

УДК 550.84

**МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ
КАТОДОЛЮМІНЕСЦЕНТНОГО ІМІДЖ-АНАЛІЗУ
В ОНТОГЕНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

Н. Словотенко, Л. Скакун, Р. Серкіз

*Львівський національний університет імені Івана Франка
79005 м. Львів, вул. Грушевського, 4
E-mail: mineral@franko.lviv.ua*

Розкрито переваги застосування катодолюмінесцентного імідж-аналізу на прикладі огляду сучасних праць стосовно мінералів, здатних виявляти люмінесцентні властивості, а також взірців кварцових гідротермальних жил Берегівського рудного поля (Закарпаття). Розглядуваний метод – тонкий і чутливий інструмент одержання генетичних характеристик мінеральної речовини, недоступних для інших аналітичних засобів.

Ключові слова: катодолюмінесценція, онтогенія, гідротермальні жили, кварц.

Мінеральні агрегати дають цінну генетичну інформацію стосовно особливостей процесів мінералоутворення досліджуваних об'єктів. Розшифрування онтогенічних характеристик, виявлених у структурно-текстурних особливостях мінералів та їхніх агрегатів, допомагає виявити умови їхнього утворення. Аналіз анатомії мінеральних індивідів та вікових взаємовідношень між індивідами для виявлення кристалізаційної історії мінеральних агрегатів і мінеральних тіл – це фундаментальний зміст онтогенетичного методу мінералогії [27]. Не випадково будові мінеральних агрегатів та індивідів приділяють значну увагу. Онтогенії мінералів присвячені класичні праці Д. Григор'єва [7, 8], А. Жабіна [8, 11], Ю. Димкова [9], Б. Чеснокова [25], В. Попова [17, 18], Н. Краснової [12]. Добре відомі фундаментальні праці стосовно формування зональності неоднорідних мінеральних індивідів Ю. Воробйова [2, 3], Т. Петрова, Е. Трейвуса, Ю. Пуніна [19, 26], В. Таусона [23], Е. Уотсон [54]. У фокус онтогенічних досліджень потрапляють просторові взаємовідношення між складовими мінералами, морфологія й анатомія індивідів, межі між ними. Конституцію індивідів, мікроструктуру агрегатів вивчають, зокрема, за допомогою електронної мікроскопії та катодолюмінесцентного імідж-аналізу. Одна з найбільших переваг застосування катодолюмінесценції мінералів – можливість виявлення анатомії кристалів, внутрішньої структури агрегатів, ростової зональності, місця деформацій у процесі формування агрегатів мінералів, діагностика подій розчинення, регенерації, які не визначають іншими аналітичними методами.

Наша мета – описати можливості застосування нового методу досліджень у мінералогії, а саме – катодолюмінесцентного імідж-аналізу, в рамках визначення онтогенічних характеристик мінералів.

Катодолюмінесценція – випромінювання світла діелектриками у відповідь на бомбардування їх електронами [22]. Центром люмінесценції називають точковий дефект структури твердого тіла – атом (часто домішковий), іон, молекулу, радикал, вакансію, що захо-

пила електрон або дірку, – який створює локальні електронні рівні у валентній (забороненій) зоні енергій, причому електронний перехід між першим збудженим і основним рівнями лежить в оптичному діапазоні енергій приблизно від 7 до 1 еВ [6]. Це відповідає довжинам хвиль від початку ультрафіолету (близько 180 нм) до початку інфрачервоної ділянки (близько 1200 нм). Концентрація елементів, необхідна для активації люмінесценції, може бути дуже малою, звичайно нижче межі чутливості мікрозондового аналізу або інших аналітичних методів, якими визначають домішкові елементи.

Люмінесценція мінералу пригнічена, якщо в структурі мінералу є так звані елементи-гасники. Центром загасання називають елемент структури, у якому загасальну роль відіграють безвипромінювальні переходи зі збудженого стану в основний, що супроводжуються випроміненням фотонів (електрон-фононний механізм внутрішнього, температурного загасання). Найпоширенішими центрами загасання є йон Fe^{2+} і радіаційні центри забарвлення за вмісту від 10^{-2} (початок помітного загасання) до 1 % (практично повне загасання) [6].

Обладнання, на якому одержують катодолюмінесцентне зображення. Катодолюмінесцентні дослідження виконують на базі сканувального електронного мікроскопа або сканувального просвічувального електронного мікроскопа. В цьому випадку катодолюмінесцентне зображення одержують у відтінках сірого кольору. Якщо катодолюмінесцентний імідж-аналіз провадять за допомогою катодолюмінесцентного мікроскопа, то зображення спостерігають у кольорі. Використовують два типи катодолюмінесцентних мікроскопів: один з них оснащений “холодним катодом”, що генерує електронний промінь, другий – “гарячим катодом”. Перевагою гарячого катода є точно контрольована інтенсивність променя, що дає змогу стимулювати випромінення світіння у дуже слабо люмінесціювальних мінералів (наприклад, у кварцу).

Підготовка взірців до вивчення передбачає виготовлення полірованих пластинок, які попередньо покривають шаром золота або вуглецю для запобігання накопиченню електричного заряду на взірці протягом досліджу.

