

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 548/549.6

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.105.08>

Ірина КВАСНИЦЯ, канд. геол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0003-0738-4599

e-mail: irynakvasnytsia@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АСПЕКТИ МІКРОТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХОНЬ ГРАНЕЙ КРИСТАЛІВ
У МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ МІНЕРАЛОУТВОРЕННЯ НА ПРИКЛАДІ ГРАНАТІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.В. Митрохіним)

Вступ. Мікротопографічні дослідження граней кристала дають великий обсяг інформації щодо походження кристала, про механізми кристалізації, деталі процесу росту, навколишнє середовище, подальше існування і поступову руйнацію мінералу, дозволяють передбачити можливу поведінку кристалів у збагачувальному процесі тощо. Грані реальних кристалів негладкі, шорсткі, мають нерівну поверхню і часто вкриті великою кількістю плоских і вигнутих мікроформ-мікрограней. Мікрорельєф грані віддзеркалює взаємодію кристалічної структури мінералу і середовища утворення мінералів, а симетрія простих мікрорельєфних форм певного походження є результатом взаємодії симетрії кристалічної структури і симетрії середовища мінералоутворення. До елементів мікротопографії (мікрорельєфу) поверхні кристалу традиційно включають фігури росту і розчинення, а також більш складні комплексні скульптури, що складаються з більшої кількості мікрограней.

Методи. При дослідженні морфології і мікротопографії поверхонь кристалів гранатів (спесартин (родовище Наніхіл, Лоліондо, Танзанія), андрадит (Смереків Камінь Вигорлат-Гутинської гряди Закарпаття, Україна)) було використано гоніометрію та растрову електронну мікроскопію (електронний мікроскоп REMMA-202M, електронний мікроскоп JSM-6700 F).

Результати. Досліджені кристали гранатів характеризуються розмаїтістю форм рельєфу поверхні граней, притаманних як процесу росту (сходинки росту, штрихи-виступи, меандри), так і розчинення (ямки розчинення, смуги з ямками розчинення, черепитчастий візерунок розчинення, трихитичні канали).

Висновки. Досліджені кристали спесартину вочевидь у процесі росту змінювали форму, оскільки грані мають грубу скульптуру (штриховака виродження, численні грубі горби росту тощо). На користь даного твердження свідчить також і наявність на окремих гранях спесартину грубої штриховки. Присутність меандрового рельєфу говорить про формування кристалів у твердому середовищі шляхом заміщення. Поверхні ж кристалів андрадиту, що входять до складу скарнової мінералізації прожилкового типу, здебільшого демонструють численні ознаки розчинення, зокрема і зубчасто-сходинковий рельєф, та заміщення гранату по тріщинках вторинними мінералами (кальцитом, рідше хлоритом), що свідчить про тривалий і багатостадійний процес метасоматичних змін.

Ключові слова: мікротопографія, мікрорельєф, скульптури росту і розчинення, гранати, андрадит, спесартин.

Вступ

Мікротопографічні дослідження граней кристала дають великий обсяг генетичної інформації про окремі етапи формування мінералів. Результати міроморфологічного аналізу в поєднанні з іншими методами вивчення мінералів дає змогу створювати більш досконалі моделі процесів мінералоутворення.

Загалом термін "мікротопографія поверхні" застосовується не тільки для означення рельєфу поверхні грані масштабом від нанометрів до сантиметрів, а і для локальної атомної структури на поверхні кристалу (Rakovan, Becker, & Hochella, 1999). Форму кристалів мінералів можна розглядати як власне форму поверхонь, що виокремлюють кристал з довкілля. Вивчаючи поверхні кристалів, можна отримати інформацію про походження кристала, механізми кристалізації, деталі процесу росту, навколишнє середовище, подальше існування і поступову руйнацію мінералу, передбачити можливу поведінку кристалів у збагачувальному процесі тощо.

