

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Иване Јелић, дипл. инж. геологије

Одлуком бр. 1/115 од 24.04.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Иване Јелић, дипл. инж. геологије, под насловом

Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације

После прегледа достављене докторске дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Одлуком Наставно-научног већа бр. 1/137 од 27.05.2020. године, именована је Комисија за оцену подобности теме и кандидаткиње Иване Јелић, дипл. инж. геол. за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под предложеним насловом „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“. Комисија је била у саставу: др Александар Пачевски, ванр. проф. предложени ментор и чланови комисије др Сузана Ерић, ред. проф. и др Јовица Стојановић, виши научни сарадник.

Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на седници одржаној 16.07.2020. године усвојило је позитиван Извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Иване Јелић под насловом „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“ (Одлука бр. 1/240 од 20.07.2020. год.).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 24.08.2020. године, на основу извештаја бр. 1/169, од 12.06.2020., који је дала Комисија именована од стране Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета у Београду, донело је Одлуку којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидаткиње Иване Јелић под насловом „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-

копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“ на Рударско-геолошком факултету (бр. 61206-2461/2-20 од 24.08.2020. године).

На основу последње молбе кандидаткиње за продужење рока за завршетак студија поднете 2022. године, Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на седници одржаној 20.10.2022. године, донело је Одлуку о продужењу рока за израду докторске дисертације Иване Јелић у трајању од једне године (бр. 1/312 од 26.10.2022. године).

Кандидаткиња Ивана Јелић, дипл. инж. геологије, 05.04.2023. године поднела је Молбу за именовање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под називом „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“. Катедра за минералогiju упутила је допис Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета са предлогом чланова Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: др Александар Пачевски, ванредни професор Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду, др Александар Кременовић, редовни професор Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду, и др Јовица Стојановић, научни саветник Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд.

Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на седници одржаној 20.04.2023. године именovalo је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Иване Јелић, под насловом: „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“ (бр. 1/115 од 24.04.2023. године). Чланови Комисије су потписници овог извештаја.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“, припада области техничких наука. По предмету истраживања, дисертација припада научној области „Геологија“, односно ужој научној области „Фундаментална и примењена минералогija“, за коју је матичан Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет.

За ментора на изради докторске дисертације именован је др Александар Пачевски, ванредни професор Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду. Ментор је аутор већег броја научних радова објављених у међународним и домаћим часописима и зборницима радова са различитих научних скупова, који су везани и за проблематику која се обрађује у дисертацији, тако да испуњава важеће критеријуме за менторство на Универзитету у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ивана Јелић рођена је 02. маја 1981. године у Београду. Основну и средњу Правно-биротехничку школу „9. Мај“ завршила је у Београду, а 2001. године уписала је Београдску пословну школу. Након завршетка више школе, 2005. године уписала је Рударско-геолошки факултет, Универзитета у Београду.

У току основних студија учествовала је у програму размене студената између Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду и Универзитета у Будимпешти, Мађарска, који се одвијао у склопу ERASMUS –а (*European Union (EU) student exchange programme*). У току летњег курса у иностранству положила је испит на енглеском језику и притом стекла одређена знања у области струке која су значајна за даљи наставак школовања.

Основне академске студије завршила је 2011. године, са просечном оценом 9,00 (девет и 00/100). Одбраном рада са темом „Јонске супституције и молекули воде у берилима из пегматита Осоја (Сталаћ) и планине Цер“, стиче академско звање дипломирани инжењер геологије на Смеру за минералогiju и кристалографију Рударско–геолошког факултета, Универзитета у Београду.

У току 2013. године волонтирала је у Предузећу за геотехнику, пројектовање, инжењеринг и консалтинг, TILEX DOO, Београд. Од децембра 2013. године до краја 2014. године радила је у Геолошком Заводу Србије.

Докторске студије уписала је школске 2013/2014 године на студијском програму Геологија Рударско–геолошког факултета, Универзитета у Београду. Сходно интересовањима у вези са предложеном темом, кандидаткиња Ивана Јелић изабрала је и положила предмете који одговарају унапређењу знања за рад на предложеној докторској дисертацији. Трећа година докторских студија (2015/2016) била је у статусу мировања ради бриге о рођеном детету.