Катодолюмінесцентний імідж-аналіз і його роль у дослідженнях. Запропонований метод полягає в аналізі катодолюмінесцентного зображення мінеральних індивідів і агрегатів. Катодолюмінесцентні зображення звичайно застосовують для виявлення і дослідження внутрішньої будови: зональності у кварці [38, 41, 43], польових шпатах [38, 40, 53], цирконі [38, 52], апатиті [38, 47, 53], флюориті [37], алмазі [30], карбонатах [36, 42] та інших мінералах. Катодолюмінесценція дає змогу реконструювати специфічні умови росту або виявити процеси, які відбувались під час кристалізації мінералів. У деяких випадках можна за кольором (інтенсивністю) катодолюмінесцентного світіння швидко визначити в кам'яному матеріалі утворення, які важко розрізняти або які навіть можуть бути невідомим мінералом. За кольором, а далі й за спектром люмінесценції оцінюють тонкі генетичні особливості, пов'язані з переважним захопленням мінералом певної домішки рідкісного елемента тієї чи іншої валентності, що можуть виявитись цінною розшуковою ознакою.

Окрім якісного аналізу зображень катодолюмінесценції, цей метод можна застосувати для кількісного дослідження текстурних параметрів. Опрацювання цифрових зображень виконують з використанням різноманітних програмних пакетів, наприклад, NIH-image, ImageJ, ImagePRO. Кількісні текстурні дані (розмір зерен, щільність розташування, тобто кількість кристалів на одиницю об'єму [35]) потрібні для одержання інформативнішого параметра – розподілу розміру кристалів CSD (crystal size distribution). Функ-

ція CSD – це залежність кількості кристалів (щільності розташування) від їхнього розміру [35]. Криві CSD графічно зображують різними способами. Інтерпретацію даних щодо CSD проводять для уточнення й характеристики умов кристалізації.

Геохімічне значення катодолюмінесценції. Детальний огляд публікацій останніх років, у яких наведені дані про походження люмінесценції в мінералах з прикладами спектрів різної природи, зроблено у праці [6]. Дані щодо походження світіння у кварці катодо-, термо-, фотолюмінесцентної природи в діапазоні довжин хвиль від 175 до 705 нм підсумовано в [32]. Катодолюмінесценцію в кварці викликають центри світіння, якими, зокрема, можуть бути точкові дефекти кристалічної ґратки, що виникають під час входження в структуру сторонніх іонів. Атоми кремнію в структурі кварцу ізоморфно заміщуються на Al^{3+} , Ga^{3+} , Fe^{3+} , Ge^{4+} , Ti^{4+} і P^{5+} , необхідність компенсації електричного заряду потребує одночасного входження в структуру кварцу таких іонів, як H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , Cu^+ , Ag^+ . Найчастіше катодолюмінесценцію кварцу зумовлюють центри, що містять атоми Al^{3+} , Fe^{3+} , Ge^{4+} , Ti^{4+} , де компенсаторами заряду є H^+ , Li^+ , Na^+ [32]. У кальциті катодолюмінесценцію викликають CaMn^{1-} , REE, Sm^{3+} , Dy^{3+} , Tb^{3+} , Eu^{3+} [36]. Звичайно катодолюмінесценція кальциту спричинена не лише одним елементом, а комбінацією елементів Mn^{2+} +REE [36]. Для виникнення катодолюмінесценції в кальциті важливе співвідношення $\text{Mn}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$. Інтенсивне катодолюмінесцентне світіння типово для кальциту зі співвідношенням Mn:Fe понад 2:1. Якщо співвідношення менше, ніж 1:3, то катодолюмінесценція стає слабкою [55]. Найпоширеніші центри світіння у флюориті – Sm^{3+} , Gd^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} , Eu^{2+} , Sm^{2+} , Yb^{2+} . Переважна частина люмінесцентних систем (центрів) в алмазі пов'язана з азотом [6].

Прикладом застосування катодолюмінесценції в онтогенічних дослідженнях можна вважати праці [29, 33, 34, 41, 43, 45, 49], де виконано реконструкцію кристалізаційної поведінки кварцу, часто паралельно з іншими сучасними аналітичними методами. Спектральний катодолюмінесцентний аналіз у поєднанні з електронним парамагнітним резонансом [29, 34], мікрозондовим аналізом, вторинно-йонною мас-спектроскопією [34] дає змогу визначити домішкові елементи або дефекти кристалічної ґратки в мінералах. Катодолюмінесцентний метод застосовували під час дослідження рубіну з Монг Хсу, М'янмар (Бірма) [31]. Головні хромофори рубіну – Cr, V, роль Ti неоднозначна: він є хромофором і гасником.