Грані реальних кристалів негладкі, шорсткі, мають нерівну поверхню й часто вкриті великою кількістю плоских і вигнутих мікроформ-мікрограней. На думку (Фекличев, 1970) – як кожна існуюча на кристалі проста форма та дійсні плоскі мікрограні, що її відображають, віддзеркалюють певні умови їхнього формування, так і кожна дійсна криволінійна мікрогрань певної кривизни та орієнтування центрального радіусу також віддзеркалює певні умови її формування. У процесі росту кристалів мінералотвірне середовище постійно змінюється, кристал же реагує на зміни динамічною поведінкою своєї поверхні, що відбивається у змінах поверхневої скульптури.

Метою даної роботи є представити результати дослідження мікротопографії граней кристалів гранатів –

спесартину (родовище Наніхіл, Танзанія) та андрадиту (Смереків Камінь Вигорлат-Гутинської гряди Закарпаття, Україна) і продемонструвати можливість використання окремих аспектів мікротопографії у моделюванні процесів мінералоутворення даних мінералів.

Методи

Для дослідження морфології і мікротопографії кристалів гранатів було використано гоніометрію та растрову електронну мікроскопію (електронний мікроскоп REMMA-202M, електронний мікроскоп JSM-6700 F).

Результати

Реальна поверхня мінералів у процесі росту часто буває "не кристалографічною", що спричинено, наприклад, розщепленим ростом, округлими поверхнями, меандруваннями шарами росту, різноманітними формами розчинення. Мікрорельєф грані віддзеркалює взаємодію кристалічної структури мінералу і середовища утворення мінералів, а симетрія простих мікрорельєфних форм певного походження є результатом взаємодії симетрії кристалічної структури та симетрії середовища мінералоутворення (Фекличев, 1970). Загалом різноманітний характер розподілу і взаємовідносин гранних мікроскульптур з одними й тими ж простими формами призводить до формування різних типів гранного мікрорельєфу та індивідуальних мікроскульптур, що не схожі до обрисів кристалу в цілому. Часто поява і своєрідне поєднання мікроскульптур на різних гранях пов'язане з тими мінімальними морфологічними властивостями кристалів, що залежать від неоднорідностей середовища кристалізації (неоднорідності у пересиченні, викликані концентраційними потоками; зустріч з перешкодами при рості в гетерогенному середовищі; фазова і текстурна неоднорідність при рості у твердому середовищі тощо).

© Квасниця Ірина, 2024

Динамічна зміна морфологічних, у тому числі мікро-морфологічних, особливостей одного й того ж мінералу залежно від генезису здавна використовується як типоморфна ознака. Проте слід зауважити, що мікрорельєф поверхні мінералу відображає умови останньої стадії утворення кристалів (Фекличев, 1970), то ж при моделюванні всієї історії утворення кристалів необхідно також враховувати особливості анатомії кристалів – оптичну, хімічну і структурну неоднорідності (секторіальність, зональність), розподіл включень, морфологію зон з різним складом і структурою, розподіл в об'ємі кристалу різноманітних дефектів (тріщини, блоки, дислокації тощо).

До елементів мікротопографії (мікрорельєфу) поверхні кристалу традиційно включають фігури росту і розчинення, а також більш складні комплексні скульптури, що складаються з більшої кількості мікрограней (Фекличев, 1970; Sunagawa, 2007). Серед елементів мікротопографії за масштабом розвитку можна виділити кілька порядків. Зокрема, на великих за площею габітусних гранях спостерігається ряд гранних мікроскульптур, що мають схожу форму, симетрію, розмір і розподіл на грані. Сукупність таких мікроскульптур можна розглядати як мікротопографію першого порядку. Водночас фіксуються і більш тонкі елементи, що утворюють мікротопографію другого порядку. Подальша деталізація досліджуваної грані дає змогу виділити додатково ще 2–4 порядки. Тут важливим аспектом дослідження мікротопографії є також встановлення просторових і часових співвідношень

між різними типами мікрорельєфу та визначення генезису кожного типу.

Розмаїтість скульптур на гранях однієї простої форми демонструє різноманітність як механізмів росту кристалів, так і наявність різних видів будівельних частинок кристалів. Скульптурні ускладнення можуть або повторювати контури габітусних граней, відповідати їм частково або сильно вирізнятися від огранювання кристалу. З великого переліку мікроскульптур найчастіше зустрічаються віциналі, елементарні фігури росту і розчинення, трансляційні реберні і вершинні форми.

