

JU ZAVOD ZA GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA CRNE GORE
GEOLOGICAL SURVEY OF MONTENEGRO

UDK: 55/56

ISSN 0435-4249

GEOLOŠKI GLASNIK

GEOLOGICAL BULLETIN

KNJIGA XVII BOOK

GEOLOŠKI GLASNIK	KNJIGA XVII	str. 273	PODGORICA, 2019
------------------	-------------	----------	-----------------

Uređivački odbor - Editorial Board

dr Marko Pajović, prof. dr Branislav Glavatović, prof. dr Milan Radulović, mr Vladan Dubljević, mr Momčilo Blagojević, mr Neda Dević, dr Darko Božović, dr Martin Đaković, dr Slobodan Radusinović

Glavni urednik - Chief Editor
dr Slobodan Radusinović

Tehnički urednici - Technical Editor
Dr Martin Đaković i Mr Neda Dević

Autori su naučno odgovorni za sadržaj svojih radova
The author are responsible for the content of their papers

*Adresa - Adress: Geološki glasnik, JU Zavod za geološka istraživanja,
Naselje Kruševac bb, 81 000 Podgorica, Crna Gora*

Grafičko uređenje - Graphical design
mr Marinko Račić

Štampa: Art Grafika, Podgorica
Tiraž: 500 primjeraka

Dragan S. Radulović¹, Ljubiša Andrić², Marija Marković³, Darko Božović⁴

MOGUĆNOST GRAVITACIJSKE KONCENTRACIJE BOGATE Pb-Zn RUDE IZ RUDNIKA „GROT“-KRIVA FEJA KOD VRANJA

Apstrakt:

U rudnom telu rudnika „Grot“-Kriva Feja kod Vranja, povremeno se pojavljuje ruda sa veoma visokim sadržajem minerala olova (Pb) i cinka (Zn). Iz ovakve rude je zbog visokog sadržaja metaličnih minerala 85-90 %, praktično nemoguće dobiti koncentrate K/Pb i K/Zn, postupkom flotacijske koncentracije, koji je osnovni definisani postupak dobijanja koncentrata u ovom rudniku. U radu je prikazano ispitivanje mogućnosti dobijanja koncentrata K/Pb i K/Zn postupkom gravitacijske koncentracije, sitnih klasa na klatnom stolu Wilfley. U radu su detaljno opisani način pripreme rude, eksperimentalni uslovi i sam postupak izvođenja opita gravitacijske koncentracije.

Ključne reči: bogata Pb-Zn ruda, gravitacijska koncentracija, klatni sto

POSSIBILITY OF GRAVITY CONCENTRATION OF RICH Pb-Zn ORE FROM “GROT” MINE – KRIVA FEJA NEAR VRANJE

Abstract:

In the ore body of the “Grot” mine - Kriva Feja near Vranje, occasionally appears an ore with a very high content of lead (Pb) and zinc (Zn) minerals. Due to the high content of metallic minerals of 85-90 %, it is practically impossible to obtain K/Pb and K/Zn concentrates from such an ore by the method of flotation concentration, which is the basic defined procedure for obtaining concentrates in this mine. The possibility of obtaining K/Pb and K/Zn concentrates by gravity concentration, of fine classes on a Wilfley shaking table, is given in the present paper. Detailed describes of the method of ore preparation, the experimental conditions and the procedure for performing the gravity concentration test is given.

Keywords: Pb-Zn rich ore, gravity concentration, shaking table

¹ Dr, viši naučni saradnik, ITNMS -Beogra, Srbija, d.radulovic@itnms.ac.rs

² Prof dr; naučni savetnik, ITNMS -Beograd, Srbija, lj.andric@itnms.ac.rs

³ Dipl. ing., istraživač saradnik, ITNMS -Beograd, Srbija, m.markovic@itnms.ac.rs

⁴ Dr, naučni saradnik, Zavod za geološka istraživanja Podgorica, bozovic.d@geozavod.co.me

UVOD

Svetska rudarska proizvodnja olova u 2016. godini je bila na nivou od 4,82 miliona tona, dok se procenjuje da se iz sekundarnih izvora dobija još između 6-7 miliona tona (u SAD-u oko 80% olova se dobija iz sekundarnih izvora, a u Evropi oko 60%). Rudarska proizvodnja cinka 2016. godine je bila na nivou od 12,7 miliona tona, dok se procenjuje da je iz sekundarnih izvora dobijeno još oko milion tona cinka (www.ilzsg.org.). Pojava bogatih ruda kod kojih je sadržaj metaličnih minerala zbirno na nivou od 85-90 %, nije česta ni kod nas ni u svetu (Ilić, 1978; Tućan, 1957; Babić, 2003; William, 2011).

Baš zbog niskog sadržaja obojenih metala u njihovim rudama širom sveta osmišljen je i patentiran postupak selektivne flotacije minerala obojenih metala (Bragg, 1923) kao postupak kojim je moguće iz siromašnih ruda dobiti koncentrate sa visokim sadržajem metala kako to zahteva metalurgija. Masovna eksploatacija rude (sa velikim kapacitetima prerade) i primena flotacijske koncentracije kao postupka pripreme, omogućili su dobijanje komercijalnih koncentrata obojenih metala iz relativno siromašnih ležišta (Pavlica i Drašković, 1996; Carr, 1994; Tagart, 1960; Lovell, 1976; Gaudin; 1957, Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b).

Međutim za rude sa povećanim sadržajem metaličnih minerala (zbirno od 85-90 % minerala Pb i Zn), nije moguće uspešno primeniti postupak flotiranja jer bi masa koju bi trebalo isflotirati trebala da bude na nivou od 90% (Manojlović-Gifing, 1969, 1989; Salatić, 1985; Čalić, 1990; Milošević, 1994; Vučinić and Radulović, 2016). U ovim uslovima (sa bogatom rudom) izvođenje uspešnog postupka flotacije nije moguća iz sledećih razloga:

- zbog velikog sadržaja i mase metaličnih minerala u ulaznoj rudi nije moguće isflotirati njihov najveći deo u zasebne koncentrate (odnosno nije moguće da se svi korisni minerali isflotiraju i da ćelija ostane „prazna“);
- zbog nemogućnosti separacije najvećeg dela korisnih minerala u koncentrate postupkom flotiranja, njihov veliki udeo odlazi u jalovinu i na taj način postupak pripreme postaje tehnološki i ekonomski neuspešan.