Як головний інструмент реконструкції кристалізаційної поведінки кварцу з гранітних масивів Подлесі (Крушні гори, Чехія) [43], Счелерхау (Німеччина) [45], складчастого поясу Лечлен (Австралія) [44], гідротермальних жил мідно-порфірових родовищ Бьют (Монтана, США) [49], Бінгем (Юта, США) [40] також застосовано катодолюмінесцентний аналіз. Структурні катодолюмінесцентні дослідження в поєднанні з електронно-зондовим аналізом (ЕРМА), виконані для кварцу субвулканічної гранітної системи, дали змогу визначити три головні стадії кристалізації гранітів Подлесі [43]. У праці [45] на підставі аналізу структури фенокристалів кварцу гранітів Счелерхау відтворено історію охолодження оловоносної гранітної магми. Складну еволюцію розвитку кварцових жил мідно-порфірового родовища Бьют розшифровано за допомогою катодолюмінесцентного аналізу на базі сканувального електронного мікроскопа [49]. У праці [44] увагу сконцентровано, головню, на виділенні генерацій, типоморфних особливостях і багатостадійних деформаційних процесах у кварці гранітів складчастого поясу Лечлен. Катодолюмінесценція використана як головний інструмент реконструкції кристалізаційної поведінки польового шпату плутону Карконоше (Польща) [53].

Катодолюмінесценція польових шпатів, що відображає вміст домішкових елементів у їхньому складі, дуже чутлива до таких змін у середовищі кристалізації, як змішування магми. Визначення розподілу домішкових елементів та зміни їхньої концентрації протягом гібридизації дало змогу авторам [53] точно реконструювати модель процесу в просторі й часі.

Катодолюмінесцентний імідж-аналіз допомагає визначити послідовність утворення мінералів у парагенетичних асоціаціях за допомогою виявлення зональності, аналізу сингенності розподілу ядер індивідів, регенерації, рис заміщення й розчинення. Саме для цього метод використано під час дослідження метасоматично змінених попелових туфів [48] вулканічних порід Крід (Колорадо), Сокорро (Нью-Мексико), Гаркувар Маунтейнз (Арізона).

Також катодолюмінесцентний імідж-аналіз використовують для вивчення процесів діагенезу й цементації [32], формування метаморфічних порід [36], під час дослідження нафтоносних порід-колекторів [32].

За допомогою катодолюмінесценції вивчали [39] радіаційні пошкодження кристалічної ґратки кварцу. Пошкодження α -частинками візуалізовані через катодолюмінесцентний імідж-аналіз завдяки появі ореолів навколо індивідів U і Th-вмісних акцесорних мінералів (наприклад, циркону), які є набагато більшими, ніж самі мінеральні вклучення [46]. За радіаційними облямітками можна виявити міграційні шляхи ураноносних флюїдів у кварцових пісковиках і кристалічних породах. Такі дослідження, зокрема, проводили [32] для конгломератів Вітватерсранду (ПАР).

Комбіновані раманівські й катодолюмінесцентні спектроскопічні дослідження агату й халцедону родовищ Окороу (Намібія) й Лос Індіос (Куба) [33] дали змогу виявити зональний розподіл зрощень халцедону, могоаніту і кварцу. Як уважають автори, текстурні переходи від халцедону до кварцу виникають завдяки зміні концентрації від слабо полімеризованого розчину кремнезему до неполімеризованого флюїду.

Як додатковий метод досліджень, катодолюмінесцентний-імідж аналіз використовували [28] для дослідження розплавних вклучень у кварці ріолітових туфів.

Перелік онтогенічних проблем, які дає змогу вирішити катодолюмінесцентний імідж-аналіз:

- розкриття анатомії індивідів, тобто виявлення зональності, секторіальності, блоковості;
- походження флюїдних вклучень у мінеральних індивідах;
- виявлення характеру росту: конкурентний чи послідовний ріст індивідів в агрегатах;
- визначення послідовності росту мінеральних індивідів та взаємної орієнтації індивідів в агрегатах;
- діагностика подій розчинення, регенерації;
- виявлення рис заміщення первинного субстрату новими мінеральними фазами та визначення послідовності заміщення;
- місце деформацій у процесі формування агрегатів;
- кореляція сингенних подій у різних взірцях.

Катодолюмінесцентний імідж-аналіз жильного кварцу Берегівського рудного поля. На прикладі катодолюмінесцентних досліджень взірців жильного кварцу гідротермального походження з Берегівського рудного поля (Закарпаття) розглянемо можливості застосування цього методу під час онтогенічних досліджень. Аналіз проведено на базі електронного сканувального мікроскопа-мікроаналізатора РЭМА-102-02 з використан-

ням катодолюмінесцентного детектора з довжиною хвиль від 400 до 650 нм у лабораторії науково-технічного й навчального центру низькотемпературних досліджень Львівського національного університету імені Івана Франка. Швидкість сканування променя – 20 с з роздільною здатністю 1024×768 точок, 256 відтінків сірого. Напруга електронного променя – 20–40 кВ. Взірці у вигляді полірованих пластинок напиляли вуглецем для запобігання накопиченню електричного заряду протягом дослідження.

У праці [20] наголошено на походженні кварцу епітермальних родовищ Березівського рудного поля з гелю кремнезему. Останні зображення катодолюмінесценції підтверджують та яскраво ілюструють цю тезу. Катодолюмінесцентне зображення кварцу (рис. 1) засвідчує, що у кварцовій масі часто трапляються відособлення без чітких морфологічно сформованих кварцових індивідів, а спостережувані утворення, які нагадують квіти або пір'я, – ніщо інше, як результат кристалізації аморфного кремнезему. Подібні “пір'ясті” утворення кварцу гідротермального походження описані в праці [49]. У кварцових жилах поширені, головню, угруповання прихованокристалічної структури (рис. 2, 3). Характер світіння різко неоднорідний, темні зони агрегату кварцу, що не світяться, межують з зонами яскравого (див. рис. 2) і помірною (див. рис. 3, б) світіння.

