

УДК 548.4(477:292.452)

**ТЕРМОМЕТРІЯ РОЗПЛАВНИХ ВКЛЮЧЕНЬ  
У КВАРЦІ АЛУНІТИЗОВАНИХ ТУФІВ ЯРУ ДЕРЕКОСЕГ  
(БЕРЕГІВСЬКИЙ РУДНИЙ РАЙОН)**

**І. Бакуменко, М. Медвідь, Н. Словотенко**

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

Виконано оптико-мікроскопічне і термометричне вивчення розкристалізованих включень у кварці туфів Берегівського району. Визначено низьку температуру солідуса (~ 640 °С) і температуру гомогенізації герметичних включень (825–860 °С). Це на сотні градусів нижче від значень температури (940–1 355 °С), відомих з публікацій про туфи Берегівського району, і значно нижче від температури в мантії Землі.

*Ключові слова:* розплавні включення, кварц, алунітизовані туфи, Берегівський рудний район.

Дослідження включень в алунітизованих туфах Берегівського горбогір'я (Берегівський рудний район) цікаве в різних аспектах. Воно дало змогу з'ясувати деякі умови кристалізації і зміни пірокластичних утворень (визначити температури солідуса й захоплення розплавних включень фенокрисалами кварцу, оцінити вплив процесів алунітизації на герметичність і поведінку включень різного розміру під час нагрівання й гомогенізації), а також зробити деякі припущення щодо особливостей вулканізму в районі.

Берегівський рудний район розташований у межах Берегівсько-Біганської горстової вулканотектонічної структури з накладеною на неї кальдерною депресією. Ця складна структура виникла в зоні зчленування Закарпатського внутрішнього прогину з Панонською западиною. Утворення змінених ріолітових туфів пов'язано з новітньою, альпійською тектономагматичною активізацією. Пізні низькотемпературні процеси метасоматичної алунітизації туфів звичайно пов'язують з впливом кислих сульфатних розчинів.

Взірці змінених ріолітових туфів, які ми вивчали методами термобарогеохімії, відібрано з туфового горизонту верхньої частини розрізу сарматського ярусу (пачка верхньодоробратівської підсвіти).

Відомо, що кислі вулканіти, як і гранітоїди, за різних геодинамічних умов можуть бути продуктами різних процесів: корового, мантійного та обох процесів. Тому є різні погляди щодо геодинамічних режимів формування неогенових вулканітів Закарпаття. Деякі дослідники традиційно пов'язують їх з острівнодуговими субдукційними режимами, які зумовлюють мантійний діапіризм і супроводжуються вулканічною діяльністю (подібно до сучасних процесів у Тихоокеанському "вогняному поясі"). Інші, беручи до уваги нові формаційно-петрохімічні, геохімічні й тектонічні особливості вулканізму в Закарпатті, ставлять під сумнів безпосередню участь речовини верхньої мантії у формуванні вулканітів на пізньоальпійській стадії вулканізму [9–12]. Дослідники трактують

пізні процеси вулканізму, що відбуваються після завершення ранішого потужного острівнодугового етапу магматизму в Карпато-Панонському регіоні, як початок нової стадії деструкції земної кори (рифтингу) з проявами вулканізму континентального типу, який супроводжується переплавленням гранітно-метаморфічного шару без безпосередньої участі мантийної речовини.

Додаткову інформацію щодо термічних режимів формування молодих вулканітів Закарпаття можуть надати результати наших досліджень включень у берегівських туфах.

Як відомо, для реконструкції геологічних і фізико-хімічних умов магматичного мінералоутворення широко використовують термометричні та інші деструктивні й недеструктивні методи вивчення “нормальних” розплавних включень [3, 6, 8]. Важливу інформацію дають дослідження супутніх, комбінованих і навіть аномальних включень [1, 3]. Серед розплавних включень за різних режимів охолодження утворюються склуваті, частково і повністю розкristалізовані включення [8]. У момент захоплення “нормальних” (за М. Єрмаковим) розплавних включень розплав був “первинно гомогенним” (без інших кристалічних, газових або рідких фаз). У “комбінованих” розплавних включеннях розплав був гетерогенним. У включення додатково з розплавом захоплювались кристали акцесорних мінералів або флюїдні фази (газові чи рідкі). Деяку інформацію про особливості магматичного мінералоутворення можуть надати й аномальні включення, пов’язані з розтріскуванням, розшнуровуванням і перенаповненням.