Postupak gravitacijske koncentracije kao jedan od najstarijih načina koncentracije koji se primenjuje prilikom procesa pripreme rude, koristi se kao dopuna postupaka flotacijske koncentracije. Naime kod veoma siromašnih Pb-Zn ruda ukoliko strukturno-teksturne osobine rude to dozvoljavaju, odnosno ako metalični minerali nisu intimno srasli sa mineralima jalovine, moguće je primeniti postupak gravitacijske pretkoncentracije da bi se odbacio deo krupno komadaste jalovine i smanjila količina rude koja odlazi u postupak mlevenja i flotiranja. Na ovaj način se povećava efikasnost postuka i smanjuju se svi troškovi pripreme rude (transporta i manipulacije sa rudom, mlevenja, potrošnja vode, utroška reagenasa itd.) (Pavlica i Drašković, 1996; Carr, 1994; Tagart, 1960; Lovell, 1976; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990).

Rudnik Pb-Zn „Grot“ - Kriva Feja, Vranje, bavi se eksploatacijom Pb-Zn rude, od 1974. godine. Tehnološka šema postupka pripreme i koncentracije rude je

osmišljena i definisana posle detaljnih ispitivanja obavljenih na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu i Rudarskom Institutu Zemun. Prema Glavnom Tehnološkom projektu koncentracija rude iz 1970. godine postrojenje za preradu je projektovano za sledeće polazne parametre:

- celokupno postrojenje za preradu Pb-Zn rude je projektovano za kapacitet od 300.000 t/god;
- sadržaja korisnih metala u obliku sulfida u ulaznoj rudi Pb + Zn je zbirno oko 10%;
- separacija sulfidnih minerala Pb i Zn u zasebne proizvode se izvodi postupkom flotacijske koncentracije;
- sadržaj vlage (vode) u ulaznoj rudi je od 3,5 %.

Tokom vremena eksploatacije koja traje duže od četrdeset godina polazni parametri rude su se dosta izmenili, pre svega polazna ruda koja se sada eksploatiše je sa daleko manjim sadržajem metaličnih minerala zbirno (Pb+Zn), oko i ispod 5 %. U rudi su prisutni, pored sulfidnih, i oksidni minerali Pb i Zn. Pored toga što je zbirni srednji sadržaj metala u ulaznoj rudi pao ispod 5 %, povremeno se u ležištu pojavljuje veoma bogata ruda, sa veoma visokim sadržajem metaličnih minerala. Pojava ovakve bogate rude sama po sebi predstavlja problem, jer tehnološki proces pripreme i prerade rude koji je definisan u pogonu za flotaciju „Grot“ nije prilagođen za ovakvu vrstu rude (Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018). Iz tih razloga više puta u pređašnjem periodu se dešavalo, da veći deo metala iz tako bogate rude završi u jalovini na jalovištu, odnosno ne izdvoji se u korisne proizvode - koncentrate koji odlaze u metalurgiju. Da bi se sagledale i procenile mogućnosti pripreme ovakve rude, predstavnici „Rudnika-Grot“ su u ITNMS dostavili uzorak mase 100 kg, na kome je obavljena fizičko-hemijska i mineraloška karakterizacija (Ilić, 1978; Milosavljević, 1985). Posle homogenizacije na polaznom uzorku određen je hemijski sastava rude, kao i mineraloški sastav pregledom pod mikroskopom i XRD analizom.

Tehnološkim ispitivanjima koja su prikazana u ovom radu ispitivana je mogućnost separacije bogate Pb-Zn rude postupkom gravitacijske koncentracije u zasebne proizvode koji su komercijalnog kvaliteta (Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018).

Postupkom pripreme rude treba da se dobiju koncentracije sledećih performansi (Pavlica i Drašković, 1996):

-K/Pb (koncentrat olova) treba da bude sa sadržajem Pb od 70%; Au i Ag plativo prema sadržaju u K/Pb; u K/Pb sadržaj Zn ne bi trebao da prelazi 6 %; sadržaj Bi u K/Pb do 2.000 g/t se penalizira preko se plaća; sadržaj Cu u K/Pb do 1,3 % se ne plaća preko se plaća umanjeno za 1,3 %; As i Sb su štetni sastojci u K/Pb i njihov pojedinačni max sadržaj je 0,3 %; max. sadržaj SiO₂ u K/Pb je do 5 %;

-K/Zn (koncentrat cinka) sa sadržajem Zn od 48 % (minimalno u K/Zn ne bi smeo sadržaj Zn da bude ispod 42%) dok se posebno bonifikuju koncentracije sa preko 50 % Zn; max. dozvoljeni sadržaj Fe u K/Zn može da bude do 13 %;

-prisustvo Cd u K/Zn je povoljno i plaća se preko 2.000 g/t; plemeniti

metali povećavaju vrednost K/Zn zahtev da ima preko 3g/t Au; As i Sb su štetni sastojci u K/Zn i njihov pojedinačni max sadržaj je 0,3 %; max. sadržaj SiO₂ u K/Zn je do 5%.

1. EKSPERIMENTALNI RAD

Iz polaznog uzorka „Grot 2-1“uzet je polazni reprezentativni uzorak za određivanje fizičko-hemijske i mineraloške karakterizacije.

1.1. FIZIČKO-HEMIJSKA KARAKTERIZACIJA UZORKA

Na polaznom uzorku iz koga je uzet reprezentativni uzorak rude je urađena hemijska, mineraloška analiza i određivanje granulostastava, polaznog uzorka. Takođe je urađena i XRD analiza polaznog uzorka rude da bi se utvrdilo u kom mineralnom obliku se nalaze rudni minerali i minerali jalovine.

1.1.1. Fizička karakterizacija uzorka

Fizičkom karakterizacijom uzorka određena je gruba vlaga u polaznom uzorku, granulometrijski sastav polaznog uzorka i XRD analiza.

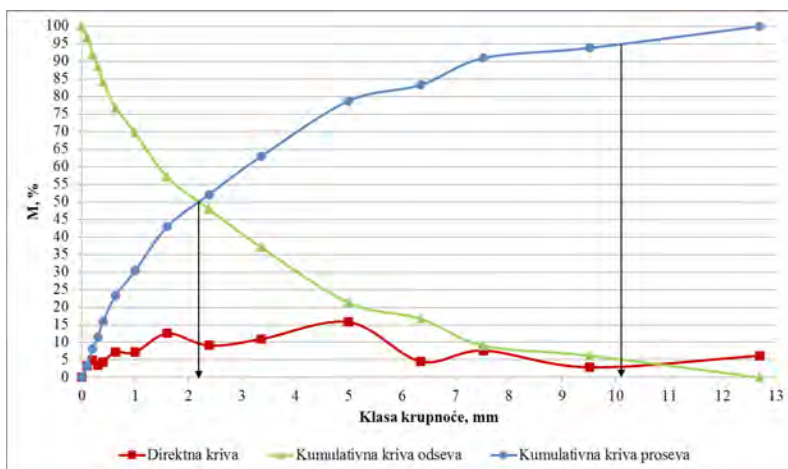
Određivanje grube vlage je obavljeno na dva uzorka sušenjem na sobnoj temperaturi u vremenu trajnja od 24 h. Sadržaj grube vlage koji je određen predstavlja srednju vrednost oba merenja i on je bio mali (W= 0,12%), odnosno celokupan uzorak Pb-Zn rude koji je dopremljen je praktično bio suv.