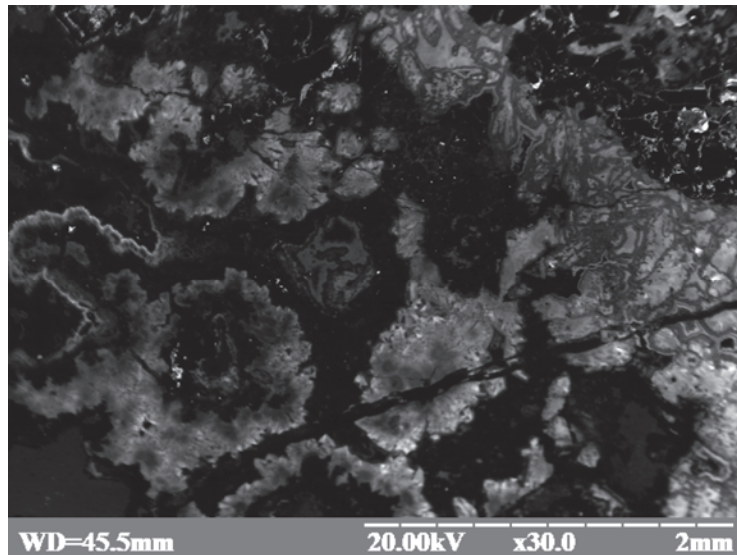


Рис. 1. Катодолюмінесцентне зображення кварцу. Рудне тіло 16.

Свідченням формування у в'язкому середовищі гелю є індивіди бариту, які мають скелетну будову (див. рис. 3). Розщепленим ростом у масі в'язкого гелю формувались індивіди флюориту. Завдяки виявленій ростовій зональності у флюориті (рис. 4, б) помітно, що індивід на початковій стадії ріс розщепленим, що підтверджує формування у в'язкому середовищі, а надалі пошарово, протягом росту він змінював свою морфологію.

Прожилок кварцу, який перетинає флюорит (див. рис. 4), відрізняється за яскравістю катодолюмінесцентного світіння від вмісного кварцу, а це означає, що перед нами дві різні генерації кварцу. Якщо уважно придивитись, то з лівого боку (див. рис. 4, б) помітне звивисте ниткоподібне відгалуження цього прожилку. Такі прожилки виникають під час синерезису гелю, коли гель, старіючи, усихає, а надлишковий розчин вичавлюється в тріщини. Найімовірніше, кварцовий прожилок був утворений з такого розчину, який міг

бути або розведеним колоїдом, або йонним розчином. Індивід крихкого флюориту, який містився в гелі кремнезему, був розірваний під час виникнення локальних напружень протягом синерезису гелю.

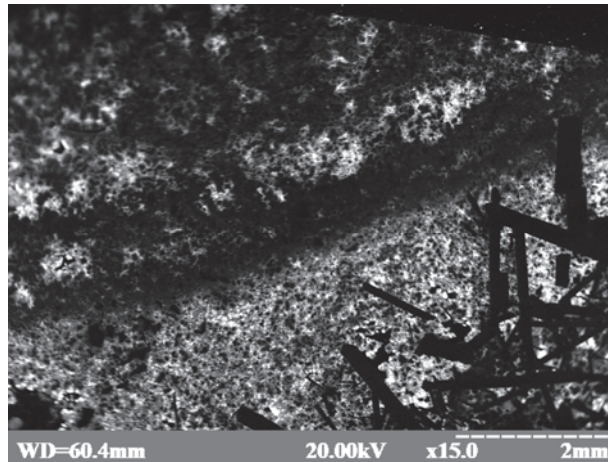


Рис. 2. Катодолумінесцентне зображення кварцу. Рудне тіло 19. Прихованокристалічний кварц містить пластинчасті індивіди кварцу (темне внизу ліворуч)

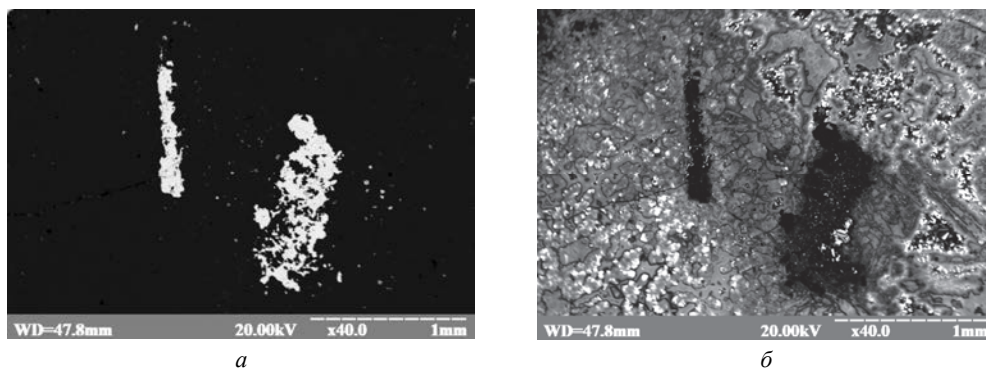


Рис. 3. Скелетні індивіди бариту в прихованокристалічному кварці:
a – BSE-зображення; *б* – катодолумінесцентне зображення. Рудне тіло 19.

