

# Значај петрографске анализе флуидних инклузија

Стефан Петровић, Милош Велојић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Значај петрографске анализе флуидних инклузија | Стефан Петровић, Милош Велојић | Записници српског геолошког друштва | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006800>

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2021 ГОДИНУ

*COMPTE RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2021*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2021*

Beograd, 2022

**Стефан Петровић<sup>1</sup>, Милош Велојић<sup>1</sup>**  
**Stefan Petrović<sup>1</sup>, Miloš Velojić<sup>1</sup>**

## ЗНАЧАЈ ПЕТРОГРАФСКЕ АНАЛИЗЕ ФЛУИДНИХ ИНКЛУЗИЈА

## SIGNIFICANCE OF PETROGRAPHIC ANALYSIS OF FLUID INCLUSIONS

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД – TRAVAIL SCIENTIFIQUE – RESEARCH PAPER

**Апстракт.** – У раду је истакнут значај петрографске анализе током истраживања флуидних инклузија и приказане могућности ове методе на примерима неких од карактеристичних петрографских појава из различитих минерала.

Петрографска анализа је први корак у испитивању флуидних инклузија. Правилно спроведена, петрографска анализа омогућава одређивање генетске везе флуидних инклузија и минерала домаћина, препознавање карактеристика флуидних инклузија и релевантну интерпретацију података из наредних корака истраживања. Петрографском анализом се дефинишу: а) дистрибуција флуидних инклузија у минералу; б) облик, величина и фазни састав флуидних инклузија; в) групације флуидних инклузија; г) дефекти флуидних инклузија и накнадне промене на њима.

Главни циљ петрографске анализе је издвајање групација флуидних инклузија, које имају исте петрографске карактеристике на основу којих можемо сматрати да су флуидне инклузије унутар групације синхроно створене. Групације флуидних инклузија настају у различитим фазама еволуције флуида и/или репрезентују различите флуиде заробљене у виду флуидних инклузија током или након настанка минерала домаћина.

Правилно спроведена петрографска анализа је од значаја за објективан избор појединачних флуидних инклузија за микротермометријска, спектрометријска и друга мерења. Значај петрографске анализе је и у одговарајућој интерпретацији свих података каснијег истраживачког поступка. У недостатку релевантне петрографске анализе, чак и огроман број података различитих анализа не доприноси много у разумевању процеса у којима су флуидне инклузије настале.

Најчешћи проблеми током петрографске анализе могу се јавити приликом непрепознавања псеудоинклузија, групација насталим хетерогеним стварањем и

---

<sup>1</sup> Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија;  
[stefan.petrovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:stefan.petrovic@rgf.bg.ac.rs), [milos.velojic@rgf.bg.ac.rs](mailto:milos.velojic@rgf.bg.ac.rs)  
University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia

инклузијама које су претрпеле промене након формирања. Један од честих проблема је и дефинисање рудоносних флуида без адекватних аргумената.

**Кључне речи:** петрографија, флуидне инклузије, флуиди, групације

**Abstract.** – This paper presents the importance of petrography in the analysis of fluid inclusions and demonstrates the possibilities of using this method on the examples of characteristic petrographic features in different minerals.

The petrographic analysis is the first step of every fluid inclusion study. A good petrographic analysis is significant for determining the genetic relationship between the fluid inclusions and the host mineral, recognizing the characteristics of fluid inclusions and enabling the relevant interpretation of other analytical analysis of fluid inclusions. It generally includes the defining of the following parameters: a) distribution of fluid inclusions in the host mineral; b) shape, size and phase composition of inclusions; c) fluid inclusion assemblages (FIA), and d) defects and post-entrapment modifications of fluid inclusions.

The most important aim of the petrographic analysis is the distinguishing of fluid inclusion assemblages (FIA), which contain similar petrographic characteristics and are assumed to be formed synchronously. Fluid inclusion assemblages represent products of different stages of fluid evolution and/or of different fluids trapped during or after the formation of crystals.

The proper petrographic analysis is significant for the adequate selection of individual fluid inclusions for microthermometry, spectrography and other types of analysis. The significance of petrographic analysis is also crucial for the proper interpretation of data in the following steps of analysis. In the absence of adequate petrographic analysis, even a huge number of subsequent measurements doesn't contribute to the understanding of the process in which the fluid inclusions were formed.