Tabela 1. Granulo-sastav uzorka polazne rude „Grot-2-1“

Klasa krupnoće, mm	M, %	↓∑ M, %	↑∑ M, %
+ 9,52	6,17	6,17	100,00
- 9,52 + 7,35	2,89	9,06	93,83
- 7,35 + 6,35	7,65	16,71	90,94
- 6,35 + 5,00	4,56	21,27	83,29
- 5,00 + 3,36	15,77	37,04	78,73
- 3,36 + 2,38	10,91	47,95	62,96
- 2,38 + 1,60	9,11	57,06	52,05
- 1,60 + 1,00	12,53	69,59	42,94
- 1,00 + 0,63	7,18	76,77	30,41
- 0,63 + 0,4	7,25	84,02	23,23
- 0,4 + 0,30	4,42	88,44	15,98
- 0,3 + 0,20	3,41	91,85	11,56
- 0,2 + 0,1	4,89	96,74	8,15
-0,1 + 0,00	3,26	100,00	3,26
Ulaz	100,00		

Određivan je granulometrijski sastav polaznog uzorka rude. Takođe je urađen i granulometrijski sastav usitnjenog uzorka rude posle usitnjavanja na krupnoću -2 mm na kome je posle prosejavanja izvršen mineraloški pregled na svakoj klasi krupnoće, radi provere stepena oslobođenosti minerala.

Granulometrijski sastav polaznog uzorka rude „Grot 2-1“ je određivan standardnim metodama prosejavnja na Tyler-ovoj seriji sita (Milosavljević, 1985). Svi otsevi sita zajedno sa prosevom poslednjeg sita su izmereni, podaci su sređeni i prikazani u obliku tabele 1. Na osnovu podataka iz tabela urađeni su dijagrami granulometrijskog sastava prikazani na slici 1.



Slika 1. Granulometrijski sastav polaznog uzorka rude „Grot 2-1“

Sa slike 1 se vidi da je srednji prečnik polaznog uzorka rude „Grot 2-1“ $d_{50}=2,189$ mm, dok je ggk odnosno $d_{95}=10,127$ mm.

1.1.2. Hemijska karakterizacija uzorka

Hemijskom analizom je određen hemijski sastav polaznog uzorka rude „Grot 2-1“ koji je trebalo da pokaže da li je uzorak rude drugačiji po svom hemijskom sastavu od sastava rude na osnovu koga je dato mišljenje o mogućnosti gravitacijske koncentracije rude uzorka „Grot 2“. Hemijski sastav uzorka rude „Grot 2-1“, na kome su obavljena laboratorijska ispitivanja i fizičko-hemijska karakterizacija, određen je i prikazan u tabeli 2. Hemijskom analizom određen je sadržaj Pb, Zn, Cu, Ag, kao glavnih korisnih elemenata i SiO₂ kao glavne komponente koja predstavlja minerale jalovine.

Tabela 2. Hemiski sastav polaznog uzorka rude „Grot 2-1“

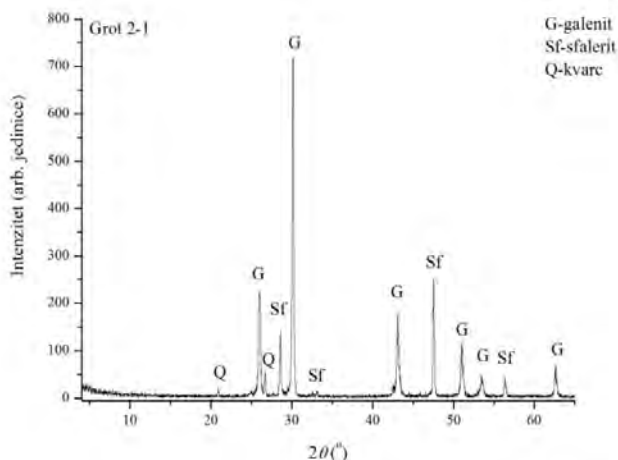
Komp., %	Pb	Zn	Cu	Ag	SiO ₂
% ili ppm	53,98	14,61	0,45	91 ppm	7,12

Hemijska analiza uzorka „Grot 2-1“ je pokazala da se ovaj uzorak značajno razlikuje od uzorka na kome je dato mišljenje o gravitacijskoj koncentraciji „Grot 2“. Naime uzorka „Grot 2-1“ je siromašniji u pogledu sadržaja Pb u odnosu na uzorak „Grot 2“ za preko 4% (sadržaj Pb u uzorku „Grot 2“ je 58,27 %, a uzorku „Grot 2-1“ 53,98%). Što se tiče sadržaja Zn situacija je slična, odnosno uzorka „Grot 2-1“ je siromašniji u pogledu sadržaja Zn u odnosu na uzorak „Grot 2“ za preko 0,6% (sadržaj Zn u uzorku „Grot 2“ je 15,24%, a uzorku „Grot 2-1“ 14,61%).

Što se tiče sadržaja Ag primetno je, da je sadržaj Ag u uzorku „Grot 2-1“ daleko veći nego u uzorku „Grot 2“ preko 60% (sadržaj Ag u uzorku „Grot 2“ je 57,31 g/t rude, a uzorku „Grot 2-1“ 91 g/t rude).

1.2. MINERALOŠKA ANALIZA

Mikroskopski pregled je pokazao da su glavni metalični minerali u uzorku galenit i sfalerit, a od minerala jalovine u najvećoj meri kvarc. Rendgenska (XRD) analiza uzorka prikazana na slici 2 je pokazala da su od najzastupljenijih minerala prisutni galenit, sfalerit i kvarc.



Slika 2. Difraktogram uzorka praha rude „Grot 2-1“

Poređenjem difraktograma uzorka rude „Grot 2-1“ (slika 2) sa difraktogramom uzorka „Grot-2“ se vidi prema veličini pikova da je sadržaj korisnih minerala (galenita i sfalerita) manji u uzorku „Grot 2-1“. Obrnuta situacija je vezana za minerale jalovine.

1.2.1. Mineraloški pregled sa osobinama pojedinih rudnih minerala

Mineraloški su ponovo pregledane sve klase krupnoće od -5,00 do 0,00 mm, prikazane u tabeli 1. I ovom analizom je potvrđeno da je u klasi krupnoće -2,38 + 1,6 mm došlo do oslobođenosti rudnih minerala od minerala jalovine u obimu od preko 80%. To znači da je ispod ove krupnoće moguće obaviti postupak gravitacijske pretkoncentracije na sitnim klasama (Pavlica i Drašković, 1996; Carr, 1994; Tagart, 1960; Lovell, 1976; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018).