“Нормальні” включення використовують як геотермометри. Вони дають змогу оцінювати порядок кристалізації магматичних мінералів, темпи охолодження магми, фіксувати прояви кипіння (за допомогою комбінованих і супутніх включень) та інші геологічні особливості формування магматичних порід [8]. Під час вивчення розплавних включень у кварці туфів ми виконали оптико-мікроскопічні й термометричні спостереження методом гомогенізації. Для з’ясування впливу процесів алунітизації на поведінку включень під час нагрівання в мікротермокамері вивчали як великі, так і дрібні включення (до 5–10 мкм). Звертали увагу на особливості морфології наявних включень, фазові співвідношення і характер розташування включень у вкрапленнях кварцу.

Вдалося відшукати первинні розкristалізовані “нормальні” включення (рис. 1). Проте в наших взірцях не виявлено ні сингенних з ними супутніх газово-рідких, ні комбінованих розплавно-флюїдних включень “гетерогенного захоплення” (за В. Калюжним) – з аномально великими газовими фазами. Отже, процеси кипіння кислих розплавів під час кристалізації кварцу дерекосезьких туфів ще не відбувались, магма була флюїдоненасиченою. Всі розплавні включення тонко розкristалізовані або девітрифіковані. Склуваті включення тут не зафіксовані, однак темп охолодження магми під час кристалізації фенокристалів кварцу був досить швидким, типовим для кристалізації в близькоповерхневих магматичних вогнищах. Однофазові склуваті включення є у взірцях зі свердловини в сусідніх ділянках.

Оптико-мікроскопічне вивчення виготовлених полірованих препаратів з включення-ми у кварці засвідчило, що виявлені розплавні включення в зернах кварцу розташовані азонально. Всі вони належать до розряду первинних і мають гарне негативне гексагонально-дипірамідальне огранування. Відповідно, у перерізах, нормальних до осі  $L_6$ , вони мають форму шестикутників, а в перерізах, паралельних до цієї осі, – форму ромба. Наявні як великі, так і дуже дрібні включення. Поряд з ізольованими включеннями часто трапляються великі затіки основної маси в фенокристали кварцу (не встигли відокремитися в ізольовані включення).

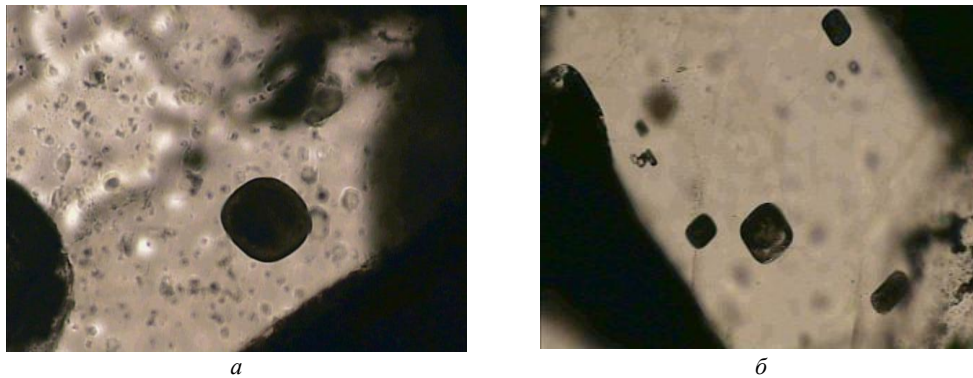


Рис. 1. Розкристалізовані розплавні включення в фенокристалах кварцу з алунізованого туфу ріолітових порфірів:

*a* – в агрегаті непрогрітого включення, яке має заокруглений ромбічний переріз, газові пухирці не просвічують; *б* – азональне розташування розплавних включень різного розміру (ромбоподібні перерізи мають однакову орієнтацію, згідну з кристалографічною орієнтацією вмісного кварцу).