Током досадашњинх докторских студија учествовала је на три међународна конгреса, а била је учесник и на једном билатералном пројекту између Србије и Словеније (пројектни циклус 2018-2019. год.), под називом „Микрометарске до нанометарске текстуре рудних минерала: методе испитивања и значај“.

Од 2018. године волонтира, а од 2019. До 2021. године била је запослена као дипломирани инжењер геологије на место конзерватора у геолошком одељењу Природњачког музеја у Београду. У периоду од 2019. до 2020. године у оквиру активности Природњачког музеја била је ко-аутор 1 изложбе. Изложбени предмети су експонати баштињени у оквиру минералашке збирке Природњачког музеја. У оквиру манифестације „Музеји за 10“ реализовала је стручна вођења везана за минералашке експонате Природњачког музеја. У образовно-истраживачком кампу у Бабушници учествовала је као предавач. Том приликом одржала је предавање и радионице из области минералогije.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Иване Јелић, под називом „Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације“ написана је на 119 страна, формата А4 (фонт: Times New Roman 12, проред: single), садржи 70 илустрација и 16 табела. Дисертација је подељена на 6 поглавља: 1. Увод (2 стране); 2. Општи део (29 страна); 3. Експериментални део (17 страна); 4. Резултати (50 страна); 5. Дискусија (11 страна); 6. Закључак (2 стране) и Списак литературе (8 страна). Поред тога, дисертација садржи: Насловну страну на српском и енглеском језику, Страну са подацима о ментору и члановима комисије, Резиме на српском и енглеском језику са кључним речима, Захвалницу, Садржај, 2 прилога, Биографију докторанда, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација повезује хемизам, структурне карактеристике и услове образовања арсенопирита, а поред тога бави се и садржајем хемијских примеса у овом минералу, као и производима његове оксидације.

У првом, уводном поглављу су кроз главна досадашња сазнања о кристалохемији арсенопирита, његове употребе у својству геотермометра, концентрисању злата и других хемијских примеса, као и његове оксидације и утицају на животну средину, утврђени основни правци истраживања и циљеви докторске дисертације.

У другом поглављу *Општи део* дат је приказ основних литературних података о арсенопириту са освртом на кристалохемијске карактеристике овог минерала и могућности његове употребе као геотермометра. Посебна пажња је посвећена и начину концентрисања злата у арсенопириту, а такође и његовој оксидацији и утицају на животну средину. У овом делу доктората приказане су и опште геолошке и металогенетске карактеристике Шумадијско-копаоничке области и дат је геолошки опис појединих локалитета (рудних лежишта и минерализација) из ове области, а који су обухваћени експерименталним радом.

Треће поглавље *Експериментални део* даје приказ локалитета и начина прикупљања узорака за лабораторијска испитивања кроз теренски рад и ранија истраживања, при чему је уједно и објашњен критеријум за селекцију узорака. За узорке који су узети из ранијих истраживања дат је основни минералшки и петрографски опис који је такође преузет из тих претходних истраживања. У овом поглављу су затим приказане примењене лабораторијске методе испитивања: микроскопска испитивања у поларисаној светлости, сепарација минерала, скенирајућа електронска микроскопија (*SEM*) и електронска микроанализа (*EMPA*), масена спектрометрија (*LA-ICP-MS* метода), рендгенска дифракција праха (*XRPD*) и трансмисиона електронска микроскопија (*TEM*).

У четвртном поглављу *Резултати* дат је приказ свих резултата истраживања. Најпре су приказани резултати микроскопских и парагенетских проучавања арсенопирита, разврстани према испитиваним локалитетима. Затим су приказани резултати одредбе структуре, димензије јединичне ћелије и As:S односа арсенопирита који су добијени методом рендгенске дифракције праха. Ови резултати су комбиновани и упоређивани са одредбом састава, појавом хемијске зонарности и садржају примеса у арсенопириту, добијеном методама скенирајуће електронске микроскопије (повратно-расути електрони и енергетско-дисперзивна спектрометрија). Потом су засебно приказани резултати комбинованог проучавања златоносног арсенопирита са локалитета Дрењак. На крају су приказани резултати истраживања продуката оксидације арсенопирита.