U okviru ovog pregleda dat je prikaz fizičkih osobina minerala prisutnih u rudi „Grot“ koje su bitne za definisanje mogućnosti gravitacijske koncentracije.

Mineraloški Pb-Zn ruda „Grot 2-1“ se sastoji od:
glavni sulfidni rudni minerali:

- galenit (PbS) $\gamma = 7,2-7,6 \text{ g/cm}^3$
- sfalerit (ZnS) $\gamma = 3,9-4,1 \text{ g/cm}^3$ i
- halkopirit (CuFeS₂) $\gamma = 4,1 \text{ g/cm}^3$

a od minerala jalovine je prisutan:

- kvarc-SiO₂, $\gamma = 2,65 \text{ g/cm}^3$.

Mineraloško-hemijska racionalna analiza prisutnih metaličnih minerala u rudi „Grot 2-1“

galenit (PbS)	62,33%
sfalerit (ZnS)	22,81%
halkopirit (CuFeS ₂)	1,32%
Σ	86,46%

1.3. EKSPERIMENTALNI USLOVI ZA IZVOĐENJE OPITA

Da bi eksperimentalni postupak gravitacijske koncentracije na uzorku rude „Grot 2-1“ bio uspešan, sagledano je i usaglašeno nekoliko bitnih uslova i principa:

- Pre svih ispoštovani su svi teorijski principi, osnove i znanja iz oblasti gravitacijske koncentracije, a kao najvažnija iz segmenta gravitacijske koncentracije sitnih klasa (Pavlica i Drašković, 1996; Carr, 1994; Tagart, 1960; Lovell, 1976; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018).
- Sabrana su i analizirana sva iskustva iz prethodnih ispitivanja gravitacijske koncentracije i pretkoncentracije obavljene u ITNMS-u, na različitim rudama, a prvestveno na sličnim mineralnim sirovinama kao što je pre svih ruda fluorita iz ležišta „Ravnaja“-Krupanj koja sadrži značajne količine Pb-Zn minerala.
- Sagledane su sve mineraloške osobine rude pre svih njene strukturno teksturne osobine, stepen sraslosti odnosno oslobođenosti, kao i druge fizičke osobine koje su važne za gravitacijsku koncentraciju (William, 2011; Chang et al., 1996).

- Na osnovu mineralnog sastava i osobina pojedinih minerala usaglašeno je određivanje kriterijuma koncentracije na osnovu koga se izvode eksperimentalna ispitivanja (Tagart, 1960; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018).
- Izvršeno je određivanje ukupnog broja klasa krupnoće kao i njihov raspon na kojima se može izvoditi postupak gravitacijske koncentracije.
- Prema svim prethodno nabrojanim parametrima izvršen je izbor optimalnog uređaja za izvođenje eksperimentalnih ispitivanja postupka gravitacijske koncentracije rude „Grot 2-1“ (Tagart, 1960; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018).

1.3.1. Kriterijum koncentracije za izvođenje opita

Kriterijum koncentracije je parametar koji definiše mogućnost uspešnog izvođenja postupka gravitacijske koncentracije u vodi. Uspešno izvođenje postupka gravitacijske koncentracije, odnosno razdvajanja dva minerala u zasebne proizvode se može izvoditi ukoliko je kriterijum koncentracije veći od 1,5 ($\zeta > 1,5$) (Tagart, 1960; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018). Kako je u uzorku „Grot-2“ sadržaj metaličnih minerala bio 92,4% (odnosno sadržaj minerala jalovine nešto preko 7%), to se postupak separacije svodio na dobijanje dva proizvoda ΔT i ΔM , odnosno razdvajanje celokupne rude na dve frakcije od kojih Δ_T koncentrat galenita i ΔM koncentrat sfalerita. Međutim, kako uzorak rude „Grot 2-1“ ima „samo“ nešto preko 86% metaličnih minerala to se mora voditi računa i o mineralma jalovine odnosno mora se obaviti postupak gravitacijske koncentracije tako da se dobije Δ_L - frakcija u kojoj će po sadržaju preovlađivati minerali jalovine. Tako da se onda kriterijum koncentracije može određivati za dva mineralna sistema separacije:

1. Razdvajanje u mineralnom sistemu galenit-sfalerit kada se kriterijum koncentracije za gravitacijsku separaciju ova dva minerala u tankom sloju vode računa po formuli:

$$\zeta_1 = \frac{Y_{PbS} - Y_{H_2O}}{Y_{ZnS} - Y_{H_2O}} = \frac{6,5}{3,1} = 2,097 \approx 2,1 \quad (1)$$

2. Razdvajanje u mineralnom sistemu sfalerit-kvarc kada se kriterijum koncentracije za gravitacijsku separaciju ova dva minerala u tankom sloju vode računa po formuli:

$$\zeta_1 = \frac{Y_{ZnS} - Y_{H_2O}}{Y_{SiO_2} - Y_{H_2O}} = \frac{3,1}{1,65} = 1,879 \approx 1,9 \quad (2)$$

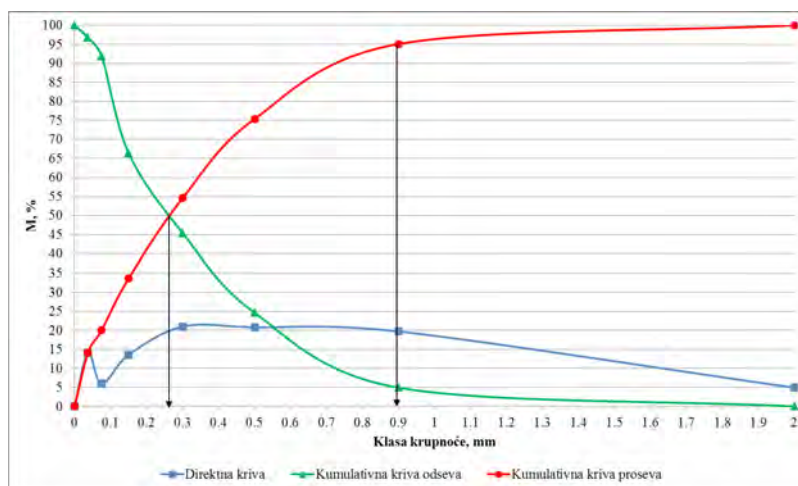
Kako su i jedan i drugi kriterijum koncentracije ($\zeta_1 = 2,1$ i $\zeta_2 = 1,9$) veći od teorijske vrednosti kriterijuma koncentracije $\zeta > 1,5$ potrebne za uspešno razdvajanje dva minerala, to se usvaja za izvođenje eksperimenta da kriterijum koncentracije bude 2.