Катодолумінесценція допомагає визначити послідовність росту індивідів в агрегатах, оскільки дає змогу розглянути розподіл зародків індивідів та межі між ними. Одновікові зародки мають однаковий характер (ступінь яскравості) катодолумінесценції.

У флюорит-кварцовому агрегаті (рис. 5) завдяки катодолумінесцентному світінню добре простежені напрям росту друз флюориту і кварцу й анатомія індивідів. Це зображення ілюструє дію так званого геометричного відбору, коли, за А. Шубніковим [5], у друзовому агрегаті ростуть головні індивіди, напрям максимальної швидкості росту яких орієнтований перпендикулярно до субстрату. На завершення формування агрегату розмір індивідів зростає, а їхня кількість зменшується, оскільки ріст не вигідно розташованих пригнічується й припиняється. Індивіди набувають паралельного або субпаралельного орієнтування.

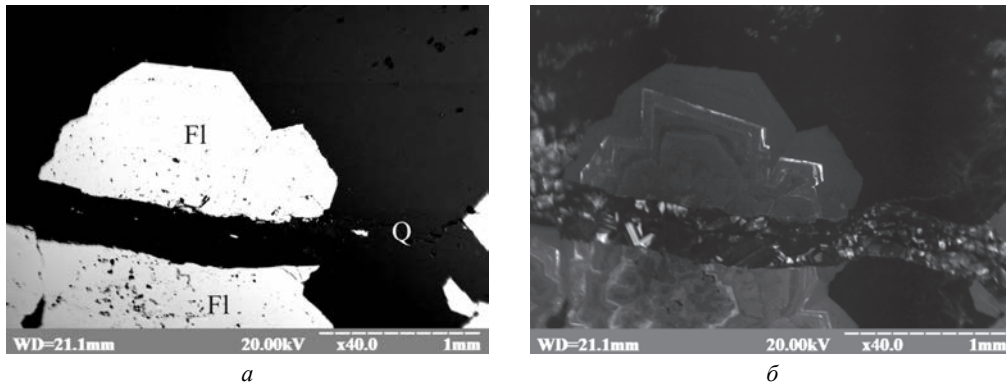


Рис. 4. Регенерація флюорит-кварцового агрегату прожилком кварцу:
a – BSE-зображення, Fl – флюорит, Q – кварц; *б* – катодолюмінесцентне зображення.
 Свердловина 1590/75.

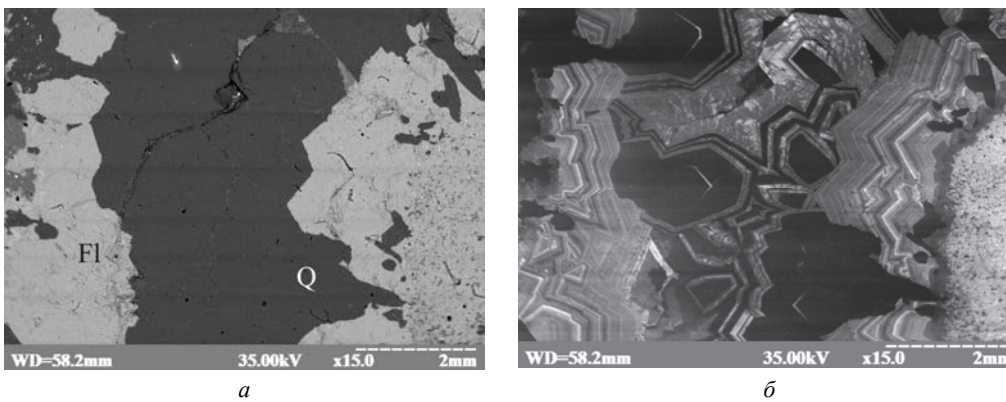


Рис. 5. Флюорит-кварцовий прожилковий агрегат:
a – BSE-зображення, Fl – флюорит, Q – кварц; *б* – катодолюмінесцентне зображення.
 Свердловина 1590/75.

З рис. 5, *б* видно, що початково кварц і флюорит зароджувались і росли одночасно. На певному рівні флюорит припинив ріст, а кварц продовжував заповнювати простір. Взаємоустрічний напрям росту індивідів в агрегатах зафіксований ритмічною зональністю обох мінералів. Між флюоритом і кварцом простежена індукційна межа (див. рис. 5, *б*).

Отже, перші зародження кварцу не мають катодолюмінесцентного світіння. Світіння з'являється на останніх стадіях росту агрегату кварцу. Остання зона світіння найпотужніша і має розщеплену будову. За відсутністю катодолюмінесцентного світіння або за потужністю внутрішніх і зовнішньої зон, які світяться, можна простежити поширення й локалізацію сингенних ділянок в агрегатах.