The largest problems in fluid inclusion petrography may occur if the following types of inclusions are not recognized: pseudoinclusions, inclusions formed by heterogeneous entrapment and inclusions that underwent post-entrapment modifications. Another common problem that may lead to wrong interpretation is the defining of ore-forming fluids without adequate petrographic evidence.

**Key words:** petrography, fluid inclusions, fluids, fluid inclusion assemblage

## УВОД

Флуидне инклузије представљају остатке флуида заробљених у минералима током раста и/или каснијих физичко-хемијских промена минерала. Испитивања инклузија могу омогућити увид у природу (састав, температура, густина, притисак и др.) и еволуцију (временска и просторна) флуида. Ова испитивања се примењују у изучавању различитих геолошких процеса, као што су магматизам, метаморфизам и тектоника. Посебно су бројна испитивања флуидних инклузија из хидротермалних система који су од значаја за генезу различитих лежишта минералних сировина (*Roedder, 1984; Wilkinson, 2001*).

Процес испитивања флуидних инклузија може бити различит и обухватати примену лабораторијских метода као што су: различите врсте микроскопије, микротермометрија, спектроскопија, масена спектрометрија, хроматографија, анализе изотопа и др. Ипак, микроскопија је увек први, а често и кључни корак ка успешним испитивањима флуидних инклузија (*Kerkhof & Hein, 2001*). Петрографска анализа флуидних инклузија се врши кроз дефинисање: а) дистрибуције флуидних инклузија у минералу; б) облика, величине и фазног састава флуидних инклузија; в)

групација флуидних инклузија; г) дефеката и накнадних промена флуидних инклузија. Главни циљ ове анализе је издвајање и повезивање групација флуидних инклузија са генетским процесима у минералу домаћину. Врши се након петролошких или рудномикроскопских испитивања са посебним освртом на парагенетску позицију минерала у којем се врши испитивање флуидних инклузија.

Петрографска анализа флуидних инклузија се врши микроскопом за пропуштену, ултравиолетну или инфра-ред светлост у зависности од врсте минерала домаћина. Последњих година, у ову сврху користе се и катодолуминисценција, ласерска конфокална скенирајућа микроскопија и друге сличне методе. Припрема препарата оптималних за петрографску анализу флуидних инклузија се може вршити на различите начине. Препарати морају бити са обе стране исполирани, оптималне дебљине (до 200 микрона) и провидности. Поступак припреме препарата за испитивање флуидних инклузија је детаљно приказан у публикацији *Goldstein et al. (2003)*.

Различити аутори су се бавили петрографијом флуидних инклузија и значајем овог, првог корака у испитивањима флуидних инклузија (*Roedder, 1984; Kerkhof & Hein, 2001; Goldstein et al., 2003*). Ипак, данас се често занемарују или недовољно користе могућности ове методе током истраживања флуидних инклузија.

У раду су поступно објашњени кораци реализације и приказане неке од карактеристичних петрографских појава до сада испитиваних минерала. Приказани су неки од резултата петрографске анализе флуидних инклузија у кварцу и анхидриту, али и у другим минералима, као што су калцит, сфалерит, гипс и берил. Указано је на значај ове методе на целокупни поступак истраживања флуидних инклузија али и евентуалне проблеме односно недостатке петрографске анализе.