1.3.2. Klase krupnoće za izvođenje opita gravitacijske koncentracije

Klase krupnoće na kojima se vrši postupak gravitacijske koncentracije određuju se na osnovu mineraloških osobina rude, strukturno-teksturnih osobina, stepena sraslosti odnosno oslobođenosti i kriterijuma koncentracije (William, 2011; Chang et al., 1996; Tagart, 1960; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018). Kako je pregledom pod mikroskopom utvrđeno da je ispod krupnoće -2,38 mm, u uzroku „Grot 2-1“ 80% minerala slobodno, to je odlučeno da se postupak gravitacijske koncentracije izvodi na sirovini usitnjenoj ispod 2 mm, odnosno -2 mm. Klase krupnoće za postupak gravitacijske koncentracije su isklasirane postupkom mokrog prosejavanja na sledećih 7 klasa krupnoće: -2 + 0,9 mm; -0,9 + 0,5 mm; -0,5 + 0,3 mm; -0,3 + 0,15 mm; -0,15 + 0,075 mm; -0,075 + 0,037 mm; -0,037 + 0,00 mm.

Posle mokrog prosejavanja uzorka rude „Grot 2-1“ na sedam klasa, određen je granulometrijski sastav uzorka rude „Grot 2-1“. Ovih sedam klasa krupnoće predstavljaju polazne uzorke za postupak gravitacijske koncentracije.

Granulometrijski sastav usitnjenog uzorka „Grot 2-1“ je određen tako što su svi otsevi sita zajedno sa prosevom poslednjeg sita izmereni, podaci su sređeni i prikazani u obliku tabeli 3. Na osnovu podataka iz tabela nacrtani su dijagrami granulometrijskog sastava prikazani na slici 3.



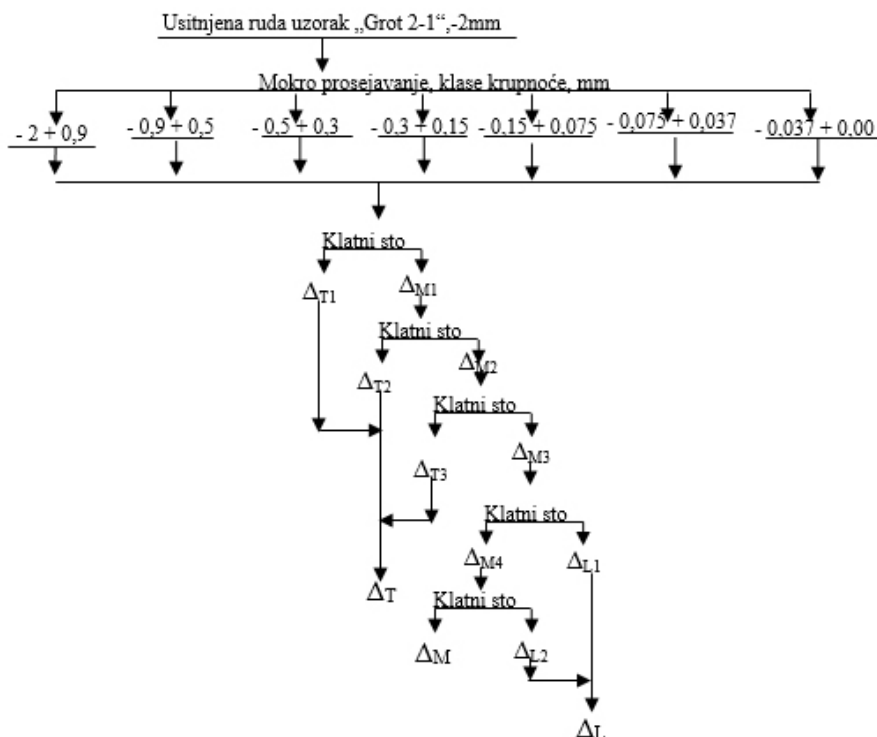
Slika 3. Granulometrijski sastav uzorka rude „Grot 2-1“ za gravitacijsku koncentraciju

Sa slike 3 se vidi da polazni usitnjeni uzorak rude „Grot 2-1“ za gravitacijsku koncentraciju ima srednji prečnik zrna $d_{50}=0,262$ mm, dok je ggk uzorka rude za gravitacijsku koncentraciju $d_{95}=0,898$ mm.

Tabela 3. Granulo-sastav uzorka rude „Grot-2-1“ za gravitacijsku koncentraciju

Klasa krupnoće, mm	M, %	↓Σ M, %	↑Σ M, %
- 2,0 + 0,90	4.92	4.92	100,00
- 0,90 + 0,50	19.7	24.62	95.08
- 0,50 + 0,30	20.79	45.41	75.38
- 0,30 + 0,15	20.97	66.38	54.59
- 0,15 + 0,075	13.56	91.85	33.62
- 0,075 + 0,037	5.95	96.74	20.06
- 0,037 + 0,00	14.11	100,00	14.11
Ulaz	100,00		

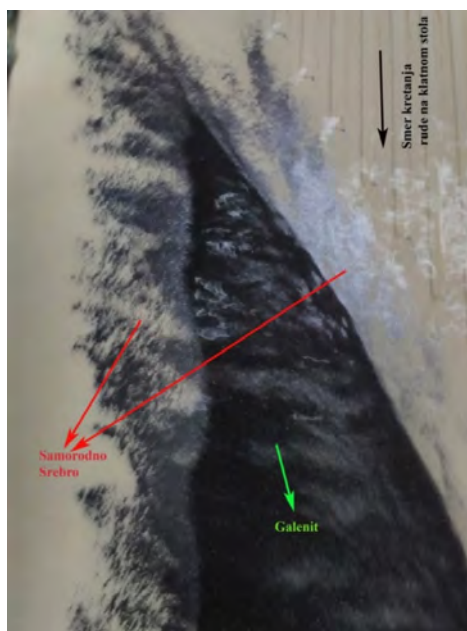
Iz tabele 3 se vidi da iako je uzorak usitnjavan na krupnoću - 2 mm, veliki je udeo najsitnije klase - 0,037 + 0,00 mm, zbog velikog sadržaja galenita u rudi koji je i najmekši mineral u ovoj paragenezi i najlakše se usitnjava i prelazi u najsitnije klase o čemu se mora voditi računa.



