

ლალი, ალმასი, საშირონი: ბარდშევა მაცნიერულ
შემეცნებაში – ძვირფასი მინერალებიდან
ლაზერებად, ბრაუნად, ნანომასალებად ...

მ. ავალიანი

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
რაფაელ აგლაძის ორგანული ქიმიისა და ელექტროქიმიის ინსტიტუტი
თბილისი, საქართველო
avaliani21@hotmail.com

მიღებულია 2022 წლის 7 თებერვალს

ანოტაცია

მიმოხილვით სტატიაში, რომელიც ეძღვნება ავტორის მამის – აპოლონ ავალიანის ხსოვნას, საკითხი განხილულია შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. შესავალი;
2. მინერალების სახელწოდებების ეტიმოლოგია, მათი ფორმის, შედგენილობის, გეოგრაფიული ლოკაციის ან თვისებებიდან გამომდინარე;
3. ისტორიული მიმოხილვა, მითები და სიმბოლიზმი, „თვალი ბივრიტი“;
4. ფერადი კორუნდებისა და ალმასის კრისტალური აგებულება;
5. მინერალების თვისებები;
6. ხელოვნური კრისტალების მიღების მეთოდები და მათი თავისებურებანი;
7. კორუნდის ჯგუფის კრისტალებისა და ალმასის გამოყენება, ნახშირბადისა და მისი უახლესი ალოტროპების მოხმარება და სარგებელი;
8. ნახშირბადი, როგორც ალოტროპული მრავალფეროვნების მაგალითი, ალმასი, გრაფიტი, გრაფენი და სხვა ფუტურისტული მასალები; და
9. დასკვნა

ვუძღვნი მამის – აპოლონ ავალიანის ხსოვნას [1 – 3].

1. შესავალი

კრისტალების მიმართ ინტერესი უძველესი დროიდან აღინიშნება. მათი აღწერა და თვისებების შესახებ ინფორმაცია გვხვდება მრავალი ქვეყნის სხვადასხვა ლიტერატურულ ძეგლსა თუ ზეპირსიტყვიერებაში. ამა თუ იმ ძვირფასი ქვის

სახელწოდება გამოიყენებოდა პოეტური შედარებებისათვის თუ შინაარსის ანუ შინა ფარული არსის აღსანიშნავად ანდა გასაძლერებლად.

მაგალითად, ქართული სახელწოდებები, რომლებიც იცვლებოდა დროთა განმავლობაში, მოტანილია თუნდაც ქართული აღორძინების ხანის უბრწყინვალეს მეგლში – „ვეფხისტყაოსანში“. ამ გენიალურ ქმნილებაში ლალი მოხსენიებულია 38-ჯერ, ბადახში ანუ საუკეთესო ხარისხის ლალი – 18-ჯერ, იაგუნდი / საფირონი – 10-ჯერ, ალმასი – 5-ჯერ, ანდამატი კი – ერთხელ [4].

ეს ძვირფასი და ულამაზესი ქვები სხვა ცნობილი მწერლებისა და პოეტების შთაგონების წყაროსაც ასაზრდოებდა, იქნებოდა ეს ფლობერი, დიუმა, კუპრინი, გალაქტიონი, პაოლო იაშვილი თუ სხვანი და სხვანი; სხვადასხვა ეპოქის მხატვრებიც ასახავდნენ ამ მინერალების სიმშვენიერეს, მრავალი მეცნიერი იკვლევდა მათ თვისებებსა და აგებულებას დროთა განმავლობაში [5 – 15].

აქ მცირე ისტორიული ექსკურსი გავაკეთოთ. ერთსა და იმავე შორეულ 1768 წელს საფრანგეთის კუთვნილ სამ ტერიტორიაზე ციდან ქვების ცვენა იქნა დაფიქსირებული და გაოგნებულმა მოსახლეობამ დაიჯერა, რომ ეს სასწაული იყო. ამ „სასწაულით“ პარიზის მეცნიერებათა აკადემიაც დაინტერესდა და სპეციალური კომისია შექმნა ფაქტის შესამოწმებლად (მასში შედიოდა ცნობილი ქიმიკოსი ლავუაზიე). მაგრამ ზეციდან დედამიწაზე ქვის დაცემის შესაძლებლობა იმდენად წარმოუდგენელი ეჩვენათ, რომ კომისიამ და შემდეგ საფრანგეთის აკადემიამაც უარყო მისი ზეციური წარმოშობა. ამასობაში ქვათა „სასწაულებრივი“ ცვენა დედამიწაზე გრძელდებოდა და ამას თვითმხილველებიც ადასტურებდნენ.

ჩები მეცნიერი ე. ფ. ხლადნი იყო ერთ-ერთი პირველი, ვინც გაილაშქრა პარიზის აკადემიის დასკვნების წინააღმდეგ და თავის თამამ ნაშრომებში ამტკიცებდა, რომ ქვები ანუ მინერალები, მართლაც, ცვიოდა ციდან. რასაკვირველია, ასეთ ვარდნას ხშირად ფანტასტიკური ისტორიები ახლდა თან და უმეცარი ხალხი ამ ქვებს წმინდა თილისმად თვლიდა; მათ ხანდახან წამლადაც იღებდნენ.

ახლა უკვე ცხადზე უცხადესია, რომ მეცნიერი-პროგრესისტი ხლადნი აბსოლუტურად მართალი იყო, როცა ამბობდა, რომ ყოველწლიურად ქვები ცვივა ხან ერთეული, ხან ე.წ. წვიმის სახით, ხან მტვერავითაა, ხან მძიმე დიდი კრისტალური ბლოკების სახით მოვევლინება დედამიწას. ასეთ ქვებს მეტეორიტებს ვუწოდებთ. ეს სხეულები შეიძლება იყოს როგორც კრისტალური აგებულების, სალი ქვის ჩამონათალის, ასევე – ლითონის ნატეხის დარი. კრისტალური აგებულება აქვს, აგრეთვე, დედამიწაზე და მის სიღრმეებში მოპოვებულ უამრავ სხვადასხვა შეფერილობის მინერალს, მათ შორის, კორუნდებს – ლალსა და საფირონს, ასევე ზღვის სიღრმეებში მოძიებულ ქვებს [16 – 18].

ალმასის მორფოლოგია ძალიან მრავალფეროვანია. იგი გვხვდება როგორც მონოკრისტალების, ასევე პოლიკრისტალური ნაერთების სახით („დაფა“, „ბალახი“, „კარბონადო“). ალმასები გვხვდება ზოგჯერ ულტრამაღალი წნევის მეტამორფულ კომპლექსებში. ისინი ასოცირდება ეკლოგიტებთან და ღრმად მეტამორფოზებულ მოწის ანუ გრანატის გნეისების ქანებში.

მცირე ზომის ალმასები მნიშვნელოვანი რაოდენობითაა ნაპოვნი მეტეორიტებში, რომლებიც უძველესი, მზის წარმოქმნამდე უფრო ადრეული, წარმოშობისაა. ისინი ასევე წარმოიქმნება დიდ ასტრობლეტებში – გიგანტური მეტეორიტის კრატერებში, სადაც გვხვდება ხელახლა გამდნარი ქანები, რომლებიც მნიშვნელოვანი რაოდენობით შეიცავს წვრილმარცვლოვან ალმასს. ამ ტიპის ცნობილი საბადოა პოპიგაის

ასტრობლემა რუსეთის ჩრდილოეთ ნაწილში, კერძოდ, ციმბირში. უკანასკნელი ორი ასწლეულის მანძილზე კი სამხრეთ აფრიკის რესპუბლიკა გახდა ალმასების მსოფლიო მოპოვების ცენტრი.

2. ეტიმოლოგია – მინერალების სახელწოდებები, მათი ფორმის, შედგენილობის, გეოგრაფიული ლოკაციის ან თვისებებიდან გამომდინარე

მინერალის უმარტივესი განმარტება შემდეგია – ესაა ბუნებრივი არაორგანული ნივთიერება, რომელიც წარმოიქმნება დედამიწის ზედაპირზე ან მის წიაღში. ჩვენ ამ პუბლიკაციაში ძირითადად შევხებით მხოლოდ რამდენიმე მინერალს, რომლებიც ასევე ცნობილია, როგორც ძვირფასი ქვები: ლალს, საფირონსა და ალმასს.

ფრიად საინტერესო ნაშრომში [8] განხილულია ძვირფასი და ნახევრად ძვირფასი კრისტალების ქართული სახელწოდებები: იგვირიონი – სეილანი, მთის ბროლი – ქარწიბა, დამანი, გველის ნალოკი ქვა, მუდრეცი (სვანურად). გრანატის ჯგუფის ძვირფას ქვებს პიროპსა და ალმანდინს ქართულად ანთრაკი, იაკინთი, წითელი იაგუნდი ეწოდება; საფირონს – სოფრი, საპფირი, საპფირონი, ლურჯი იაგუნდი; მარჯანს – მოწი; გიშერს – სათი; სარდიონს – აყიყო, იამრანი; იასპს – ეშმა, ამარტა; ალემასტრს – თაგვმარილა; ონიქსს – ანუქიონი, ანვიქიტი, ფრცხილი; ამეთვისტოს – სნოსნა; ზურმუხტს – ზმური, სამარაგდი; მარგალიტს – მანგი; ქრიზობერილს – ზაბერჯათი, ზობარჯი, ბეჟმედი, კაცის თვალი; ფირუზს – ფეროზი; კეთილშობილ შპინელს – ბადახშანის ლალი; ქრიზოლიტს – ხვრისოლინტი; ტოპაზს – პაზიონი, თუპაზი, ტანპაზონი, ტანმბაზი, თეთრი იაგუნდი; და ა.შ.

მინერალი ბერილი ანუ აკვამარინი, რომელიც განსაკუთრებული სილამაზითაა გამორჩეული (ის ზღვისა და ცისფერია), ბერილოს, ბივრიტის, ბივრილის თვლის სახელდებით გვხვდება..

3. ისტორიული მიმოხილვა, მითები და სიმბოლიზმი, „თვალი ბივრიტი“

ძვირფასი თუ ნახევრად ძვირფასი ქვების ანუ სხვადასხვა ფერის, აგებულებისა თუ ღირებულების კრისტალების და დივერსიფიცირებული გეოლოგიური წარმოშობის მინერალების აღწერა, სახელწოდებანი, აგებულება და თვისებები შეისწავლება მრავალ სამეცნიერო და ტექნოლოგიურ დისციპლინაში: გეოლოგია, გეოქიმია, მინერალოგია, კრისტალოგრაფია, კრისტალოქიმია და ა.შ. ამ დისციპლინებთან მჭიდრო კავშირშია აგრეთვე ფიზიკა, ქიმია, ბიოფიზიკა, მასალათმცოდნეობა, ბიოლოგია, მედიცინა, მეტალურგია, დედამიწის შემსწავლელი მეცნიერებები და, რა თქმა უნდა, საიუველირო ინდუსტრია. აღიარებულია, რომ ძვირფასი და ნახევრად ძვირფასი ანუ ე.წ სანახელავო ქვების სახელწოდებების უმეტესობა ბერძნულ–ლათინური წარმოშობისაა ანდა არაბულ ან სპარსულ ენებში უდევს სათავე (მაგალითად, ლალი, ბროლი და ა.შ.). როგორც ზემოთ მოტანილი მაგალითიდან ჩანს, ქართულ სახელწოდებებში ზოგიერთი

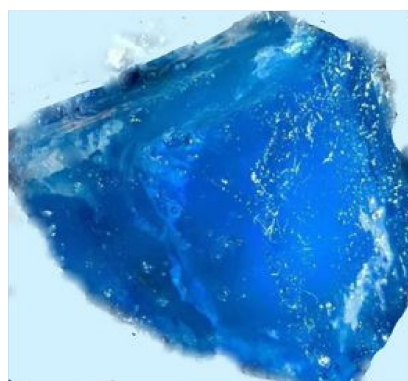
კრისტალის / ძვირფასი ქვის სახელდება ვარიაციებს მოიცავს და სხვადასხვა სახელწოდებას ატარებს. ფაქტიურად, თითქმის ყველა ენაზე, ისევე როგორც ქართულში, მინერალების ანუ ჩვენ სამ კონკრეტულ შემთხვევაში ძვირფასი ქვების / კრისტალების სახელწოდებანი ხშირად დაკავშირებულია მათ ფიზიკურ თვისებებთან, როგორიცაა ფერი, სიმტკიცე, ფორმა და სხვა.



(ა)



(ბ)



(გ)

სურათი 1. (ა), (ბ) და (გ): ბერილი
/ აქვამარინი, ე.წ. ზღვის
საფირონი ანუ ბივრიტი.

მაგალითად ავიღოთ ფერი: აქვამარინი (ანუ აკვამარინი) – ლათინურად ზღვის წყლის ფერი (სურათი 1ა და 1ბ), ლალი – არაბულ–სპარსული სახელია და წითელს ნიშნავს (სურათები 2 და 3).



(ა)



(ბ)

სურათი 2. (ა) და (ბ): ლალის
ბუნებრივი მინერალები.



(ა)



(ბ)

სურათი 3. (ა) მინერალი პიროპი და
(ბ) ბუნებრივი ძოწის დამუშავებული ქვა.

აქვამარინთან, იგივე ბერილთან, იგივე ბივრილთან მრავალი გადმოცემაა დაკავშირებული და ის ბევრის მთქმელი და მნიშვნელოვანი სიმბოლოა ქართველთათვის.

დაახლოებით 323 წელს, ზოგიერთი მკვლევარის აზრით, 316 – 317 ან შესაძლოა, 319 – 320 წლებში წმიდა ქალწული ნინო სომხეთის მხრიდან მოადგა საქართველოს, ფარავნის ტბიდან გამომავალ მდინარეს გაუყვა მტკვრის შესართავამდე და მცხეთაში მივიდა. დაღონებულმა იქ მცხოვრებთა კერპთაყვანისმცემლობით მოციქულთა სწორმა ნინომ მთაზე მდგომი არმაზის კერპები ლოცვის ძალით შემუსრა და დაამსხვრია. როდესაც ქარი, სეტყვა და ჭექა-ქუხილი შეწყდა, წმინდა ნინო მივიდა დამსხვრეულ კერპებთან და ნამსხვრევებიდან ამოიღო ბივრიტის ქვა, რომელიც არმაზის კერპს თვალის ადგილზე ჰქონდა ჩასმული.

მოციქულთა სწორმა ნინომ აიღო ბივრიტის თვალი და მცხეთაში საქადაგებლად წავიდა: თან წაიღო ბივრიტიც და სულიერი ცხოვრების ახალი ფორმაც.

თუ დავესესხებით პროფესორ მარიამ ჩხარტიშვილს, „თვალი ბივრიტი“ ქართველებისათვის წარმართობასა და ქრისტიანობას შორის ხიდის სიმბოლოა, ახალი ცხოვრების დასაწყისია. და ეს კარგად ჩანს, კერძოდ, ქართლის მოქცევის შემდეგ წარმართულ ეპოქაში შექმნილი და წარმართული სიმბოლიკით აღბეჭდილი ქართული ანბანის დანარჩუნების ფაქტში [19, 20].

