

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ
Наставно-научном већу

Одлуком Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета бр. 1/337 од 02.12.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Стефана Петровића под насловом

**„Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног
лежишта Рудник”**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ И ДИСЕРТАЦИЈИ

Стефан Петровић рођен је 15. маја 1994. године у Горњем Милановцу. Основну школу „Арсеније Лома” завршио је 2009. године на Руднику. Средњу, Геолошко-хидрометеоролошку школу „Милутин Миланковић” у Београду завршио је 2013. године. Био је полазник истраживачке станице „Петница” (2012. године) и стипендиста компаније „НИС” (2013. године).

Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду уписао је 2013. године. Основне академске студије, на студијском програму Геологија завршио је у року, 2016. године, са просечном оценом 9,32. Септембра исте године са одбранио је завршни рад на тему „Геологија и методе истраживања полиметаличног лежишта Рудник”, са оценом 10.

Мастер академске студије на Рударско–геолошком факултету, Геолошки одсек, модул Економска геологија, уписао је 2016. године. Исте је завршио септембра 2018. године са просечном оценом 9,61. Мастер рад на тему „Геолошке карактеристике полиметаличне минерализације у формацији кластичног флиша лежишта Рудник”, одбранио је 2018. године са оценом 10, чиме је стекао звање Мастер геолог.

У октобру 2018. године, уписао је докторске студије Геологије на Универзитету у Београду – Рударско-геолошком факултету. Од марта 2019. године је у радном односу у звању Истраживач-приправник (2019-2023. године) а затим Истраживач-сарадник (од 2023. године) и Асистент (од 2024. године) на Рударско-геолошком факултету у Београду. Од избора у звање, био је ангажован на организацији и припреми материјала за извођење вежби из наставних предмета: Проспекција лежишта чврстих минералних сировина, Методе истраживања лежишта минералних сировина и Истраживање лежишта чврстих минералних сировина.

Стефан Петровић је у периоду 2019-2020. године учествовао је као истраживач на Пројекту основних истраживања финансираном од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, број N176016: Магматизам и

геодинамика Балканског полуострва од мезозоика до данас: значај за образовање металних и неметалних рудних лежишта. Учесник је пројекта REASONING: „Карактеризација и технолошки поступци за рециклажу и поновну употребу флотацијске јаловине из рудника Рудник”, пројекат Призма, Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије.

Активан је члан Српског геолошког друштва и добитник награде Српског геолошког друштва за најбољи рад младих геолога и студената у 2019. години. Био је члан Организационог одбора 18. Конгреса геолога Србије 2022. године. Члан је и међународног друштва геолога The Society for Geology Applied to Mineral Deposits (Швајцарска).

Током рада на Рударско-геолошком факултету, Стефан Петровић, мастер геолог и истраживач-сарадник, обавио је неколико стручно-научних пракси и усавршавања:

- У мају 2017. године похађао је међународни курс Coal and Peat Geology and Organic Petrography на Рударско-геолошком факултету у Београду.
- У априлу 2019. године похађао је курс Leapfrog Geo Fundamentals на Рударско-геолошком факултету у Београду.
- У јулу 2019. године похађао је међународни курс CirCOOL2019-The Value Life Cycle of Materials in the Circular Economy на Универзитету у Леобену, Аустрија.
- У новембру 2019. године похађао је курс Surpac Geology Fundamentals на Рударско-геолошком факултету у Београду.
- У јануару 2020. године похађао је курс Datamine, studio RM and NPV на Рударско-геолошком факултету у Београду.
- У фебруару 2020. године боравио је на стручном усавршавању и лабораторијским испитивањима флуидних инклузија применом микротермометријских мерења и RAMAN методе као стипендиста СЕЕРУС мреже: СИИ-РО-0038-15-1920-М-135781 на Универзитету у Леобену, Аустрија.
- У јулу 2021. године боравио је на стручном усавршавању и лабораторијским испитивањима главних и микроелемената у сулфидним минералима применом метода SEM-EDS, EPMA, LA-ICP-MS као стипендиста СЕЕРУС мреже: СИИ-RS-0038-16-2021-М-143279 на Универзитету у Леобену, Аустрија.
- У мају 2022. године боравио на стручном усавршавању и лабораторијским испитивањима флуидних инклузија применом микро-RAMAN методе и анализа података кроз софтвере AqSo-NaCl software LonerB, LonerAP као стипендиста СЕЕРУС мреже: М-RS-0038-2122-153156 на Универзитету у Леобену, Аустрија.
- У мају 2023. године похађао је курс The need for raw materials in the European Union (EU reliance on import, EU critical raw materials, future outlook) and critical raw material deposits – Slovakia as an example на Рударско-геолошком факултету у Београду.

Поред стручних усавршавања, кандидат је био члан Организационог одбора и учествовао на 18. Конгресу геолога Србије 2022. године, као и на конференцији The 17th SGA Biennial Meeting „Mineral Resources in a changing world” 2023. године у Цириху (Швајцарска).

Наслов и обим дисертације

Наслов докторске дисертације кандидата Стефана Петровића, мастер геолога, гласи: „Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник”.

Дисертација садржи:

- 141 страна рачунарски обрађеног текста А4 формата, укључујући додатке, односно 119 страна текста А4 формата без додатака,
- 10 табела у тексту дисертације,
- 92 слике у тексту дисертације,
- 3 прилога - табеларно приказаних резултата истраживања, и
- 242 литературна навода у списку литературе.

Хронологија одобравања и израде дисертације

Научно-наставно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на седници одржаној 16. 09. 2019. године донело је Одлуку о именовању Комисије за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације, кандидата Стефана Петровића, мастер геолога под називом: „Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник” (документ број 1/278 од 21.09.2021. године). Кандидат Стефан Петровић је 27.09.2021. године одбранио предложену тему докторске дисертације на Рударско-геолошком факултету.

Научно-наставно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на седници одржаној 21.10.2021. године, усвојило је позитиван Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације, кандидата Стефана Петровића, мастер геолога под називом: „Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник”. За менторе су именовани др Раде Јеленковић, редовни професор и др Владица Цветковић, редовни професор, дописни члан САНУ (документ број 1/414 од 21.10.2021. године).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на електронској седници одржаној 04.11.2021. године донело је Одлуку којом се даје Сагласност на Одлуку Научно-наставног већа Рударско-геолошког факултета о прихватању теме докторске дисертације Стефана Петровића, под називом: „Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник” и одређивању проф. др Радета Јеленковића и проф. др Владице Цветковића за менторе (документ број: 61206-4392/2-21 од 04.11.2021., примљено на Рударско-геолошком факултету 19.11.2021. године, број 1/447).

Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација кандидата Стефана Петровића, мастер геолога, припада научној области Геологија, односно ужој научној области Економска геологија (Студијски програм Геологија, модул Економска геологија, Универзитет у Београду - Рударско-

геолошки факултет). За менторе дисертације су одређени др Раде Јеленковић, редовни професор Универзитета у Београду - Рударско-геолошки факултет, ужа научна област Економска геологија и академик др Владица Цветковић, редовни професор, Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, ужа научна област Петрологија.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Предмет истраживања предложене теме дисертације је хидротермално полиметалично лежиште Pb, Zn, Cu и Ag Рудник, локализовано на истоименој планини у домену Шумадијске зоне Српско-македонске металогенетске провинције. Стварање лежишта се доводи у везу са различитим геолошким процесима одиграним пре, током и након интензивне магматске активности у доба олигоцене и доњег миоцена. У геолошкој грађи лежишта је издвојено шест главних јединица: кластична, пешчарско-карбонатна, пелитско-карбонатна и карбонатна су кредне старости и имају карактеристике седимената флиша, значајно метаморфисаних у домену лежишта. Осим њих, од посебног значаја за рудну минерализацију је јединица хидрауличних бреча чији је настанак условљен магматско-кинематским догађајима. Следећа јединица је магматска; представљена је кварцлатитским дајковима, дацитским и андезитским изливима и ређим појавама кварцмонцонита и лампрофира.

Од почетка савремених геолошких истраживања (1952. године) до данас, на простору полиметаличног лежишта Рудник је пронађено више од 100 рудних тела у којима је садржано преко 13 Mt полиметаличне руде. Рудна тела су различитих величина, најчешће од 30.000 до 150.000 t руде, ређе и више од 300.000 t руде; највећа рудна тела су имала до 900.000 t руде.

Рудна тела су различитих облика; преовлађују слојолика (псеудослојеви), сочива, гнезда и жица. Минерална парагенеза је сложена. Пиротин је количински и просторно најзаступљенији минерал, а прате га сфалерит, галенит, халкопирит, арсенопирит, пирит и шелит. Минерали бизмута (бизмут, бизмутинит, сулфосоли бизмута), као и минерали никла и кобалта (сулфиди, арсениди и сулфоарсениди) су ретки.

Предложена тема докторске дисертације обрађује геолошку грађу, састав и услове стварања полиметаличног лежишта Рудник. Основни задатак је утврђивање карактеристика хидротермалних рудоносних флуида и његова еволуција, са акцентом на анализи и асоцијације главних и пратећих микроелемената и њихове расподеле у главним рудним минералима лежишта. Њихово изучавање је од нарочитог значаја за генетско моделовање лежишта и у значајној мери ће утицати на допуну и корекцију раније формираног, прелиминарног генетског модела. Према научном пољу истраживања, предложена тема докторске дисертације припада области Геонаука, односно ужој научној области Економска геологија. За обе области је матичан Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду.

Израда докторске дисертације има два основна циља:

1. Утврђивање својстава хидротермалних рудоносних флуида и њихове улоге у стварању полиметаличног лежишта Рудник.

2. Утврђивање пратеће асоцијације рудних и микроелемената у рудним телима и рудоносним структурама лежишта Рудник, њихове дистрибуције, просторног размештаја, и значаја у тумачењу генетског модела лежишта.

Научни допринос се огледа у:

- Одређивању фаза хидротермалне активности и услова стварања рудних тела у лежишту Рудник,
- Утврђивању доводних и прерасподељујућих путева кратца хидротермалних флуида,
- Утврђивању дистрибуције елемената (рудних и пратећих) у простору и времену,
- Утврђивање екстензитета и интензитета појављивања рудних и пратећих елемената рудне асоцијације,
- Издавање геохемијских асоцијација елемената, њихових временских сукцесија и температура обарања,
- Утврђивање корелативних веза између асоцијација рудних и пратећих елемената, везе елемената са појединачним рудним минералима, елемената и средина депоновања рудне минерализације,
- Температурно мапирање и дефинисање зоналности минерализације у домену лежишта и околних стена рудних тела,
- Тумачењу генетског модела лежишта на основу присуства микроелемената и типова хидротермалних флуида.

Апликативни допринос се огледа у:

- Стварању научно засноване подлоге за формирање и тумачење генетски сличних типова лежишта у домену Српско-македонске металогенетске провинције,
- Прикупљању већег броја података о дистрибуцији микроелемената применом савремених минералогских, хемијских и геохемијских метода испитивања, а који ће бити основа за доношење одлуке о њиховој потенцијалној економској валоризацији,
- Издавање перспективних зона за концентрисање сребра као водич за усмеравање будућих геолошких истраживања,
- Дефинисању типова руде са аспекта главних, споредних и микроелемената као основе за развој нових и/или унапређење постојећих метода и техника прераде руде, односно њихово ефективније и ефикасније искоришћење.

3. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ И ПОЛАЗНИ ПОДАЦИ

Утврђивање састава и других релевантних карактеристика рудоносних хидротермалних флуида (фазност, притисак, температура, салинитет и др.), вршило би се испитивањем флуидних инклузија у транспарентним минералима, који су просторно и генетски везани за минерале рудне парагенезе. Раније спроведеним испитивањима, утврђено је да су кварц и калцит чести прагиоци рудне минерализације у простору целог лежишта Рудник.

Формирају правилне, кристалне форме, одговарајућих су величина и транспарентни што је предуслов за проналажење и испитивања флуидних инклузија. У неким од њих су ранијих година утврђене и делимично изучене флуидне инклузије. Такође је значајно да су макроскопским проучавањем рудних узорака уочене појаве нарастања кристала, што поред сложеног минералног састава, може бити индиција вишефазног деловања рудоносних хидротермалних флуида. Полазна претпоставка је да ће изучавања флуидних инклузија у претходно селектованим минералима, дати одговор на више питања од значаја за генетско моделовање лежишта, као што су: порекло и састав хидротермалних рудоносних флуида, као и њихова еволуција у времену и простору пре, у време и након стварања лежишта. Поменута испитивања биће праћена детаљним изучавањем рудних и петрогених парагенеза, односно истраживањима која ће надградити познате податке о минералном саставу рудне и околне средине, а што је предуслов за генетско моделовање лежишта и одређивање његове просторне и временске позиције.

Испитивање асоцијације микроелемената и њихове расподеле у главним рудним минералима лежишта Рудник, уследиће након поузданог дефинисања минералних и рудних парагенеза, издвајања минерализационих фаза и температурних услова њиховог стварања.

Досадашњим геолошким истраживањима је утврђено да рудна тела олова и цинка у лежишту Рудник имају променљиве садржаје главних рудних елемената (Pb, Zn, Cu и Ag). Њихови садржаји су у релативно широком опсезима: за Pb 0,33-6,22%, Zn 0,15-6,91%, Cu 0,08-10% и Ag 18-169 g/t, а што зависи од типа руде и њиховог састава.

Детаљно истражена и делом експлоатисана рудна тела су различитог минералног састава. Поред готово мономинералних, пиротинских рудна тела, позната су и тзв. полиметалична бакроносно-пиротинска, галенитско-сфалеритска, галенитско-сфалеритско-халкопиритска и пиротинско-галенитско-сфалеритско-халкопиритска. Са аспекта минералног састава, услова стварања, облика рудних тела, њихових текстурно-структурних и других карактеристика, груписана су у више рудних формација: 1) скарновска, плочаста (стратиформна /псеудослојевита/) и сочиваста, галенит-сфалеритска (\pm Cu, Bi, Ag) рудна формација; 2) скарновска, морфолошки сложена галенит-сфалеритска (\pm Cu, Bi, Ag) рудна формација, морфолошки подтипови: неправилно елипсоидна са плочастим завршецима, неправилно плочаста са задебљањима, неправилно елипсоидна до гнездаста; 3) хидротермална, плочаста галенит-сфалеритска (\pm Cu, Bi, Ag) рудна формација, 4) хидротермална морфолошки сложена, превасходно метасоматска (неправилно конусна са издужењем у вршном делу) галенит-сфалеритска (\pm Cu, Bi, Ag) рудна формација и 5) хидротермална, штокверно-импрегнациона до импрегнациона ураноносна (пехленда) рудна формација.

Садржаји Pb, Zn и Cu у рудним телима су у директној зависности од степена концентрисаности рудних минерала, првенствено галенита, сфалерита и халкопирита, који су и најучесталији у лежишту, односно текстурно-структурног варијетета руде. Са економског али и генетског аспекта, посебно важно је изучавање садржаја и дистрибуције сребра у лежишту Рудник. Његова испитивања у претходном периоду су вршена на нивоу парагенетских анализа узорака из рудних тела, ретко рудних зона. Систематска испитивања дистрибуције Ag у лежишту преко упоредне анализе садржаја у појединачним

рудним телима и/или групама рудних тела, као и времена и средине њиховог стварања, посебно у погледу просторне дистрибуције, нису вршена. Ранијим рудномикроскопским изучавањима је утврђено да се сребро налази у галениту, аргентопетландиту, да гради сулфосоли, а познато је и као самородно. Концентрација Ag у халкопиритима из различитих рудних тела и рудних зона није изучавана, иако постоје индиције да поменути минерал може бити његов значајан носилац, посебно имајући у виду да су концентрати бакра обogaћени овим елементом. Извршена су прелиминарна испитивања садржаја микроелемената у рудним телима из рудних зона Средњи Штурац, Прлови, Гушави поток и Бездан. Уочено је да између рудних тела СШ23 и Г16 постоји корелација садржаја Cu и Ag, као и између Pb и Ag у рудним телима Бездан и П7. Ови подаци указују на значајније расејавања Ag у халкопириту у појединим рудним зонама лежишта. Просторна дистрибуција Ag у лежишту није утврђена. На основу података који су добијени анализама рудне масе у процесу експлоатације рудних тела, утврђено је да је сребро присутно у целом лежишту, али у различитим концентрацијама у појединачним рудним телима и рудоносним зонама. Високе концентрације су утврђене у рудним телима жичног типа, нарочито у домену рудних зона Средњи Штурац и Бездан (до 1000 g/t). Садржај сребра у другим анализираним рудним зонама варира у границама од неколико десетина до 500 g/t.

Садржаји важнијих пратећих рудних елемената у лежишту Рудник (Bi, Cd, As), њихова повезаност са минералима главне рудне парагенезе, концентрације у минералима-носиоцима, дистрибуција у појединачним рудним телима и рудоносним зонама, такође није разјашњена. Претходним изучавањима је утврђена корелација између појединих рудних и пратећих елемената, али не и детаљно просторно, временски и генетски разјашњена. До сада спроведена мултиелементна испитивања присуства и садржаја осталих ретких и расејаних елемената такође указују на различиту просторну дистрибуцију и степен концентрације у различитим минералним врстама.

Технолошким испитивањима је утврђено да се у концентратима олова, цинка и бакра као пратећи елементи налазе Ag и Bi. Сребро се већим делом концентрише у концентрату олова али је констатовано и у концентрату бакра. Садржаје микроелемената из концентрата није могуће корелисати са са појединачним рудним телима, јер је тзв. излазна руда из лежишта композит добијен са већег броја откопа разних рудних тела.

На основу карактеристика хидротермалних флуида, заступљености главних и елемената у траговима, као и геолошког положаја, претпоставља се да лежиште Рудник припада класи скарновских лежишта олова и цинка, односно подкласи дисталних скарновских лежишта Zn.

4. ОПИС САДРЖАЈА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Стефана Петровића садржи следећа основна поглавља:

- Увод,
- Развој рударства, студијска и научна истраживања лежишта Рудник,
- Металогенетски положај и геолошке карактеристике лежишта Рудник,
- Методологија истраживања,
- Резултати,

- Дискусија,
- Закључак,
- Литература и
- Прилози

Кратак приказ појединачних поглавља

У *Уводу* докторске дисертације кандидат Стефан Петровић приказује географски положај и уводне геолошке карактеристике лежишта Рудник. Ово поглавље се бави и дефиницијом лежишта Рудник као скрановског генетског типа, према оценама различитих истраживача. Наглашава се да је такав закључак изведен на основу индиректних геолошких доказа и посредних геолошких карактеристика лежишта. Такође се наводи да су недавна научна истраживања лежишта била парцијална, обухватила су само одређене сегменте лежишта или појединачне појаве, али уз одсуство интегралног генетско-геолошког тумачења.

Текст даље пружа информације о процесима формирања скрановских лежишта, укључујући проградни изотермски контактни-метаморфизам, проградни метасоматизам и ретроградни метаморфизам. Ови процеси су детаљно објашњени у контексту стварања рудних минерализација и еволуције хидротермалних флуида. Посебна пажња посвећена је истраживању флуидних инклузија и дистрибуције микроелемената у сулфидним минералима, као и њиховој улози у разумевању процеса формирања скрановских лежишта.

Такође, истиче се недостатак детаљних истраживања флуидних инклузија и дистрибуције микроелемената у лежишту Рудник. Истиче се да је главни циљ дефинисање периода еволуције хидротермално-скрановског лежишта Рудник, утврђивање карактеристика хидротермалних флуида, микроелемената и њихове расподеле у сулфидним минералима, како би се допринело бољем разумевању генетског модела лежишта. Наглашава се да дисертација има за циљ да и допринесе разумевању улоге хидротермалних флуида у формирању лежишта Рудник, одређивању фаза хидротермалне активности, периода и стадијума образовања лежишта, као и услова стварања рудне минерализације.

Поглавље *Развој рударства, студијска и научна истраживања лежишта Рудник* даје сажет преглед историје рударства на планини Рудник. Наводи се да се рударство на том подручју сеже далеко у прошлост, почевши од неолита, када су се рударили различити минерали попут горског кристала, лимонита и руде бакра. Даље се наводи да савремена индустријска експлоатација руде започела је 1952. године, да су се рударске активности на планини Рудник континуирано одвијале са само кратким прекидима, чинећи рудник Рудник значајним рударским центром у Србији. Овај преглед наглашава континуитет рударске традиције на том подручју кроз различите историјске периоде и значај рудника Рудник у савременој рударској индустрији Србије.

Ово поглавље дисертације пружа и детаљан преглед истраживања геологије и рударства на планини Рудник током различитих периода, почевши од радова Пирха из 1829. године. Наводе се истраживања и радови различитих истраживача и геолога током 20. века, као и почетком 21. века. Текст даје увид у континуирани напор у истраживању геологије и

рударства на планини Рудник, који су допринели разумевању вулканизма, структура, минералне парагенезе, геохемијске асоцијације елемената, металогеније и других геолошких карактеристика. Такође, наглашава се допринос различитих студија, мастер радова и доктората у разумевању рудних зона, минерализације и геолошких процеса на овом подручју.

У поглављу *Металогенетски положај и геолошке карактеристике лежишта Рудник* аутор детаљно представља геолошке карактеристике и металогенетску припадност овог лежишта, смештеног у централном делу Српско-македонске металогенетске провинције, познате као Шумадијска металогенетска зона. Посебан нагласак стављен је на геотектонски оквир и генезу рудних лежишта у том региону, истичући значај олигоценског и миоценског магматизма у њиховом формирању. Аутор детаљно објашњава како су лежишта у Српско-македонској металогенетској провинцији, као и Рудник, повезана са развојем магматско-хидротермалних система, што је резултирало разноврсним типовима минерализације као што су Pb, Zn, Sb, Bi, Ag, As, Cu и Au.

Даље у тексту, пружају се детаљне информације о геолошкој грађи лежишта Рудник, обухватајући описе ултрабазичних стена јурске старости, седиментних стена горње креде, вулканских стена, контактано-метаморфних стена, вулканских бреча и рудних тела. Рудна тела, која се налазе у различитим литолошким јединицама, детаљно су описана у погледу њиховог облика, величине и минералне асоцијације. Аутор истиче значај контактано-метаморфних и метасоматских процеса за формирање рудних тела у овом подручју, наглашавајући комплексност геолошких процеса који су довели до формирања лежишта Рудник.

Ово поглавље текста пружа информације о разумевању геолошке и металогенетске сложености лежишта Рудник, што је од суштинског значаја за схватање процеса стварања минерализације и развоја магматско-хидротермалног система чијом еволуцијом је лежиште настало.

Поглавље *Методологија* детаљно описује методологију и процес узорковања и лабораторијских испитивања, пружајући увид у организацију истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације.

Ово поглавље садржи следећа потпоглавља: Узорковање, Израда препарата, Оптичка испитивања, Испитивања флуидних инклузија и Минералошка и геохемијска испитивања сулфида.

Текст описује методологију узорковања и истраживања на лежишту Рудник кроз три теренске кампање током 2019., 2020. и 2021. године. Локације узорака јасно су приказане на Шематској карти (Слика 6) и документоване у Прилогу 1.

Аутор описује процес израде препарата за различите врсте испитивања: израду петрографских препарата за проучавање петрогених минерала, препарата за испитивање флуидних инклузија и препарата за проучавање рудних минерала. Корасти овог процеса су детаљно описани, а аутор такође наводи лабораторије и институције у којима су ови

препарати израђени, као и са којима је сарађивао током процеса израде.

У наставку текста детаљно су описане лабораторије, укључујући различите типове микроскопа и камере која је коришћена кроз петрографску анализу стена у пропуштеној светлости, преглед препарата за флуидне инклузије такође у пропуштеној светлости, као и рудну микроскопију у одбијеној светлости.

Аутор описује низ аналитичких техника које су коришћене у истраживању флуидних инклузија и микротекстуре кварца.

Представљени су параметри за микротермометријска мерења флуидних инклузија, извођење катодолуминисценције (SEM-CL) за испитивање микротекстурних карактеристика кварца, микро-Раман спектроскопију за идентификацију течних, чврстих и гасовитих фаза у флуидним инклузијама, као и крио-Раман спектроскопију за анализу присуства специфичних хидрата соли и еутектичког понашања флуида. Детаљно су описане лабораторијске методе, укључујући опрему и процесе калибрације. Напоменуто је и неколико софтверских алата коришћених за израчунавање за израчунавање салинитета, моларних запремина, притиска хомогенизације и изохора.

Аутор користи низ напредних техника за анализе минерала и њихових хемијских састава. Анализе скенирајућим електронским микроскопом (SEM) са енергетско-дисперзивном спектрометријом (EDS) извршене су ради провере хомогености и/или зонарности минерала, испитивања минералних фаза у облику инклузија и одређивања хемијског састава минерала. За мапирање елемената коришћена је електронска микроанализа (EPMA). За детаљнију анализу микроелемената, аутор је користио масену спектрометрију индуковане спрегнуте плазме применом ласерске аблације (LA-ICP-MS). Обрада мерења и евалуација одступања од стандарда извршени су коришћењем софтвера Iolite V3.1.

Следи поглавље *Резултати* у којем је приказан преглед резултата хемијских, минералолошких, геохемијских и микротермометријских анализа спроведених на узорцима из лежишта Рудник. Ово поглавље је богато илустровано графичким прилозима, табелама, микрофотографијама, графиконима и пратећим базама података. Добијени резултати су приказани у више потпоглавља; Минералолошка и парагенетска истраживања скарна, Испитивања флуидних инклузија, Минералолошка и парагенетска испитивања сулфидних минерала, Геохемија сулфида: LA-ICP-MS i EPMA анализе.

Акцент је на петрографским испитивањима скарна, као најчешћим носиоцима сулфидне минерализације. Такође се детаљно описује минерализација и текстура ових стена, као и њихове микроскопске карактеристике. Метакластити, који су такође присутни, описани су као стене са рекристализованим калцитом и присуством сулфидних минерала. Аутор даје детаљан опис минералних фаза, структуре стена и текстуре, користећи микроскопске анализе и геохемију главних минерала.

Микротекстурне карактеристике кварца су дефинисане и обухватају особине и структуре кристала кварца (облике кристала, њихову величину, дистрибуцију, као и присуство инклузија или нечистоћа унутар кристала). Петрографија флуидних инклузија, бавила се

проучавањем типова, облика, величине и састава инклузија које су заробљене унутар кристала. Примењена је Микро-Раман спектроскопија за анализу хемијског састава инклузија у кварцу, а ова техника је омогућила идентификацију саставних елемената присутних у инклузијама, као што су соли, гасови и друге хемијске супстанце. На пример, спектри добијени микро-Раман спектроскопијом показали су карактеристичне врхове који указују на присуство одређених гасова као што су CO₂, CH₄ или H₂S. Осим тога, идентификоване су и соли као што је NaCl или друге минералне компоненте. Микротермометрија флуидних инклузија у кварцу је техника коришћена проучавање температура при којима су ове инклузије формиране или су претрпеле промене у својим особинама.

Минералозна и парагенетска истраживања сулфидних минерала обухватила су анализу њихових минералозних својстава и међусобних односа унутар сулфидне минерализације лежишта Рудник. Ова истраживања пружају увид у састав, структуру и распоред сулфидних минерала. Кључни кораци у овим истраживањима укључују идентификацију сулфидних минерала, микроскопско испитивање њихове текстуре и распореда у стенама, као и одређивање њихових минералних асоцијација или парагенетских веза са другим присутним минералима.

LA-ICP-MS и EPMA су омогућиле прецизно мапирање дистрибуције микроелемената унутар пиротина, галенита, сфалерита, халкопирита и арсенопирита. Ова техника пружала је детаљне информације о саставу сулфидних минерала, укључујући присуство и дистрибуцију различитих елемената, што омогућава боље разумевање геохемијских процеса који су довели до формирања сулфидне минерализације.

Следи поглавље *Дискусија* које је и једно од најзначајних поглавља у дисертацији и представља оригинални научни допринос кандидата. Поглавље је организовано кроз следећа потпоглавља; Периоди развоја хидротермално-рудносног система, Еволуција флуида и услови образовања хидротермално-рудносног система, Концентрисање, дистрибуција и извор микроелемената у хидротермално-рудносног систему, Генетска разматрања, поређења садржаја микроелемената и карактеристика флуида са другим лежиштима и Модел формирања и развоја хидротермално-рудносног система.

Текст истражује минерализацију и парагенетске односе у лежишту Рудник, који се истиче скарновском минерализацијом Са-силиката и присуством сулфидних рудних минерала као што су сфалерит, галенит и халкопирит. Аутор анализира три различита периода (прерудни, синрудни и пострудни) формирања скарнова и руде како би разумео геохемијске процесе који су обликовали лежиште.

Поред периодизације формирања скарнова и руде, аутор анализира еволуцију хидротермалних флуида кроз дефинисане парагенетске периоде. Резултати анализе флуидних инклузија указују на вишефазну еволуцију хидротермално-рудносног система, са променама у температури, салинитету и саставу флуида током времена. Анализа флуидних инклузија пружа кључне информације о температури, салинитету и саставу хидротермалних флуида присутних током формирања лежишта Рудник. Ови подаци омогућавају боље разумевање геохемијских процеса и еволуције минерализације у овом

скарновском лежишту.

Детаљно су истражене геохемијске карактеристике главних сулфидних минерала, као и дистрибуција елемената у њима. Посебно су истакнути високи садржаји Cd, Ag и Mn, који су типични за скарновска лежишта. Осим тога, аутор анализира однос микроелемената у сулфидима, који пружа увид у процесе формирања минерала и геохемијске карактеристике лежишта. Ови резултати омогућавају боље разумевање генетског типа лежишта Рудник и користе се за идентификацију карактеристичних особина овог лежишта у поређењу са сличним скарновским системима широм света.

У *Закључку* дисертације кандидат Стефан Петровић сумира резултате својих проучавања лежишта Рудник и даје одговоре на више питања његове генезе, претходно постављених у виду главних циљева у уводу дисертације као што су утврђивање својстава хидротермалних рудоносних флуида и њихове улоге у стварању полиметаличног лежишта Рудник и утврђивање пратеће асоцијације рудних и микроелемената у рудним телима и рудоносним структурама лежишта Рудник, њихове дистрибуције, просторног размештаја, и значаја у тумачењу генетског модела лежишта.

5. ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС

Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација кандидата Стефана Петровић под насловом „*Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник*” представља оригинално дело које на савремен, научно заснован начин третира проблематику геолошко-металогенетских проучавања скарновских лежишта олова, цинка, бакра и сребра.

Спроведена теренска, лабораторијска и кабинетска истраживања се базирају на постојећим и значајним новоприкупљеним подацима о геолошкој грађи и минералшко-геохемијским карактеристикама лежишта Рудник. Током рада на докторској дисертацији кандидат је значајно допринео разумевању минералшких, петролошких и хидротермалних процеса који су довели до формирања овог лежишта. Поред тога, утврдио је различите стадијуме депоновања рудне минерализације, одредио њихов минерални састав и садржај микроелемената, чиме дисертација добија практичан значај у погледу могућности валоризације различитих рудних елемената.

Оцена способности кандидата за самостални рад

Израдом докторске дисертације кандидат Стефан Петровић је доказао да поседује зрелост научног истраживача и да је способан да се бави самосталним научним радом али и да учествује у раду научно-истраживачких тимова.

Остварени научни допринос

Научни допринос ове дисертације је остварен дефинисањем: периода развоја хидротермално-рудносног система, еволуције флуида и услова образовања хидротермално-рудносног система, механизма концентрисања и субституције микроелемената у сулфидима, дистрибуције и извора микроелемената, генетских разматрања, поређења садржаја микроелемената и карактеристика флуида са другим лежиштима као и предлогом модела формирања и развоја хидротермално-рудносног система.

Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и сагледавања постојећих решења из области докторске дисертације, закључујемо да су резултати истраживања приказани у дисертацији значајни и применљиви у пракси. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, закључујемо да је кандидат Стефан Петровић одговорио на сва релевантна питања и круцијалне проблеме на које је наишао током истраживања.

Значајан део остварених резултата се односи на анализу генетског модела лежишта Рудник. Проучавајући минерализацију, текст описује врсту и дистрибуцију минерала у лежишту. Проучавајући парагенетске односе, дефинишу се три периода формирања скарна и руде. Анализа еволуције хидротермалних флуида пружа увид у то како су хидротермални флуиди еволуирали током времена, укључујући мешање различитих флуида, обогаћивање система волатилним компонентама, хлађење флуида и утицај метеоритске воде. Детаљно се проучава температура формирања сулфидних минерала и скарна на основу микротермометријских мерења флуидних инклузија и анализе температура кристализације минерала. Анализира се и распрострањење микроелемената у различитим сулфидним минералима ради разумевања геохемијских процеса и индикација просторне еволуције хидротермалних флуида. Поред тога, истражује се и корелација између минералне парагенезе и флуидних инклузија како би се разумели различити фазе еволуције хидротермалних флуида, као и промене у условима температуре и салинитета. Кроз поређење са сличним скрновским лежиштима у свету, врши се анализа геохемијских карактеристика лежишта Рудник ради идентификације сличности и разлика у генетском пореклу и хемијским особинама. Ове анализе заједно пружају дубљи увид у геолошке процесе који су формирали лежиште Рудник, као и у његове геохемијске карактеристике.

Очекивана примена резултата у пракси

Резултати научних истраживања кандидата Стефана Петровића су високог степена применљивости. Њихова практична примена се огледа у стварању научно засноване подлоге за формирање и тумачење генетски сличних типова лежишта у домену Српско-македонске металогенетске провинције, у складу са савременим генетским разматрањима лежишта минералних сировина.

Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат Стефан Петровић је користио бројну литературу из области опште и историјске геологије, геотектонике, науке о лежиштима минералних сировина, генезе рудних лежишта, а нарочито генезе скарновских лежишта (242 позива на друге референце). Референтна литература је обухватила целокупно поље интересовања кандидата, односно најзначајније публикације које се односе на проблематику скарновских у свету и прецизно је приказана у поглављу *Литература*.

Најстарији публиковани подаци које је кандидат користио потичу из 1829. године, а најновији из 2023. године. Кандидат је такође користио и бројне студије, елаборате и пројекте истраживања лежишта Рудник уз дозволу надлежне компаније.

6. ОБЈАВЉЕНИ И САОПШТЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Резултати научних истраживања кандидата Стефана Петровића су високог степена применљивости. Њихова практична примена се огледа у могућој употреби података о дистрибуцији микроелемената добијених применом савремених минералošких, хемијских и геохемијских метода испитивања, као основу за доношење одлуке о њиховој потенцијалној економској валоризацији и дефинисању технолошких типова руде са аспекта главних, споредних и микроелемената као основе за развој нових и/или унапређење постојећих метода и техника прераде руде, односно њихово ефективније и ефикасније искоришћење.

Резултати научних истраживања кандидата Стефана Петровић су научно верификовани у више публикација националног и међународног значаја. Од посебног научног и практичног значаја за докторску дисертацију су следеће публикације:

М22 – Рад у часопису међународног значаја

Petrović, S., Bakker, R.J., Cvetković, V., Jelenković, R. (2024). Multiphase evolution of fluids in the Rudnik hydrothermal-skarn deposit (Serbia): new constraints from study of quartz-hosted fluid inclusions. *Miner Petrol* 118, 461–482, IF₂₀₂₂=1.8, <https://doi.org/10.1007/s00710-024-00860-7>

М51 – Врхунски часопис националног значаја:

Петровић, С., Батоћанин, Н. (2020). Алтерације перидотита контролисане карактером флуида на примеру харцбургита Рудника. Серпентинизација или таклизација? Записници Српског геолошког друштва (за 2019. годину), 15-26. ISSN: 0372–9966

М33 – Саопштења са међународних скупова штампана у изводу

Petrović, S., Bakker, R.J., Cvetković, V., Jelenković, R. (2023). Fluid inclusion study in quartz of the Rudnik Pb-Zn-Cu-Ag skarn deposit, Serbia. *Mineral Resources in a Changing World-17th SGA Biennial Meeting, Zurich, 28th August-1st September 2023.*, Society for Geology Applied to Mineral Deposits (2023)

M64 – Саопштења са националних скупова штампана у изводу

Petrović, S., Pačevski, A., Bertrandson Erlandson, V., Jelenković, R. (2022). Poreklo asocijације Ni, Ag i Sn minerala u polimetaličnom ležištu Rudnik. 18. Kongres geologa Srbije „Geologija rešava probleme”, Divčibare, 01-04 jun 2022., Srpsko geološko društvo (2022)

7. ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација кандидата Стефана Петровића под насловом „Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник” урађена је према одобреној пријави и представља оригинално научно дело посвећено систематском научном проучавању еволуције хидротермалног рудоносног система, асоцијације главних и микроелемената у оквиру различитих типова рудне минерализације и њиховог значаја у тумачењу генетског модела лежишта Рудник..

Према предмету обраде, примењеној методици истраживања и оствареним резултатима, докторска дисертација припада ужој научној области Економска геологија. Према оствареним резултатима истраживања, иста се може применити и као модел изучавања других сличних типова лежишта минералних сировина у Србији и у ширем региону.

Научни допринос овог истраживања је у разумевању процеса еволуције флуида у хидротермалном систему, што има потенцијалну примену у различитим рудним пројектима не само у Србији.

Кандидат је извршио обимно истраживање карактеристика хидротермалних рудоносних флуида, донесавши закључке који су значајни за тумачење процеса формирања руде и за развој генетских модела рудних лежишта. Његова анализа микроелемената у рудним минералима открива важне информације о концентрацијама ретких и племенитих метала, што је од великог значаја за прецизно разумевање економске вредности рудних лежишта.

Израдом докторске дисертације и оствареним резултатима истраживања чији је део приказан у два научна рада од чега је један публикован у часопису међународног значаја (категорија M22), кандидат је доказао да влада савременим методама проучавања и оцене минералних ресурса и да је способан да врши израду комплексних геолошких и аналитичких студија на различитим нивоима и стадијумима истраживања.

Тиме су се стекли услови за јавну одбрану докторске дисертације кандидата Стефана Петровића.

Предлог Комисије наставно-научном већу

На основу свега изложеног сматрамо да докторска дисертација кандидата Стефана Петровића, мастер геолога, „Еволуција хидротермалног рудоносног система полиметаличног лежишта Рудник” представља оригинално научно дело из уже научне области Економска геологија.

Предлажемо Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду да прихвати позитиван Извештај о урађеној докторској дисертацији, као и да кандидата Стефана Петровића, мастер геолога, позове на усмену одбрану пред Комисијом у истом саставу.

У Београду,
05.12.2024. године

Комисија за оцену докторске дисертације

Др Владимир Симић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет

Др Александар Пачевски, редовни професор,
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет

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