Slika 4. Pisana šema pripreme i separacije Pb-Zn rude uzorak „Grot 2-1“, postupkom gravitacijske koncentracije

1.3.3. Izbor uređaja za izvođenje ispitivanja gravitacijske koncentracije

Odlučeno je da se gravitacijska koncentracija pojedinačnih klasa krupnoće obavi na klatnom stolu Wilfley 13. Wilfley klatni stolovi su se pokazali u eksploataciji kao veoma dobri uređaji za gravitacijsku koncentraciju sitnih klasa u tankom sloju vode (Tagart, 1960; Gaudin, 1957; Lešić i Marković, 1968; Weis, 1985a,b; Čalić, 1990; Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018). Iz iskustva i na osnovu teorijskih principa je odlučeno da se postupak gravitacijske koncentracije obavi tako da se definitivni proizvodi (Δ_T , Δ_M , Δ_L) dobijaju posle trostrukog prečišćavanja (Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018). Pisana šema pripreme uzoraka i načina izvođenja opita data je na slici 4.



Slika 5. Prikaz trake galenite i samorodnog srebra na klatnom stolu (Radulović i Andrić, 2017; Radulović, 2018)

Prilikom izvođenja postupka gravitacijske koncentracije, uočeno je da se od klase - 0,9 + 0,5 mm, pa zatim i u svim sledećim klasama, na klatnom stolu pojavljuje traka minerala iznad trake galenita (minerali sa većom specifičnom masom od specifične mase galenita). Pošto je prema mineralnom sastavu samo samorodno srebro sa većom specifičnom masom od galenita odnosno $\gamma_{\text{pbS}} = 7,2 - 7,6 \text{ g/cm}^3$, dok je $\gamma_{\text{Ag}} = 10,5 \text{ g/cm}^3$, to smo zaključili da ova traka mineral pripada samorodnom srebru. Prisustvo ove trake i u svim ostalim finijim klasama krupnoće, govori da bi se ovaj proizvod mogao izdvojiti na klatnom stolu kao definitivni. Mineraloški je potvrđeno da su dimenzije jedinične ćelije galenita u uzorku rude “Grot 2-1”, skoro po veličini i zapremini identične sa teorijskim dimenzijama jedinične ćelije.

U slučaju kada se atom srebra nalazi u kristalnoj rešetki galenita, dimenzije jedinične ćelije su manje od teorijskih vrednosti za čist galenit. Činjenica da je galenit u uzorku rude "Grot 2-1" isti kao teorijski čist galenit, nam govori da je srebro slobodno i van rešetke galenita, odnosno da je samородno. Izgled srebrene trake na klatnom stolu prikazan je na slici 5.

Svi proizvodi dobijeni u postupku gravitacijske koncentracije su osušeni, izmerene su im mase i dati su uzorci na hemijsku analizu. Posle dobijenih rezultata hemijske analize, formiran je tovarni bilans u kome su prikazani sadržaji i iskorišćenja za sve dobijene proizvode. Tovarni bilans je prikazan u tabeli 4.

ZAKLJUČAK DOBIJENIH REZULTATA GRAVITACIJSKE KONCENTRACIJE

Mineraloške osobine samog uzorka, strukturno teksturne karakteristike kao i stepen sraslosti odnosno oslobođenosti minerala, kao i visok sadržaj metaličnih minerala u uzorku „Grot 2-1“ su u velikoj meri odredili način izvođenja postupka gravitacijske koncentracije. Ruda za postupak gravitacijske koncentracije je trebalo da bude usitnjena na optimalnu krupnoću - 2,00 mm. Visok sadržaja galenita u uzorku, maseno preko 62 % (kao najmekšeg minerala u rudnoj paragenezi), uslovio je da usitnjavanjem uzorka na krupnoću - 2 mm, sadržaja klase - 0,037 + 0,00 mm u usitnjenom uzorku bude preko 14 %. O činjenici, da je galenit najmekši mineral i da stoga zbog visokog sadržaja u rudi, vrlo lako prelazi u najsitnije klase, treba stalno voditi računa.

Iz dobijenih rezultata prikazanih u tabeli 4 može se uočiti da je došlo do uspešne separacije pojedinih minerala u zasebne proizvode po klasama krupnoće koje su određene po kriterijumu koncentracije. Ova činjenica pokazuje da su usvojeni parametri gravitacijske koncentracije dobro odabrani i primenjeni tokom eksperimentalnih ispitivanja.

Što se tiče pojedinih proizvoda, iz tabele 4 se vidi da su rezultati vezani za odvajanje minerala Pb - galenita u koncentrat galenita (Δ_T frakciji) i srebra u koncentratu galenita (Δ_T frakciji) i koncentratu sfalerita (Δ_M frakciji) izuzetno dobri. Što se tiče kvaliteta koncentrata galenita (Δ_T frakcije) i sfalerita (Δ_M frakcije) može se reći da su dobijeni proizvodi tržišnog kvaliteta. Naime, sadržaj Pb u Δ_T frakciji se kreće od 75,26 % do 83,74 % odnosno zbirno za celu frakciju 78,49 % Pb. Sadržaj Zn u koncentratu galenita se kreće od 1,31 do 6,53 %, zbirno u odnosu na celu Δ_T frakciju sadržaj Zn je 4,21 %. Sve ovo govori da je komercijalni koncentrat galenita dobijen uspešnom separacijom od ostalih minerala, sa visokim kvalitetom i iskorišćenjem.