ამრიგად, აქვამარინი ზღვის წყლისფერი ქვაა; aquamarine – ფრანგულად მას ზღვის საფირონსაც უწოდებენ: *aigue-marine* (*marine* – ზღვას ნიშნავს). ქართველთათვის ის ბივრიტია, მნიშვნელოვანი შინა ფარული არსით დატვირთული. „იოანეს გამოცხადების“ მიხედვით, ბივრილი იქნება ახალი იერუსალიმის კედლის მერვე საფუძველი (აპოკ. 21.20); ტობი წინასწარმეტყველთან კი ვკითხულობთ [21], რომ იერუსალიმის მოედნები „ბერილონით, ანთრაკით და სუფირული ქვით მოიკირწლება“.

ფერის მიხედვით სახელწოდებებია, აგრეთვე, პიროპი – ცეცხლისფერი (სურათი 3), როდონიტი – ვარდისფერი, ფლოგოპიტი – ცეცხლის მსგავსი, ლაჟვარდი – ცისფერი. კიანიტი ძველ ბერძნულად ნიშნავს ლურჯს, ლაჟვარდოვანს, მალაქიტი – ბალახისფერს, მწვანეს, ფოთლისფერს, ცირკონი – სპარსულად ოქროსფერია, ზურმუხტი ქართულადაა სიმწვანის სინონიმი, სპოდუმენი ბერძნულად ფერფლისებრ-ნაცრისფერია, ციტრინი – ლიმონისებრ-ყვითელი და ა.შ.

მაგრამ აღმასი ბერძნულად ნიშნავს უძლეველს, არაბულად – უმაგრესს, უძლეველს. ბერილის სახელწოდება სათავეს იღებს ბერილიუმიდან, რაც ბერძნულად ტკბილს ნიშნავს (Be-ის მარილების მოტკბო გემო იგულისხმება). ანუ ამ შემთხვევებში სახელდება თვისებებთან არის დაკავშირებული.

ფორმის მიხედვით სახელწოდებებია: გრანატი, რომელიც მომდინარეობს ლათინურიდან *malum granatum* – მარცვლოვანი ხილი; სკაპოლიტი – ღეროსებრი, სტავროლიტი – ჯვრის ქვა და ა.შ.

შედგენილობასთან დაკავშირებულ სახელწოდებათა მაგალითებია: სოდალიტი – Na-ის შემცველი, კობალტინი – Co-ის შემცველი, ტიტანიტი – Ti-ის შემცველი, ფლუორიტი – F-ის შემცველი და სხვა.

გეოგრაფიული ადგილმდებარეობის მიხედვით შერჩეული ქვების სახელწოდებებია: ანდალუზიტი, ალმანდინი, ამაზონიტი, ვეზუვიანი, ისლანდიური შპატი, მუსკოვიტი, კორდიერიტი, შპესარტინი და სხვა.



სურათი 4. ბუნებრივი კორუნდის
ანუ ლალის კრისტალი.



სურათი 5. ბუნებრივი კორუნდის – საფირონის
კრისტალები (ს. მარინის კოლექციიდან).

ხშირად ამ ძვირფას ქვებს მაგიურ და / ან სამკურნალო თვისებებს მიაწერდნენ. გრანატი ანუ ძოწი ძლევამოსილი ენერგიის, სიცოცხლის სიყვარულისა და ამბიციების სიმბოლო იყო, ამეთვისტო კი – გონიერებისა და სიმშვიდის, მშვიდობიანობის. ბერძნულად amethystos, ხოლო ლათინურად amethystus სიმთვრალის დამმარცხებელს ნიშნავს. ლალი (სურათი 4) ანუ იგივე rubis, ლათინურად rubeus, ნიშნავს წითელს. ის სიმბოლოა სიმამაცისა და ღვთაებრივი სიყვარულის. ინდუსებისათვის ლალი უძვირფასესი ქვაა. ევროპაში საუკუნეების მანძილზე მას ადგილი ეკავა მეფეთა გვირგვინებში და რომის პაპების ბეჭდებში, რადგან სიმბოლო იყო იესოს ჯვარცმისას დაღვრილი სისხლის წვეთისა.

საფირონი (სურათი 5) – ფერდინანდ ჰოფერის თანახმად [6], ეს სახელწოდება მომდინარეობს ებრაულიდან ან ქალდეურიდან და ნიშნავს „გრავირებას“. ეს ტერმინი, ძალიან მცირე ცვლილებებით, თითქმის ყველა ენაში გვხვდება. როგორც ჩანს, ის თავდაპირველად გამოიყენებოდა გრავირებისათვის შესაფერისი ყველა კრისტალური აგებულების ქვის დასამუშავებლად. შუა საუკუნეების რუსეთში ლალი და სხვადასხვა შეფერილობის საფირონები ცნობილი იყო საერთო სახელწოდებით „იაჰონტები“ (ან „იახონტები“ – яхонты). სავარაუდოა, რომ ეს სიტყვა ჩამოყალიბდა სპარსული yakund-ის, არაბული yakut-ისა და სლავური yahont-ის ფუძეზე. იმავდროულად, ლალს „ალისფერ იაჰონტს“ უწოდებდნენ, ხოლო საფირონს ყველაზე ხშირად – лазур-ს ანუ ცისფერს.



სურათი 6. ბუნებრივი კორუნდის
– საფირონის კრისტალები.

საფირონი (სურათი 6) ბერძნულიდან, σάπφειρος – ლურჯი ქვა, უნდა მომდინარეობდეს. შესაძლოა ამ ტერმინს ებრაული საწყისი აქვს: 710 (საპირი) ანდა სპარსული იგივე მნიშვნელობით. საფირონი სხვადასხვა ფერის ძვირფასი ქვაა, კორუნდის ერთ-ერთი სახეობა. მინერალოგიაში საფირონებს უწოდებენ ექსკლუზიურად ცისფერ ან ლურჯ კორუნდებს, საიუველირო ინდუსტრიაში – ნებისმიერ ფერს, გარდა იასამნისფერი-წითლისა, რადგანაც ასეთ ქვებს ლალი ეწოდება.



(ა)



(ბ)

**სურათი 7. (ა) და (ბ): დამუშავებული
საფირონების ნიმუშები.**

საფირონის ლურჯი ფერი (სურათი 7) განპირობებულია მის კრისტალებში ტიტანისა (Ti) და რკინის (Fe) მინარევების არსებობით [7 – 12]. თუმცა აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ რკინის მინარევის რაოდენობის მიხედვით, საფირონი მომწვანო ამ მოყვითალო ელფერსაც იძენს.

ყველაზე მეტი ლეგენდა, ალბათ, მაინც ალმასების (სურათი 8) შესახებ არის ცნობილი. საუკუნეების მანძილზე ბატონობდა აზრი, რომ ინდოეთში ალმასები (მაგალითად, ერთერთი უდიდესი ბუნებრივი ბრილიანტი Koh-i-Noor) 6000 წლის წინათაც კი მოიპოვებოდა. ისტორიულად კი დამტკიცებულია, რომ პირველი ალმასები

და, შესაბამისად, მათი დამუშავების შედეგად მიღებული ბრილიანტები მოპოვებულ იქნა 3000 წლის წინ ინდოეთში. მითოსის თანახმად, ისინი წარმოდგენილია როგორც „ვარსკვლავთა ნაყოფი“ და წმინდა წყაროებიდან მომდინარე. სწორედ ამიტომ ეს ძვირფასი ქვები დღემდე ამშვენებს რელიგიურ საგნებს.



სურათი 8. ბუნებრივი ალმასის კრისტალი.

ალმასის ეტიმოლოგია ასეთია. მიჩნეულია, რომ ევროპაში ეს ტერმინი გვხვდება მე-14 საუკუნის შუა პერიოდიდან diamaunt-ის სახით, ძველი ფრანგულიდან გამომდინარე – diamant. ხოლო თავად ძველ ფრანგულში ეს სახელწოდება მომდინარეობს ლათინურიდან: diamantem, რომელიც გადასხვაფერებულია ბერძნულიდან – adiamantem (სახელწოდება შეცვლილია ბერძნული სიტყვების გავლენით და იწყება თავსართით δια) ანდა კლასიკური ლათინურიდან – adamantem ანუ „მაგარი ლითონი“. ფუძე კი ძველი ბერძნულია: ἀδάμας ანუ „უმარესი მასალა“.

საინტერესოა, რომ ზოგჯერ სახელწოდება ქვის ღირებულებაზეც კი მიუთითებს, მაგალითად, სანსკრიტულად „უპალა“ ანუ „ოპალი“ ძვირფას ქვას ნიშნავს. ძვირფას ქვებს უწოდებდნენ აგრეთვე მზის ქვას, მთვარის ქვას, ვეფხვის თვალს, შევარდენის თვალს, კატის თვალს და ა.შ.

ბუდისტური ტექსტების სიმბოლიკით, ალმასი, როგორც სიმართლე, მარადიულია. ეს მინერალი ტიბეტური ლამაიზმის მისტიკის ნაწილიცაა. ეგვიპტეში, საბერძნეთსა და ძველ რომში ალმასი ითვლებოდა ურღვევად და წარმოადგენდა ე.წ. „ღვთის ცრემლებს“. მას ატარებდნენ როგორც ამულეტს, რომელსაც მიაწერდნენ შხამის საწინააღმდეგო თვისებებს. ხოლო ბერძნულ–რომაული მითოლოგია მას მარადიულ სიყვარულთან აკავშირებს: კუპიდონის ისარს ხომ ალმასის წვერი ამშვენებდა.

ადრე ითვლებოდა და, ალბათ, ნაწილობრივ მაინც დღემდე სწამთ, რომ ქვების სამკურნალო თვისებები შეიძლება იყოს ფუნდამენტურად მნიშვნელოვანი ადამიანების

კეთილდღეობისა და შინაგანი სიმშვიდისათვის. ისინი საშუალებას იძლევიან აღდგეს ფიზიკური და ფსიქიკური ენერგიები, კურნავენ სხვადასხვა სნეულებებს.

ითვლება, რომ კორუნდი დადებითად მოქმედებს ადამიანის ნერვულ სისტემაზე, უხსნის მას დეპრესიას, კურნავს უძილობას, განდევნის კოშმარებს. სხვადასხვა ფერის კორუნდი ხელს უწყობს წნევის შემცირებას, სასარგებლოა მხედველობის, გულისა და სისხლის მიმოქცევის ორგანოების დაავადებების სამკურნალოდ, შეუძლია მოხსნას ოსტეოქონდროზით გამოწვეული ზურგის ტკივილი და დაეხმაროს ადამიანს (ცხადია, რომელსაც ამის სჯერა!) ხერხემლისა და სახსრების მკურნალობაში, დადებითად მოქმედებს თირკმელებზე, ღვიძლზე და საჭმლის მომნელებელ ორგანოებზე.

ყველაზე ხშირად სამკურნალო თვისებებს მიაწერენ კორუნდის გამჭვირვალე სახესხვაობებს: საფირონსა და ლალს. საფირონს და ლალს ჯადოსნური თვისებებსაც კი მიაწერენ. თუმცა არა მგონია, რომ ამას სერიოზულად აღვიქვამდეს რომელიმე ჩვენგანი და ამიტომ წინამდებარე სამეცნიერო მიმოხილვაში აღნიშნულ თემას მეტად აღარ შევეხებით.

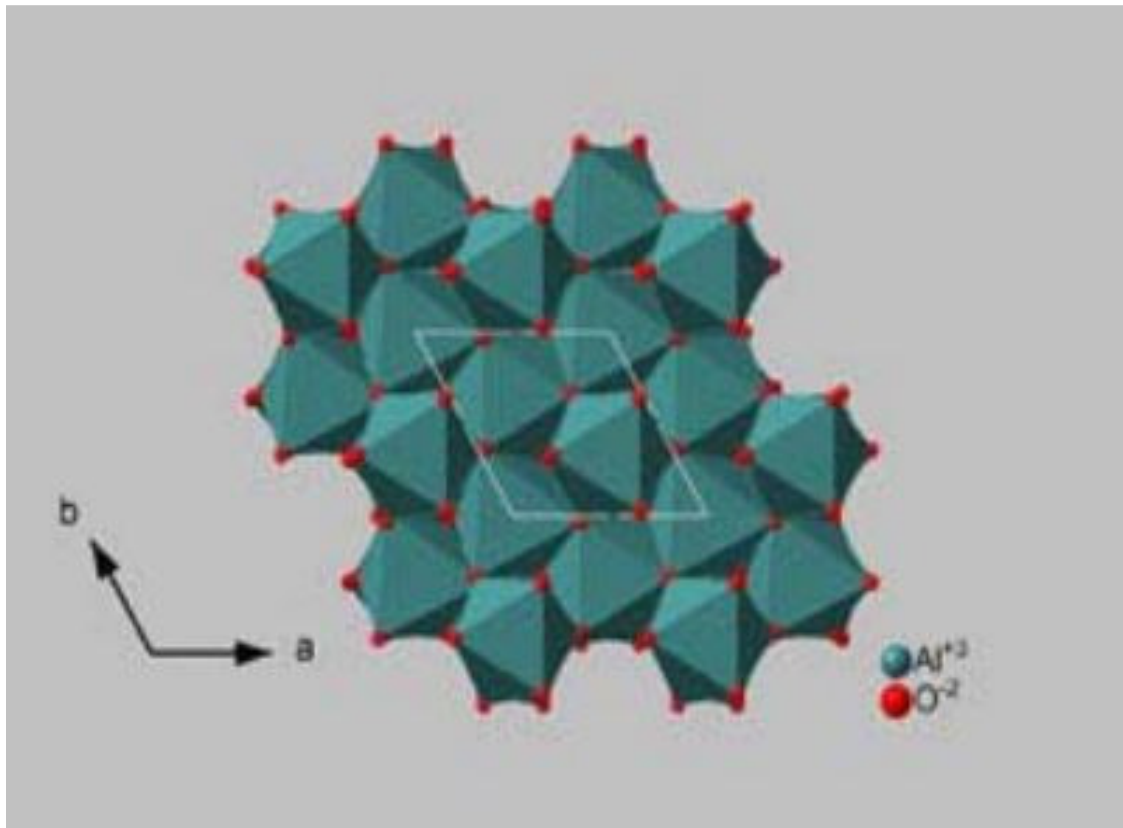
4. მინერალების კრისტალური აგებულება

მრავალი მეცნიერის აზრით, კორუნდის სტრუქტურა ერთ-ერთი ყველაზე სრულყოფილია და იმავდროულად – უმკვრივესი, მდგრადი, და, ალბათ, ამის გამო სუფთა კორუნდისა და ალმასის თვისებები საკმაოდ მსგავსია [13, 16 – 18].