Для даного дослідження було використано результати вивчення мікротопографії поверхонь граней мінералів групи гранатів, зокрема кристалів спесартину з родовища Наніхіл (Танзанія) та андрадиту (Смереків Камінь Вигорлат-Гутинської гряди Закарпаття, Україна).

Спесартин, представлений крупними, добре оформленими ізометричними кристалами розміром 0,5–5 см, знайдено у шахті, яка розташована у ~14 км на південний схід від Лоліондо (Chadwick et al., 2008; Kvasnytsia et al., 2019). Геологія даного родовища детально не з'ясована. Кристали неоднорідного від світло- до темно-помаранчевого кольору вирізняються сильною тріщинуватістю і наявністю численних включень червонувато-фіолетового мусковіту (рис. 1). Гоніометричними дослідженнями встановлено, що кристали представлені комбінацією тетрагонтриоктаедр {211} і ромбоедр {110}.



Рис. 1. Кристали спесартину з родовища Наніхіл (Танзанія) (Kvasnytsia et al., 2019)

Андрадит, що має вигляд дрібних добре оформлених ізометричних кристалів і ксеноморфних коронованих зерен, знайдено у складі скарнової прожилкової мінералізації у змінених породах на ділянці Смереків камінь (Вигорлат-Гутинська гряда, Українські Карпати) (Квасниця, & Шем'якіна, 2009). Порооди пронизані системою розгалужених метасоматичних прожилків сфен-клінопіроксен-карбонат-калішпатового складу, іноді з хлоритом і магнетитом. Останні перетинаються більш пізніми хлорит-гранат-карбонатними прожилками, найбільш ранніми виділеннями у яких є гранати, що утворюють ідіоморфні кристали в зальбандах прожилок, а також спостерігаються у вигляді

агрегатних скупчень. Досліджений андрадит представлений ідіоморфними кристалами ромбододекаедричного габітусу кольором від темно-медового до бурого розміром 0,2–0,5 мм (рис. 2). За даними гоніометричних досліджень кристалам притаманні такі прості форми, як ромбододекаedr {110} і тетрагонтриоктаedr {211}.

Поверхням габітусних форм досліджених кристалів гранатів притаманні різноманітні скульптурні ускладнення як гіпсометрично вищі, так і гіпсометрично нижчі за поверхню грані. Так, на частині кристалів спесартину видно відмінну мікротопографію поверхні притаманну різним простим формам одного кристалу (рис. 3).

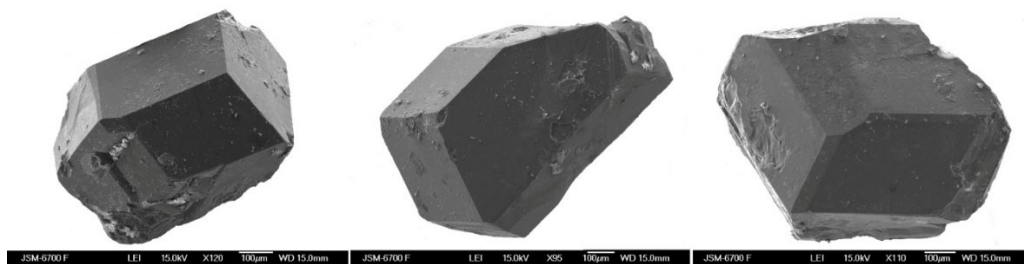


Рис. 2. Кристали андрадиту (ділянка Смереків камінь, Вигорлат-Гутинська гряда, Українські Карпати) (растровий електронний мікроскоп JSM-6700 F)

