



19. КОНГРЕС ГЕОЛОГА СРБИЈЕ
ГЕОЛОГИЈОМ ДО ОДРЖИВИХ РЕШЕЊА
Борско језеро 3-6 јун 2026.



REASONING

Characterisation and technological procedures for recycling and reusing of the Rudnik mine flotation tailings.



ПРИЗМА



Фонд за науку
Републике Србије

PRIMENA MAGNETNE SUSCEPTIBILNOSTI U KARAKTERIZACIJI FLOTACIJSKE JALOVINE RUDNIKA „RUDNIK“

Vesna Cvetkov, Filip Arnaut, Stefan Petrović, Dragana Životić,
Vladimir Simić*



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ | БЕОГРАД
ИНСТИТУТ ОД НАЦИОНАЛНОГ
ЗНАЧАЈА ЗА РЕПУБЛИКУ СРБИЈУ



Ovo istraživanje finansirao je Fond za nauku Republike Srbije, GRANT 7522 – REASONING i
Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije br. 451-03-34/2026-03/200126



GEOLOGIJA I ODRŽIVA BUDUĆNOST

Metodološki iskorak

- **Merenje MS za:** preliminarno skeniranje flotacijske jalovine rudnika „Rudnik“, u cilju detektovanja zona sa povišenim sadržajem teških metala - projekat **REASONING (PRIZMA, Fond za nauku)**

Koncept magnetne susceptibilnosti (MS)

- **Šta merimo:** magnetni odgovor materijala na spoljašnje magnetno polje - zavisi od vrste, koncentracije i veličine zrna minerala
- **Magnetni minerali (MM):** Fe-oksidi (magnetit, hematit) i Fe-sulfid / hidroksid (monoklinični pirotin, gregit / getit)

Prednosti merenja MS

- **Osetljiva:** detekcija koncentracije $MM < 1\%$
- **Brza:** jednostavno uzorkovanje, priprema i merenje uzoraka
- **Nedestruktivna:** nepromenjen uzorak
- **Ekonomična:** ušteda vremena i budžeta

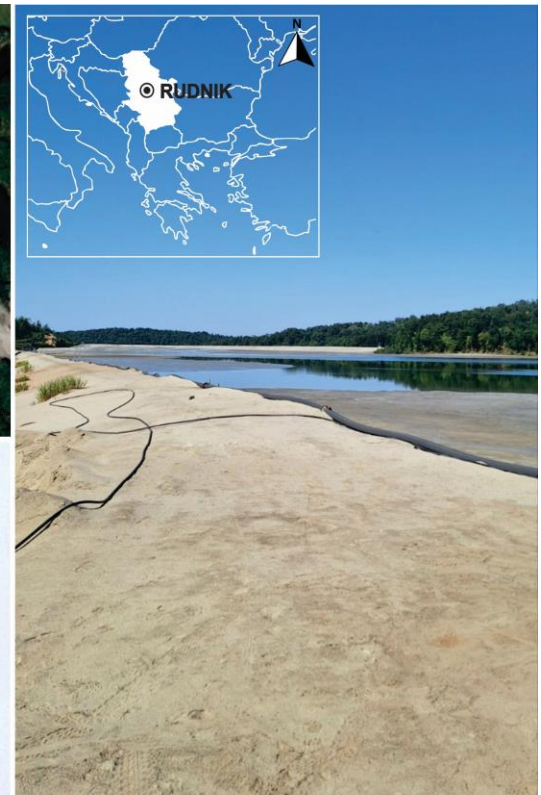
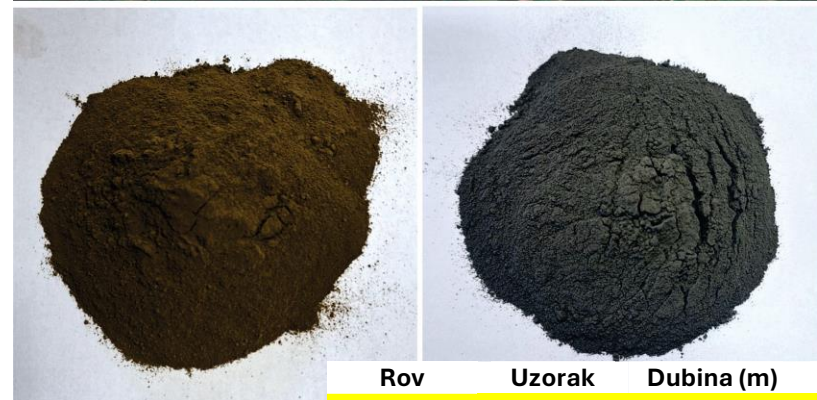
MS kao „proxy“ alat za teške metale

- **Mehanizam:** teški metali (Cr, Ni, Mo, Cd, Pb, Zn, Cu..) adsorbovani na površini / inkorporirani u strukturu MM - nusprodukt industrijskih i rudarskih procesa, sagorevanja fosilnih goriva, saobraćaja..
- **Informacije o izvoru teških metala:** zemljište, rečni sedimenti, lišće ..)
- **Ekološki indikator:** snažna pozitivna korelacija između povišenih vrednosti MS i prisustva teških metala kao posledica rudarskih procesa (*Jordanova, 2013; Gómez-García i sar., 2015; Lam i sar., 2020..*)



UZORKOVANJE I METODOLOGIJA

- **Lokacija:** unutar jalovišta - korito nekadašnjeg Suvog potoka
 - ✓ 3 rova - 16 uzoraka do dubine od 4 m
- **Merenja:** zapreminska i masena MS
- **Instrumenti:**
 - ✓ MFK-1A Kappabridge (AGICO Instruments, Češka Republika) osetljivost 2×10^{-8} SI, $H=400$ A/m, ~ 20 °C
 - ✓ Radwag AS 220 R2 Plus
- **Protokol merenja:**
 - ✓ fiksna zapremina 20 cm^3
 - ✓ 5 ponovljenih merenja uzoraka
 - ✓ 10 merenja plastične kesice i držača instrumenta
- U ovom istraživanju je korišćena **masena MS**



Rov	Uzorak	Dubina (m)	Opis materijala
T1	T1.1	0.0-0.5	Sivi materijal
	T1.2	0.5-1.0	
	T1.3	1.0-1.5	
	T1.4	1.5-2.0	
	T1.5	2.0-2.5	Smeđ materijal
	T1.6	2.5-3.0	
	T1.7	3.0-3.5	Sivi materijal, proslojen smeđim materijalom
	T1.8	3.5-4.0	
T2	T2.9	0.0-1.0	Sivi materijal
	T2.10	1.0-2.0	Sivi materijal
	T2.11	2.0-3.0	Smeđ materijal
	T2.12	3.0-4.0	Sivi materijal
T3	T3.13	0.0-1.0	Sivi materijal
	T3.14	1.0-2.0	Sivi materijal
	T3.15	2.0-3.0	Smeđ materijal
	T3.16	3.0-4.0	Sivi materijal



IDENTIFIKACIJA MAGNETNIH MINERALA NOSIOCA MS SIGNALA

- Mineraloška ispitivanja

- Geofizička ispitivanja

✓ Ključni nosioci
povišenog signala
MS: **pirotin** uz
podršku **hematita** i
getita

✓ Selektivnost MS:
glavna mineralna
osnova (kvarc, kalcit)
ne utiče na promenu
MS signala

Grupa		Minerala	Metoda verifikacije	Relativna zastupljenost u uzorcima																	
				T1.1	T1.2	T1.3	T1.4	T1.5	T1.6	T1.7	T1.8	T2.9	T2.10	T2.11	T2.12	T3.13	T3.14	T3.15	T3.16		
Silikati, fosfati, karbonati, sulfati		Kvarc	XRD, Optički, SEM-EDS, FTIR																		
		Kalcit	XRD, Optički, SEM-EDS, FTIR																		
		Epidot	SEM-EDS																		
		Ca-granat	SEM-EDS																		
		Ortoklas (K-feldspat)	XRD, SEM-EDS, FTIR																		
		Ca-klinopiroksn	SEM-EDS																		
		Apatit	SEM-EDS																		
		Cirkon	SEM-EDS																		
		Gips	XRD																		
		Hlorit	XRD																		
Sulfidi i samorodni elementi		Plagiklas	XRD																		
		Pirit	XRD, Optički, SEM-EDS																		
		Arsenopirit	XRD, Optički, SEM-EDS																		
		Pirotin (feri-)	XRD, Optički, SEM-EDS					X		X		X			X	X					
		Sfalerit	XRD, Optički, SEM-EDS																		
		Halkopirit	XRD, Optički, SEM-EDS																		
		Galenit	XRD, Optički, SEM-EDS																		
		Samorodni bizmut	Optički, SEM-EDS																		
		Samorodno srebro	Optički, SEM-EDS																		
		Samorodni bakar	Optical, SEM-EDS																		
Oksidi i hidroksidi (minerali površ. raspadanja)		Pentlatid	Optički, SEM-EDS																		
		Hematit (antifero-)	Optički, SEM-EDS					X		X		X			X	X					
		Bizmut	Optički, SEM-EDS																		
		Ceruzit	SEM-EDS																		
		Malahit	SEM-EDS																		
		Anatas	XRD																		
		Getit (antifero-)	XRD, SEM-EDS																		
Geofizička ispitivanja			MS [10 ⁻⁶ m³kg ⁻¹]			1.465 1.997 1.528 2.230 2.766 2.034 2.428 1.673 2.367 0.687 1.217 1.502 4.643 4.724 1.965 1.991															
glavni	>25%	srednje	5%–25%	sporedni	1%–5%	tragovi	<1%	T1				T2				T3					



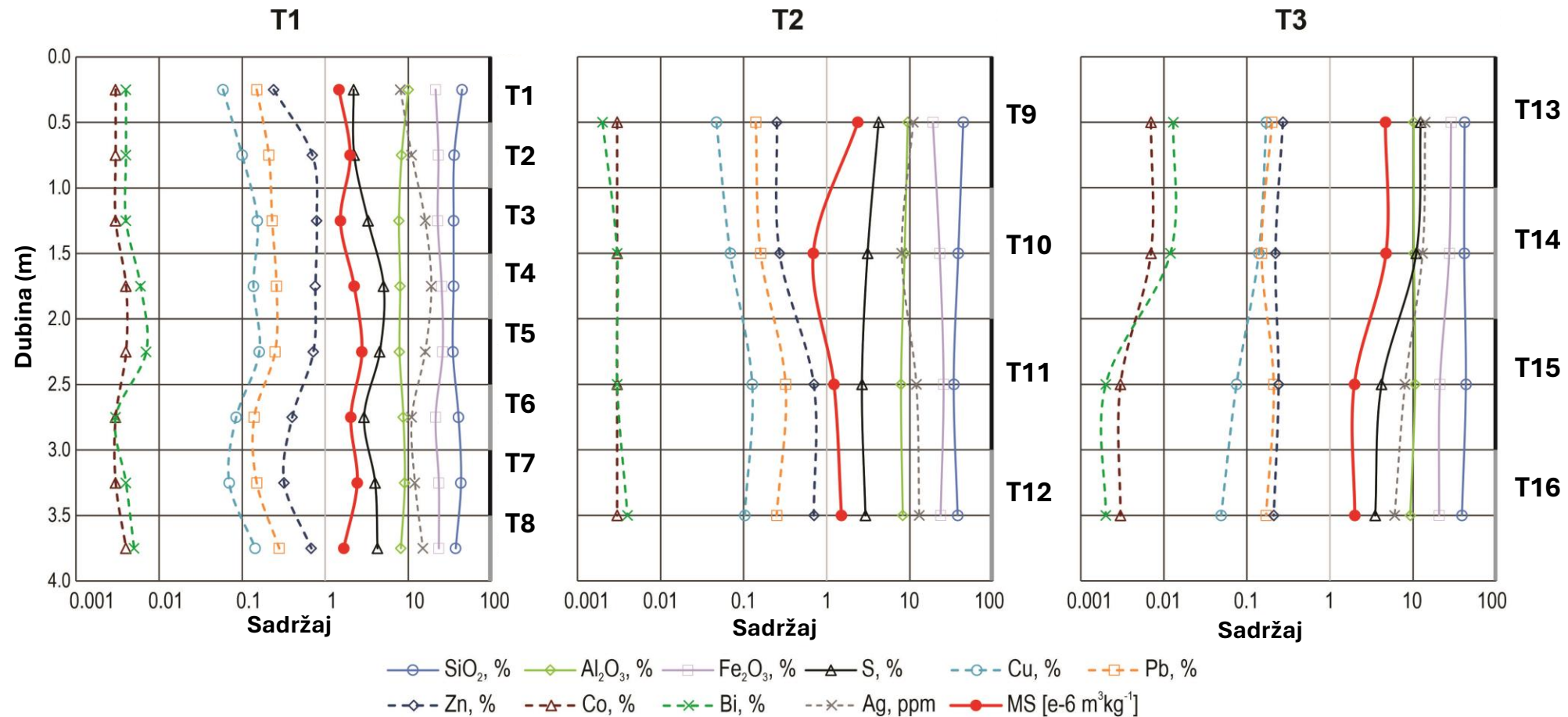
SADRŽAJ GLAVNIH OKSIDA I METALA I MASENA MS

- **Geohemijska ispitivanja**
- **MS detekcija:** povišena masena MS → povišen sadržaj Fe, S, Co, Bi i Cr
- **Ekonomski i ekološki značaj:** brzo mapiranje i selekciju zona bogatih određenim elementima

		***	***						**			*			**		
Uzorak	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	S (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Co (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ba (%)	As (%)	Bi (%)	Ag (µg/g)	MS [e-6 m ³ kg ⁻¹]
T1.1	44.30	0.55	9.98	21.31	2.20	0.06	0.15	0.24	0.003	0.016	0.164	0.018	0.003	0.132	0.004	8	1.465
T1.2	35.74	0.50	8.30	23.02	2.24	0.10	0.21	0.70	0.003	0.011	0.161	0.016	0.002	0.034	0.004	11	1.997
T1.3	35.10	0.45	7.69	22.59	3.28	0.15	0.23	0.79	0.003	0.013	0.189	0.021	0.002	0.039	0.004	16	1.528
T1.4	35.10	0.48	7.96	25.17	5.05	0.14	0.26	0.76	0.004	0.014	0.180	0.036	0.001	0.040	0.006	19	2.230
T1.5	34.45	0.52	7.82	25.88	4.54	0.16	0.25	0.72	0.004	0.014	0.177	0.036	0.002	0.035	0.007	16	2.766
T1.6	40.23	0.53	8.71	21.31	2.94	0.09	0.14	0.40	0.003	0.012	0.150	0.021	0.001	0.012	0.003	11	2.034
T1.7	43.01	0.48	9.05	23.31	3.99	0.07	0.15	0.32	0.003	0.012	0.164	0.022	0.001	0.014	0.004	12	2.428
T1.8	37.24	0.52	8.13	23.31	4.25	0.14	0.28	0.68	0.004	0.013	0.164	0.025	0.001	0.016	0.005	15	1.673
T2.9	43.87	0.47	9.43	19.02	4.22	0.05	0.14	0.25	0.003	0.023	0.123	0.019	0.001	0.732	0.002	11	2.363
T2.10	38.31	0.52	8.66	22.88	3.11	0.07	0.16	0.27	0.003	0.015	0.145	0.017	0.001	0.266	0.003	8	0.687
T2.11	33.81	0.53	7.84	25.45	2.66	0.13	0.32	0.70	0.003	0.012	0.156	0.015	0.001	0.065	0.003	12	1.217
T2.12	37.66	0.47	8.22	23.45	2.93	0.10	0.25	0.70	0.003	0.011	0.188	0.016	0.001	0.032	0.004	13	1.502
T3.13	41.73	0.37	10.17	28.74	12.30	0.17	0.20	0.27	0.007	0.018	0.105	0.027	0.002	0.541	0.013	14	4.643
T3.14	41.30	0.45	10.24	27.31	10.90	0.14	0.15	0.22	0.007	0.019	0.104	0.025	0.002	0.550	0.012	13	4.724
T3.15	43.23	0.63	10.57	21.02	4.16	0.08	0.21	0.24	0.003	0.018	0.119	0.017	0.001	0.195	0.002	8	1.965
T3.16	38.73	0.52	9.26	20.59	3.49	0.05	0.17	0.21	0.003	0.017	0.132	0.016	0.001	0.163	0.002	6	1.991



SADRŽAJ GLAVNIH OKSIDA I METALA I MASENA MS





STATISTIČKA KORELACIJA MS & GEOHEMIJE

Pirsonov koeficijent korelacije

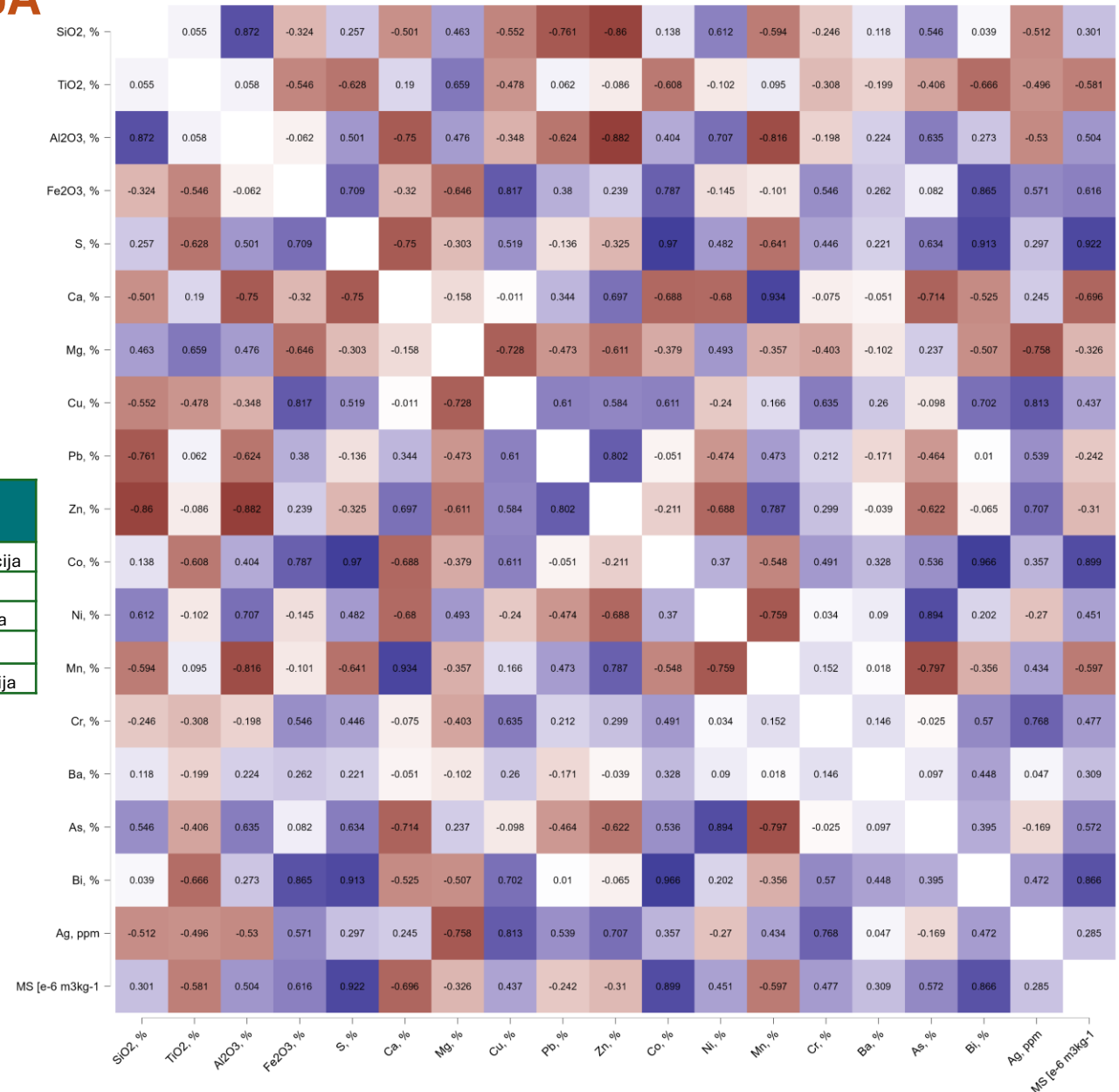
- Nosioci MS signala:
 - ✓ veoma jaka pozitivna S ($r=0,92$)
 - ✓ jaka Fe_2O_3 ($r=0,62$)
- Teški metali:
 - ✓ veoma jaka Co ($r=0,90$)
 - ✓ jaka Bi ($r=0,87$)
 - ✓ umerena Cr ($r=0,48$)