Те, що саме пізні зони індивідів збагачені домішковими елементами, свідчить про кристалізацію кварцу в закритій системі, звідки речовина не виводилась. Зони катодолюмінесцентного світіння кварцу утворились на завершальній стадії розвитку агрегату, коли мінерал інтенсивно захоплював елементи-домішки. Термодинамічно нерідко вигідно концентрувати домішки по межах кристалів [24].

Розщеплена будова індивідів кварцу є наслідком автодеформаційних явищ [26], що виникають під дією внутрішніх ростових напружень.

Подібні індивіди жильного кварцу з розщепленою будовою периферійної ростової зони описували М. Сандер і Дж. Блек [50], які називали їх “плюмажним” кварцом. На завершальних стадіях росту індивіди кварцу були вимушені захоплювати домішки, які утримувались у середовищі. Збагачені елементами-домішками зони ставали локалізаторами концентраційних напружень, які компенсувались дислокаціями кристалічної ґратки. Внаслідок цього в індивідах кварцу спостерігають розщеплення і блоковість периферійних зон.

Флюїдні вклучення – це реальні зразки флюїдів, які існували на деякому відрізку геологічної історії порід і мінералів. Вони є джерелом об’єктивної інформації про параметри середовища мінералоутворення – температуру, тиск, густину, хімічний склад тощо. Ріст мінерального індивіда супроводжується захопленням новоутвореними шарами частинок маточного середовища або сторонніх домішок – вклучень. Першочергове завдання, яке виникає під час дослідження флюїдних вклучень, – це визначення первинності або вторинності цих вклучень.

Вклучення, моменту ізоляції якого відповідає певна зона росту кристала і яке перебуває в цій зоні, називають первинним. Первинні сингенетичні вклучення належать не обов’язково лише до площинних зон росту, а й до об’ємних елементів внутрішньої морфології. З огляду на це виділяють [10] два види первинних вклучень: зональні й азональні. Азональні первинні вклучення одиничні або мають один щодо одного об’ємний розподіл, можуть розміщуватись радіально по площинах просування ребер кристалів, не пов’язаних з тріщинуватістю.

Характерною рисою вторинних епігенетичних вклучень є відсутність зв’язку їх з процесом росту і регенерації кристала-господаря [10]. Вони утворюються у тріщинах, які виходять на поверхню граней, залікованих у пізніший період або етап мінералоутворення.

На катодолюмінесцентних зображеннях жильного кварцу і флюориту Березівського рудного поля (див. рис. 4–6) нема тріщинок заліковування, які б перетинали внутрішні ростові зони індивідів. Це важлива інформація щодо первинного походження флюїдних вклучень у кварці й флюориті Березівського рудного поля; вторинних вклучень у мінералах нема.

Отже, катодолюмінесцентний імідж-аналіз використовують для дослідження складу, структури мінералів, їхніх генетичних характеристик і типоморфних особливостей. Його застосовують як інструмент для виявлення ростової зональності або відмінностей у будові кристалів різних генерацій, не помітних під оптичним мікроскопом. Катодолюмінесцентний аналіз дає змогу реконструювати перебіг мінералоутворювальних процесів. Дефекти, домішкові елементи, що спричиняють катодолюмінесцентне зображення друзового агрегату кварцу. Свердловина 1575.

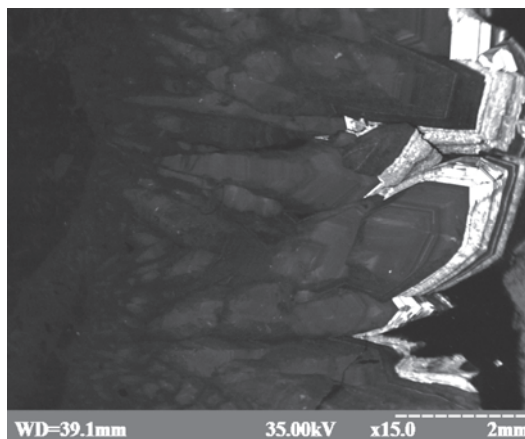


Рис. 6. Катодолюмінесцентне зображення друзового агрегату кварцу. Свердловина 1575.

долюмінесцентне випромінення, відображають специфічні фізико-хімічні умови росту індивідів і, отже, мають генетичне значення. Розкриття внутрішньої структури, ростової зональності й дефектів ґратки кристалів неможливе у разі застосування інших аналітичних методів – найважливіше прикладне значення катодолюмінесценції.