## **РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА**

### **Дистрибуција флуидних инклузија у минералу**

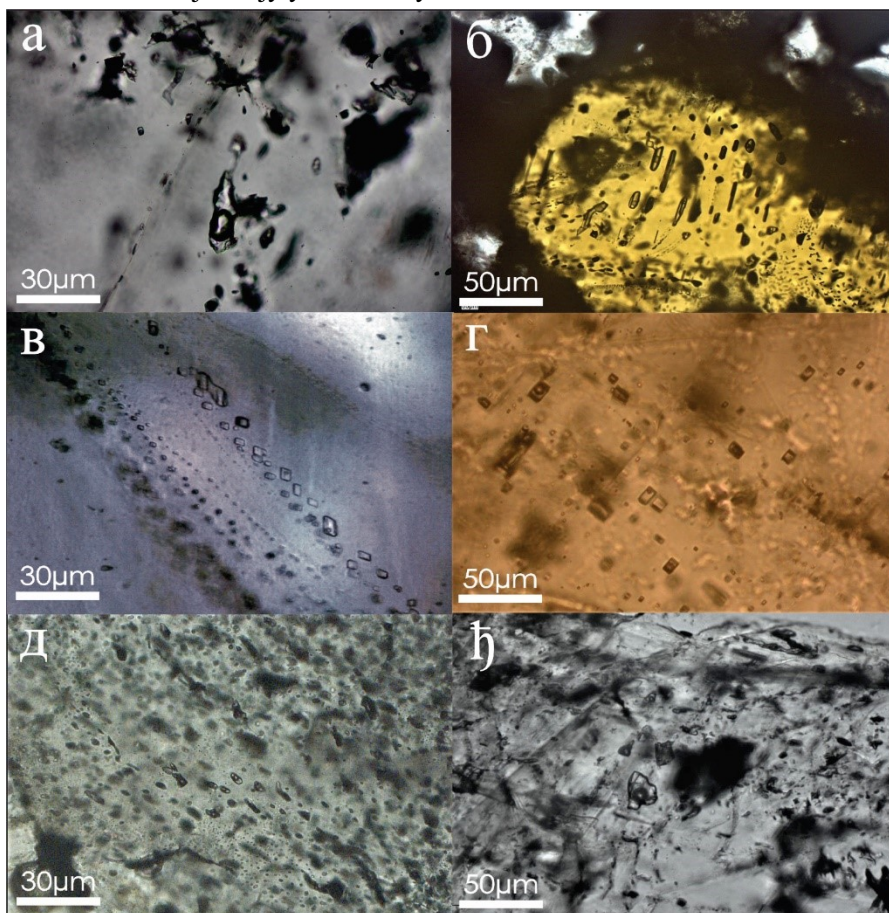
Повезаност начина дистрибуције флуидних инклузија и петрографских карактеристика минерала у којима се налазе, може указати на присуство флуидних инклузија насталих кроз различите генетске процесе. Присуство зона раста, сростања, рекристализације, цепљивости и пукотина у минералу може утицати на дистрибуцију флуидних инклузија. Флуидне инклузије су често удружене у виду група, зона, стаза или се јављају појединачно (Сл.1). Њихово појављивање може бити искључиво везано за одређене зоне раста, али се могу налазити и у виду стаза које пресецају више различитих зона. Због тога, препознавање заједничког начина организације флуидних инклузија у простору минерала, може бити једна од индиција генетски сличних насталих инклузија и представља један од основних задатака петрографске анализе.

### **Облик, величина и састав флуидних инклузија**

Флуидне инклузије су различитих облика, а њихов облик најчешће одражава више или мање савршен облик кристала у којем се налазе. Облик

флуидних инклузија у једном препарату може бити различит (цеваст, квадрат, ромб, облик негативног кристала, делимично или потпуно неправилан), а ређе се дешава да инклузије показују исти облик (Сл.1). Идентификовање облика флуидних инклузија треба вршити посматрањем појединачних инклузија у оквиру скупова дефинисаних на основу њихове заједничке дистрибуције.

Величина флуидних инклузија на којима се врше проучавања најчешће је између 5 и 30 микрона. Бројне су флуидне инклузије од 1-5 микрона, док се ређе срећу >50 микрона. Адекватна величина флуидних инклузија је један од услова за успешну анализу. Мала величина инклузија (<5 микрона) ограничава могућност петрографске анализе и примену осталих метода, посебно микротермометрије. Такође, и величину флуидних инклузија треба одредити кроз претходно дефинисана заједничка појављивања и увидети да ли се инклузије сличних величина јављају у истим скуповима или не.



Слика 1: Изглед флуидних инклузија у различитим испитиваним минералима: а) кварц - изоловане инклузије неправилних облика б) сфалерит - цевасте инклузије у зони раста в) гипс - инклузије облика ромба у стазама г) анхидрит - инклузије облика ромба дуж цепљивости д) берил - инклузије негативног кристалних облика е) калцит - инклузије неправилних облика ромба у групама.

Одређивање састава флуидних инклузија се врши препознавањем фаза присутних у флуидним инклузијама на собној температури. Ово представља један од најкориснијих и најпримењенијих критеријума приликом описа флуидних инклузија (*Kerkhof and Hein, 2001*). Најчешће присутне фазе су течна, гасовита и чврста (може бити присутна једна или више чврстих фаза). Присуство чврстих фаза може бити индикатор презасићености флуида одређеном компонентом у тренутку стварања флуидних инклузија што може бити од значаја за каснију интерпретацију. Такође, процена фазних односа тј. релативне заступљености гасовите и течне фазе и дефинисања тзв., гасовитих или течних флуидних инклузија представљају значајне параметре приликом одређивања састава и врста флуидних инклузија.