Пето поглавље *Дискусија* представља синтезу добијених експерименталних података и досадашњих сазнања о арсенопириту која се могу наћи у литератури. Дискусију чине три засебне целине, али које се међусобно надовезују чинећи тако један јединствени склоп. Први део дискусије усмерен је на могућу корелацију између кристалохемије и састава арсенопирита са условима образовања парагенетски различитих типова руде у којима је овај минерал присутан. Други део дискусије огледа се у разматрању резултата који се тичу садржаја злата у арсенопириту. У овом делу је дискутован начин појављивања, дистрибуција, облик и величина честица самородног злата у златоносном арсенопириту са локалитета Дрењак, као и механизам отпуштања злата из арсенопирита током његове оксидације у рудама и на јаловиштима. Трећи део дискусије обрађује продукте оксидације арсенопирита и њихов постанак током алтерације сулфидних минерала у површинским условима.

У шестом поглављу *Закључак* сумирани су најзначајнији резултати докторске дисертације који уједно пружају и препоруке за даља истраживања у овој области минералогije.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Разматрана докторска дисертација представља оригинални научно-истраживачки рад у области минералогije рудних лежишта. Хемијске, структурне и друге специфичности неког минерала у зависности су од услова његовог образовања и могу се, на пример, у значајној мери користити у одредби физичко-хемијских услова образовања рудних лежишта.

У оквиру ове докторске дисертације дефинисане су кристалохемијске и парагенетске карактеристике арсенопирита и дискутоване су могућности и ограничења у употреби арсенопирита у својству геотермометра. Затим, детаљно је одређен и описан начин појављивања самородног злата у златоносном арсенопириту Дрењака и приказана је његова дистрибуција и током оксидације овог минерала. На крају, одређени су најзначајнији производи оксидације арсенопирита, који у неким случајевима могу да садрже и злато или друге примесе, али су генерално од значаја за праћење мобилности арсена на јаловиштима, који иначе спада у веома токсичне елементе и загађиваче животне средине. Савременост и оригиналност истраживања приказаног у овој докторској дисертацији потврђени су и публикавањем рада у међународном часопису и саопштењима на једном међународном скупу.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру докторске дисертације цитирано је 108 литературних навода, који су углавном објављени у часописима међународног значаја. Преглед литературних података омогућио је да се прикаже стање у испитиваној научној области, као и да се сагледа актуелност проблематике предметне докторске тезе. Кандидаткиња је првенствено прегледала обимну литературу која је везана за проучавање кристалохемије арсенопирита, услове постанка и могућност његове употребе као геотермометра, још од шесдесетих година прошлог века. Кандидаткиња је исто тако прегледала и литературу о садржају хемијских примеса, нарочито злата у арсенопириту, његове оксидације на рудним јаловиштима и утицаја на животну средину кроз ослобађање арсена, што представља прилично актуелан правац истраживања последњих деценија. Из пописа литературе која је коришћена у докторату, као и објављених публикација кандидаткиње, може се запазити да кандидаткиња на адекватном нивоу познаје област истраживања, као и актуелно стање истраживања у овој области у свету.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У овој докторској дисертацији коришћене су опште и посебне методе истраживања. Од општих научних метода примењене су: индуктивно и дедуктивно закључивање, компарација, анализа и синтеза, генерализација и специјализација. Резултати у овој докторској дисертацији добијени су применом одговарајућих експерименталних техника и савремених аналитичких метода, а адекватном анализом и обрадом података извршен је приказ резултата. За одредбу минералног састава узорака и форме појављивања арсенопирита у њима коришћена је поларизациона микроскопија у одбијеној, а по потреби и пропуштеној светлости. У циљу одредбе хемијског састава овог минерала и садржаја примеса у њему коришћена је метода скенирајуће електронске микроскопије (*SEM*) са електронском микроанализом (*EMPA*). Овом методом извршена је и карактеризација хемијске зонарности, односно хомогености арсенопирита, а одређивано је и присуству микрометарских зрна других минерала у њему. Одредба структуре и димензије јединичне ћелије арсенопирита са различитих локалитета, извршена је методом рендгенске дифракције праха (*XRPD*). За анализу елемената у траговима у златоносном арсенопириту Дрењака, употребљена је метода

масене спектрометрије (*LA-ICP-MS* метода). На крају, за потребе утврђивања начина појављивања и дистрибуције нанометарског злата у овом арсенопириту и његовом продукту оксидације скородиту, употребљене су методе трансмисионе електронске микроскопије (*ТЕМ*).

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати кандидаткиње Иване Јелић, дипл. инж. геологије везани за ову докторску дисертацију осим фундаменталног имају и примењени значај у области геологије рудних лежишта и заштити животне средине. Систематским и свеобухватним хемијским и структурним проучавањем арсенопирита из парагенетски различитих минерализација указано је на могућности, али и ограничења у примени арсенопирита као геотермометра. Детаљно је описан начин појављивања микроскопског до субмикроскопског злата у арсенопириту са локалитета Дрењак, а притом је утврђена и Au-Bi корелација у оквиру овог As-Au-Bi система, што може бити веома значајно за проспекцију минерализације злата, нарочито у нашој прилично рудоносној Шумадијско-копаоничкој области. Притом, указан је значај и скородита (продукта оксидације арсенопирита) као носилаца злата, а описане су и трансформације на микро- до нанометарској скали које захватају и самородно злато током оксидације сулфида, што је свакако један од најзначајнијих резултата ове дисертације имајући у виду да су такви подаци веома оскудни у литератури. На крају, одређени су и описани најзначајнији продукти оксидације арсенопирита настали током површинске алтерације руде, што је од значаја са становишта миграције и фиксације токсичног арсена на рудним јаловиштима, а тиме и са становишта заштиту животне средине.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Ивана Јелић, дипл. инж. геологије је током израде докторске дисертације показала самосталност, систематичност и стручност у сагледавању проблема истраживања и критичке анализе добијених података. Током примене различитих аналитичких метода, обраде резултата и њихове презентације у објављеном раду и саопштењима показала је да влада знањима везаним за област истраживања и методама научног рада. Осим тога, кандидаткиња је успешно и квалитетно одговорила на циљеве постављене у предлогу за израду ове дисертације, што указује на њену способност да објективно и у целини сагледа истраживачки процес и услове потребне за реализацију овог процеса.

Комисија сматра да кандидаткиња поседује све квалитете који су неопходни за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос ове докторске дисертације огледа се у следећем:

- Током рада на докторској дисертацији систематски је анализиран арсенопирит, FeAsS из различитих парагенеза и стадијума минерализације са неколико локалитета (Рудник, Саставци, Трепча, Рујак, Дрењак, Голијска река и Јурија) у оквиру Шумадијско-копаоничке области. Нестехиометријски As:S однос одређиван је на основу параметара јединичне ћелије и d_{131} међупљосног растојања. На тај начин је утврђено да се садржај арсена у испитиваним арсенопиритама креће у опсегу од 32.3 до 34.3 at.% As.

- На основу варијације у садржају арсена одређен је температурни опсег кристализације арсенопирита, али је притом указано на ограничења у примени арсенопирита као геотермометра услед различитих фактора који утичу на варијацију у саставу арсенопирита.
- Испитивани арсенопирит најчешће садржи Co, Ni и Sb примесе, док је злато присутно једино у арсенопириту са Дрењака, при чему се јавља у виду микро- до нанометарских честица које запуњавају микропукотине у арсенопириту, често заједно са минералима бизмута. Ово злато се заправо састоји од нанокристалита. Током оксидације арсенопирита и образовања скородита, злато се у великој мери концентрише и у овом продукту оксидације, и то у виду реликтних зрна, „колоидног“ злата и наночестица злата величине од свега 15 до 3 nm.
- Најчешћи продукти оксидације арсенопирита у површинским условима су скородит и фармакосидерит, а у мањој мери су образовани и други секундарни минерали који могу бити носиоци арсена на рудним јаловиштима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем циљева и постављених хипотеза у односу на добијене резултате може се констатовати да приказана истраживања у потпуности задовољавају критеријуме једне докторске дисертације. Увидом у доступну литературу из ове области, као и резултате добијене применом адекватне методологије може се констатовати да су коришћене методе у складу са савременим методама и да су резултати у овој докторској дисертацији значајни са научног аспекта.

Један од главних доприноса овог доктората је сагледавање кристалохемијских варијација арсенопирита из различитих парагенеза у оквиру једне рудоносне области, а овај део резултата докторске дисертације публикован је у истакнутом међународном часопису (референца 1 доле у наставку текста). Поред наведеног, од истакнутог су значаја и резултати проучавања златоносног арсенопирита који представљају једну донекле засебну целину у оквиру доктората. Прелиминарни резултати овог истраживања публиковани су на једном међународном скупу (референца 2 доле у наставку текста), а целокупни и свеобухватни резултати изнети су у рукопису који је тренутно у процесу ревизије у врхунском међународном часопису (M21).

4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос и резултати истраживања добијени током израде ове дисертације верификовани су у раду који је објављен у истакнутом међународном часопису, са кандидаткињом као првопотписаним. Кандидаткиња је резултате добијене у овој докторској дисертацији представила и на једној међународној конференцији.

Радови кандидаткиње који су директно везани за докторску дисертацију:

M22 - Рад објављен у истакнутом међународном часопису

1. **Jelić, I.,** Pačevski, A., Kremenović, A., Šoster, A., Šestan, A., Zavašnik, J. (2023): Crystallography and Surface Oxidation of Stoichiometric Arsenopyrite from Šumadija-Kopaonik Pb-Zn/Polymetallic Ore District (Serbia). *Crystals*, 13, 278 <https://doi.org/10.3390/cryst13020278>

M33 - Саопштење са скупа међународног значаја штампано у целини

2. **Jelić, I.**, Zavašnik, J., Vulić, P., Pačevski, A. (2019): Micro- to nanoscale texture of gold-bearing arsenopyrite from the Gokčanica locality, Serbia. Proceedings of XIII International Mineral Processing and Recycling Conference, 8-10 May 2019, Belgrade, Serbia, 101-103.
3. Pačevski, A., Zavašnik, J., Šoster, A., Šestan, A., Luković, A., **Jelić, I.**, Kremenović, A., Zdravković, A., Erić, S., Bajuk-Bogdanović, D. (2019): Micro- to nanoscale textures of ore minerals: methods of study and significance. Proceedings of XIII International Mineral Processing and Recycling Conference, Belgrade, Serbia, 8–10 May 2019, 98-100.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидаткиње Иване Јелић, дипл. инж. геологије под називом „**Арсенопирит из рудних лежишта Шумадијско-копаоничке области: парагенеза, састав и продукти оксидације**“, представља оригинални научни рад из уже научне области Фундаментална и примењена минералогичка наука. Кандидаткиња је студиозним приступом, реализацијом лабораторијских истраживања, анализом доступне литературе и тумачењем добијених резултата истраживања, дошла до оригиналних закључака, чиме је показала способност за самостални научно-истраживачки рад. Као један од најзначајнијих доприноса докторске дисертације могу се навести резултати који се односе на варијацију у хемизму и димензији јединичне ћелије арсенопирита из различитих минералних парагенеза и постмагматских стадијума. Међу најзначајније резултате овог доктората свакако треба навести и детаљно проучавање дистрибуције и карактеристика самородног злата у златоносном арсенопириту и његовом продукту оксидације скородиту са локалитета Дрењак. Ово проучавање засновано на комбиновању уобичајених микроскопских испитивања и савремених метода микроанализа, омогућило је увид у текстурне карактеристике злата у микрометарском до нанометарском опсегу, што представља релативно редак и веома значајан тип истраживања не- само у домаћој научној заједници већ и у свету генерално.

Анализирајући докторску дисертацију кандидаткиње Иване Јелић, Комисија је закључила да она представља значајан и оригинални научни допринос области геологије и минералогичке науке, да је у свему израђена у складу са стандардима научно-истраживачког рада и важећим прописима, те стога предлаже Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета да овај извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности и овај извештај упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду ради коначног усвајања, након чега би се приступило усменој одбрани дисертације пред комисијом у истом саставу.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Александар Пачевски, ванредни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Александар Кременовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Јовица Стојановић, научни саветник
Институт за технологију нуклеарних и других
минералних сировина, Београд