1. *Азимов П.Я.* Формирование ростовой зональности в метаморфических гранатах (роль *PT*-условий и флюидного режима): Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2000.
2. *Воробьев Ю.К.* Неоднородности минералов как индикаторы условий их образования // *Минералогические индикаторы генезиса эндогенных руд.* М.: Наука, 1987. С. 148–178.
3. *Воробьев Ю.К.* Закономерности роста и эволюции кристаллов минералов. М.: Наука, 1990.
4. Выращивание кристаллов из растворов / Т.Г. Петров, Е.Б. Трейвус, Ю.О. Пунин, А.П. Касаткин. Л.: Недра, 1983.
5. *Годовиков А.А.* Введение в минералогию. Новосибирск: Наука, 1973.
6. *Горобец Б.С., Рогожин А.А.* Спектры люминесценции минералов: Справочник. М.: Изд-во ВИМС, 2001.
7. *Григорьев Д.П.* Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961.
8. *Григорьев Д.П., Жабин А.Г.* Онтогенез минералов: Индивиды. М.: Наука, 1975.
9. *Дымков Ю.М.* Минеральные индивиды и минеральные агрегаты // *Генезис минеральных индивидов и агрегатов.* М.: Наука, 1966. С. 72–76.
10. *Ермаков Н.П., Долгов Ю.А.* Термобарогеохимия. М.: Недра, 1979.
11. *Жабин А.Г.* Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979.
12. *Краснова Н.И., Петров Т.Г.* Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1995.
13. *Павлишин В.І.* Основи морфології і анатомії мінералів. К.: Київ. ун-т, 2000.
14. *Павлишин В.І., Матковський О.І., Довгий С.О.* Генезис мінералів: Підручник. К.: Київ. ун-т, 2003.
15. *Павлишин В.І., Юшкин Н.П., Попов В.А.* Онтогенетический метод в минералогии. Киев: Наук. думка, 1988.
16. *Петровская Н.В.* Особенности морфологии минералов как индикаторы условий минерало- и рудогенеза // *Минералогические индикаторы генезиса эндогенных руд.* М.: Наука, 1987. С. 10–75.
17. *Попов В.А.* Практическая кристалломорфология минералов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984.
18. *Попов В.А.* К морфологическому анализу структур минеральных агрегатов // *Проблемы онтогенеза минералов.* Л.: Наука, 1985. С. 46–60.
19. *Пунин Ю.О., Петров Т.Г., Трейвус Е.Б.* Низкотемпературное моделирование процессов минералообразования // *Зап. Всесоюз. минерал. об-ва.* 1980. Т. 109. № 5. С. 517–524.
20. *Словотенко Н., Скакун Л.* Ознаки формування кварцових жил з гелю кремнезему // *Мінерал. зб.* 2005. № 55. Вип. 1. С. 66–78.
21. Современная кристаллография. Т. 3: Образование кристаллов / А.А. Чернов, Е.И. Гиваргизов, Х.С. Багдасаров и др. М.: Наука, 1980.
22. *Таращан А.Н.* Люминесценция минералов. Киев: Наук. думка, 1978.

23. Таусон В.Л. О формировании ростовой секториальной неоднородности в изоморфно-смешанных кристаллах // Геохимия. 2005. № 4. С. 454–458.
24. Хайретдинов И.А. Основы электро-геохимии литогенеза и гидротермального процесса. М.: Наука, 1982.
25. Чесноков Б.В. Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов. М.: Недра, 1974.
26. Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О. Оптические аномалии в кристаллах. СПб.: Наука, 2004.
27. Юшкин Н.П. Генетические методы минералогии и онтогенеза минералов // Проблемы онтогенеза минералов. Л.: Наука, 1985. С. 3–9.
28. Bachmann O., Wallace P.J., Bourquin J. The melt inclusion record from the rhyolitic Kos Plateau Tuff (Aegean Arc) // Contrib. Mineral. Petrol. 2010. Vol. 159. P. 187–202.
29. Finch A.A., Klein J. The causes and petrological significance of cathodoluminescence emission from alkali feldspars // Contrib. Mineral. Petrol. 1999. Vol. 135. P. 234–243.
30. Freitas J.A., Strom U., Collins A.T. Photoluminescence and cathodoluminescence studies of semi-conducting diamond // Diamond and Related Materials. 1993. N 2. P. 87–91.
31. Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G. et al. Trace-element contents and cathodoluminescence of “trapiche” rubies from Mong Hsu, Myanmar (Burma): geological significance // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. P. 179–193.
32. Götze J., Plötze M., Habermann D. Origin, spectral characteristics and practical application of the cathodoluminescence (CL) of quartz – a review // Mineralogy and Petrology. 2001. N 71. P. 225–250.
33. Götze J., Nasdala L., Kleeberg R. et al. Occurrence and distribution of “moganite” in agate/chalcedony: a combined micro-Raman, Rietveld, and cathodoluminescence study // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. Vol. 133. P. 96–105.
34. Götze J., Plötze M., Götze Th. et al. Cathodoluminescence (CL) and electron paramagnetic resonance (EPR) studies of clay minerals // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. P. 195–212.
35. Higgins M.D. Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. New York; Cambridge: Univ. press, 2006.
36. Houzar S., Leichmann J. Application of cathodoluminescence to the study of metamorphic textures in marbles from the eastern part of the Bohemian Massif // Bull. of Geosciences. 2003. Vol. 78. N 3. P. 241–250.
37. Kempe U., Plötze M., Brachmann A. et al. Stabilisation of divalent rare earth elements in natural fluorite // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. P. 213–234.
38. Kempe U., Götze J., Dandar S. et al. Magmatic and metasomatic processes during formation of the Nb-Zr-REE deposits Khaldzan Buregte and Tsakhir (Mongolian Altai): Indications from a combined CL-SEM study // Mineral. Mag. 1999. Vol. 63. N 2. P. 165–177.
39. Komuro K., Horikawa Y., Toyoda S. Development of radiation-damage halos in low-quartz: cathodoluminescence measurement after He⁺ ion implantation // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. P. 261–266.
40. Krbetschek M.R., Götze J., Irmer G. et al. The red luminescence emission of feldspar and its wavelength dependence on K, Na, Ca-composition // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. P. 167–177.