Као и приликом описивања облика и величине, састав флуидних инклузија треба разматрати у оквиру издвојених скупова и проверити да ли се скупови одликују истим или различитим присутним фазама.

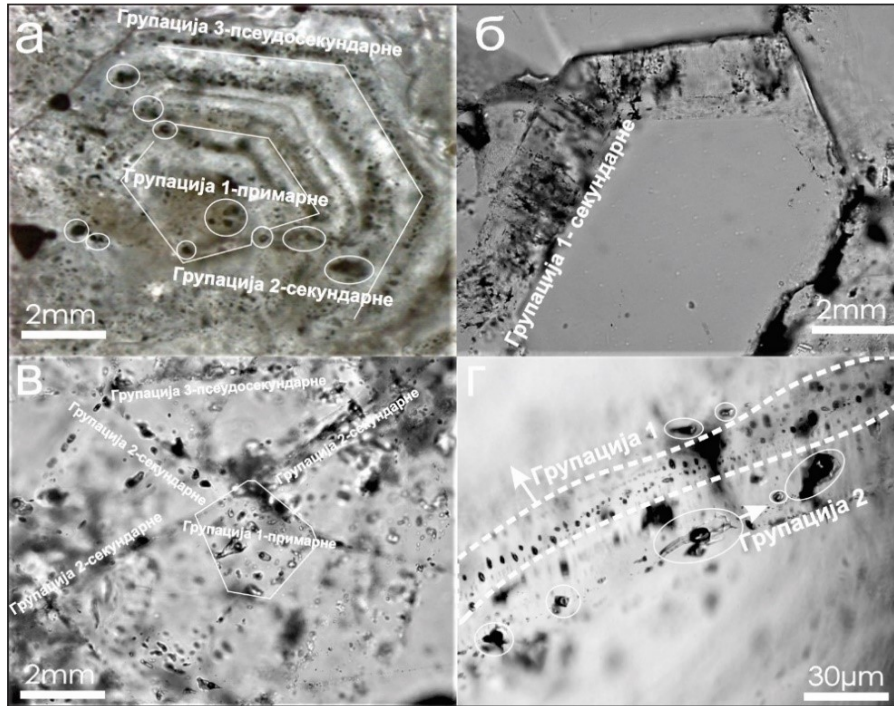
### **Дефинисање групација флуидних инклузија**

Дефинисање групација флуидних инклузија се врши на основу свих петрографских карактеристика флуидних инклузија и представља основу за планирање наставка испитивања (Сл.2). Према упутствима приказаним у *Goldstein & Reynolds (1994)*, групацију флуидних инклузија (енгл. FIA-Fluid Inclusion Assemblage) представљају истовремено образоване флуидне инклузије које су настале кроз исте механизме, а одликују се истим/сличним петрографским карактеристикама у микроскопском видном пољу. Уколико је групација флуидних инклузија настала истовремено, у сличним условима и ако није имала накнадне промене, она ће се одликовати хомогеношћу података каснијих мерења (микротермометријска, спекторскопска, ласерска итд.) (*Bodnar et al., 2003*).

У циљу разумевања јаснијег генетског односа између минерала домаћина и групација флуидних инклузија које се у њему налазе, данас се најчешће врши раздвајање инклузија на примарне, секундарне и псеудосекундарне и то према правилима приказаним у *Roedder (1984)*. Примарне флуидне инклузије су настале истовремено када и минерал домаћин и локализоване су унутар зона раста кристала (Сл.2). Секундарне флуидне инклузије створене су након кристализације минерала, дуж прелома и деформација које пресецају зоне раста минерала, а псеудосекундарне инклузије су образоване пре него што је раст кристала завршен (Сл.2). По пореклу, псеудосекундарне су сличне секундарним флуидним инклузијама, с тим што су формиране дуж микро фрактура или других деформационих зона које су накнадно зарасле. Ипак, за разлику од секундарних, њихово заробљавање је праћено растом кристала.