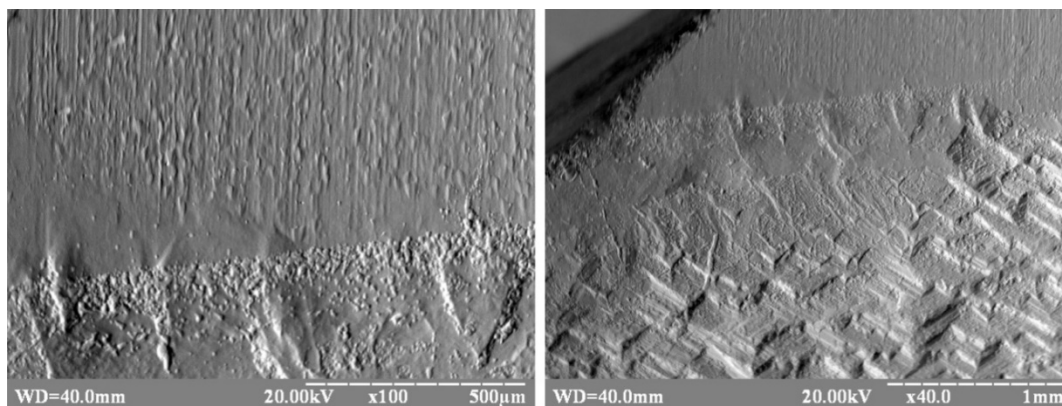


Рис. 3. Мікротопографія різних граней кристалів спесартину (Наніхіл, Танзанія)
(растровий електронний мікроскоп REMMA-202M)

До скульптур росту на поверхні граней можна віднести: сходинки росту, які спостерігаються на окремих гранях андрадиту і спесартину (рис. 4,а), взаємопаралельні вузькі штрихи-виступи, які утворюють штриховку і значно поширюються по поверхні грані в одному напрямку (рис. 4,б), та меандри – асиметричні виступи змінної висоти і ширини, що довільно змінюють напрям свого поширення на гранях спесартину (рис. 4,в).

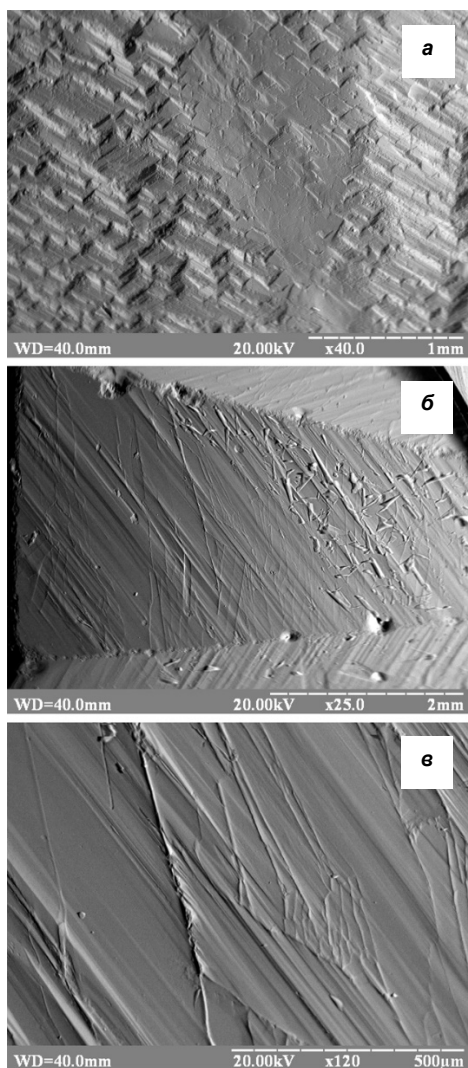


Рис. 4. Акцесорії росту на гранях кристалів спесартину
(растровий електронний мікроскоп REMMA-202M):
а – сходинки росту, б – штрихи-виступи, в – меандри

Гіпсометрично від'ємними утвореннями на гранях є різноманітні форми розчинення. Загальною особливістю поверхонь розчинення є своєрідне зрізання ростової анатомічної картини, формування конусної макроскульптури поверхні, утворення каналів і щілин розчинення вздовж дислокацій та меж блоків тощо. За (Фекличев, 1970), всі поверхневі дефекти (включення, домішкові центри, вакансії, дислокації, тріщини, шви зростання блоків і двійників) є генераторами шарів розчинення. Загалом явища слабого розчинення присутні на поверхні мінералів майже завжди. Так, на гранях {110} кристалів досліджуваного андрадиту спостерігається різний ступінь їх розчинення: від скупчення дрібних ямок розчинення – поля корозії (рис. 5,а), смуг з ямками розчинення (рис. 5,б), зубчато-сходинкового (черепитчатого) візерунку (рис. 5,в) до прояву трихітичних каналів у місцях виходу дислокацій (рис. 5,г) (Квасниця, & Шем'якіна, 2009).