Явищ розтріскування й утворення дочірніх включень навколо розплавних включень не спостерігали. Не виявлено також зонального розташування включень, яке характерне для неспокійних умов кристалізації в разі внесення нових порцій розігрітого розплаву в магматичне вогнище, а також уявно-вторинних розплавних включень. Хоча явних ознак розтріскування й розгерметизації включень не зафіксовано, термометричні дослідження засвідчили, що всі великі включення не були герметичними. Лише з невеликими включеннями вдалося провести надійні досліді щодо гомогенізації. А всі великі включення мають завищену температуру початкового підплавлення і дають значно завищені, фальшиві значення  $T_{\text{гом}}$  або взагалі не гомогенізуються.

Поряд з розплавними включеннями в кварці наявні численні кристалічні включення первинного і вторинного походження (протогенетичні й епігенетичні). Протогенетичні включення представлені голчастими мікрокристаликами апатиту. Їх спостерігали також як додаткові фази у комбінованих розплавно-кристалічних включеннях. Звичайно такі голки виступають за межі розкристалізованого агрегату комбінованих включень.

Для визначення температури ізоляції розплавних включень у кварці й, відповідно, температури його кристалізації в магматичному вогнищі використано традиційний метод гомогенізації вмісту включень. Для спостережень за фазовими перетвореннями у включенні під час нагрівання препаратів ми використали конструкцію високотемпературної мікротермокамери, запропоновану М. Михайловим і В. Шацьким 1974 р. У ній замість спіралей або стрічок з платини чи тугоплавких сплавів використано силітовий нагрівач.

Для врахування термоградієнтних похибок, пов'язаних з розташуванням спаю термомпари в мікротермокамері та позицією і товщиною мікропрепаратів з включеннями, проведено ретельне еталонування температури (з використанням стандартних сольових еталонів і золота). Для зменшення градієнтів температури в робочій ділянці термокамери використано корундові вікна, на які встановлювали препарати (корунд має високу теплопровідність). Для оцінки температури фазових перетворень у розплавних включеннях користувались побудованими графіками залежності показників термомпари від температури у включеннях. Для спостережень під мікроскопом за поведінкою включень під час нагрівання використовували об'єктив з водяним охолодженням.

Під час рівноважного нагрівання “нормальних” розплавних включень усі процеси, які відбувались у ході охолодження фенокристалів, ідуть у зворотному порядку (аж до відновлення за певної температури гомогенного розплавного стану законсервованої у включенні речовини). Це дає змогу оцінювати температуру захоплення включень під час кристалізації фенокристалів. Під час спостереження розплавних включень у ході їхнього нагрівання ми фіксували температуру таких явищ:

1) початок плавлення у включеннях (поява перших котектичних порцій міжзернового розплаву). Це так звана температура солідуса конкретної флюїдно-магматичної системи. Солідусну температуру фіксують за ліпшим проходженням світла і просвітленням кристалічного агрегату включення внаслідок виплавлення розплаву;

2) загальне переплавлення всіх кристалічних фаз. У цьому разі поряд з розплавом у включенні залишається один або декілька газових пухирців, об'єм яких поступово зменшується під час нагрівання. Звичайно дрібніші газові пухирці зникають раніше, ніж більші;

3) загальна гомогенізація – залишається тільки розплав, а газова фаза, зменшуючись, зникає (завдяки термічному розширенню розплаву під час нагрівання).