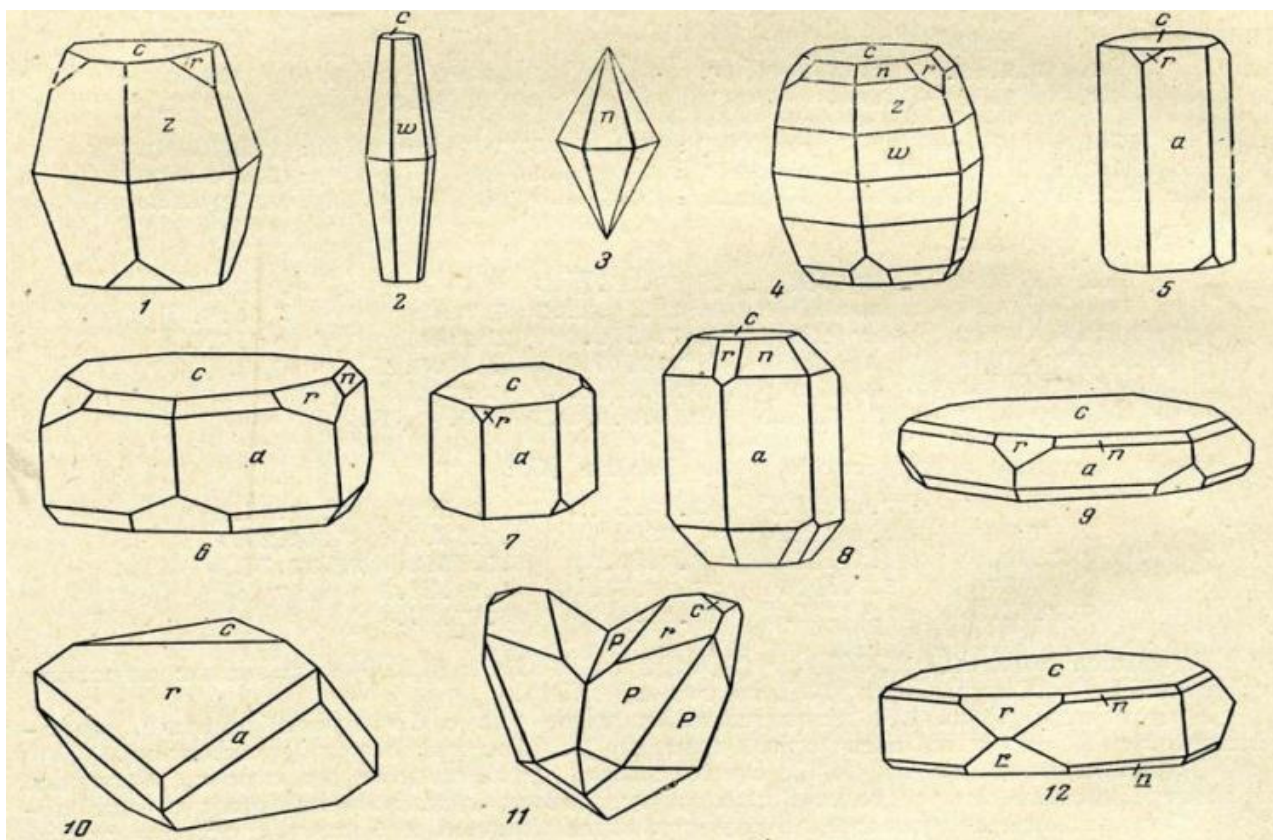
ლალი, როგორც მინერალი, კორუნდის ნაირსახეობაა. ლალს განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს ინდურ ცივილიზაციაში. ტერმინი „კორუნდი“ მომდინარეობს სანსკრიტული სიტყვიდან „კურუვინდა“ (kuruvinda). შედგენილობით ეს მინერალი ალუმინის ოქსიდია, მისი ქიმიური ფორმულაა Al_2O_3 , და მიეკუთვნება ტრიგონალურ სინგონიას, რომბოედრულ კრისტალურ სისტემას (სურათი 9). მას დიტრიგონალურ სკალენოედრების 3m სიმეტრიის კლასსაც მიაკუთვნებენ. შესაბამისი სივრცული ჯგუფია D_{3d}^6 , $-R3(-)c$. კორუნდის ჰექსაგონალური ელემენტარული უჯრედის პარამეტრებია: $a = 4.751$ და $c = 12.970$ Å, ფარდობით $a / c = 1 : 1.365$.

აღნიშნული მინერალი შეიცავს 52.91% ალუმინსა და 47.09% ჟანგბადს. კრისტალური მესრის ფუძეს შეადგენს ჟანგბადის იონები ეფექტური რადიუსით 1.32 Å, რომლებიც მჭიდროდაა წყობილი (თუ მათ წარმოვიდგენთ სფეროების სახით) ჰექსაგონალურ მესერში. ისინი ყოველ მესამე ფენაში თანმიმდევრულადაა განლაგებული. შედარებით მცირე ზომის ალუმინის იონები ეფექტური რადიუსით 0.57 Å ოქტაედრულ სივრცეებში, მჭიდროდ წყობილ ჟანგბადის იონებს შორის, იმყოფება. აღსანიშნავია, რომ ლითონის, ამ შემთხვევაში ალუმინის, იონები იკავებს არა ყველა კრისტალოგრაფიულ სივრცეებს, არამედ მხოლოდ მათ 2/3 ნაწილს.

ალუმინის იონების მდებარეობა ოქტაედრულ ფენებში იმგვარადაა რეალიზებული, რომ სივრცეების ორი შევსებული ფენა ერთ ცარიელს ენაცვლება. ამ მონაცვლეობის გამო, მესამე რიგის სიმეტრიის ღერძის გასწვრივ ალუმინისა და ჟანგბადის იონების განლაგებაში ხორციელდება განმეორებადობა, შესაბამისად, ყოველი სამი და ყოველი ორი ფენის მონაცვლეობით, ხოლო მთლიანად სტრუქტურის ჟანგბადისა და ალუმინის ყოველი ექვსი ფენის შემდეგ.



სურათი 9. კორუნდის სქემატური აგებულება [13].



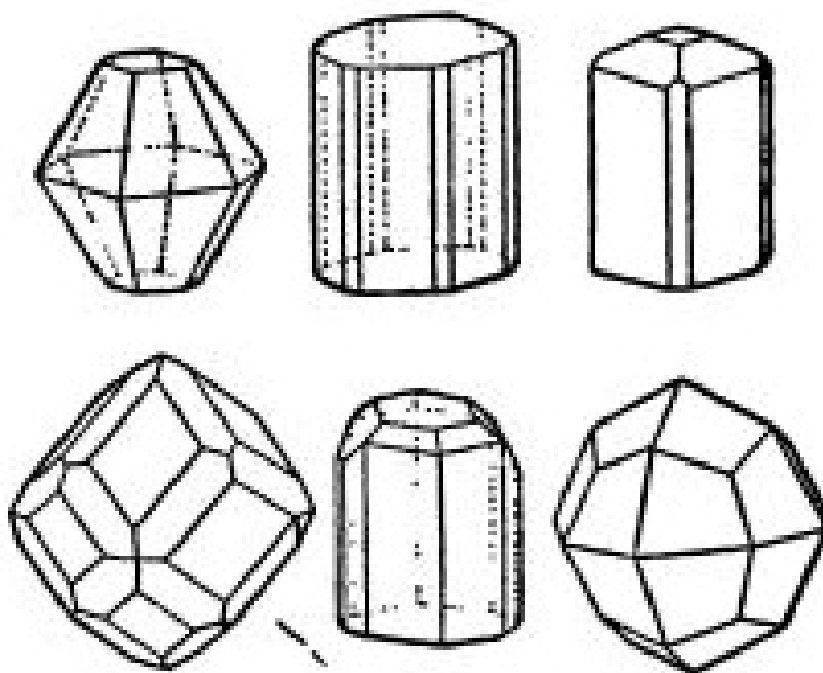
სურათი 10. სხვადასხვა ქვეყანაში მოპოვებული კორუნდის კრისტალების განსხვავებული აგებულება [13].

როგორც აღინიშნა, კორუნდის სტრუქტურა ერთ-ერთი ყველაზე უფრო მეტად კომპაქტურია კრისტალური მინერალების სტრუქტურათა შორის, რაც მას ანიჭებს მდგრადობას და რის გამოც გამოიყურება კორუნდის კრისტალები გარეგნულად ფაქტიურად უნაკლოდ [13, 14].

სხვადასხვა ქვეყანაში მოპოვებულ კორუნდის კრისტალებს განსხვავებული აგებულება აქვთ (სურათი 10). მაგალითად, საფირონის კრისტალებისათვის მეტწილად დამახასიათებელია ჰექსაგონალურ-დიპირამიდული და ე.წ. კასრის ფორმის აგებულება, თუმცა მათთვის რომბოედრულიც არაა გამორიცხული [11 – 13].

ზემოთ ისიც ითქვა, რომ ლალის მოპოვების გეოგრაფია საკმაოდ ფართოა. ის გვხვდება აფრიკაში, აზიაში, ავსტრალიაში და ამერიკის ზოგიერთ შტატშიც, როგორიცაა მონტანა და სამხრეთი კაროლინა. ძირითადი საბადოები ისეთ ქვეყნებშია, როგორიცაა მيانმა (ანუ ბირმა), ტაილანდი (ანუ სიამი), შრი-ლანკა (ანუ ცეილონი), კენია, ტანზანია, და ტაჯიკეთი, ასევე, ავღანეთი და იაპონია.

ლალი ტიპიური ჰიპოგენური მინერალია. გვხვდება მაგმატურ ქანებში, სილიციუმის შემცველ ღარიბ ქანებში (სიენიტის ტიპის, ნეფელინურ სიენიტებში). მსხვილი კრისტალები მოიპოვება პეგმატიტებში, რომლებიც გენეტიკურად კავშირშია აღნიშნულ მთის ქანებთან. შედარებით დიდი, მაგალითად 10 სმ-ის დიამეტრის მეტაკრისტალები დამახასიათებელია მეტამორფული ქანებისათვის – გნეისებისთვის, მოწის ამფიბოლიტებისა და გრანულიტებისათვის. ის ასევე წარმოიქმნება კონტაქტურ-მეტამორფული ცვლილებების მქონე თიხამიწით მდიდარ დანალექ ქანებში.



სურათი 11. ბუნებრივი მინერალების კრისტალური აგებულება: კორუნდი, ბერილი, ვეზუვიანი, გრანატიანი მოწი, ტოპაზი და ლეიციტი [11].

სურათზე 11 მოტანილია ზოგიერთი ამ მინერალისათვის უპირატესად დამახასიათებელი კრისტალური აგებულება (აკად. ა. ე. ფერსმანის მიხედვით) [11].

5. მინერალების თვისებები

განვიხილოთ კორუნდის (სურათი 12) ძირითადი მახასიათებლები. სიხისტეა 9 მოსის შკალით. იგი ოპტიკურად ანიზოტროპულია. მისი სიმკვრივე $3.97 - 4.05 \text{ გ/სმ}^3$ -ის ფარგლებშია. კორუნდის გარდატეხის მაჩვენებელია $1.76 - 1.77$. ლალის კრისტალების წითელი ფერი განპირობებულია მათში ქრომის ატომების მინარევებით, რომელთა შემცველობაც დაახლოებით 2%-ის ფარგლებში ვარირებს.



(ა)



(ბ)

სურათი 12. დამუშავებული (ა) ლალის
და (ბ) ლურჯი საფირონის ნიმუშები.

ფაქტობრივად ყველა ბუნებრივ მინერალში და, მათ შორის, ლალშიც გვხვდება გარკვეული ჩანარტები. მხოლოდ სინთეზური ლალია, ასე ვთქვათ, სრულყოფილი შთაბეჭდილების შემქმნელი. თუმცა, ისიც აღსანიშნავია, რომ რაც უფრო იშვიათი და

მცირეა ნატურალურ ლალში ჩანართები, მით უფრო ღირებული შეიძლება იყოს ესა თუ ის ბუნებრივი მინერალი. ლალი შეფერილ ბრილიანტებთან ერთად – ესაა ისეთი ძვირფასი ქვა, რომელსაც შესაძლებელია უმაღლესი ღირებულება ჰქონდეს.



(ა)



(ბ)

სურათი 13. (ა) ბუნებრივი ალმასები და (ბ) დამუშავებული ალმასები ანუ ბრილიანტები.

მინერალოგიაში საფირონებს უწოდებენ ექსკლუზიურად ცისფერ ან ლურჯ კორუნდებს, საიუველირო ინდუსტრიაში – ნებისმიერ ფერისას, გარდა მოიასამნისფერო წითლისა (რადგანაც ასეთ ქვებს ლალს უწოდებენ). საფირონის ლურჯი ფერი განპირობებულია ტიტანის (Ti) და რკინის (Fe) მინარევებით. ამასთან აღსანიშნავია, რომ რკინის მინარევები ქვას მომწვანო-მოყვითალო ელფერს ანიჭებენ, ვანადიუმის მინარევი – მოიისფროს, ხოლო ქრომი – ვარდისფერს [15, 22].

ლურჯი კორუნდის ანუ საფირონის კრისტალური სიმეტრია ტრიგონალურია. საფირონის მახასიათებლები შემდეგია. სიხისტე მოსის შკალით 9-ს შეადგენს. საფირონის კრისტალი ოპტიკურად ანიზოტროპულია. მის სიმკვრივედ მიღებულია 3.93 გ/სმ^3 (თუმცა, ზოგიერთი ავტორის მონაცემით ის 4.03 გ/სმ^3 -ს ტოლია). გარდატეხის მაჩვენებელი მერყეობს 1.762-დან 1.778-მდე ინტერვალში. კორუნდისათვის დამახასიათებელია მინისებრი, კარგი ბზინვარება; მასში პლეოქროიზმი საკმაოდ ძლიერადაა გამოხატული. ზოგიერთ საფირონს არ ახასიათებს ლუმინესცენცია, ზოგი კი ავლენს ამ თვისებას და გარგრის ფერით ლუმინესცირებს. ლღობის ტემპერატურაა 2040°C . სპექტრის ინფრაწითელ არეში გამჭვირვალობა 6500 ნმ -ის სიგრძის ტალღამდეა. საფირონი დიელექტრიკია. ამ მინერალს ახასიათებს ასტერიზმის ეფექტი, რომელიც სამი ფიზიკური ფენომენის რთული ურთიერთქმედების შედეგია: სინათლის გარდატეხა კრისტალის ზედაპირის სიმრუდეზე, სინათლის დიფრაქცია მიკროჩანართებზე და ამ მიკროჩანართებიდან მისი არეკვლა.

როგორც საყოველთაოდაა ცნობილი, ნახშირბადის რამდენიმე ალოტროპული სახესხვაობა არსებობს, რომელთაგან ერთ-ერთი სწორედ ალმასია (სურათი 13), ეს ბერძნული წარმოშობის სიტყვაა – $\alpha\delta\mu\alpha\varsigma$ ანუ „უმაგრესი მასალა“. აქედანაა, ალბათ, წარმომდგარი ძველი ქართული ტერმინი ადამანტი. დამუშავებულ ალმასს ქართულ ენაზე ბრილიანტს უწოდებენ, განსხვავებით ფრანგულ და ინგლისურენოვანი კულტურებისა, სადაც მას მხოლოდ ერთი სიტყვით აღნიშნავენ: *diamant* (ფრანგულად) ან *diamond* (ინგლისურად). სიტყვა *brilliant*, რომელსაც ქართველები ვხმარობთ, ფრანგულად მბრწყინავს ნიშნავს. ალმასებს კიმბერლიტის საბადოებიდან აქვთ მხოლოდ ერთი – შებრტყელებული ოქტაედრული ფორმა. ამავდროულად გავრცელებულია რომბის დოდეკაედრების მსგავსი კრისტალებიც მომრგვალებული წახნაგებით და ასევე დოდეკაედროიდის სახითაც.