Дрібні пірамідальної форми ямки розчинення фіксуються і безпосередньо на сходинках росту на гранях спесартину (рис. 6,а). Окремим граням притаманні різної форми невеликі каверни і ланцюжки пірамідальних ямок (рис. 6,б).

До гіпсометрично нижчих від рівня грані утворень також належать заглибини – відбитки інших мінералів, наприклад циркону на гранях спесартину (рис. 7).

Дискусія і висновки

Отже, досліджені кристали гранатів характеризуються розмаїтістю форм рельєфу поверхні граней, притаманних як процесу росту, так і розчинення. Так, кристали спесартину вочевидь у процесі росту змінювали форму, оскільки грані мають грубу скульптуру (штриховка виродження, численні грубі горби росту тощо). Відомо, що велика кількість грубих горбів росту або віциналей на гранях одних простих форм і відносно гладка поверхня на гранях інших простих форм кристала свідчить про зміну форми кристалів за зміни зовнішніх умов росту, оскільки груба скульптура властива граням з більшою відносною швидкістю росту (Попов, 2011). На користь даного твердження свідчить також і наявність на окремих гранях спесартину грубої штриховки. Присутність меандрового рельєфу говорить про формування кристалів у твердому середовищі шляхом заміщення.

Поверхні ж кристалів андрадиту, що входять до складу скарнової мінералізації прожилкового типу, здебільшого демонструють численні ознаки розчинення, зокрема й зубчато-сходинковий рельєф, та заміщення гранату по тріщинах вторинними мінералами (кальцитом, рідше хлоритом), що свідчить про тривалий і багатостадійний процес метасоматичних змін.

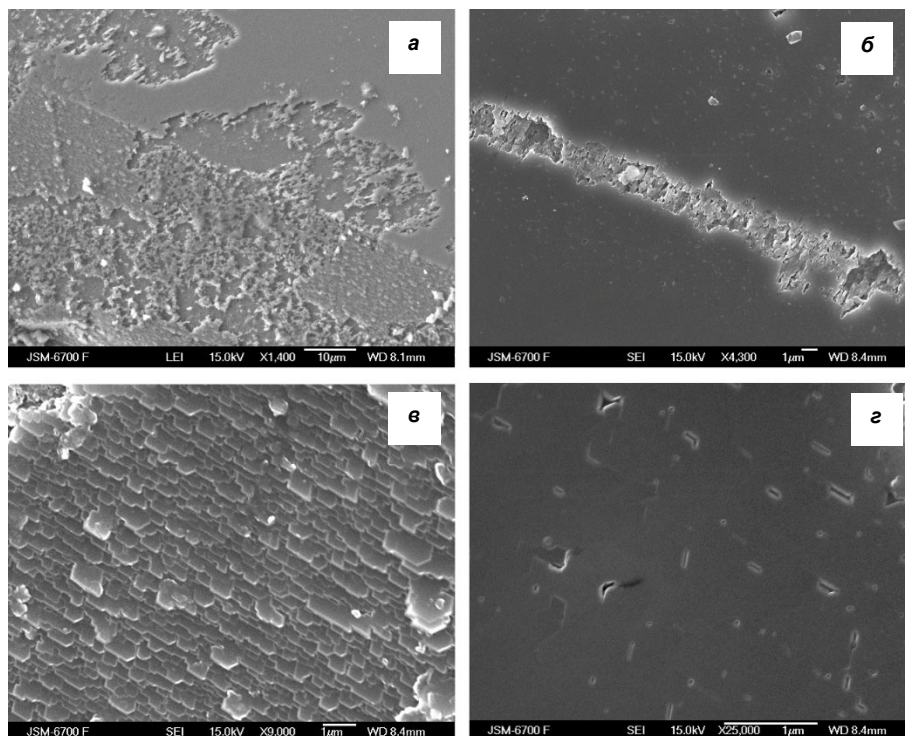


Рис. 5. Мікроморфологія граней {110} кристалів андрадиту, різні скульптури розчинення (електронний мікроскоп JSM-6700 F фірми Jeol):

а – поля корозії; б – смуги з ямками розчинення; в – черепитчатий візерунок; г – трихітичних каналів у місцях виходу дислокацій

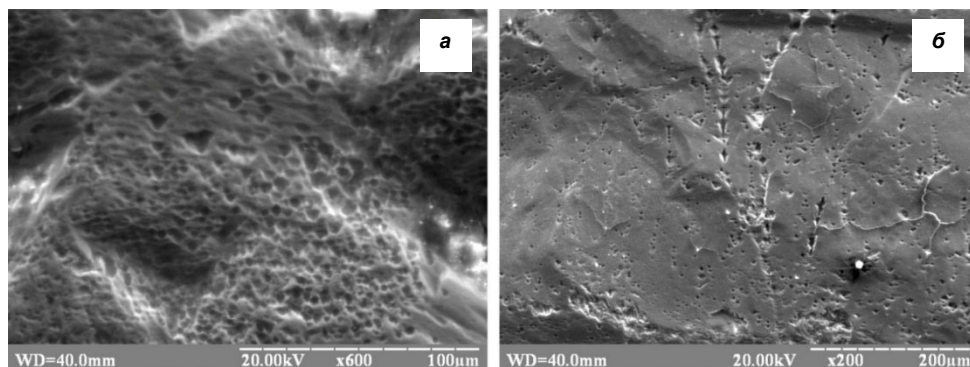


Рис. 6. Скульптури розчинення на гранях кристалів спесартину (растровий електронний мікроскоп REMMA-202M):

а – пірамідальні ямки розчинення на сходинках росту; б – окремі каверни та ланцюжки пірамідальних ямок

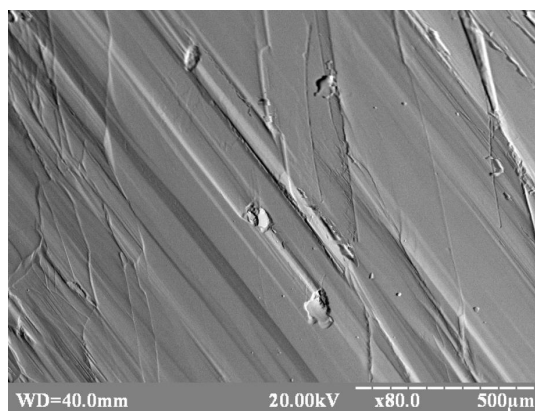


Рис. 7. Відбитки кристалів циркону на гранях кристалів спесартину (растровий електронний мікроскоп REMMA-202M)

Представлені тут результати дослідження демонструють можливість використання особливостей мікротопографії поверхні при моделюванні процесів мінерало-

утворення. У подальших дослідженнях цікавим би було зіставити мікротопографію поверхонь граней кристалів гранатів, утворених у різних мінералогенічних системах.

Список використаних джерел

Квасниця, І., & Шем'якіна, Т. (2009). Андрадит з неогенових метасоматитів Вигорлат-Гутинської гряди (Закарпаття). *Мінералогічний збірник*, 59 (1), 169–173.

Попов, В. (2011). *Практическая генетическая минералогия*. УрО РАН. Фекличев, В. (1970). *Микроморфологические исследования*. Недра. Chadwick, K., Koivula, J., & Laurs, B. et al. (2008). Spessartine from Loliondo, Tanzania. *Gems and Gemology*, 44 (1), 76–78.

Kvasnytsia, I., Andreev, A., Skrylnikova, Yu., & Naumenko, I. (2019). The features of spessartine from Nani Hill (Loliondo, Tanzania). *Proceedings of the XVIIIth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902080>

Rakovan, J., Becker, U., & Hochella, M. (1999). Aspects of goethite surface microtopography, structure, chemistry, and reactivity. *American Mineralogist*, 84(5–6), 884–894. <https://doi.org/10.2138/am-1999-5-624>

Sunagawa, I. (2007). *Crystals: Growth, Morphology, & Perfection*. Cambridge University Press.

References

Chadwick, K., Koivula, J., & Laurs, B. et al. (2008). Spessartine from Loliondo, Tanzania. *Gems and Gemology*, 44 (1), 76–78.

Iryna KVASNYTSIA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0003-0738-4599

e-mail: ikvasnytsia@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Feklichev, V. (1970). *Mikromorfologicheskiye issledovaniya*. Nedra [in Russian]. Kvasnytsia, I., & Shemyakina, T. (2009). Andradite from neogene metasomatite of the Vygorlat-Gutyn hills (the Transcarpathian). *Mineralogical Collection*, 59 (1), 169–173 [in Ukrainian].

Kvasnytsia, I., Andreev, A., Skrylnikova, Yu., & Naumenko, I. (2019). The features of spessartine from Nani Hill (Loliondo, Tanzania). *Proceedings of the XVIIIth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902080>

Popov, V. (2011). *Prakticheskaya geneticheskaya mineralogiya*. UrO RAN [in Russian].

Rakovan, J., Becker, U., & Hochella, M. (1999). Aspects of goethite surface microtopography, structure, chemistry, and reactivity. *American Mineralogist*, 84(5–6), 884–894. <https://doi.org/10.2138/am-1999-5-624>

Sunagawa, I. (2007). *Crystals: Growth, Morphology, & Perfection*. Cambridge University Press.

Отримано редакцією журналу / Received: 08.01.24

Прорецензовано / Revised: 05.04.24

Схвалено до друку / Accepted: 29.05.24

ASPECTS OF MICROTOPOGRAPHY OF MINERAL SURFACES IN MODELING OF MINERAL FORMATION PROCESSES ON THE EXAMPLE OF GARNETS

Background. Microtopographic studies of the crystal faces provide a large amount of information about the origin of the crystal, the mechanisms of crystallization, the details of the growth process, the environment, the further existence and gradual destruction of the mineral, allow predicting the possible behavior of crystals in the enrichment process, etc. The faces of real crystals are non-smooth, rough, have an uneven surface and are often covered with a large number of flat and curved microform-microfaces. The face microrelief reflects the interaction of the crystal structure of the mineral and the mineral formation environment; the symmetry of simple microrelief forms of a certain origin is the result of the interaction of the symmetry of the crystal structure and the symmetry of the mineral formation environment. The elements of the crystal surface microtopography (microrelief) traditionally include growth and dissolution figures, as well as more complex sculptures consisting of more microfaces.

Methods. Goniometry and scanning electron microscopy (REMMA-202M electron microscope, JSM-6700 F electron microscope) were used to study the morphology and microtopography of the garnet crystals surface (spessartine (the Nani hill deposit, Loliondo, Tanzania), andradite (Smerekiv Kamin', Vygorlat-Gutyn hills, Transcarpathian, Ukraine)).

Results. The studied garnet crystals are characterized by a variety of surface relief forms inherent in both the growth process (growth steps, protrusion strokes, meanders) and dissolution (dissolution pits, strips with dissolution pits, tiled dissolution pattern, trichitic channels).

Conclusions. The studied crystals of spessartine obviously changed their shape in the process of growth, since the faces have a rough sculpture (striations, numerous rough growth hillocks, etc.). This statement is also supported by the presence of coarse striation on individual faces of spessartine. The presence of a meander relief indicates the formation of crystals in a solid environment by substitution.

The surfaces of andradite crystals, which are part of the vein-type skarn mineralization, mostly show numerous signs of dissolution, including a dentate-stepped relief, and the replacement of garnet by fissures with secondary minerals (calcite, less often chlorite), which indicates a long and multi-stage process of metasomatic changes.

Keywords: microtopography, microrelief, growth and dissolution sculptures, garnet, andradite, spessartine.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.