Често, овакво раздвајање не може се са сигурношћу извршити због нејасних петрографских односа, сложене дистрибуције инклузија, присуства бројних зона раста кристала и зараслих пукотина (*John et al., 2010*). Због ових проблема, више аутора предлаже коришћење још једне генетске категорије “неодређене инклузије”, којом треба означавати групације чије тачно генетско порекло не можемо да одредимо (*Goldstein et al., 2003; Chi et al., 2021*). У том

случају потребно је издвојити скупове флуидних инклузија које су на исти начин организоване у простору минерала (Сл.2г).



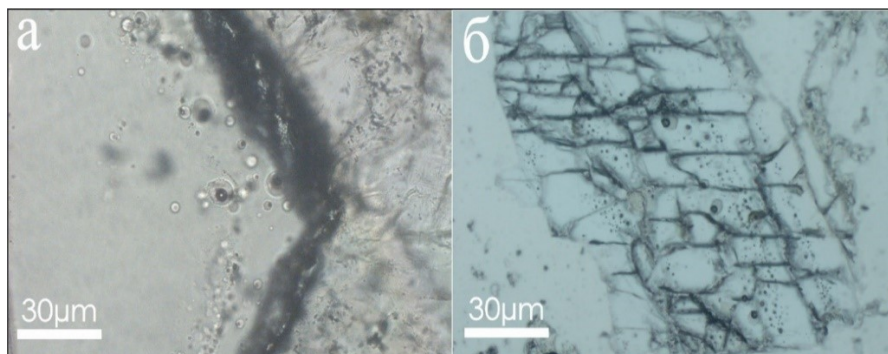
Слика 2: Дефинисање групација флуидних инклузија. а) Зонаран кристал кварца као пример јасног генетског критеријума издвајања групација флуидних инклузија у зонама раста. б) Повезаност групације флуидних инклузија са зонама срастања кристала. в) Различита дистрибуција флуидних инклузија и предлог групација. г) Флуидне инклузије у зонама са немогућношћу дефинисања генетске припадности већ само различитих групација.

## Проблеми који се јављају при петрографској анализи

### Псеудоинклузије и други типови инклузија

Приликом припреме препарата, често се дешава да се слободни простори минерала запуне лепком или другим течностима. Тиме се могу формирати псеудоинклузије које изгледом личе на праве флуидне инклузије (Сл. 3а) (Goldstein et al. 2003). Овај тип инклузија се може препознати по томе што су обично концентрисане у истом нивоу на контакту препарата и предметног стакла.

Инклузије растопа (енгл. *melt inclusions*) могу бити веома сличне флуидним инклузијама (Сл.3б). Оне настају процесом заробљавања магматског растопа током кристализације петрогених минерала и могу се користити за петролошка проучавања, али их не треба мешати са флуидним инклузијама (Goldstein et al. 2003; Randive et al., 2014).



Слика 3: Појаве које се могу лако помешати с флуидним инклузијама: а) Остаци лепка у кварцу, који имају ваздушни мехур због чега подсећају на флуидне инклузије. б) Инклузије магматског растопа у плагиокласу.

### *Хетерогено хватање*

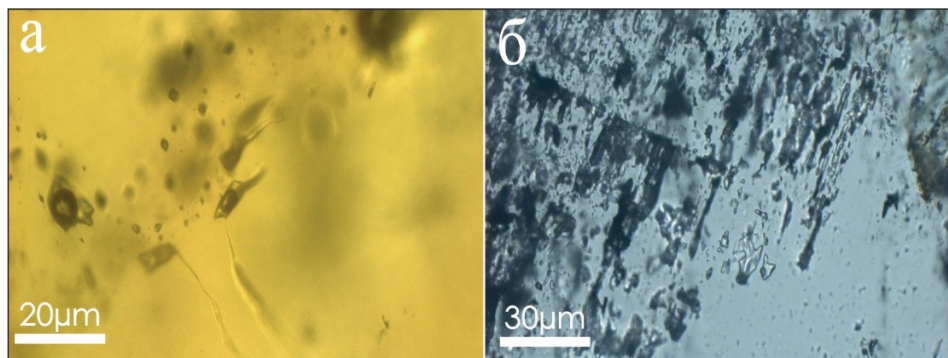
У сврху поуздане петрографске анализе и примене накнадних метода испитивања флуидних инклузија, анализу групација инклузија треба вршити на инклузијама које су у сагласности са Редеровим правилима (Roedder, 1984; Randive et al., 2014). Најчешће се користе три Редерова правила: 1) у инклузијама је заробљен јединствен хомоген флуид, 2) запремина инклузије се није мењала и 3) није дошло до промене састава инклузија након формирања.

