმკვრივე - 2,79 გ/სმ³; ხსნადობა ფიზიოლოგიურ ხსნარში -1,75%) და განაპირობებს არსებული/გამოყენებული ბიომინაკრისტალურ მასალებთან (Cerabone, Bioceramics) თვისობრივ იდენტურობას და ასევე ISO 13175-3-2015 სტანდარტის მოთხოვნებთან სრულ შესატყვისობას..
9. ჩატარებული კვლევებით დადასტურდა კალციუმ-ფოსფატური ნაერთების შემცველი კომპლექსური ნედლეულის - ძვლის ნაცრის გამოყენებით ბიოაქტიური მინამასალების მიღების შესაძლებლობა, რაც განაპირობებს ბიომასალების მიღების სანედლეულო ბაზის გაფართოებას და მათი წარმოების ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების გაუმჯობესებას.

Abstract

The main characteristic of the third millennium is the humanization of various spheres of human life, which is ultimately associated with an increase in human life expectancy and standard of living. The realization of the above is directly related to the acquisition of materials that make it possible to create artificial organs or restore the damaged ones. In this beforementioned direction, over the last 50 years, up to 40 different materials (ceramics, glass, metal, polymer, etc.) have been used for human skin, muscle tissue, blood vessels, bone tissue replacement-restoration and other purposes. Through them it became possible to replace or regenerate more than 50 components of the human body.

In particular, among the artificial materials used in endoprosthesis, the so-called Bioceramic is significantly allocated, materials and this term refers to materials containing more than one species of calcium phosphate compounds. They are obtained by different approaches, but biomaterials with the desired properties of the main part of the species that can be used in practice are obtained by high temperature baking (bioceramics) or sliding (biomaterials of amorphous-crystalline nature).

Although well-known and practically used in medicine in certain types of bioceramics (mainly hydroxyapatite and β -modification of tricalcium phosphate) and bioglass (mainly obtained in the composition of $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ based on silicate), research work is underway to create new composition of bioactive materials, including bioactivity glasses. Such studies distinguish two main areas - the creation of biomass with specific properties depending on the purpose and the receipt of biomass on a new raw material base. In the latter case, the goal is twofold: to obtain improved and at the same time economical biomaterials.

The main goal of our work was the second direction, and in particular in a specific species of biomaterial - bioglass, CaO and P₂O were used simultaneously as input material, a product obtained from the processing of bone of complex raw-cattle, in the form of bone ash.

Bone ash is characterized by a high content of ready-made calcium phosphates (up to 90%) and hence, it should be characterized by signs of bioactivity characteristic of natural bone. Based on the above, bone ash as a complex raw material was selected by us as a synthesis in the "classic" $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ composition and as one of the main raw material components for obtaining known bioactive glass materials.

On the basis of bone ash, biomass pots of $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ system with a content of up to 25% of bone ash were calculated and synthesized by boiling method obtained in glass technology. The maximum boiling temperature

was 1300-1400 ° C, and the delay at boiling temperature was 2 h. Detected piles of different compositions to produce different homogeneous alloys.

Glass containing 6-10 mas% phosphorus anhydride was obtained, and their targeted forced thermal processing at 600-1000 ° C confirmed the possibility of obtaining glass crystalline materials. The influence of the SiO₂ / P₂O₅ oxide ratio of the two glasses on the degree of structural differentiation of the glasses and the properties of the glass / glass-crystals has been established.

Structural transformation of glass into crystalline crystal glass is achieved by using CaF₂ as a crystallization nucleator in the composition of glass-based glass ash. Complete volumetric crystallization of glasses is achieved by adding 3-4% F to their composition and forcing crystallization by two-step thermal processing (600/900). The crystalline phases detected in crystallized glasses are: vitlocytic (tricalcium orthophosphate) and silicate (wollastonite), when the amorphous component remains as the accompanying phase.

It was found that the obtained biomines are characterized by mechanical compressive strength in the range of 470-510 MPa, while the solubility of their grains in physiological solutions (37 ° C, 1 h) is 1.3-1.5%. Forced crystallization of glasses changes their properties, which is manifested in an increase in mechanical strength up to 710 MPa, a decrease in chemical solubility in the test reagent (not more than 2% under 72-hour delay conditions).

Research has shown that ash-based glass and glass-crystal materials are similar in properties to known glassy biomaterials and can therefore be recommended as bioactive materials.

სადისერტაციო ნაშრომების ძირითადი შედეგები წარმოდგენილია შემდეგ პუბლიკაციებში:

1. ე. უჩანეიშვილი, თ. ჭეიშვილი. ბუნებრივი ძვლის საფუძველზე ბიოაქტიური მასალების მიღება. საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება“. სტუ-ს შრომები, თბ. 2020. გვ. 317-322
2. ე. უჩანეიშვილი, თ. ჭეიშვილი. ბიოაქტიური მინამასალების მიღებისათვის ახალი სახეობის სანედლეულო ბაზის შერჩევა. საქართველოს კერამიკოსთა ასოციაციის ჟურნალი „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“, 2020 წ., ტ. 22, N2(44). გვ. 3-7
3. თ. ჭეიშვილი, ე. უჩანეიშვილი. $Na_2O - CaO - SiO_2 - P_2O_5$ კომპოზიციაში სინთეზირებული მინების ჰეტეროგენული ჩანასახწარმოქმნით მიღებული მინაკრისტალური მასალების თვისებების შესწავლა. საქართველოს კერამიკოსთა ასოც. ჟურნალი „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“, 2020 წ., ტ. 23, N1(45). გვ. 3-9.
4. ე. უჩანეიშვილი. ახალი სანედლეულო ბაზაზე სინთეზირებული ბიომინების დაკრისტალებით მიღებული მასალების თვისებათა შესწავლა. საქართველოს კერამიკოსთა ასოციაციის ჟურნალი „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“. 2021 წ., ტ. 23, N1(45). გვ. 80-95