Унаслідок підвищеної в'язкості кислих силікатних розплавів для визначення більш-менш рівноважних независених температур усіх фазових перетворень включення в кварці підігрівали дуже повільно впродовж декількох годин. Після гомогенізації вмісту включень під час їхнього охолодження в розплаві знову з'являються газові пухирці (внаслідок термічної усадки). Вони відособлюються (рис. 2) в разі певного переохолодження розплаву у включеннях (порівняно з температурою гомогенізації). Ця різниця в значеннях температури тим більша, чим більша в'язкість розплаву. Такий ефект дає змогу використовувати включення як геовіскозиметри і підтверджує, що кислі магми в проміжних вогнищах є більш в'язкими порівняно з базальтовими й ультраосновними.

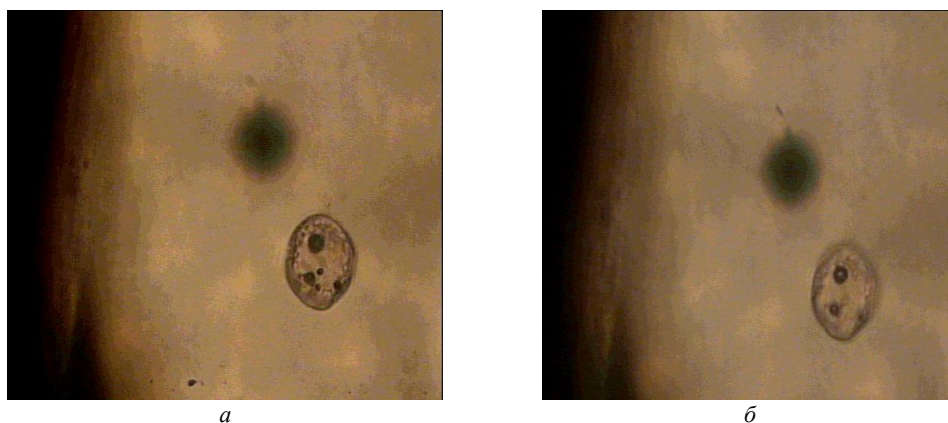


Рис. 2. Вигляд охолоджених включень після нагрівання, переплавлення кристалічних фаз і гомогенізації:

*а* – у включенні є декілька газових фаз у розплаві; *б* – за вищої температури дрібні газові фази зникають, а великі газові пухирці залишаються. Подальше нагрівання призводить до гомогенізації включення (до зникнення газового пухирця).

Явища початку низькотемпературного ліквідусного плавлення, подальшого повного переплавлення кристалічних фаз і повної гомогенізації вмісту включень ми спостерігали лише в найдрібніших включеннях, які не були розгерметизовані й зберегли флюїди,

розчинені в магмі. Включення великого розміру виявились розгерметизованими і за рівноважної температури не підплавлялися й не гомогенізувалися (залишалися темними). За дуже високої температури ці включення частково підплавлялися й поводити себе, як сухі системи. Лише деякі з них гомогенізувалися, однак уже за температури понад 1 000 °С.

Отже, постмагматичні процеси алунізації туфів “пошкодили” всі великі розплавні включення. Водночас включення зберегли гарне негативне огранування, і зовні помітних ознак розгерметизації (у вигляді навколишніх тріщинок з ореолами вторинних флюїдних включень) не видно.

Помітне ліквідусне підплавлення в дрібних герметичних включеннях у кварці берегівських туфів ми спостерігали за температури близько 640 °С і вище. Далі під час нагрівання включення світлішають, і в кристалічному агрегаті поступово чітко виявляються газові фази. Зазвичай, фіксують декілька газових пухирців, що свідчить про підвищену швидкість охолодження після ізоляції включень у кварці за гіпабісальних умов. Поступово об’єм газових фаз зменшується, і найдрібніші газові пухирці зникають. Повне переплавлення кристалічних фаз простежували за температури, дещо нижчої від температури гомогенізації включень.