У складу с првим Редеровим правилом, уколико је дошло до мешања или кључања флуида током формирања, у групацијама ће се налазити хетерогени флуид, тако да ће инклузије имати различите фазне односе. Препознавање групација које указују на кључање раствора је од значаја, с обзиром да је то процес који често у хидротермалним системима доводи до депоновања минерализације. У осталим случајевима требало би водити рачуна о инклузијама које су настале хетерогеним хватањем, пошто њихова анализа може дати обмањујуће резултате и пропусте при њиховој интерпретацији.

### *Модификације настале после формирања (декрепитација, цурење) итд.*

Ако инклузије нису у складу са другим и трећим Редеровим правилом, тј. ако је дошло до промене запремине и/или састава инклузија након формирања, њихове особине више не одговарају особинама флуида из ког су формиране. Узроци који доводе до ових промена могу бити различити: рекристализација, издуживање кристала, промена температуре или притиска у систему, што доводи до експлозије или цурења инклузија (Kerkhof & Hein, 2001; Randive et al., 2014). На слици 4а и 4б су приказани примери инклузија које не треба користити за анализе због тога што се примећује да је дошло до модификација насталих након формирања.





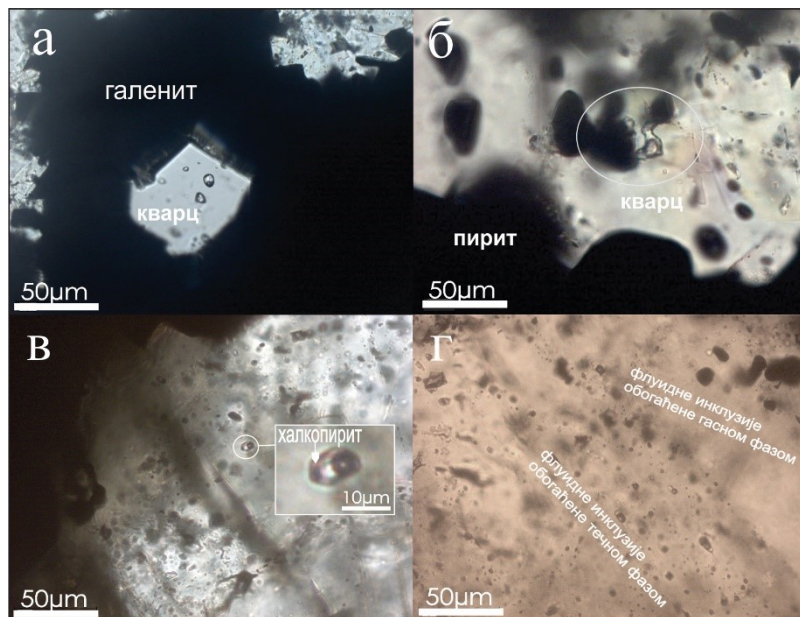
Слика 4: Деформације инклузија које се јављају након формирања: а) Цурење инклузија у кварцу које се вероватно јавља због издуживања инклузија. б) Пуцање инклузија у кварцу, које се јавља због каснијих деформација кристала.

#### *Проблеми при дефинисању рудоносних флуида*

Приликом бројних анализа флуидних инклузија из рудоносних система, један од главних задатака је одређивање услова депоновања минерализације. Истраживачи често на основу петрографских посматрања сматрају да су провидни минерали (нпр. кварц, калцит) који су чести пратиоци рудних минерала, настали сингенетски с рудном минерализацијом. Ова запажања често доводе до претпоставке да услови стварања флуидних инклузија у поменутих провидним минералима одговарају условима стварања рудних минерала, што у неретком броју случајева није тачно (*Wilkinson, 2001; Chi et al., 2021*).

Једини начин да се непогрешиво утврде карактеристике рудоносног флуида јесте испитивање примарних флуидних инклузија у рудним минералима, као што су нпр. сфалерит или шелит (*Wilkinson, 2001*). Међутим, у анализама где се врши проучавање провидних минерала, постоји још аргумената који се могу користити као индикатори да инклузије садрже рудоносне флуиде.