Tabela 4. Bilans Gravitacijske koncentracije rude Grot uzorak 2-1

Klasa krupnoće, mm	Proizvodi	M, %	Pb, %	Zn, %	Ag, g/t	IPb, %	IZn, %	IAg, %
-2 + 0,9	ΔT	2,93	75,26	5,87	165,80	4,06	1,32	4,81
	ΔM	1,29	17,48	43,37	88,69	0,42	4,28	1,13
	ΔL	0,70	6,72	18,28	15,79	0,08	0,98	0,11
	U odnosu na ulaz	4,92	50,36	17,47	124,24	4,56	6,58	6,05
-0,9 + 0,5	ΔT	11,87	79,41	3,39	176,65	17,36	3,08	20,75
	ΔM	5,58	12,94	47,28	54,83	1,33	20,21	3,03
	ΔL	2,25	2,06	7,32	10,02	0,09	1,26	0,22
	U odnosu na ulaz	19,70	51,75	16,27	123,11	18,78	24,55	24,00
-0,5+0,3	ΔT	14,95	75,49	6,53	129,60	20,79	7,48	19,17
	ΔM	4,21	6,89	49,90	34,93	0,53	16,09	1,46
	ΔL	1,63	1,69	7,98	11,04	0,05	1,00	0,18
	U odnosu na ulaz	20,79	55,81	15,43	101,13	21,37	24,57	20,81
-0,3+0,15	ΔT	15,92	76,44	5,22	121,41	22,42	6,36	19,13
	ΔM	3,71	6,43	41,55	31,88	0,44	11,80	1,17
	ΔL	1,34	1,12	5,29	14,98	0,03	0,54	0,20
	U odnosu na ulaz	20,97	59,24	11,65	98,77	22,89	18,70	20,50
-0,15+0,075	ΔT	10,07	83,74	1,31	122,57	15,53	1,01	12,21
	ΔM	2,50	6,88	48,05	23,92	0,32	9,20	0,59
	ΔL	0,99	1,53	11,76	4,97	0,03	0,89	0,05
	U odnosu na ulaz	13,56	63,57	10,69	95,80	15,88	11,10	12,85
-0,075+0,037	ΔT	3,98	83,05	1,70	134,21	6,09	0,52	5,29
	ΔM	1,31	11,27	38,54	40,93	0,27	3,87	0,53
	ΔL	0,66	2,15	18,57	12,07	0,03	0,94	0,08
	U odnosu na ulaz	5,95	58,27	11,68	100,12	6,39	5,33	5,90
-0,037+0,00	ΔT	3,11	80,39	2,09	139,81	4,60	0,50	4,30
	ΔM	5,80	49,78	11,37	94,80	5,32	5,05	5,44
	ΔL+Mulj	5,20	2,09	9,10	2,97	0,20	3,62	0,15
	U odnosu na ulaz	14,11	38,95	8,49	70,88	10,12	9,17	9,89
	ΣΔT	62,83	78,49	4,21	137,77	90,87	20,27	85,66
	ΣΔM -2,0+0,037	18,60	9,65	45,95	42,96	3,31	65,45	7,91
	ΔM- 0,037+0,00	5,80	49,78	11,37	94,80	5,32	5,05	5,44
	ΣΔL+Mulj	12,77	2,14	9,19	7,83	0,50	9,23	0,99
Ulaz		100,00	54,28	13,06	101,05	100,00	100,00	100,00

Sadržaj sfalerita u Δ_M frakciji se kreće od 38,54 do 49,90 %, odnosno zbirno 45,95 % Zn. Koncentrat galenita je uspešno dobijen u svim klasama krupnoće osim u najsitnijoj ($- 0,037 + 0,00$ mm), tako koncentrat sfalerita Δ_M frakcija, nije odgovarajućeg kvaliteta u klasi $- 0,037 + 0,00$ mm, i Δ_M frakcija ove klase se ne može spojiti sa Δ_M frakcijom ostalih klasa. Sadržaj Pb u koncentratu sfalerita (Δ_M frakciji) se kreće od 6,43 do 17,48 %, odnosno zbirno na celu Δ_M frakciju, koja predstavlja definitivni koncentrat sfalerita, sadržaj Pb je 9,65 %.

Što se tiče iskorišćenja u postupku gravitacijske koncentracije sitnih klasa u tankom sloju vode na klatnom stolu, Pb u koncentratu galenita (Δ_T frakciji) iznosi zbirno 90,87 %, dok je iskorišćenje srebra u Δ_T i Δ_M frakciji zbirno oko 93,57 %. Iskorišćenje sfalerita je unekoliko lošije nego kod galenita i srebra. Zbog visokog masenog učešća galenita u rudi i samim tim visokog masenog učešća koncentrata galenita u ulaznoj rudi od 62,83 %, i pored niskog sadržaja Zn u koncentratu galenita (4,21 %), iskorišćenje Zn u koncentratu Pb je preko 20 %. I pored visokog sadržaja Pb u koncentratu sfalerita od 9,65 %, iskorišćenje Pb u koncentratu sfalerita je relativno nisko 3,31 %, zbog malog masenog učešća koncentrata sfalerita u ulazu. Što se tiče Δ_L frakcije koja je trebala da predstavlja jalovinu postupka gravitacijske koncentracije na klatnom stolu ona je maseno relativno mala i iznosi 12,77 % zajedno sa muljem.

Sadržaj Pb u ovom proizvodu se kreće od 1,12 do 6,72 % u zavisnosti od klase krupnoće, dok je u celokupnom proizvodu (Δ_L frakciji) sadržaj olova 2,14 %. Zbog toga je i gubitak Pb u ovom proizvodu nizak i kreće se na nivou od 0,5%. Sadržaj srebra u jalovini (Δ_L frakciji) se kreće od 2,97 g/t u najsitnijoj klasi do 15,79 g/t u najkrupnijoj klasi. Pošto je srebro kao najteže uglavnom prešlo u Δ_T i Δ_M frakciju to je gubitak ovog metala u Δ_L frakciji 0,99 %.

Sadržaj Zn u Δ_L frakciji se kreće od 5,29 % do preko 18 % u najkrupnijoj klasi i u klasi krupnoće $-0,075 + 0,037$ mm. Sadržaj Zn u Δ_L frakciji u svim klasama krupnoće iznosi 9,19 %. Gubitak sfalerita u ovom proizvodu (Δ_L frakciji) za sve klase krupnoće stoga iznosi 9,23 %.

Kako je sadržaj svih metala u ovom proizvodu (Δ_L frakciji) značajan to bi trebalo ovaj proizvod posle gravitacijske koncentracije spojiti sa usitnjenom siromašnom rudom (koja sadrži zbirno Pb + Zn oko 5%) rudnika „Grot“ na ulazu u postupak flotacijske koncentracije. Na ovaj način bi se dodatno valorizovala ova bogata ruda i smanjio bi se gubitak korisnih minerala u jalovini postupka gravitacijske koncentracije.

Kako su dobijeni rezultati zadovoljavajući, osim unekoliko vezano za koncentrat Zn, to se može obaviti dodatno ispitivanje, sa većim brojem prečišćavanja koje bi sigurno dovele do boljeg kvaliteta koncentrata i povećanog iskorišćenja Zn u njemu.

Takođe pojava samorodnog srebra u klasama krupnoće ispod $- 0,9$ mm, navodi na zaključak da bi bilo moguće dobiti još jedan definitivni proizvod, koncentracijom na klatnom stolu. Samorodno srebro dobijeno na ovaj način bi bilo sa visokim kvalitetom i cenom na tržištu plemenitih metala.