Серед виготовлених плоскопаралельних полірованих препаратів лише в двох були включення, придатні для гомогенізації. У пластинці 1 (А 10) дрібні включення гомогенізувалися за 825–860, у пластинці 2 (А 11) – за 860 °С. Початкове солідусне підплавлення в цих включеннях відбувалось за 640 °С. Однак часто підплавлення вдається помітити лише в разі підвищеної температури. А в ході повільного охолодження гомогенізованих включень газова фаза з’являється в них тільки в разі суттєвого переохолодження (до 680–670 °С). Це свідчить про високу в’язкість захопленого у включення кислого силікатного розплаву.

Близький інтервал температури гомогенізації ми зафіксували раніше під час вивчення включень у кварці аналогічних об’єктів Берегівського горбогір’я (див. таблицю). Частина наведених значень “солідусної” температури явно завищена, оскільки початок підплавлення нам не вдалося помітити вчасно. Отримані попередні дані поки не дають змоги пояснити наведену в таблиці зміну  $T_{\text{гом}}$  включень з глибиною локалізації вулканітів.

Значення температури гомогенізації ( $T_{\text{гом}}$ ) і “солідусної” температури ( $T_{\text{сол}}$ ) розкристалізованих включень у кварці кислих вулканітів

Свердловина І 347			Свердловина І 348		
Глибина відбору, м	$T_{\text{гом}}$ , °С	$T_{\text{сол}}$ , °С	Глибина відбору, м	$T_{\text{гом}}$ , °С	$T_{\text{сол}}$ , °С
190	825–830	560–650	438,8	890–860	820
395	820–830	760	490,5	830	760
460	930	800	508,8	785	750

Цікаво, що в кварці зі свердловин І 347 (глибина 190 м) поряд з тонко розкристалізованими включеннями спостерігають однофазові склуваті включення з такою ж температурою гомогенізації (825–830 °С). Утворення однофазових включень свідчить про дуже високий темп охолодження пірокластичного матеріалу. Під час нагрівання склуватих включень спочатку простежується розкристалізація скла за 540–600 °С. Потім новоутворений кристалічний агрегат переплавляється, і в розплаві з’являються газові пухирці. А далі відбувається гомогенізація цих включень одночасно з сингенними розкристалізо-

ваними включеннями. Заслугує на увагу також факт, що під час охолодження деяких гомогенізованих включень після переходу температури інверсії кварцу простежують миттєве добре помітне зменшення об'єму газової фази, що свідчить про суттєву пластичність скла за цієї низької температури.

Водночас є давня інформація про значно вищу температуру кристалізації кварцу з ріолітових туфів Берегівського горбогір'я [4, 5, 7]. За даними Б. Жовтулі, розплавні включення в кварці тут гомогенізувались за температури від 1 355–1 345 до 1 060–960 °С. Проте з огляду на наші контрольні термометричні дані щодо берегівських туфів можна очікувати, що ці “високотемпературні” включення втратили герметичність і тому без флюїдної складової під час нагрівання дали суттєво завищену температуру гомогенізації. Ця завищена (“мантійна”!) температура не узгоджується також з деякими петрохімічними й геохімічними “коровими” характеристиками пізніх ефузивних і експлозивних вулканітів [9–12], які геохімічно подібні до “корових” еталонів. Температура гомогенізації в кварці берегівських туфів значно нижча, ніж у ранніх фенокристалах кварцу і плагіоклазу острівнодугових вулканітів мантійного походження із зон субдукції Камчатки, Курильських островів та Японії [2, 8 та ін.].

Отже, наші дані свідчать про те, що перед експлозіями, які зумовили формування ріолітових туфів Берегівської структури, кислий розплав у гіпабісальному проміжному вугнищі мав порівняно невисоку температуру.

1. Бакуменко И. Т. Сопутствующие, комбинированные и аномальные включения, критерии их распознавания и возможности использования / И. Т. Бакуменко // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. – М., 1982. – С. 126–140.
2. Гончарук А. Ф. К проблеме происхождения вулканогенных формаций гипабиссальных интрузивов и связи с ними оруденения в Закарпатском прогибе / А. Ф. Гончарук // Материалы КБГА, секция VI. – Братислава, 1975. – С. 71–78.
3. Ермаков Н. П. Термобарогеохимия / Н. П. Ермаков, Ю. А. Долгов. – М. : Недра, 1979. – 271 с.
4. Жовтуля Б. Д. Исследование включений в кварце липаритовых туфов Береговского холмогорья / Б. Д. Жовтуля // Минерал. сб. – 1976. – № 30, вып. 1. – С. 60–64.
5. Жовтуля Б. Д. Физико-химические условия образования вулканических пород и связанных с ними углеродсодержащих соединений Закарпатской области УССР (на основании изучения включений в минералах) : автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук / Б. Д. Жовтуля. – Львов, 1976. – 20 с.
6. Калюжный В. А. Основы учения о минералообразующих флюидах / В. А. Калюжный. – Киев : Наук. думка, 1982. – 238 с.
7. Калюжный Вл. А. К условиям кристаллизации кварца кислых вулканитов Закарпатья / Вл. А. Калюжный, Б. Д. Жовтуля // Минерал. сб. – 1977. – № 3, вып. 1. – С. 68–70.
8. Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов / Т. Ю. Базарова, И. Т. Бакуменко, В. П. Костюк [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1975. – 258 с.

9. Молявко В. Г. Петрология позднекайнозойского магматизма альпийского пояса Юго-Восточной Европы : автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук / В. Г. Молявко. – Киев, 1990. – 37 с.
10. Ступка О. С. Геодинамічна природа неогенового вулканізму Карпато-Панонського регіону / О. С. Ступка // Геологія і геохімія горючих копалин. – 1998. – № 3 (104). – С. 44–52.
11. Тектоно-магматическая эволюция Карпат / [З. М. Ляшкевич, А. П. Медведев, Ю. З. Крупский и др.]. – Киев : Наук. думка, 1995. – 132 с.
12. Lyashkevitch Z. M. Magmatism and structure of the lithosphere beneath the Ukrainian Carpathians / Z. M. Lyashkevitch, A. P. Medvedev, A. S. Varitchev // Геологія і геохімія горючих копалин. – 1998. – № 3 (104). – С. 54–68.

**THERMOMETRY OF MELT INCLUSIONS IN QUARTZ  
FROM ALUNITE TUFFS OF DEREKOSEG RAVINE (BEREHOVE ORE REGION)**

**I. Bakumenko, M. Medvid', N. Slovotenko**

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

Optical microscopic and thermometric studies of crystallized inclusions in quartz of the tuffs from Berehove ore region have been carried. Lower temperature of the solidus (~ 640 °C) and homogenization temperature of the hermetic inclusions (825–860 °C) have been distinguished. These results are lower by hundreds grades than temperature (960–1 355 °C), known from publications concerning the tuffs of Berehove area, and substantially below, than temperature in the Earth's mantle.

*Key words:* crystallized inclusions, quartz, alunite tuffs, Berehove ore region.

**ТЕРМОМЕТРИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ  
В КВАРЦЕ АЛУНИТИЗИРОВАННЫХ ТУФОВ ОБРАГА ДЕРЕКОСЕГ  
(БЕРЕГОВСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН)**

**І. Бакуменко, М. Медвідь, Н. Словотенко**

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко  
79005 г. Львов, ул. Грушевского, 4  
E-mail: mineral@franko.lviv.ua*

Проведено оптико-микроскопическое и термометрическое изучение раскристаллизованных включений в кварце туфов Береговского района. Установлено низкую температуру солидуса (около 640 °C) и температуру гомогенизации герметичных включений (825–860 °C). Это на сотни градусов ниже значений (960–1 355 °C), известных по публикациям о туфах Береговского района, и существенно ниже температуры в мантии Земли.

*Ключевые слова:* расплавные включения, кварц, алунитизированные туфы, Береговский рудный район.

Стаття надійшла до редколегії 13.10.2011

Прийнята до друку 09.11.2011