41. *Landtwing M.R., Pettke T.* Relationships between SEM-cathodoluminescence response and trace-element composition of hydrothermal vein quartz // *Amer. Mineral.* 2005. Vol. 90. P. 122–131.
42. *Lapiente M.P., Turi B., Blanc P.* Marbles from Roman Hispania: stable isotope and cathodoluminescence characterization // *Applied Geochemistry.* 2000. Vol. 15. P. 1469–1493.
43. *Müller A., Kronz A., Breiter K.* Trace element and growth patterns in quartz: a fingerprint of evolution of the subvolcanic Podlesí Granite System (Krušné hory Mts., Czech Republic) // *Bull. of the Czech Geol. Survey.* 2002. Vol. 77. N 2. P. 135–145.
44. *Müller A., Lennox P., Trzebski R.* Cathodoluminescence and micro-structural evidence for crystallisation and deformation processes of granites in the Eastern Lachlan Fold Belt (SE Australia) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. Vol. 143. P. 510–524.
45. *Müller A., Seltmann R., Behr H.-J.* Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in a tin granite – case study from the Schellerhau Granite Complex, Eastern Erzgebirge, Germany // *Mineral. Deposita.* 2000. Vol. 35. P. 169–189.
46. *Owen M.R.* Radiation-damage halos in quartz // *Geology.* 1988. Vol. 16. P. 529–532.
47. *Roeder P.L., Mac Arthur D., Ma X-P.* et al. Cathodoluminescence and microprobe study of rare-earth elements in apatite // *Amer. Mineral.* 1987. Vol. 72. P. 801–811.
48. *Rougvie J.R., Sorensen S.S.* Cathodoluminescence record of K-metasomatism in ash-flow tuffs: Grain-scale mechanisms and large-scale geochemical implications // *Geology.* 2002. Vol. 30. N 4. P. 307–310.
49. *Rusk B., Reed M.* Scanning electron microscope-cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana // *Geology.* 2002. Vol. 30. N 8. P. 727–730.
50. *Sander M.V., Black J.E.* Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems – implication for fluid inclusion studies // *Econ. Geol.* 1988. Vol. 83. P. 1052–1060.
51. *Saunders J.A.* Silica and gold textures in bonanza ores of the Sleeper deposit, Humboldt county, Nevada: evidence for colloids and implications for epithermal ore-forming processes // *Econ. Geol.* 1994. Vol. 89. P. 628–638.
52. *Schaltegger U., Fanning C.M., Günther D.* et al. Growth, annealing and recrystallisation of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 134. P. 186–201.
53. *Slaby E., Götze J.* Feldspar crystallization under magma-mixing conditions shown by cathodoluminescence and geochemical modeling – a case study from the Karkonosze pluton (SW Poland) // *Mineral. Mag.* 2004. Vol. 68. N 4. P. 561–577.
54. *Watson E.B.* Surface enrichment and trace-element uptake during crystal growth // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1996. Vol. 60. N 24. P. 5013–5020.
55. *Yardley B.W.D., Lloyd G.E.* An application of cathodoluminescence microscopy to the study of textures and reactions in high-grades marbles from Connemara, Ireland // *Geol. Mag.* 1989. Vol. 126. N 4. P. 333–337.

**CATHODOLUMINESCENCE IMAGE-ANALYSIS AS A TOOL
FOR THE MINERAL DYNAMIC FORMATION RESEARCHES****N. Slovotenko, L. Skakun, R. Serkiz**

*Ivan Franko National University of Lviv
Hrushevskyi St. 4, UA – 79005 Lviv, Ukraine
E-mail: mineral@franko.lviv.ua*

The cathodoluminescent-image analysis use advantages are opened by the example of a modern works review concerning the minerals, capable to show luminescent properties, and also samples of Beregove mine field quartz hydrothermal veins (Transcarpathians). This is the thin and sensitive tool of the mineral genetic characteristics reception which enables to study mineral dynamic formation of the researched samples inaccessible to other analytical methods.

Key words: cathodoluminescence, ontogenesis, hydrothermal veins, quartz.

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО
ИМИДЖ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОНТОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ****Н. Словотенко, Л. Скакун, Р. Серкиз**

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко
790054 г. Львов, ул. Грушевского, 4
E-mail: mineral@franko.lviv.ua*

Раскрыты преимущества использования катодолюминесцентного имидж-анализа на примере обзора современных работ относительно минералов, способных проявлять люминесцентные свойства, а также образцов кварцевых гидротермальных жил Береговского рудного поля (Закарпатье). Рассматриваемый метод – тонкий и чувствительный инструмент получения генетических характеристик минерального вещества, недоступных иным аналитическим методам.

Ключевые слова: катодолюминесценция, онтогенез, гидротермальные жилы, кварц.

Стаття надійшла до редколегії 03.06.2010

Прийнята до друку 21.10.2010