SUMMARY

The mineralogical properties of the sample, the structural and textural characteristics, as well as the degree of maturity and release of minerals, as well as the high content of metallic minerals in the sample “Grot 2-1”, have largely determined the method of performing the gravitational concentration process. The ore for the gravity concentration process was to be grinded to an optimum size of - 2.00 mm. Obtained results show that there was a successful separation of individual minerals into separate products by size classes, which were determined according to the concentration criterion. Concerning the individual products, it can be seen that the results related to the separation of Pb - galena minerals into galena concentrate (Δ_T fraction) and silver in galena concentrate (Δ_T fraction) and sphalerite concentrate (Δ_M fraction) are extremely good. Regarding the quality of the galena (Δ_T fraction) and sphalerite (Δ_M fraction) concentrate, it can be said that the products obtained are of market quality. Specifically, the content of Pb in the Δ_T fraction ranges from 75.26% to 83.74%, or cumulatively for the whole fraction 78.49% Pb. The content of Zn of the galena concentrate ranges from 1.31 to 6.53%, summing over the whole ΔT fraction, the content is 4.21%. The content of sphalerite in the ΔM fraction ranged from 38.54 to 49.90%, or a total of 45.95% Zn. The content of Pb in the sphalerite concentrate (Δ_M fraction) ranges from 6.43 to 17.48%, that is, cumulatively to the whole Δ_M fraction in sphalerite concentrate, the Pb content being 9.65%. Regarding the utilization in the process of gravity concentration of small classes in a thin layer of water on a pendulum table, Pb in the galena concentrate (Δ_T fraction) is 90.87%, while the silver yield in Δ_T and Δ_M fraction is approximately 93.57%. The utilization of sphalerite is somewhat worse than for galena and silver. Due to the high mass content of galena in the ore and, consequently, the high mass fraction of galena concentrate in the ore inlet of 62.83%, despite the low Zn content of galena concentrate (4.21%), the Zn utilization in concentrate of Pb is over 20%. Despite the high Pb content in the sphalerite concentrate of 9.65%, the Pb yield in the sphalerite concentrate is relatively low at 3.31%, due to the low mass fraction of sphalerite concentrate in the inlet.

As for the Δ_L fraction that was supposed to represent the tailings of the gravity concentration process on the pendulum table, it is relatively small in mass and is 12.77 % along with the mud. The content of Pb in this product ranges from 1.12 to 6.72% depending on the size class, while in the whole product (Δ_L fraction) the lead content is 2.14%. Therefore, the loss of Pb in this product is low and ranges at 0.5%. The content of silver in tailings (Δ_L fraction) ranges from 2.97 g/t in the smallest class to 15.79 g/t in the largest class. As silver, being the heaviest, mainly passed into the Δ_T and Δ_M fraction, the loss of this metal in the Δ_L fraction is 0.99%. The Zn content in the Δ_L fraction ranges from 5.29 % to over 18 % in the largest class and in the size class of -0.075 + 0.037 mm. The Zn content of the ΔL fraction in all size classes is 9.19%. The loss of sphalerite in this product (ΔL fraction) for all size classes is therefore 9.23%.

LITERATURA

- Babić, D., 2003: *Mineralogija*. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 432 pp.
- Bragg, G.A., 1923: Selective flotation of minerals. Bureau of US patents No 1478697 A.
- Carr, D.D., (Ed.), 1994: *Industrial minerals and rocks, 6th edition*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1196 pp.
- Chang. L.L.Y., Howie. R.A. and Zussman. J., 1996: *Rock-forming minerals, (2nd edition)*, v. 5B, non-silicates, Geological Society of London Harlow: Longman, 383 pp.
- Čalić, N., 1990: *Teorijski osnovi pripreme mineralnih sirovina*. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 496 pp.
- Gaudin, A.M., 1957: Flotation, McGraw Hill Book Co, 573 pp.
- Ilić, M., 1978: *Specijalna mineralogija, II deo*. Izdavačko-informativni centar studenata, Beograd, 184 pp.
- Ilić, M. i Karamata, S., 1978: *Specijalna mineralogija, I deo*. Izdavačko-informativni centar studenata, Beograd, 154 pp.
- Lešić, Đ. i Marković, S., 1968: *Priprema mineralnih sirovina*. Građevinska knjiga, Beograd, 471 pp.
- Lovell V.M., In: *Fuerstenau, M.C. (Ed.), Flotation A.M. Gaudin Memorial volume*, AIME, 1976, New York, 621 pp.
- Manojlović-Gifing, M., 1969: *Teorijske osnove flotiranja*, Rudarski Institut, Beograd, 106 pp.
- Manojlović-Gifing, M., 1989: *Faze flotacijske pulpe*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 179 pp.
- Milosavljević, R., 1985: *Metode ispitivanja mineralnih sirovina u pripremi mineralnih sirovina*, Rudarsko-geološki fakultet Beograd, 152 pp.
- Milošević, S., 1994: *Flotacijska koncentracija*. Tehnički fakultet Bor, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 211 pp.
- Pavlica, J. i Draškić, D., 1996: *Industrijska primena pripreme mineralnih sirovina*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 299 pp.
- Pavlica J. i Draškić D., 1997: *Priprema nemetaličnih mineralnih sirovina*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
- Pokhrel, L.R. and Dubey, B., 2013: *Global scenarios of metal mining, environmental repercussions, public policies, and sustainability: A review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 43, p.1-37.
- Radulović, D. S., Andrić, Lj., Terzić, A., Petrov, M., Stojanović, J., Trumić, Mi. i Trumić, Ma., 2018: *Tehničko-tehnološko rešenje M-84 „Novo tehničko rešenje–Dobijanje koncentrata K/Pb i K/Zn tržišnog kvaliteta postupkom gravitacijske koncentracije bogate rude sa povećanim sadržajem metaličnih minerala iz “Pb-Zn” Rudnika Grot“*. Godina prihvatanja TR od strane MNO, 45 pp.
- Radulović, D. S. i Andrić, Lj., 2017: *Studija tehnoloških ispitivanja mogućnosti gravitacijske koncentracije bogate “Pb-Zn” rude iz Rudnika Grot (Uzorak “Grot 2-1”)*, Arhiva ITNMS, 30 pp.

- Salatić, D., 1985: *Flotacijski reagensi*, Prvi deo. Beograd.
- Tagart, A.F., 1960: *Handbook of mineral dressing-ores and industrial minerals*. Seventh Printing, John Wiley & Sons, New York, 1915 pp.
- Tučan, F., 1957: *Specijalna mineralogija*. Školska knjiga, Zagreb, 579 pp.
- Vučinić, D.R. and Radulović, D.S., 2016: *Stability of lead ethyl xanthate on galena surface*. Editors: Željko Čupić and Slobodan Anić, PHYSICAL CHEMISTRY: 13th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Proceedings Volume 2, Published by: Society of Physical Chemists of Serbia, Belgrade September 26-30, Serbia, L-01-P, pp. 749-752.
- Weis, H. L., 1985a: *SME Mineral procesing Handbook*, Volume 1.
- Weis, H. L., 1985b: *SME Mineral procesing Handbook*, Volume 2.
- William ,W.D., 2011: *Introduction to Mineralogy, 2nd Edition*. Oxford University Press.Inc., New York, 496 pp.
- <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx>