

ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА (ЗА 2023. ГОДИНУ)

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE

pour les années 2023

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY

for the year 2023

Beograd, 2024

Владимир Симић¹, Стефан Петровић¹, Филип Арнаут², Весна Цветков¹,
Милена Костовић¹, Драган Радуловић³, Јовица Стојановић³, Владимир
Јовановић³, Дејан Тодоровић³, Нина Николић⁴, Јелена Сенћански⁵,
Грозданка Богдановић⁶, Драгана Мариловић⁶

Vladimir Simić¹, Stefan Petrović¹, Filip Arnaut², Vesna Cvetkov¹, Milena
Kostović¹, Dragan Radulović³, Jovica Stojanović³, Vladimir Jovanović³,
Dejan Todorović³, Nina Nikolić⁴, Jelena Senćanski⁵, Grozdanka Bogdanović⁶,
Dragana Marilović⁶

КАРАКТЕРИЗАЦИЈА И ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПЦИ ЗА РЕЦИКЛАЖУ И ПОНОВНУ УПОТРЕБУ ФЛОТАЦИЈСКЕ ЈАЛОВИНЕ РУДНИКА „РУДНИК“ (REASONING)

CHARACTERISATION AND TECHNOLOGICAL PROCEDURES FOR RECYCLING AND REUSING OF THE RUDNIK MINE FLOTATION TAILINGS (REASONING)

ПРИКАЗ ПРОЈЕКТА – PROJECT PRESENTATION

Апстракт: Пројекат Карактеризација и технолошки поступци за рециклажу и поновну употребу флотацијске јаловине из рудника „Рудник“ (REASONING) је мултидисциплинарни истраживачки пројекат испитивања јаловине кроз геолошка, минералозна, геохемијска, геофизичка научна испитивања и развој одговарајућих технолошких метода за употребу јаловине у индустрији. REASONING се реализује кроз програм „Призма“ Фонда за науку Републике Србије и бави се испитивањем јаловине

¹ Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија;
University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia

² Универзитет у Београду - Институт за Физику, Београд, Србија
University of Belgrade, Institute of Physics, Belgrade, Serbia

³ Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, Србија
Institute for Technology of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Belgrade, Serbia

⁴ Универзитет у Београду - Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд, Србија
University of Belgrade, Institute for Multidisciplinary Research, Belgrade, Serbia

⁵ Универзитет у Београду - Институт за општу и физичку хемију, Београд, Србија
University of Belgrade, Institute of General and Physical Chemistry, Belgrade, Serbia

⁶ Универзитет у Београду - Технички факултет у Бору, Бор, Србија
University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Bor, Serbia

настале током вишедеценијске експлоатације и флотацијске прераде руде из рудника „Рудник“. Примарни циљеви пројекта су карактеризација, развој технолошких метода за ефикасно издвајање корисних метала и других елемената присутних у јаловини и оцена могућности коришћења јаловине као сировине. Истраживања ће се реализовати кроз радне пакете који ће имати за циљ: мерење и праћење промена физичко-хемијских услова дуж вертикалног профила тела јаловине, корелацију магнетне суспектибилности са садржајем тешких метала са дубином и дефинисање зона обогаћивања, утврђивање дистрибуције минералних асоцијација, варијација и трендова у саставу порних вода, тешких метала и пратећих елемената, истраживање дистрибуције стабилне минералне асоцијације и дистрибуције елемената кроз теоријско геохемијско моделовање, проналазак оптималне шеме за екстракцију елемената теоријским приступом, електрохемијско одвајање елемената из синтетичких и лужених раствора и технолошки поступак валоризације корисних компоненти. Пројектни тим чине истраживачи из геологије, минералне индустрије, технологије, хемије из шест домаћих и једне научноистраживачке институције из иностранства. Пројекат REASONING ће допринети проучавању дистрибуције елемената, поступцима екстракције и начину коришћења јаловине из јаловишта рудника „Рудник“ а резултати овог пројекта требало би да буду и стандард за будућа истраживања и комплексну валоризацију јаловине из бројних јаловишта у Србији.

Кључне речи: Призма, REASONING, Рудник, јаловина, Фонд за науку Републике Србије

Abstract: The project Characterization and technological procedures for recycling and reuse of flotation tailings from the "Rudnik" mine (REASONING) is a multidisciplinary research project of tailings examination through geological, mineralogical, geochemical, geophysical scientific investigations and the development of appropriate technological methods for the use of tailings in industry. REASONING, funded by the "PRIZM" program of the Science Fund of the Republic of Serbia, examines tailings formed during decades of exploitation and flotation processing of ore from the "Rudnik" mine. The primary objectives of the project are characterization, development of technological methods for efficient extraction of useful metals and other elements present in tailings and assessment of the possibility of using tailings as raw material. Research will be carried out through work packages that will aim to: measure and track changes in physical-chemical conditions in the tailing with depth, correlate magnetic susceptibility with heavy metals contents with depth and to define the enrichment zones, determine distribution of mineral associations, variations and trends in the composition of pore waters, heavy metals and accompanied elements in tailing with depth, investigate distribution of stable mineral association and elements distribution through theoretical geochemical modeling, investigate optimal pathway for elements extraction through theoretical approach, investigate the electrochemical separation of elements from synthetic and leached solutions, and investigate technological procedure for the valorization of useful components from the tailing material. The project team consists of researchers from geology, mineral industry, technology, chemistry from six domestic and one scientific research institution from abroad. The REASONING project will contribute to the study of the distribution of elements, extraction procedures and the way of using tailings from the "Rudnik" mine tailings, and the results of this project should be a standard for future research and complex valorization of tailings in Serbia.

Key words: Prizma, REASONING, Rudnik, tailings, Science Fund of the Republic of Serbia

УВОД

Пројекат „Карактеризација и технолошки поступци за рециклажу и поновну употребу флотацијске јаловине из рудника Рудник“ (REASONING) реализује се кроз програм „Призма“ Фонда за науку Републике Србије. Пројекат

REASONING представља мултидисциплинарни приступ проучавању флотацијске јаловине кроз геолошка, минералошка, геохемијска, геофизичка научна испитивања и развој технолошких метода у сврху оцене могуће употребе јаловине у индустрији на конкретном примеру јаловине рудника „Рудник“.

Флотацијска јаловина представља материјал различитог састава који настаје у процесу вађења корисних елемената из руде. Овај нуспродукт рударства се акумулира у јаловиштима која се због природе материјала и начина одлагања означавају као потенцијална опасност по животну средину. Прерадом полиметаличне руде, пре свега Pb и Zn, настала је бројна јаловишта, која су друга по значају врста отпада у рударској индустрији у Србији.

Флотацијско јаловиште настало прерадом полиметаличне руде Pb, Zn, Cu и Ag из рудника „Рудник“ једно је од најпознатијих јаловишта у Србији. Одлагање јаловине је почело након изградње постројења за припрему и прераду руде 1953. године, када је изграђена и прва брана јаловишта. Од почетка прераде полиметаличне руде до данас у јаловишту рудника „Рудник“ депоновано је >11 милиона тона, односно ~7 милиона m³ нуспроизвода флотацијске прераде. Флотацијска јаловина рудника „Рудник“ представља финозрнаст материјал (-0,40+0,00 мм) састављен углавном од алуминосиликатних минерала кварца и фелдспата (>60%), мањих количина минерала глине (5-10%), док остатак представљају минерали Pb, Cu, Zn, Fe са констатованим присуством тешких метала до 1%.

Примарни циљ пројекта REASONING је минералошко-геохемијска карактеризација јаловине, развој технолошких метода за ефикасно издвајање корисних метала и других елемената пронађених у флотацијској јаловини рудника „Рудник“ и оцена могућности коришћења преосталог дела јаловине као сировине за грађевинску индустрију. У сврху реализације овог циља спровешће се комплексна мултидисциплинарна истраживања кроз учешће истраживача из домаћих и страних научноистраживачких организација. Стечена знања и предложене методе биће основа за развој алтернативних еколошки прихватљивих метода екстракције корисних компоненти из јаловине и коришћења јаловине као минералне сировине.

ЦИЉЕВИ ПРОЈЕКТА И ИСТРАЖИВАЧКИ ТИМ

Циљеви истраживачког пројекта REASONING су:

Мерење и праћење промена физичко-хемијских услова дуж вертикалног профила тела јаловине. Мерења физичко-хемијских параметара порних флуида у јаловишту (pH, редокс потенцијал (ORP), температура, проводљивости, укупни растворени кисеоник, отпорност раствора).

Корелација магнетне суцептибилности са садржајем тешких метала са дубином и дефинисање зона обогаћивања. Одређивање магнетне суцептибилности ниског поља и планирање додатних минералошких и геохемијских истраживања у зонама магнетних аномалија које указује на високо обогаћење тешким металима.

Утврђивање дистрибуције минералних асоцијација, варијација и трендова у саставу порних вода, тешких метала и пратећих елемената у јаловини са дубином. Минералозна и геохемијска истраживања: комбинацијом инструменталних техника, оптичке микроскопије, електронске микроскопија (SEM/EDS), рендгенске дифракције (XRD), FTIR, RAMAN и ICP-OES спектроскопије. Одређивање дистрибуције секундарних минералних асоцијација по дубини биће упоређено са резултатима теоријског моделовања у циљу дефинисања зоне секундарног обогаћивања елемената.

Истраживање дистрибуције стабилне минералне асоцијације и дистрибуције елемената кроз теоријско геохемијско моделовање. Примена теоријског моделовања у сврху дефинисања врсте новонасталих минералних фаза и присуства стабилних минералних асоцијација. Планирана је употреба софтверских пакета PHREEQC и PhreePlot за теоријско геохемијско моделовање водених раствора, прорачун индекса zasiћености и конструисање Pourbaix дијаграма, одређивање поља стабилности јонских врста у воденим растворима који транспортују тешке метале и других елемената као и поља стабилности минералних и аморфних фаза

Установљавање оптималне шеме за екстракцију елемената теоријским приступом. Теоријско моделовање оптималног начина екстракције елемената из луженог раствора. Моделовање лужених раствора вршиће се у сврху екстракције фаза жељеног састава. Успостављени начини екстракције биће тестирани на синтетичким растворима путем електрохемијских експеримената да би се потврдила валидност резултата теоријског моделовања.

Електрохемијско одвајање елемената из синтетичких и лужених раствора. Електрохемијски експерименти на синтетичким растворима. Експеримент ће укључивати тестирање различитих комбинација материјала и облика електрода, одређивања услова за проналажење одговарајућих процедура за ефикасно одвајање и екстракцију елемената. Биће извршено и тестирање на стварним растворима излуженим из јаловине како би се показало да је утврђена процедура валидна.

Технолошки поступак валоризације корисних компоненти из јаловине. Поред електрохемијске екстракције, биће изведени алтернативни приступи за рекулерацију ПГЕ, црних и обојених метала како би се добио „чист” јаловински материјал пречишћен од глине, присутних токсичних црних и обојених метала у флотацијској јаловини. Циљ је да се произведу концентрати вредних метала, као и да се произведе чврсти остатак без тешких метала који се састоји од силикатних, алумо-силикатних и оксидних минерала који неће представљати опасност за животну средину и који се као такав може даље користити у грађевинарству и путној индустрији. Овај циљ ће се остварити у низу од три подактивности: 1. успостављање процедура валоризације ПГЕ, 2. успостављање процедура валоризације обојених метала које садрже одговарајући минерали и 3. верификација потенцијалне примене алумосиликатног јаловинског материјала за путну индустрију.

За реализацију предложених циљева пројекта формиран је тим истраживача из области геологије, минералне индустрије, технологије, хемије,

који поседују искуства и резултате претходних сличних истраживача. Истраживачки тим чине истраживачи из шест домаћих научно-истраживачких институција и једна из иностранства (Немачка) (Табела 1). Шеф истраживачког тима пројекат REASONING је Проф. Др Владимир Симић са Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду.

Табела 1. Истраживачки тим пројекта REASONING

Институције	Истраживачи
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет	Проф. Др Владимир Симић
	Проф. Др Весна Цветков
	Проф. Др Милена Костовић
	Стефан Петровић
Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина	Др Драган Радуловић
	Др Јовица Стојановић
	Др Владимир Јовановић
	Др Дејан Годоровић
Универзитет у Београду - Институт за мултидисциплинарна истраживања	Др Нина Николић
Универзитет у Београду - Институт за општу и физичку хемију	Др Јелена Сенћански
Универзитет у Београду - Технички факултет Бор	Проф. Др Грозданка Богдановић
	Драгана Мариловић
Универзитет у Београду - Институт за физику	Филип Арнаут
Универзитет RWTH Ахен, Немачка Факултет за георесурсе и инжењерство материјала	Др Срећко Стопић

РАДНИ ПАКЕТИ ПРОЈЕКТА

Минералозна и геохемијска карактеризација јаловине. Почетак реализације пројекта подразумева прикупљање узорака за геохемијска, геофизичка и минералозна испитивања из четири истражне бушотине дубине ~30 метара. Посебна пажња биће посвећена спровођењу мерења и анализа дефинисаних кроз циљеве 1-4, јер ће они дати основу за даља истраживања. Ово се посебно огледа у одређивању садржаја елемената и процени физичко-хемијских услова у јаловини, јер ће ти подаци бити коришћени за планирање корака током електрохемијске екстракције и избор одговарајућих мембрана. Физичко-хемијски параметри ће се мерити помоћу вишепараметарског инструмента и применом различитих анализа које ће пружити свеобухватно разумевање промена физичко-хемијских својстава на различитим дубинама јаловишта. Добијене информације су од значаја за одређивање стабилности минералних асоцијација, дистрибуције метала и других елемената. Истраживање ће допринети корелацији између магнетне суспектибилности и концентрације тешких метала, а мерења ће се фокусирати на интервале од 10 цм да би се идентификовала подручја обогаћивања у високој резолуцији. Подаци високе

резолюције добијени овим истраживањем пружиће информације за накнадне анализе (спроведене у нижој резолуцији), које се односе на обогаћене зоне. Претходно приказани подаци о физичко-хемијским параметрима, као и анализирани хемијски састав порозних течности, послужиће као улазни параметри за теоријско моделовање стабилних минералних асоцијација у нормалним условима.

Електрохемијско одвајање и екстракција елемената. Други пакет обухвата теоријско моделовање екстракције елемената из луженог раствора, као и тестирање електрохемијске сепарације и екстракције. Циљ теоријског моделовања елемената из излужених раствора је одређивање најефикаснијих метода за екстракцију ових елемената. Почетна фаза тестирања укључиваће преглед лабораторијски припремљених синтетичких раствора користећи методологију покушаја и грешака (*engl. Trial-and-test*). Процес електрохемијске сепарације и екстракције ће се спроводити на припремљеним растворима који садрже жељене елементе у облику сулфата (нпр. Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, Al, Cd, Ni) у односима одређеним из хемијских анализа порозних течности. Примарни циљ радног пакета је одредити најефикасније методе за сепарацију и екстракцију елемената.

Технолошка истраживања и поступци за валоризацију корисних компоненти из јаловине. Овај пакет се састоји од три одвојене подгрупе, свака фокусирана на специфичне процедуре везане за валоризацију ПГЕ и обојених метала, као и рециклирање и примену флотацијских јаловина у друмској индустрији. Узорци од 150 кг ће се прикупљати за процену ПГЕ и накнадне процесе магнетске сепарације, млевења, и лабораторијских тресућих столова. Поступци за процену валоризације обојених метала, вршиће се на узорцима тежине од 350 кг, укључују процес испирања који се спроводи под природним атмосферским климатским условима. Током експеримената, вршиће се праћење рН, сланости, температуре и концентрације елемената у раствору током времена. Процес одвајања минерала глине из ће се спроводити користећи сита. Десилтовани узорак ће проћи кроз магнетску сепарацију користећи различите параметре магнетних сепаратора. На крају, процедуре рециклирања и примене флотацијских јаловина у друмској индустрији ће проћи темељно физичко и механичко тестирање како би се утврдила њихова погодност за изградњу путева.

ЗАКЉУЧАК

Предложена методологија пројекта REASONING никада није примењена у изучавању флотацијске јаловине Србији. Нови концепт и приступ изучавању огледа се у примени најсавременијих аналитичких метода и дефинисању технолошких поступака рециклаже јаловине. Пројекат REASONING ће обезбедити сазнања о вертикалној и бочној дистрибуцији главних и микроелемената и пратећој геохемијској асоцијацији у флотацијској јаловини рудника „Рудник“ а добијени резултати биће основа за примену одговарајућих технолошких поступака прераде. Реализација пројеката ће имати позитиван утицај на научну заједницу, друштво, привреду, индустрију, образовање и животну средину. Резултат овог пројекта треба да оствари мултипликативни

ефекат коришћења јаловине на начин да се минимизирају сви негативни еколошки и социјални утицаји, а максимизирају позитивни утицаји у смислу односа индустрије, локалне заједнице и регионалног економског развоја. Предложена методологија и очекивани резултати пројекта REASONING требало би да буду стандард за будућа истраживања и комплексну валоризацију јаловине у Србији.

Захвалност

Истраживање спроведено уз подршку Фонда за науку Републике Србије, Пројекат 7522, Карактеризација и технолошки поступци за рециклажу и поновну употребу флотацијске јаловине рудника „Рудник“ - REASONING / This research was supported by the Science Fund of the Republic of Serbia, #Grant No 7522, Characterisation and technological procedures for recycling and reusing of the Rudnik mine flotation tailings – REASONING.