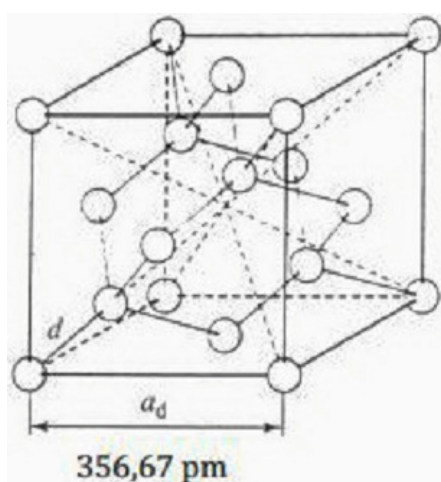


სურათი 14. გრაფიტის კრისტალური მესრის აგებულება.

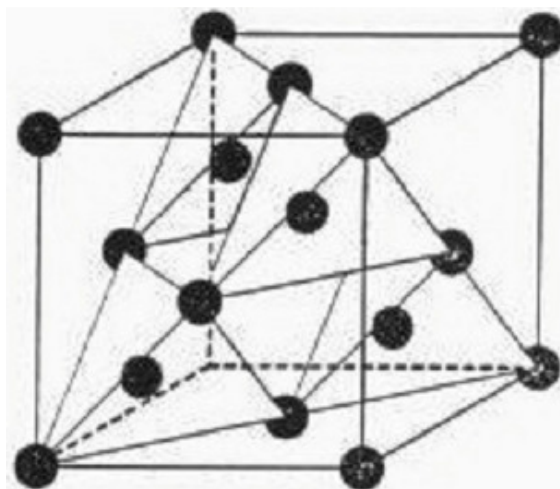
ბრილიანტი, როდესაც ის აღწევს სისუფთავის საკმაოდ მაღალ ხარისხს, განსაკუთრებულ მექანიკურ, ოპტიკურ, თერმულ და ელექტრონულ თვისებებს იძენს. ალმასი, ალბათ, ყველაზე გამორჩეული მინერალია დედამიწაზე, ცისარტყელას ყველა

ფერით მოციმციმე, ბუნებრივ მინერალებში ყველაზე მედეგი – დიდი სიხისტის მქონე სწორედ ალმასია და ამართლებს კიდევ თავის სახელწოდებას – „უძლეველს“. ეს მინერალი უხსნადია რაიმე სითხეში, გარდა გამლღვარი ლითონისა ან ლღობილი ქანებისა. მხოლოდ 800°-ზე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე შეიძლება ალმასის დაწვა შენადნობში რომელიმე მარილთან.

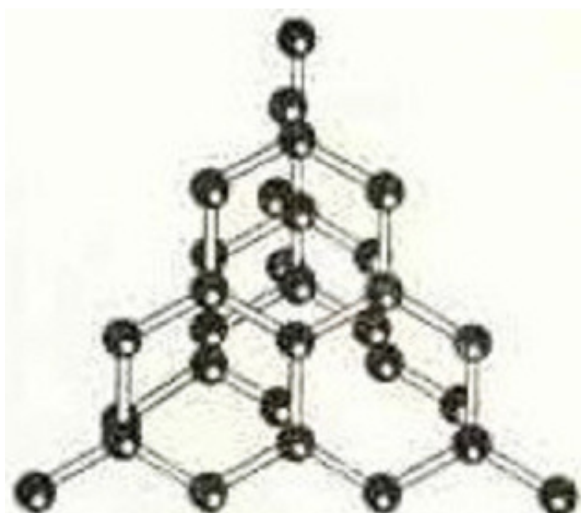
დაბოლოს, ალმასს აქვს განსაკუთრებული თვისება, განაზნის მზის სინათლე ანუ ჰქონდეს ის ეფექტი, რაც წვიმის წვეთებს, ცაში ნათელ, ფერად ცისარტყელას რომ ქმნიან. დახვეწილი, კარგად დაწახნაგებული, ბრილიანტი განსაკუთრებით კაშკაშა ცისარტყელას იძლევა. საყურადღებო და გასაოცარიც ის არის, რომ ბრილიანტი თავისი შედგენლობით მხოლოდ და მხოლოდ უბრალო ნახშირბადია, რომლის ერთ-ერთი სახესხვაობაც გრაფიტია (სურათი 14). ალმასის კრისტალური აგებულების სქემატური ვარიანტები მოტანილია სურათზე 15.



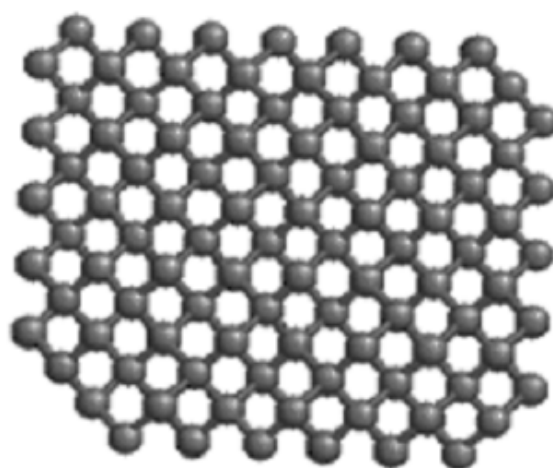
(ა)



(ბ)



(გ)

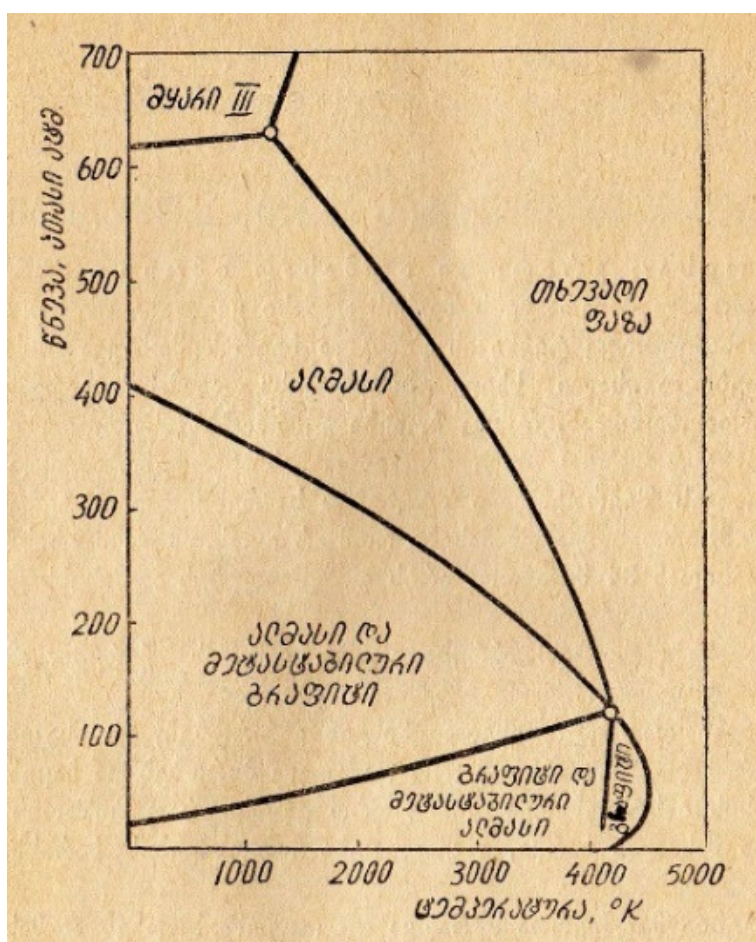


(დ)

სურათი 15. (ა), (ბ), (გ) და (დ): ალმასის კრისტალური მესრის აგებულების ვარიანტები.

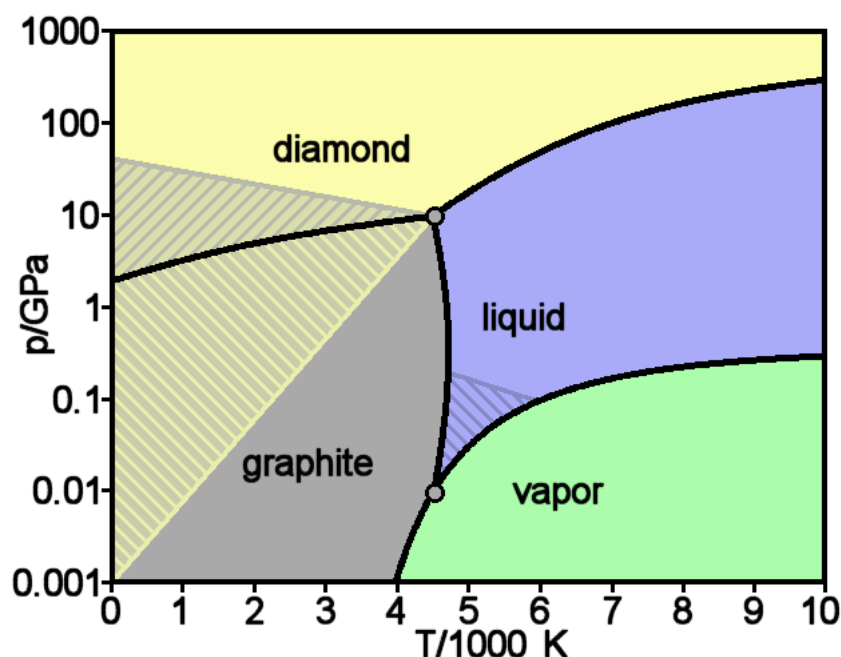
ნახშირბადი სტაბილიზირებულია სხვადასხვა მრავალატომური სტრუქტურის სახით, განსხვავებული კონფიგურაციებით, რომელთაც ალოტროპები ეწოდებათ. მათ შორის შედარებით ყველაზე მეტად ცნობილია: ამორფული ნახშირბადი, გრაფიტი და ალმასი ანუ ბრილიანტი.

ნახშირბადის (C) კუბური პოლიმორფული (ალოტროპული) მოდიფიკაცია, სტაბილურია მაღალი წნევის პირობებში. ატმოსფერულ წნევასა და ოთახის ტემპერატურაზე (ე.წ. ნორმალურ პირობებში) ის მეტასტაბილურია, მაგრამ განუსაზღვრელი დროით შეუძლია არსებობდეს გრაფიტად გადაქცევის გარეშე, რომელიც ამავე პირობებში ასევე სტაბილურია. მაღალ ტემპერატურაზე ვაკუუმში ან ინერტულ აირში კი ალმასი თანდათან გარდაიქმნება გრაფიტად.



სურათი 16. ნახშირბადის ფაზათა დიაგრამა [3].

გასული საუკუნის სამოც-სამოცდაათიან წლებში ნახშირბადის ფაზათა დიაგრამა გამოიყურებოდა ისე, როგორც ეს **სურათზე 16** არის ნაჩვენები [3]. საინტერესოა აღინიშნოს, რომ 1989 წელს, მხოლოდ თეორიულ მოსაზრებებზე დაყრდნობით, აგებული იქნა ნახშირბადის ე.წ. თეორიული ფაზური დიაგრამა ანუ ფაზების არსებობა ტემპერატურაზე და წნევაზე დამოკიდებულებით (**სურათი 17**). შედარებით უფრო ახალმა შრომებმა კი აჩვენა, რომ ალმასის ლღობის ტემპერატურა (იხილე ზედა მარჯვენა მრუდი) დაახლოებით 4700 კ-ს არ აღემატება [17, 18, 22, 23].



სურათი 17. 1989 წელს თეორიულად აგებული ნახშირბადის ფაზური დიაგრამა, სადაც T ტემპერატურაა, ხოლო p – წნევა. ნაჩვენებია გრაფიტისა და ალმასის მყარი და, აგრეთვე, ნახშირბადის თხევადი და გაზური ფაზები [23 – 26].

სუფთა ჟანგბადის ნაკადში ალმასი იწვის სუსტი ცისფერი ალით 720 – 800°C-ზე, და საბოლოოდ მთლიანად გარდაიქმნება ნახშირორჟანგის გაზად. 2000°C-მდე გახურებისას ჰაერის გარეშე ალმასი 15 – 30 წთ-ში გადადის გრაფიტში.

აღმოაჩენილია ნახშირბადის რამდენიმე სხვა ალოტროპი, როგორიცაა ალონდალეიტი, მინა-ნახშირბადი, რომელიც უკვე 40 წელზე მეტია რაც გამოიყენება. სინთეზირებულია ფულერენები, კერძოდ, Buckminsterfullerene-ის ტიპისა ზოგადი ფორმულით C_{60} , რომლებიც თავის მხრივ გამოიყენება კვლევებში. ნახშირბადის ალოტროპების კლასი, აგრეთვე, მოიცავს ნანომილაკებსა და ნანობოჭკოებს. ცნობილია ნახშირბადის ნანოქაფი და ხაზოვანი აცეტილენური ნახშირბადი (კარბინი). როგორც დამტკიცდა, გრაფენი არის ნახშირბადის ორგანოზომილებიანი ფურცლოვანი სიბრტყე, რომლის ატომებიც განლაგებულია ჰექსაგონალური მესრის კვანძებში [27 – 30].

ცნობილია, რომ კიმბერილიტების ან ლამპროიტების მიერ ზედაპირზე გამოტანილი ბუნებრივი ალმასები კრისტალიზდება დედამიწის მანტიაში 200 კმ სიღრმეზე 4 გიგაპა-ზე უფრო მაღალი წნევის ქვეშ 1000 – 1300°C ტემპერატურაზე.

აღინიშნა, რომ ალმასის კრისტალური სისტემა კუბურია, სივრცული ჯგუფია $Fd\bar{3}m$. ალმასის სტრუქტურა შეიძლება წარმოდგენილი იყოს, როგორც წახნაგცენტრირებული ორი კუბური მესერი, რომლებიც მთავარი დიაგონალის გასწვრივ ერთმანეთის მიმართ მისი სიგრძის მეოთხედით არიან დაძრულნი ანუ გადაადგილებულნი. ალმასის კრისტალები საკუთარ სტრუქტურაში ყოველთვის შეიცავს სხვადასხვა დეფექტებს (წერტილოვანს, ხაზოვანს, გარკვეული მცირე ჩანართების სახით). ალმასი ან შესაბამისად მისი დამუშავების შედეგად მიღებული ბრილიანტი შეიძლება იყოს უფერული, სრულიად გამჭვირვალე ანდა – ფერადი, მაგალითად: ყვითელი, ყავისფერი, წითელი, ლურჯი, მწვანე, შავი, ნაცრისფერი

სხვადასხვა ელფერი და ა.შ. რენტგენის, კათოდური ანდა ულტრაიისფერი სხივების მოქმედებით ბრილიანტების უმეტესობა იწყებს ლუმინესცირებას ლურჯ, მწვანე, ვარდისფერ და სხვა ფერებში. ალმასები ხასიათდება სინათლის განსაკუთრებულად ძლიერი გარდატეხით. მათი გარდატეხის მაჩვენებელი ვარირებს 2.417-დან 2.421-მდე და მას ძლიერი დისპერსია (0.0574) ახასიათებს. აღსანიშნავია, რომ პლეოქროიზმი არაა მათში არ ვლინდება. ალმასი დიელექტრიკია და მას თბოგამტარობის ყველაზე მაღალი მაჩვენებელი აქვს ცნობილ დიელექტრიკულ მყარ სხეულებს შორის.

საუკეთესო გამჭვირვალობა, გარდატეხის მაღალი მაჩვენებელი და ამ მაჩვენებლის საკმაოდ დისპერსია (ანუ „ფერთა თამაში“) ალმასს ხდის ერთ-ერთ ყველაზე ძვირფას ქვად, ზურმუხტთან და ლალთან ერთად, რომლებიც მას ერთგვარ მეტოქეობას უწევენ. ალმასის მთავარ განმასხვავებელ თვისებათა შორის ხაზგასასმელია ცნობილ მინერალებს შორის სიმაგრის / მედეგობის ყველაზე მაღალი ინდექსი.

6. ხელოვნური კრისტალების მიღების მეთოდები და მათი თავისებურებანი, კორუნდები

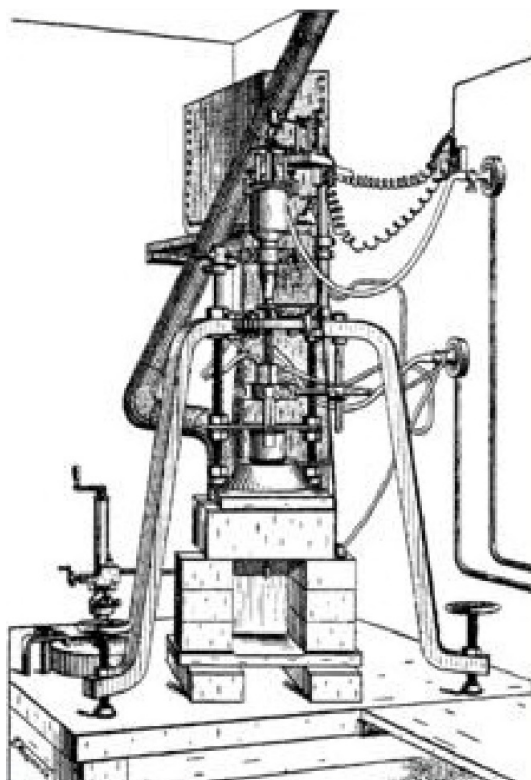
პირველი ექსპერიმენტები ხელოვნური ლალის მისაღებად ჩაატარა გოდენმა 1837 წელს. ცნობილია, რომ იგი მაღალ ტემპერატურაზე ალღობდა ალუმინის ოქსიდის ქრომის, როგორც პიგმენტის, მცირე რაოდენობის დამატებით. 1847 წელს ებელმენმა მიიღო თეთრი საფირონი ალუმინის ოქსიდის შეღებვით ბორის მჟავასთან. 1876 წლიდან მოყოლებული 1891 წლამდე, ფრანგი ედმონ ფრემი, თავის ნაშვილებ ვაჟთან და, იმავდროულად, თანაშემწესთან ოგიუსტ ვერნეილთან ერთად ახორციელებდა ლალის სინთეზს გამლღვალ მარილებიდან. ოგიუსტ ვერნეილმა 1892 წელს განახორციელა სინთეზი, წარადგინა საფრანგეთის აკადემიაში ბეჭდიანი ქაღალდები, მაგრამ მხოლოდ 1902 წელს გაასაჯაროვა თავისი მიღწევა. სწორედ ვერნეილმა მიიღო პირველად სინთეზური ლალი ალუმინის ოქსიდის ფხვნილიდან წითელი საღებავის – ქრომის ოქსიდის დამატებით და ორიგინალური აპარატურის გამოყენებით. **სურათზე 18** მოტანილია ვერნეილის აპარატის სქემა ხელოვნური ლალის სინთეზისათვის [13, 16].

აღწეროთ ვერნეილის მეთოდი. კორუნდის კრისტალების მიღება ტიგელში, რა თქმა უნდა, ძნელია, რადგანაც მას საკმაოდ მაღალი ლღობის ტემპერატურა აქვს: 2030°C. ვერნეილმა მიაგნო ისეთ მეთოდს, რომელიც კრისტალების ზრდის საშუალებას მისცემდა. კრისტალი იზრდება ნალღობიდან, სპეციალური ტიგელის გარეშე, რადგან ლალის კრისტალები სტალაგმიტების მსგავსად წარმოიქმნება. პროცესი შემდეგნაირად შეიძლება წარმოვიდგინოთ. ალუმინის ოქსიდის ფხვნილის წვრილი ნაკადი უწყვეტად მიეწოდება (თითქოს „იღვრება“) აირთა ნარევის არეში, სადაც ტემპერატურა 2000°C-ზე მეტია და ფხვნილი მომენტალურად ლღვება. ნალღობის უმცირესი წვეთები ეცემა საყრდენზე, რომელზედაც საწყისი ჩანასახოვანი ანუ ე.წ. საფალიე კრისტალი უკვე არის დაფიქსირებული და იქვე კრისტალიზდება.

ამ მეთოდს აქვს მთელი რიგი უპირატესობებისა, რომელთა შორის აღსანიშნავია: კონტეინერის არარსებობა, რის შედეგადაც მოხსნილია ფიზიკურ-ქიმიური ურთიერთქმედების პრობლემები კონტეინერის მასალასთან, კრისტალიზაციის პროცესის განხორციელების შესაძლებლობა ჰაერის არეში 2000°C-ის რაიონში, და კრისტალიზაციის ატმოსფეროს რედოქსული პოტენციალი კონტროლდება ცეცხლის

ალის ჟანგბადისა და წყალბადის შემცველობის ფარდობის შეცვლით, ასევე – ტექნიკური სიმარტივე და კრისტალების ზრდის მონიტორინგის ხელმისაწვდომობა.

თუმცა, ვერნილის მეთოდს აქვს გარკვეული ნაკლოვანებებიც: ოპტიმალური თანაფარდობის შერჩევის სირთულე საფაღიე კრისტალის ჩაწევის სიჩქარეს, კაზმის მიწოდებასა და მუშა გაზების მოხმარებას შორის. აგრეთვე სირთულეს წარმოადგენს, ის გარემოება, რომ შესაძლოა ნალღობში მინარევებმა შეაღწიოს მუშა გაზებიდან და ღუმელის კერამიკიდან; კრისტალიზაციის ზონაში კი ტემპერატურის მაღალი გრადიენტები ვითარდება, რაც ხელს უწყობს კრისტალებში მნიშვნელოვანი შიდა დაძაბულობის წარმოქმნას.



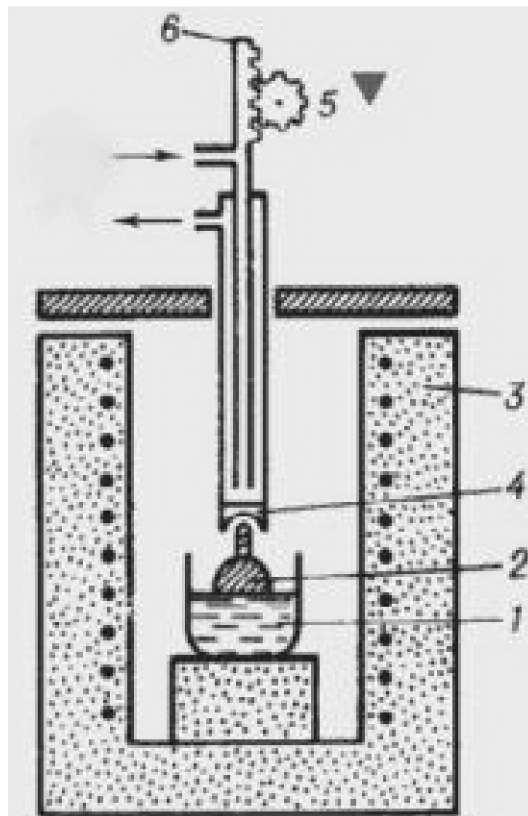
სურათი 18. ხელოვნური ლალის სინთეზის ვერნილის აპარატის სქემა.

რაც შეეხება ვერნილის ღუმელს, იგი შედგება ვერტიკალური ჟანგბად-წყალბადის სანთურის, ფხვნილის დოზატორისა და კერამიკული ძირისაგან. მცირე ცვლილებებით, ეს ღუმელი შეიძლება გამოყენებულ იქნას კორუნდის, შპინელის და რუთილის კრისტალების სინთეზისთვისაც. კორუნდების სინთეზის დროს დოზატორი ივსება მაღალი სისუფთავის ალუმინის ოქსიდის ფხვნილით. მინარევები შემდეგია: ქრომის ოქსიდი – ლალის მისაღებად, რკინისა და ტიტანის – ლურჯი საფირონის, ნიკელის ოქსიდი – ყვითელი საფირონისათვის. ნარინჯისფერი საფირონის მისაღებად იყენებენ ნიკელს, ქრომსა და რკინას, მანგანუმს – ვარდისფერი საფირონისათვის. სპილენძი მოლურჯო-მომწვანო საფირონის მისაღებად არის გამოყენებული, კობალტი კი – მუქი ლურჯი საფირონისათვის. ვანადიუმისა და ქრომის ოქსიდები გამოიყენება ფერის ცვლილების ეფექტისათვის, კერძოდ, ალექსანდრიტის საიმიტაციოდ (მოვარდისფრო-იასამნისფერი მოლურჯო-მოწითალო ელფერით).

პროცესის მიმდინარეობა შემდეგია. ვიბრატორი ან პატარა მოძრავი ჩაქუჩი ეხება დოზატორს და იწვევს კონტროლირებადი სიჩქარით ალუმინის ოქსიდის ფხვნილის ვარდნას ჟანგბადის ნაკადში. როდესაც ფხვნილი ეცემა ჟანგბად-წყალბადის 2200°C -იანი ცეცხლის ალში, ის ღვებება და წვეთავს მზრუნავ კერამიკულ სადგარზე, რომელიც მოთავსებულია მრგვალი ფორმის ცეცხლგამძლე აგურის კამერაში [13]. გამლღვარი ალუმინის ფხვნილი იწყებს გაცივებას და, შესაბამისად, გამაგრებას. მისი მიწოდების სიჩქარეს ზრდიან მანამდე, სანამ არ დაიწყება 15 – 25 მმ დიამეტრის კორუნდის ე.წ. „ბულის“ წარმოქმნა. ტერმინი *boule* ფრანგულიდან მოდის, რაც ბურთის ნიშნავს. ამ, სფერული ფორმის, კორუნდის ნიმუშის სიდიდის ზრდასთან ერთად, მას ნელ-ნელა ჩაწევენ იმგვარად, რომ ლალის ზედა ნაწილი ცეცხლის ყველაზე ცხელ უბანში ხვდებოდეს. ჩვეულებრივ, „ბული“ 40 – 48 მმ სიგრძისაა და მისი მასა 4 სთ-ის განმავლობაში 200-დან დაახლოებით 500 კარატამდე იზრდება.

„ბულის“ სწრაფი ზრდა და შემდგომი გაცივება მასში შინაგან დამაბულობას აჩენს, რაც, თავის მხრივ, ბზარებს წარმოშობს მისი გახერხვისას გრძივი მიმართულების პერპენდიკულარულად. ღუმელიდან ამოღების შემდეგ „ბული“, თუ ჯერ კიდევ არაა გაბზარული, ორ გრძივ ნაწილად დაიყოფა, რომ ჭრილის მეშვეობით მოიხსნას კრისტალის შიგა დამაბულობების ძირითადი ნაწილი.

თავისი პირველი ექსპერიმენტებისას ვერნეილმა 2 სთ-ის განმავლობაში 2.5 – 3.0 გ მასის ანუ 12 – 15 კარატის კრისტალების მიიღება შეძლო.

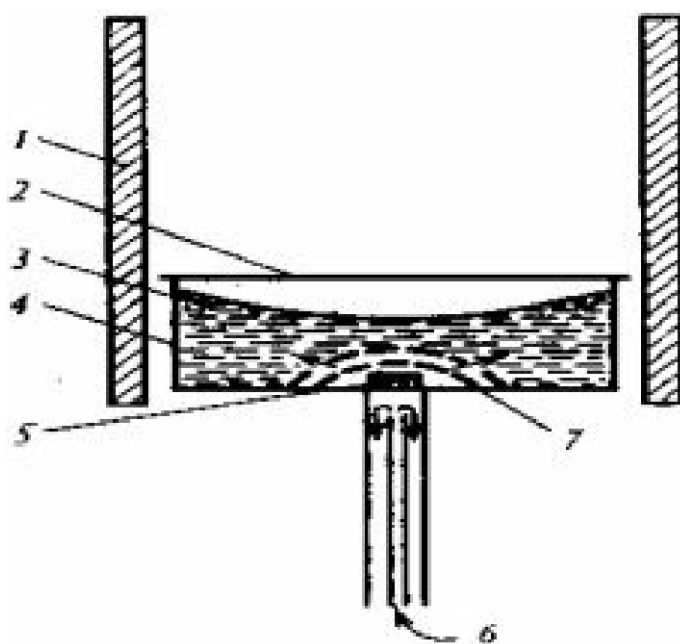


სურათი 19. ჩოხრალსკის მეთოდით კორუნდის მონოკრისტალების მისაღები აპარატის სქემა: 1 – ჭურჭელი ნალღობით, 2 – კრისტალი, 3 – ღუმელი, 4 – მაცივარი და 5 – ამწევი მექანიზმი [13].

ჩოხრალსკის მეთოდი ლალის კრისტალების ზრდის სამრეწველო მეთოდია და განსხვავდება იმით, რომ დნობის ტემპერატურა მუდმივია, ხოლო კრისტალი მისი თანდათანობითი ზრდისას გამოცალკევდება ნალღობიდან. **სურათზე 19** მოტანილია ჩოხრალსკის მეთოდით კორუნდის მონოკრისტალების მისაღები აპარატის სქემა.

ლეიკოსაფირონის დიდი (10 კგ-მდე მასის) კრისტალების გაზრდა შესაძლებელია კიროპულოსის მეთოდის გაუმჯობესებული ვარიანტით. ამგვარი კრისტალიზაციის დროს ნალღობის გამოყენება ანუ ათვისება 100%-ის ოდენობით ხდება. კაზმი შედგება ვერნილის ლეიკოსაფირონის კრისტალების წვრილი ნატეხებისაგან. კრისტალების ზრდის სიჩქარე კი 250 გ/სთ-ია. კრისტალებს ახასიათებს სრულყოფილების მაღალი ხარისხი, მათში არ შეიმჩნევა არც ბლოკების ჩამოყალიბება, არც შრეები და არც ზრდის ზონები. ასეთ კრისტალებს არაა, ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული კრისტალებისათვის ხშირად დამახასიათებელი, ოპტიკური არაერთგვაროვნობები ცენტრალური ღერძის გასწვრივ.

ბაღდასაროვის მეთოდი მაღალი ხარისხის კორუნდის დიდი კრისტალების მიღების ერთ-ერთი საუკეთესო მეთოდია, რომელიც ჰორიზონტალური ზონური დნობის მეთოდის ერთ-ერთ მოდიფიკაციას წარმოადგენს.



სურათი 20. სტოკბერგერის მეთოდით მაღალი ხარისხის

მონოკრისტალური კორუნდის მისაღები დანადგარის სქემა.