Текстурна повезаност рудних и петрогених минерала може се користити као аргумент у случајевима када се рудни минерали налазе у зонама раста кристала у којима се налазе и примарне инклузије (*Wilkinson, 2001*). На слици 5а је приказано ситно зрно кварца које садржи групацију инклузија заробљених између више зрна сулфида. Други случај, који се ређе примећује, јесте постојање јасне физичке везе флуидних инклузија с рудним минералима, као што је приказано на слици 5б (заокружено). Један од најчешћих аргумената за рудоносност флуида јесте присуство рудних минерала у флуидним инклузијама. У случају засићености флуида елементима од којих су формиран рудни минерали, може доћи до кристализације тих минерала у виду чврсте фазе унутар флуидних инклузија (Сл. 5в). У случају да групација флуидних инклузија садржи рудне минерале, то може бити аргумент рудоносности флуида у инклузијама, односно може да укаже на то да услови стварања флуидних инклузија одговарају развоју рудоносног система. Међутим, ако су инклузије које садрже рудни минерал ретке, онда је могуће да је тај кристал случајно заробљен током затварања инклузија (*Chi et al., 2021*).



Слика 5: Аргументи који могу указати да инклузије садрже рудоносни флуид. а) Инклузије које се налазе у кварцу који је окружен зрнима галенита б) Инклузија која је повезана са ситним зрнима пирита в) Инклузија у кварцу која садржи халкопирит г) Кварц са бројним инклузијама богатих паром и течном фазом с кристалима соли, који указује на процесе кључања.

Кључање је процес који често доводи до депоновања минерализације у хидротермалним системима (*Wilkinson, 2001*). Присуство бројних ситних инклузија богатих паром и инклузија богатих течношћу (који често имају и кристале соли) у истим зонама раста кристала, сматра се за доказ кључања у систему (*Roedder, 1984; Heinrich, 2005*) (Сл.5г). Због тога је потребно обратити посебну пажњу на препознавање овог процеса, нарочито ако су присутне и друге појаве које указују на повезаност инклузија и рудних минерала.

## ЗАКЉУЧАК

Петрографска анализа представља методу коју је неопходно применити приликом истраживања флуидних инклузија уз разумевање неколико чињеница:

- Врши се као први и основни корак у истраживањима флуидних инклузија.
- Од значаја је за наредне кораке истраживања као и целокупну интерпретацију резултата аналитичких испитивања.
- Главни циљ је дефинисање различитих групација флуидних инклузија које ће репрезентовати различите фазе еволуције флуида и/или различите флуиде.

- Издвајање групација се врши на основу петрографских карактеристика минерала домаћина, текстуралне повезаности минерала и флуидних инклузија, облика, величине, састава и накнадних деформација флуидних инклузија.
- Да би се избегла субјективност, потребно је држати се одређених упутстава и редоследа дефинисања петрографских карактеристика.
- Најчешћи проблеми изазвани су неискуством истраживача (нпр. не препознавање групација насталим хетерогеним стварањем) и недостатком адекватних петрографских аргумената (нпр. код дефинисања рудоносних флуида).

## ЛИТЕРАТУРА

- Bodnar, R. J., Samson, I., Anderson, A., & Marshall, D. (2003): Reequilibration of fluid inclusions. *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*, 32, 213-230.
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. & Steele-MacInnis, M., (2014): 13.5 — Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Treatise on Geochemistry*, Second Edition 2nd edn. Elsevier, Oxford, 119-142.
- Chi, G., Diamond, L. W., Lu, H., Lai, J., & Chu, H. (2021): Common problems and pitfalls in fluid inclusion study: a review and discussion. *Minerals*, 11(1), 7.
- Goldstein, R. H., & Reynolds, T. J. (1994): Fluid inclusion microthermometry.
- Goldstein, R. H., Samson, I., Anderson, A., & Marshall, D. (2003): Petrographic analysis of fluid inclusions. *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*, 32, 9-53.
- Heinrich, C.A., (2005): The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. *Mineralium Deposita*, 39(8), 864-889.
- John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., ... & Taylor, R. D., (2010): Porphyry copper deposit model. *Scientific investigations report*.
- Randive, K. R., Hari, K. R., Dora, M. L., Malpe, D. B., & Bhondwe, A. A. (2014): Study of fluid inclusions: methods, techniques and applications. *Geol. Mag*, 29, 19-28.
- Roedder, E., (1984): Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*. Mineral. Soc. America, Washington., 12, 644.
- Van den Kerkhof, A. M., & Hein, U. F. (2001): Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1-4), 27-47.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272