- 1 – გამათბობელი, 2 – ლითონის საფარი, 3 – დნობა, 4 – ტიგელი,
5 – კრისტალის ჩანასახი, 6 – გაზის შემყვანი, 7 – კრისტალის
ზრდის არე (ისარი აჩვენებს ზრდის მიმართულებას) [13, 16].

სტოკბერგერის მეთოდით შესაძლებელია ძალიან მაღალი ხარისხის მონოკრისტალური კორუნდის (დისლოკაციების სიმკვრივე დაახლოებით 10^2 სმ²-ის, ხოლო ნარჩენი დამაბულობა 0.3 – 0.5 კგმ/სმ²-ის რიგისა) მიიღება. მოლიბდენის ცილინდრული კონტეინერი (**სურათი 20**), რომლის ძირზეც დამაგრებულია კრისტალის ჩანასახი (და რომელშიც მოთავსებულია ალუმინის ოქსიდი), მუდმივი სიჩქარით გადაადგილდება ქვემოთ. კრისტალის ზრდა ხდება ამ ჩანასახოვანი კრისტალის –

ნალღობის ზონის გავლის შემდეგ ანუ, ფაქტობრივად, კორუნდის ლღობის ტემპერატურის იზოთერმის გავლის შემდეგ. ასე გაზრდილი კრისტალების სიგრძე 220 მმ მდეა, ხოლო დიამეტრი – 50 მმ-მდე [13].

გაზური ფაზიდან კრისტალიზაციის მეთოდი შედარებით ნაკლებადაა გამოყენებული. ეს პროცესი ჩვეულებრივ ღია სისტემაში ხორციელდება და მოიცავს კრისტალიზაციის ზონაში წყალბადისა და ნახშირორჟანგის ნაკადში ალუმინისა და ქრომის ქლორიდებისაგან შემდგარი გაზის ნარევის მიწოდებას. ამ უკანასკნელის ნაცვლად შეიძლება გამოყენებულ იქნას CO და Ar. კრისტალიზაცია ხდება 1550 – 1750°C ტემპერატურის ფარგლებში და გამოისახება შემდეგი რეაქციით: $2\text{AlCl}_3 (\text{გაზი}) + 3\text{H}_2 + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{კრისტალი}) + 3\text{CO} + 6\text{HCl} (\text{გაზი})$.

სინთეზური ლალის კრისტალიზაცია ხსნარ-ნალღობებიდანაც არის შესაძლებელი. პირველად წითელი კორუნდის – ლალის მოზრდილი ზომის კრისტალები, დაახლოებით 100 კარატამდე მასით, მიღებული იქნა ფლუსის მეთოდით 1956 წელს ლითიუმის მოლიბდატის ხსნარ-ნალღობიდან. ფლუსის მეთოდით წითელი კორუნდების სინთეზური მიღება ხდება, აგრეთვე, ტყვიის ოქსიდებისა და ფტორიდების ან ამ ნაერთებისა და ბორის ოქსიდის, როგორც გამხსნელების, ნარევის გამოყენებით. კორუნდის ხსნადობამ აღნიშნული ნაერთების ნალღობში 1300 – 1400°C ტემპერატურაზე შეიძლება 30 – 40%-ს მიაღწიოს. კრისტალიზაცია ხორციელდება პლატინის მოგრძო ცილინდრულ ჭურჭელში. თუ გამხსნელად გამოიყენება ტყვიის ფტორიდი. კორუნდის კრისტალები 1200 – 1400°C ტემპერატურის დიაპაზონში იზრდება.

პროცესი მიმდინარეობს თანდათანობით, 1.5°/სთ სიჩქარით გაცივებისას, წარმოიქმნება 10 – 15 მმ-მდე ექვსკუთხა ფირფიტები. ასეთი კრისტალები შეიძლება იყოს სტრუქტურულად ძალიან სრულყოფილი და პრაქტიკულად არ შეიცავდეს ჩანართებს. თუმცა, იმავდროულად ეს კრისტალები ავლენენ ფერის არათანაბარ განაწილებას. ცენტრალურ ნაწილს, რომელიც პინაკოიდის ფორმის უბანია, უფრო ინტენსიური ფერი აქვს, ხოლო კრისტალის პერიფერიული უბნები, წარმოდგენილი უფრო სწრაფად მზარდი რომბოედრული სახის პირამიდალური სიმეტრიით, ნაკლებად ინტენსიურად არის შეფერილი და მათში მცირე ორფაზიანი ჩანართებაცაა.

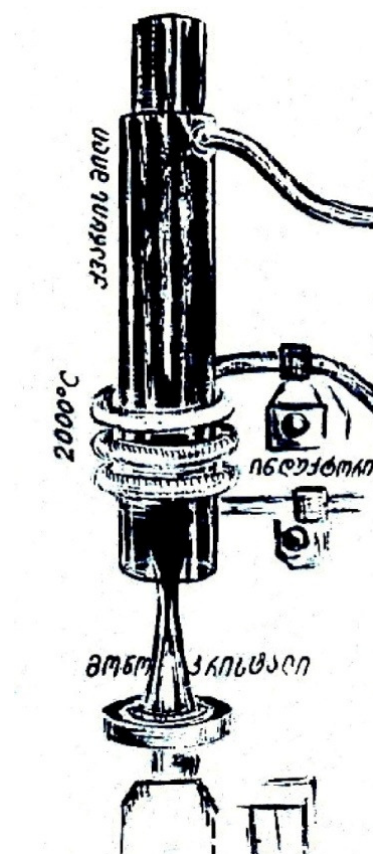
ფლუსის მეთოდით მიღებულ ყველაზე სრულყოფილ ლალის კრისტალებს ჰქონდათ ექვსკუთხა ფირფიტების ფორმა, რომელთა დიამეტრი 3 სმ-ს აღწევდა და რომელთაც 1 სმ სისქე ჰქონდათ. მათი მიღება განხორციელდა პლატინის ჭურჭელში ალუმინის ოქსიდის ხსნარებიდან $\text{PdO-PdF}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ -ის ლღობის პირობებში, ქრომის ოქსიდის მცირე დანამატებით. კრისტალიზაცია ხდებოდა 1260°C-ზე გაგრილების სიჩქარით 1°/სთ [13].

სინთეზური საფირონების მიღებისას გასათვალისწინებელია, რომ მათი შემადგენელი კომპონენტებია ალუმინის ოქსიდი, როგორც ძირითადი მასალა, და მინარევის სახით რკინა, ტიტანი, ქრომი, ვანადიუმი ან მაგნიუმი, იმის შესაბამისად, თუ როგორი შეფერილობის კრისტალებია სასურველი. ხაზგასასმელია, რომ სინთეზის ტემპერატურა ძალიან მაღალი უნდა იყოს. ბუნებრივი კრისტალებისაგან ერთადერთი შესაძენვე დიფერენციაცია იქნება ის, რომ ხელოვნურ რეალიზაციაში არ იქნება ჩანართები, რაც გამოარჩევს ბუნებრივ მინერალებს სინთეზურად მიღებული საფირონებისაგან.

გამჭვირვალე, უფერო, საფირონები საიუველირო ქვებია. ამჟამად კორუნდი ტექნიკური და საიუველირო მიზნებისათვის სამრეწველო მასშტაბით მიიღება,

ძირითადად, ვერნილის მეთოდით (კაზმიდან წყალბად-ჟანგბადის ალის პირობებში), ფლუსიდან – ბრიჯმენისა და კიროპულოსის მეთოდებით და, აგრეთვე, ჰიდროთერმული მეთოდით. ღარიბი მადნების გამდიდრების სქემები მოიცავს გრავიტაციულ მეთოდებს, მაგნიტურ სეპარაციასა და ფლოტაციას ცხიმოვანი მჟავების კოლექტორებით ტუტე გარემოში. ამ შეთხვევაში ქაფწარმომქმნელი აგენტებია სპირტები და ფიჭვის ზეთი.

საკმაოდ პრაქტიკულად ითვლება დიდი სიმძლავრის დანადგარის (სურათი 21) ლითონის კამერაში მიღებული პლაზმის გამოყენება [3]. მილის კედლის გასწვრივ მიეწოდება არგონის ჭავლი, რომელიც წარიტაცებს კორუნდის ფხვნილს ისე, რომ არ მოხდეს მისი გაფანტვა. გაზის ჭავლი თითქოს კუმშავს ფხვნილის ნაკადს და უნარჩუნებს მას გარკვეულ მიმართულებას. სისტემაში სიჩქარეები ისეა განაწილებული, რომ განმუხტვის ზონაში ფხვნილის ნაწილაკები მხოლოდ გარედან შემოიღვება, მთლიანად გაღლება კი ხდება თავად კრისტალზე, რომლის ზრდის სიჩქარეც შეადგენს 10 – 15 მმ/სთ. პროცესის კონტროლისათვის გრძელფოკუსიანი ლინზი მეშვეობით კრისტალის გამოსახულებაც პროეცირდება სპეციალურ ეკრანზე, რაც საშუალებას გვაძლევს დისტანციურად ვარეგულიროთ რეჟიმი [3].



სურათი 21. პლაზმის ჭავლში
საფირონისა და სხვა კორუნდების
მისაღები დანადგარი.

წვის სითბური მახასიათებლების გაუმჯობესების მიზნით, არგონს მცირე რაოდენობით ჰაერსაც ურევენ. ასეთი გზით იღებენ არა მხოლოდ საფირონებს, არამედ –

სხვა კრისტალებსაც. შევნიშნეთ, რომ ტექნიკური დანიშნულების კორუნდი ბოქსიტების თერმული დამუშავებითაც მიიღება.

რაც შეეხება სინთეზურ ალმასებს ანუ ბრილიანტებს, უნდა აღინიშნოს, რომ ალმასების სამრეწველო საბადოები, როგორც წესი, კიმბერლიტური და ლამპროიტული საბადოებია, ხოლო სინთეზური ალმასების – ბრილიანტები დოპირება შეიძლება ხელოვნურად ბორით, ფოსფორით ან აზოტით, კერძოდ, მათი ელექტრონული თვისებების შესაცვლელად. უკანასკნელ ხანებში ადამიანმა თითქოს „აჯობა ბუნებას“ და ღუმელებში მიიღო ისეთი ნივთიერება, როგორიცაა ბორის კარბიდი B_4C , რომელიც ზოგ შემთხვევაში ბრილიანტზეც კი უფრო მეტი სიმტკიცითა და მეტი მედეგობითაც გამოირჩევა, თუმცა, იმავდროულად საკმაოდ მყიფეცაა.

საარქივო ცნობების თანახმად, 1694 წელს იტალიელმა მეცნიერებმა ჯ. ავერანიმ და კ.-ა. ტარჯონიმ ორი მცირე ალმასის შეღებობის მცდელობისას აღმოაჩინეს, რომ ძლიერი გახურებისას ალმასი იწვის ისე, როგორც ნახშირი. სმაიტსონ ტენანის მიერ 1797 წელს გაკეთებულმა აღმოჩენამ, რომ ალმასი ანუ ბრილიანტი ნახშირის განსხვავებული ფორმაა, გზა გაუხსნა ხელოვნური ალმასების სინთეზის შესალებლობის მიხედვით. რამდენიმე წლის შემდეგ ლავუაზიემ დაადგინა, რომ ალმასის დაწვისას წარმოიქმნება ნახშირბადის დიოქსიდი. 1800-იანი წლების დასაწყისში ჰემფრი დევიმ და მაიკლ ფარადეიმ საბოლოოდ დაამტკიცეს, რომ ალმასი წარმოადგენს ნახშირისა და გრაფიტის ქიმიურ სახესხვაობას. სულ მალე, ათიოდე წლის შემდეგ, 1823 წელს ხარკოვის უნივერსიტეტის დამაარსებელმა ვასილ კარაზინმა მაღალ ტემპერატურებზე მერქნის მშრალად გამოხდისას მიიღო უცნობი მყარი კრისტალები, რომლებიც ჭრიდნენ მინას. 1893 წელს პროფესორმა ხრუმჰოვმა ნახშირბადით გაჯერებული გამდნარი ვერცხლის მასის სწრაფად გაცივებისას ასევე მიიღო კრისტალები, რომლებიც კვალს ამჩნევდნენ მინასა და კორუნდს [11 – 15].

1879 წელს, ზოგიერთი წყაროს თანახმად კი 1880 წელს, შოტლანდიელმა ქიმიკოსმა ჯეიმზ ჰენიმ აღმოაჩინა, რომ ტუტე ლითონების ორგანულ ნივთიერებებთან ურთიერთქმედებით გამოიყოფა ნახშირბადი გრაფიტის ფანტელების სახით და ივარაუდა, რომ მსგავსი რეაქციების ჩატარებისას მაღალი წნევის პირობებში ნახშირბადი შეიძლება დაკრისტალბულიყო ალმასის სახით. მთელი რიგი ექსპერიმენტების შემდეგ, სადაც პარაფინის, აბუსალათინის ზეთისა და ლითიუმის ნარევის დიდი ხნის განმავლობაში აყოვნებდა დალუქულ, წითელ ვარვარებამდე გახურებულ ფოლადის მილში, მან შეძლო მიეღო რამდენიმე კრისტალი და დაადასტურა, რომ ისინი ალმასებია. მეცნიერულ სფეროებში მისი აღმოჩენა არ იქნა აღიარებული იმ ვარაუდით, რომ შეუძლებელია ალმასი წარმოქმნილიყო მსგავსი დაბალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში. თანაც განმეორებითი ექსპერიმენტებისას ჰენიმ ვეღარ მიიღო სინთეზური ალმასი.

ჰენის კვლევების ხელახალი ჩატარებისას 1943 წელს რენტგენულ-ფაზური ანალიზით დამტკიცდა, რომ გამოყოფილი კრისტალები ნამდვილად ალმასებია, თუმცა პროფესორმა კ. ლონსდეილმა, რომელიც ატარებდა ამ ანალიზს, კვლავ განაცხადა, რომ ჰენის ექსპერიმენტები წარმოადგენდნენ მისტიფიკაციას [13].

1953 წელს სტოკჰოლმში, ელექტროენერგიის კომპანიის ASEA პროექტის QUINTUS განხორციელებისას ბალთაზარ ფონ პლატენისა და ანდერს კემპის მიერ შემუშავებული ტექნიკა გასაიდუმლოვდა.

მომდევნო, 1954 წელს ტრეისი ჰოლმა (ფირმა General Electric) გაიმეორა ეს ექსპერიმენტები და გამოაქვეყნა შედეგები ჟურნალში Nature. ფრანგული საარქივო

მასალების თანახმად, სწორედ მაშინ იქნა ოფიციალურად აღიარებული პირველი სინთეზური ალმასის მიღება [27 – 29].



(ა)



(ბ)

სურათი 22. მეოცე საუკუნის 80-იან წლებში სინთეზურად მიღებული ალმასების ერთერთი პირველი ნიმუშები.

1950-იანი წლების ბოლოს De Beers ჯგუფმა (რუსეთთან და ჩინელებთან ერთად) წამოიწყო სინთეზური ბრილიანტების სამრეწველო წარმოება. ამან გამოიწვია ინდუსტრიისათვის განკუთვნილი ბუნებრივი ბრილიანტების ფასის დაცემა. 1980-იან წლებში რუსმა მკვლევრებმა ნოვოსიბირსკში შექმნეს ბრილიანტის დასინთეზების აგრეგატი (სურათი 22). მათ შეიმუშავეს მცირე ზომის მოწყობილობა, რომელსაც შეეძლო ნახშირბადის ბრილიანტად გარდაქმნა. აღმასების სინთეზის კვლევები წარმოებდა აგრეთვე მოსკოვში, ნ. კურნაკოვის სახ. ზოგადი და არაორგანული ქიმიის ინსტიტუტში, აკადემიკოს ივანე ტანანაევის ხელმძღვანელობით. აღსანიშნავია, რომ თავდაპირველად მიღებული ბრილიანტები საკმაოდ მცირი ჯდება [11 – 16]. მცირეფასი ქვების ხარისხის მქონე სინთეზური ბრილიანტების პირველი რეალური გამოყენება საიუველირო ინდუსტრიაში დაიწყო 1990-იანი წლების შუა პერიოდიდან, მაგრამ მხოლოდ 21-ე საუკუნის მეორე დეკადის ბოლოს დაიწყო ამ სინთეზური ბრილიანტების უფრო მასიური გამოყენება. 2018 წელს De Beers ჯგუფმა გამოუშვა ლაბორატორიული საიუველირო ხაზი Lightbox Jewelry.

ზოგადად, ბევრი ისეთი ცნობილი კომპანია დაარსდა და განვითარდა ამ სწრაფად მზარდ ბაზარზე, რომელიც დაკავებულია სინთეზური აღმასების ანუ ბრილიანტების წარმოებიდან დაწყებული და მათი გამოყენების სხვადასხვა სფეროთი დამთავრებული. მრავალია მათი მიზნებიც: ბიოტექნოლოგიები, ნანობრილიანტების წარმოების ახალი პროცესები, ინსტრუმენტები ენერგეტიკული ელექტრონიკისათვის და ა.შ.

თანამედროვე მეთოდებით აღმასების მისაღებად გამოიყენება გაზების ნარევის გარემო, რომელიც შედგება 95%-ით წყალბადისა და 5%-ით ნახშირბადმემცველი გაზისაგან (მაგალითად, პროპანი და აცეტილენი) და, ასევე, მაღალი სიხშირის პლაზმისაგან, რომელიც კონცენტრირებულია სარეაქციო გარემოს ძირში ანუ იქ, სადაც წარმოიქმნება აღმასები. გაზის ტემპერატურა 700 – 850°C-ია, წნევა კი 30-ჯერ ნაკლებია ატმოსფერულზე. სინთეზის ტექნოლოგიური რეჟიმიდან გამომდინარე, აღმასების ზრდის სიჩქარე 7-დან 180 მკმ/სთ-მდე იზრდება.

7. კორუნდის ჯგუფის კრისტალებისა და აღმასის გამოყენება, ნახშირბადისა და მისი ფუტურისტული ალოტროპების მოხმარება და სარგებელი

წითელმა კორუნდმა ანუ ლალმა ძალიან ფართო გამოყენება ჰპოვა მექანიკური საათების წარმოებაში, ზოგჯერ – ელექტრონული საათების წარმოებაშიც კი, საკისრების დამზადებაში, ლალის ქვაზე ლითონის უკიდურესად დაბალი ხახუნის გამო. საათების წარმოებაში ამჟამად გამოყენებული ყველა ლალი სინთეზურია და შეიძლება იყოს როგორც ლალის ფხვნილისაგან აგრეგირეგაციით მიღებული, ასევე – მონობლოკებად, ყველაზე ძვირადღირებული მექანიზმებისათვის, ძირითადად, ოდნავ მოვარდისფრო და სრულიად გამჭვირვალე ქვების სახით.

მცირე ზომის ლალები ასევე გამოიყენებოდა ანალოგურ ვოლტმეტრებში, ამპერმეტრებში და მულტიმეტრებში, რათა მინიმუმამდე დაყვანილიყო გალვანომეტრის მოძრავი შეკიდული კვანძის ხახუნი, რომელიც ცდომილების წყარო იქნებოდა გაზომვების დროს. უკანასკნელ პერიოდში ლალი გამოიყენება აბრაზიულ ქარგოლებში, ზოგჯერ თეთრ კორუნდთან ერთად, და მულტიმეტრებში.

განსაკუთრებით აღსანიშნავია ლალის გამოყენება ლაზერებში. ასეთი პირველი ლაზერი შეიქმნა 1960 წელს და ამ ტექნიკის სამრეწველო გამოყენება 1965 წლიდან დაიწყო.

სინთეზური უფერული კორუნდი გამოიყენება სატელიტებისა და კოსმოსური ხომალდების საფანჯრე მინების დასამზადებლად (რადგანაც ის გამჭვირვალეა ულტრაიისფერი სინათლისათვის და იმავდროულად ძალიან მედეგია), ასევე ლაზერული ტექნიკის სინათლის გამტარ კომპონენტებში (ოპტიკა, ლაზერული რენტგენის მიკროსკოპები და ა.შ.).

რაც შეეხება ალმასებს, ალმასის განსაკუთრებული სიმაგრე თავის გამოყენებას ჰპოვებს მრეწველობაში: მას გამოიყენებენ დანების, ბურღების, მჭრელების და სხვა ამგვარი ტექნიკური საშუალებების დასამზადებლად. სინთეზურ ალმასებზე მოთხოვნის ზრდა მრეწველობაში იწვევს ხელოვნური ალმასების წარმოების გაფართოებას. ბოლო დროს ეს პრობლემა წყდება ალმასის ფენის კლასტერული და იონურ-პლაზმური დაფენით მჭრელ ზედაპირზე.

ალმასის ფხვნილი (როგორც ბუნებრივი ალმასის დამუშავების ნარჩენი, ასევე ხელოვნური ალმასები) გამოიყენება როგორც აბრაზივი, მჭრელი და სალესი დისკოების დასამზადებლად.

მეტად პერსპექტიულია ალმასის გამოყენება მიკროელექტრონიკაში. ესენია მზა ნაკეთობები, რომელთაც აქვთ მაღალი სითბური და რადიაციული მდგრადობა. ასევე პერსპექტიულია ალმასის გამოყენება მიკროელექტრონიკის აქტიური ელემენტებად, განსაკუთრებით, ზეზუსტ და მაღალვოლტიან ელექტრონიკაში. ნახევარგამტარული ხელსაწყოების დამზადებისას ძირითადად გამოიყენება ალმასის დოპირებული ფირები. ბოროთ დოპირებულ ალმასს აქვს p-ტიპის გამტარობა, ფოსფორით – n-ტიპისა. ფართო აკრძალული ელექტრონული ზონის გამო ალმასის შუქდიოდები სპექტრის ულტრაიისფერ ნაწილში ფუნქციონირებენ.

2004 წელს ლ. ვერემჩაგინის სახ. მაღალი წნევების ფიზიკის ინსტიტუტში პირველად განხორციელდა ისეთი ალმასის სინთეზი, რომელსაც ჰქონდა ზეგამტარი გადასვლა 2 – 5 კ-ზე. მიღებული ნიმუში წარმოადგენდა ბოროთ ძლიერ ლეგირებულ პოლიკრისტალურ ალმასს. მოგვიანებით იაპონიაში მიიღეს ალმასის ფირები, რომლებიც გადადიოდა ზეგამტარ მდგომარეობაში 4 – 12 კ ტემპერატურაზე. ეს ფაქტი – ალმასის ზეგამტარობა – დღეს დღეისობითაც მეცნიერების დიდ ინტერესს იწვევს.

8. ნახშირბადი, როგორც ალოტროპული მრავალფეროვნების მაგალითი, ალმასი, გრაფიტი, გრაფენი და სხვა ფუტურისტული მასალები

გრაფენი ნახშირბადის ორგანოზომილებიანი ალოტროპიული მოდიფიკაციაა, რომელიც წარმოქმნილია ნახშირბადის ატომების ერთი შრის სისქით და რომელსაც ჰექსაგონალური სტრუქტურა ახასიათებს.

გრაფენის მიღება არც ისე დიდი ხნის წინ მოხერხდა. თეორიულად ის ნაწინასწარმეტყველები იყო 1947 წელს ფილიპ ველასის მიერ. მანჩესტერის უნივერსიტეტის მეცნიერებმა ანდრეი გეიმმა და კონსტანტინე ნოვოსელოვმა აღმოაჩინეს გრაფენი 2004 წელს და შემდგომ – 2010 წელს ამ აღმოჩენისათვის მიიღეს

ნობელის პრემია ფიზიკის დარგში. ეს ყველაზე ფუტურისტული მასალაა და სწორედ ამიტომ ევროგაერთიანების მიერ მხარდაჭერილია პროექტი Graphene Flagship, რომელიც ხელს უწყობს ამ არაჩვეულებრივი მასალის კვლევასა და გამოყენებას.

გრაფენი მსუბუქი, მტკიცე, გამჭვირვალე და, იმავდროულად, ელასტიური გრაფიტის ერთი შრეა, რომელიც შედგება კრისტალური ნახშირბადისაგან. ეს ძალიან მყარი და არაჩვეულებრივად მოქნილი მასალა ლითონივით კარგად ატარებს ელექტრულ დენსა და სითბოს და თანაც მინასავით გამჭვირვალეა. ელექტრონები გრაფენებში გადაადგილდებიან თითქმის 100-ჯერ უფრო სწრაფად, ვიდრე სილიციუმში, რომელიც დღეს-დღეობით კომპიუტერული პროცესორების ძირითად მასალას წარმოადგენს [30–33].

უამრავი საინტერესო, მნიშვნელოვანი და ინტენსიური ბოლოდროინდელი კვლევა არსებობს, იქნება ეს ზოგადი ნანოტექნოლოგიების, თუ კონკრეტულად ამ ახალი მასალების ირგვლივ [31, 34–46].

გრაფენში ნახშირბადის ატომის ჰექსაგონალური უჯრედული სტრუქტურის გამო ოთხი ელექტრონიდან სამი უკავშირდება მეზობელ ატომებს, ხოლო მეოთხე ელექტრონის ორბიტა პერპენდიკულარულია გრაფენის სიბრტყისა. დამაკავშირებელი (ასე ვთქვათ, ბმული) ელექტრონები უზრუნველყოფენ უჯრედის სიმტკიცეს, ხოლო მეოთხე, ანტიდამაკავშირებელი ელექტრონი გრაფენს ანიჭებს მაღალ სითბო- და ელექტროგამტარობებს. ასეთი სტრუქტურის გამო გრაფენი ალმასივით მტკიცეა და ამასთან მას დაახლოებით 20%-ით მეტი ჭიმვადობა ახასიათებს.

კომპიუტერულ ტექნიკაში გრაფენის გამოყენებისას დიდი ყურადღება სწორედ მეოთხე გაუწყვილებელ ელექტრონს ექცევა.

გრაფენის გამოყენების არეალი მრავალფეროვანია და მომავალში, დიდი ალბათობით, კიდევ უფრო გაფართოვდება. გრაფენს აქვს ერთი განსაკუთრებული თვისებაც: ელექტრონების ვალენტური და გამტარობის ზონების ურთიერთგადაკვეთა ძალიან მცირეა, რის გამოც ელექტრონები გადაადგილდებიან გრაფენის უჯრედებში თითქმის დაუბრკოლებლად და, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, დიდი სიჩქარით. გრაფენული ტრანზისტორები შეიძლება გამოყენებული იყოს კომპიუტერული პროცესორებისათვის, მათ შეუძლიათ იმუშაონ ძალიან მაღალი წარმადობით და დიდი სიჩქარით, ამასთანავე არ გადახურდნენ. კომპანია IBM ჯერ კიდევ 2010 წელს შეიმუშავა ტრანზისტორი, რომლის სიხშირეც არის 100 გიგაჰც.

ამრიგად, თუ გრაფენს გამოვიყენებთ ჩიპების დასამზადებლად, მაშინ საგრძნობლად აიწევს კომპიუტერების წარმოების დონე. ის გამოიყენება, აგრეთვე, ფლემ-მეხსიერებებში. მეცნიერების აზრით, გრაფენის გამოყენებას კავშირგაბმულობის მოწყობილობებში შეუძლია 10-ჯერ და 100-ჯერადაც კი გაზარდოს კომუნიკაციის სიჩქარე.

უმსხვილესი IT-კომპანიები, როგორებიცაა Nokia და Samsung, ჩართული არიან გრაფენის კვლევისა და გამოყენების ფართომასშტაბიან პროექტებში. მთავარია შემუშავდეს გრაფენის წარმოების უფრო იაფი მეთოდი [40–44]. უკვე წლებია, რაც გრაფენის ტესტირება მიმდინარეობს აგრეთვე ბიოსამედიცინო გამოყენებისათვის და იმის გასარკვევად, არის თუ არა ტოქსიკური ეს მასალა [30–32, 35, 37, 45, 47, 48].

2022 წელს ანუ კოვიდ-პანდემიის პირობებში დაიდო მნიშვნელოვანი უახლესი კვლევების შედეგები ამ მიმართულებით. მაგალითად, პროფესორმა ჰონგ ბიუნ-ჰიმ, სეულის ეროვნული უნივერსიტეტის ნანომასალების ექსპერტმა, აღნიშნა, რომ გრაფენის ტესტირება მიმდინარეობს ბიოსამედიცინო გამოყენებისათვის, ვაქცინების ჩათვლით, მაგრამ ეს კვლევები ჯერ კიდევ ექსპერიმენტულ ფაზაშია და კომერციულად

ხელმისაწვდომი მხოლოდ კლინიკური კვლევების დასრულების შემდეგ გახდება [30, 31, 45, 47 – 49]. თუმცა, ამის გარეშეც გრაფენს და (ზოგადად, ნახშირბადს) მსოფლიოს მეცნიერები „მაგიურ ფუტურისტულ“ მასალას უწოდებდნენ ენერგიისა და ახალი ტექნოლოგიების სფეროში მისი მულტიფუნქციური გამოყენების გამო [43, 44, 46].

ნახშირბადის ნანობოჭკოები გრაფენის დახვეული ფურცლებისაგან შემდგარი ცილინდრული სტრუქტურებია, რომლებიც „ჩაწყობილნი“ არიან ზუსტი გეომეტრიის თანახმად. ყველაზე გავრცელებულ ნანობოჭკოებს შეიძლება ჰქონდეთ დახვეული ფურცლების გრძივი განლაგება (საკმაოდ ახლოსაა ნახშირბადის ნანომილაკის მრავალკედლიან სტრუქტურასთან), ფურცლები განლაგებულია ძაფების ღერძების მიმართულების ან მათი კონუსური დაბოლოებების პერპენდიკულარულად.

ნანობოჭკოვანი სფეროების დიამეტრი რამდენიმე ათეულიდან რამდენიმე ასეულ ნანომეტრამდეა და ამიტომ ისინი ერთი ან ორი რიგით უფრო თხელია, ვიდრე ჩვეულებრივი ნახშირბადის ბოჭკოები. მათი სინთეზი ტარდება ან ორთქლის ფაზაში ნახშირწყალბადის კრეკინგით ლითონის კატალიზატორზე, რაც ნახშირბადის ნანომილაკების სინთეზის ყველაზე გავრცელებული პროცესის ანალოგიურია, ანდა პოლიმერული ნანომაკონსტრუქციის მიღებით, რომელიც შემდეგ კარბონიზდება.

გრაფენს აქვს გარკვეული ბიოციდური ეფექტი და ბიოლოგიურად დაბინძურებულ საექვო გარემოზე ზემოქმედების უნარი, რომლებიც ნაჩვენებია *in vitro* და ზოგიერთისათვის *in vivo*.

2013 წელს ბრაუნის უნივერსიტეტის ჯგუფმა შეისწავლა გრაფენის „ფანტელები“, რომლებიც შედგებოდა 10 მკმ სისქის რამდენიმე ფენისგან. ხსნარში მოთავსებისას მათ შეუძლია უჯრედის მემბრანის გახვრეტა წვეროების მეშვეობით და პენეტრაცია, რაც შემდეგ საშუალებას აძლევს გრაფენს „ინტერნალიზდეს“ და შეიჭრას უჯრედში. ამ ფენომენის ფიზიოლოგიური ეფექტები უცნობია და შემდგომი კვლევებით შეფასებას საჭიროებს [30]. 2014 წელს სტონი ბრუკის უნივერსიტეტის მკვლევრებმა აჩვენეს, რომ გრაფენის ნანონაწილაკების სამი ტიპი („ნანობაფთების“, ნანოფირფიტებისა და „ნანოხახვების“ სახით) არატოქსიკურია 50 მკგ/მლ-მდე კონცენტრაციისას. ისინი არ აფერხებენ ადამიანის ძვლის ტვინის ღეროვანი უჯრედების დიფერენციაციას ოსტეობლასტებად (ძვლებად) ან ადიპოციტებად (ცხიმებად), რაც მიუთითებს იმაზე, რომ დაბალი დოზებით ისინი უსაფრთხოა ბიოსამედიცინო გამოყენებისათვის [37].

გრაფენის ტოქსიკურობის კვლევების მიმოხილვაში, შრომის [49] ავტორებმა მეცნიერულად განიხილეს გრაფენის ტოქსიკურობის სხვადასხვა ცნობილი მექანიზმი. შემდგომი კვლევები უფრო მეტად იყო ფოკუსირებული გრაფენის ოჯახის ნანომასალებზე (GFNs) და მოტანილი იყო ტოქსიკურობის რამდენიმე ტიპური მექანიზმი, როგორიცაა უჯრედის ფიზიკური დაზიანება, ოქსიდაციური სტრესი, დნმ-ის დაზიანება, ანთებითი რეაქცია, აპოპტოზი, აუტოფაგია და უჯრედული ნეკროზი [30, 45, 48, 49].

2020 წელს ახალმა კვლევებმა აჩვენა, რომ გრაფენის ტოქსიკურობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება რამდენიმე ფაქტორთან კორელაციაში: მოლეკულის ფორმა, ზომა და / ან სისუფთავე, წარმოების შემდგომი დამუშავების საფეხურები, ჟანგვითი მდგომარეობა, ფუნქციური ჯგუფები, დისპერსიულობა, სინთეზის მეთოდები, ასევე შეყვანის გზა და დოზა და ექსპოზიციის დრო. კოვიდ-19-ის პანდემიასთან ბრძოლის ფარგლებში გრაფენის შემცველი ნიღბები, მასალა, რომელიც ცნობილია თავისი ანტივირუსული მოქმედებით, 2021 წლის ივლისში ამოღებული იქნა კანადის ბაზრიდან სავარაუდო ტოქსიკურობაზე ექვის გამო [30, 50]. ჩატარებული კვლევების

შედეგად ექსპერტებმა დაასკვნეს, რომ რისკი არ არსებობდა და ისინი კვლავ გამოიტანეს ბაზარზე 2021 წლის ბოლოსათვის [50].

9. დასკვნა

დასკვნის სახით აღვნიშნავთ, რომ ქიმია პარადოქსებით აღსავსე მეცნიერებაა [51] და უამრავ სიურპრიზს გვიქადის დროთა მუდმივი დინების განმავლობაში. ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი უახლესი მასალა, ნახშირბადის ნანომილაკებისა და გრაფენის ჰიბრიდული მასალების ჩათვლით, უდავოდ უაღრესად პერსპექტიული სისტემებია ენერგეტიკაში და გარემოსდაცვითი მრავალფუნქციური გამოყენებისათვის. ამასთანავე, მომავალი აღმოჩენები ჯერ კიდევ წინაა. არც ის დაგვაიწყდეს, რითიც დავიწყეთ: თავდაპირველად დასახელებული ძვირფასი ქვები – ლალი, ალმასი, საფირონი – მათაც ასევე საკუთარი ადგილი აქვთ მრავალფეროვანი აპლიკაციისა და სარგებლობის მომტან სხვადასხვა სფეროში, თუნდაც ხელოვნების ესოდენ განსხვავებულ მიმართულებებში.

მადლიერება

გვინდა განსაკუთრებული მადლობა მოვახსენოთ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტის პროფესორს, ბატონ ლევან ჩხარტიშვილს რჩევებისათვის, თანამშრომლობა რომელთანაც ჩვენთვის უაღრესად მნიშვნელოვანია.

დამოწმებანი

- [1] ა. ავალიანი. საქართველოს წიაღისეულის გადამუშავების გზები, 1974, თბილისი, საქართველოს მეცნ. აკად. გამომცემლობა „მეცნიერება“.
- [2] ა. ავალიანი. ლობილთა ელექტროლიზი, 1972, თბილისი, საქართველოს მეცნ. აკად. გამომცემლობა „მეცნიერება“.
- [3] ა. ავალიანი. მაღალი ტემპერატურები ბუნებასა და ტექნიკაში, 1966, თბილისი, საქართველოს მეცნ. აკად. გამომც. „მეცნიერება“.
- [4] შ. რუსთაველი. ვეფხისტყაოსანი, 1966, თბილისი, გამომცემლობა „საბჭოთა საქართველო“.
- [5] ნ. ფოფორაძე, ვ. ზუხბაია. ძვირფასი და სანახელავო ქვები, 1998. https://www.dzglebi.ge/statiebi/xelovneba/dzvrfasi_da_sanaxelavo.html
- [6] F. Hoefer. Histoire de la botanique, de la minéralogie et de la géologie: Depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours, 12, 1882, Paris, Hachette.
- [7] F. Farges, C. Dubois. À la recherche du véritable “Ruspoli”. Revue de gemmologie AFG, 2013, 186, 20-30.
- [8] С. Ахметов. Беседы о геммологии, 1989, Москва, Молодая гвардия.

- [9] H. Scheel Jr, Ts. Fukuda. Crystal Growth Technology, 2003, Chichester, John Wiley & Sons, Inc.
- [10] E. R. Dobrovinskaya, L. A. Lytvynov, V. Pishchik. Sapphire: Materials, Manufacturing, Applications, 2009, New York, Springer-Verlag.
- [11] А. Е. Ферсман. Занимательная минералогия, 1959, Москва, Изд. Акад. наук СССР.
- [12] А. Е. Ферсман. Путешествия за камнем, 1960, Москва, Изд. Акад. наук СССР.
- [13] Г. В. Манджиева. Корунд и его драгоценные разновидности (Курсовая работа), 2009, Москва, Московский гос. унив. им. М. В. Ломоносова.
- [14] Н. И. Еремин. Неметаллические полезные ископаемые, 1991, Москва, Московский Гос. унив. им. М. В. Ломоносова.
- [15] В. С. Балицкий, Е. Е. Лисицина. Синтетические аналоги и имитации природных драгоценных камней, 1981, Москва, Недра.
- [16] А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х. С. Багдасаров, В. А. Кузнецов, Л. Н. Демьянец, А. Н. Лобачев. Современная кристаллография. Том 3: Образование кристаллов, 1980, Москва, Наука.
- [17] A. Britel, F. Bennani. Cours de cristallographie géométrique et de cristalochimie, 2018/2019, Dhar El Mahraz, Faculté des sciences.
- [18] Е. К. Лазаренко. Курс минералогии, 1971, Москва, Высшая школа.
- [19] M. Chkhartishvili. Narrative sources on the creation of Georgian alphabet. Pro Georgia – J. Kartvelological Studies, 2021, 31, 101-113.
- [20] მ. ჩხარტიშვილი. „თუალი იგი ბივრიტი“ ანუ კვლავ ქართული ანბანის შექმნის დროის შესახებ. კრ.: იოსებ ალიშვარაშვილი – 60 (რედ. ო. ჯანელიძე), 2022, გორი, გორის სახელ. სასწ. უნივ. გამომცემლობა, 382-419.
- [21] გ. ალიშვარაშვილი. იერუსალიმის ბივრილი და მცხეთის ბივრიტი. კრ.: ქართული ეკლესიის ავტოკეფალიის აღდგენის 100 წლისთავისადმი მიძღვნილი სამეცნიერო კონფერენცია (მოხსენებათა თეზისები), 2017, თბილისი, თსუ, 10-11.
- [22] Г. Н. Иванова. Синтетические аналоги ювелирных камней, 2006, Иркутск, Изд. Иркутского гос. тех. унив.
- [23] J. H. Eggert, D. G. Hicks, P. M. Celliers, D. K. Bradley, R. S. Mc Williams, R. Jeanloz, J. E. Miller, T. R. Boehly, G. W. Collins. Melting temperature of diamond at ultrahigh pressure. Nat. Phys., 2010, 6, 40-43.
- [24] A. Greenville Whittaker. The controversial carbon solid-liquid-vapour triple point. Nature, 1978, 276, 5689, 695-696.
- [25] J. M. Zazula. On Graphite Transformations at High Temperature and Pressure Induced by Absorption of the LHC Beam. 1997, CERN, LHC-Project-Note-78, 1-14.
- [26] F. P. Bundy. Pressure-temperature phase diagram of elemental carbons. Physica A, 1989, 156, 1, 169-178.
- [27] J. Steinbeck, G. Braunstein, M. S. Dresselhaus, T. Venkatesan, D. C. Jacobson. A model for pulsed laser melting of graphite. J. Appl. Phys., 1985, 58, 11, 4374-4382.
- [28] M. Ottavi. La bonne mine des diamants synthétiques. Libération, 29 novembre 2018.
- [29] J.-F. Augereau. L'irrésistible percée industrielle des pierres synthétiques. Le Monde, 9 mars 2001.
- [30] Sh. Joshi, R. Siddiqui, P. Sharma, R. Kumar, G. Verma, A. Saini. Green synthesis of peptide functionalized reduced graphene oxide (rGO) nano bioconjugate with enhanced antibacterial activity. Sci. Rep., 2020, 10, 1, 9441, 1-11.

- [31] R. R. Rudrapati. Graphene: Fabrication methods, properties, and applications in modern industries. In: Graphene Production and Application (Eds. S. Ameen, M. Shaheer Akhtar, H.-Sh. Shin), 2020, IntechOpen, Ch. 2, 9–22.
- [32] R. I. Providence. Jagged graphene edges can slice and dice cell membranes. News from Brown, Université Brown, 10 juillet 2013.
- [33] Y. Xu, Y. Liu, H. Chen, X. Lin, Sh. Lin, B. Yu, J. Luo. Ab initio study of energy-band modulation in graphene-based two-dimensional layered superlattices. J. Mater. Chem., 2012, 22, 45, 23821–23829.
- [34] Zh. Liu, L. Ma, G. Shi, W. Zhou, Y. Gong, S. Lei, X. Yang, J. Zhang, J. Yu, K. P. Hackenberg, A. Babakhani, J.-C. Idrobo, R. Vajtai, J. Lou, P. M. Ajayan. In-plane heterostructures of graphene and hexagonal boron nitride with controlled domain sizes. Nat. Nanotechnol., 2013, 8, 2, 119–124.
- [35] Y. Li, H. Yuan, A. von dem Bussche, M. Creighton. Graphene microsheets enter cells through spontaneous membrane penetration at edge asperities and corner sites. Proc. Natl. Acad. Sci., 2013, 110, 30, 12295–12300.
- [36] L. Chkhartishvili. Prospects for Gerasimov's molecular potential approach to nanotechnology. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 24–24.
- [37] Y. Talukdar, J. T. Rashkow, G. Lalwani, S. Kanakia. The effects of graphene nanostructures on mesenchymal stem cells. Biomaterials, 2014, 35, 18, 4863–4877.
- [38] B. R. Avchyan, A. G. Ghazaryan, K. A. Sargsyan, Kh. V. Sedrakian. High harmonic generation in plane graphene quantum dots with different shapes and edges. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 9–9.
- [39] H. Avetissian, A. Avetissian, A. Ghazaryan, G. Mkrtchian, Kh. Sedrakian, High harmonic generation at particle-hole multiphoton excitation in gapped bilayer graphene. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 10–10.
- [40] T. Berberashvili, L. Chakhvashvili, H. Bakhtiari, G. Goderdzishvili, P. Kervalishvili. Silicon–graphene based solar elements. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 14–14.
- [41] A. Ghazaryan, H. Matevosyan, K. Sedrakian. Harmonic generation at low-energy particle-hole excitation in bilayer graphene. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 35–35.
- [42] L. P. Ichkitidze, A. G. Markov, A. Yu. Gerasimenko, D. V. Telyshev, S. V. Selishchev. Influence of the magnetic field gradient on the optical density of an aqueous dispersion containing biological material and carbon nanotubes. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 49–49.
- [43] F. D. S. Marquis. Carbon nanotubes and graphene hybrid materials systems for multifunctional applications in energy and environment. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 83–83.

- [44] D. Tomanek. Miracles of carbon on the nanoscale. In: Abs. 6th Int. Conf. "Nanotechnology" – GTU nano 2021 (Eds. L. Chkhartishvili, M. Chikhradze), 2021, Tbilisi, Tech. Univ., 108-108.
- [45] V. Palmieri, M. Papi. Can graphene take part in the fight against COVID-19? Nano Today, 2020, 33, 100883, 1-4.
- [46] S. Bailly. L'angle magique du graphène. Pour la science, 2018, 487, 14-15.
- [47] М. С. Бочкова, В. П. Тимганова, П. В. Храмцов, С. В. Ужвийук, К. Ю. Шардина, А. И. Нечаев, М. Б. Раев, С. А. Заморина. Изучение влияния наночастиц оксида графена на люминол-зависимую хемилюминесценцию лейкоцитов человека. Медицинская иммунология, 2020, 22, 5, 977-986.
- [48] G. Lalwani, M. D'Agati, A. Mahmud Khan, B. Sitharaman. Toxicology of graphene-based nanomaterials. Adv. Drug Delivery Rev., 2016, 105, 109-144.
- [49] L. Ou, B. Song, H. Liang, J. Liu. Toxicity of graphene-family nanoparticles: A general review of the origins and mechanisms. Particle and Fibre Toxicology, 2016, 13, 1, 1-24.
- [50] Masques contenant du graphène. Hôpitaux Numéro d'identification: RA-75309, Gouvernement du Canada, 28 octobre 2021.
- [51] ა. ავალიანი. ქიმიის პარადოქსები, 1985, თბილისი, საქართველოს მეცნ. აკად. გამომცემლობა „მეცნიერება“.