Apsolutna vrednost koeficijenta korelacije	Interpretacija
0.00 - 0.10	Zanemarljiva korelacija
0.10 - 0.39	Slaba korelacija
0.40 - 0.69	Umerena korelacija
0.70 - 0.89	Jaka korelacija
0.90 - 1.00	Veoma jaka korelacija

Spirmanov koeficijent korelacije ranga niže vrednosti (izuzev za Cr)

S ($r=0,73$), Fe_2O_3 ($r=0,35$)

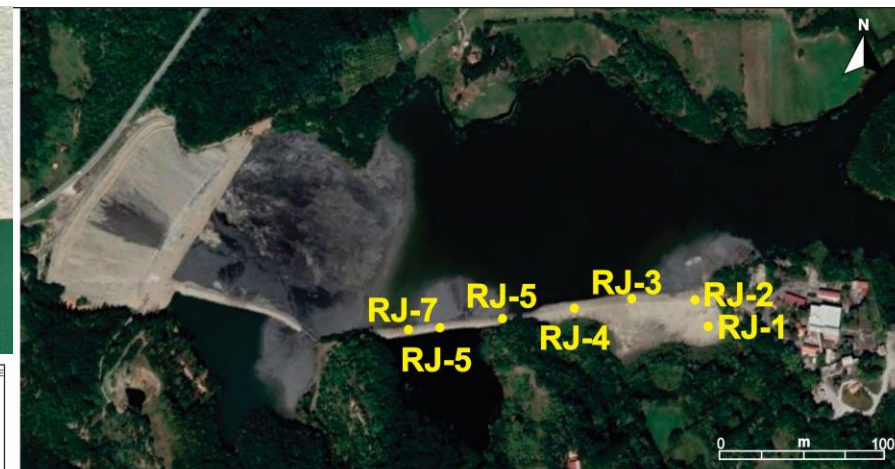
Cr ($r=0,67$), Co ($r=0,62$), Bi ($r=0,41$)





UZORKOVANJE I METODOLOGIJA

- **Lokacija:** bedem na flotacijskom jalovištu
 - ✓ 7 bušotina – uzorkovane na 10 cm tokom bušenja
 - ✓ kolekcija od 1010 uzoraka
 - ✓ 125 kompozita od metra
- **Merenja:** zapreminska i masena MS (**2270 merenja**)
- **Instrumenti:**
 - ✓ MS3 /MS2B (Bartington Instrument, UK)
osetljivost 2×10^{-6} SI, ~ 20 °C
 - ✓ Radwag AS 220 R2 Plus
- **Protokol merenja:**
 - ✓ fiksna zapremina 12 cm^3
 - ✓ 10-to merenje ponovljeno ($\sim 1\%$)
 - ✓ merenje bočice uzorka
- U ovom istraživanju je korišćena **masena MS**



Bušotina	Broj uzoraka	Dubina (m)
RJ-1	103	12
RJ-2	109	11.1
RJ-3	142	14.6
RJ-4	116	16.2
RJ-5	218	21.8
RJ-6	168	16.8
RJ-7	155	15.5

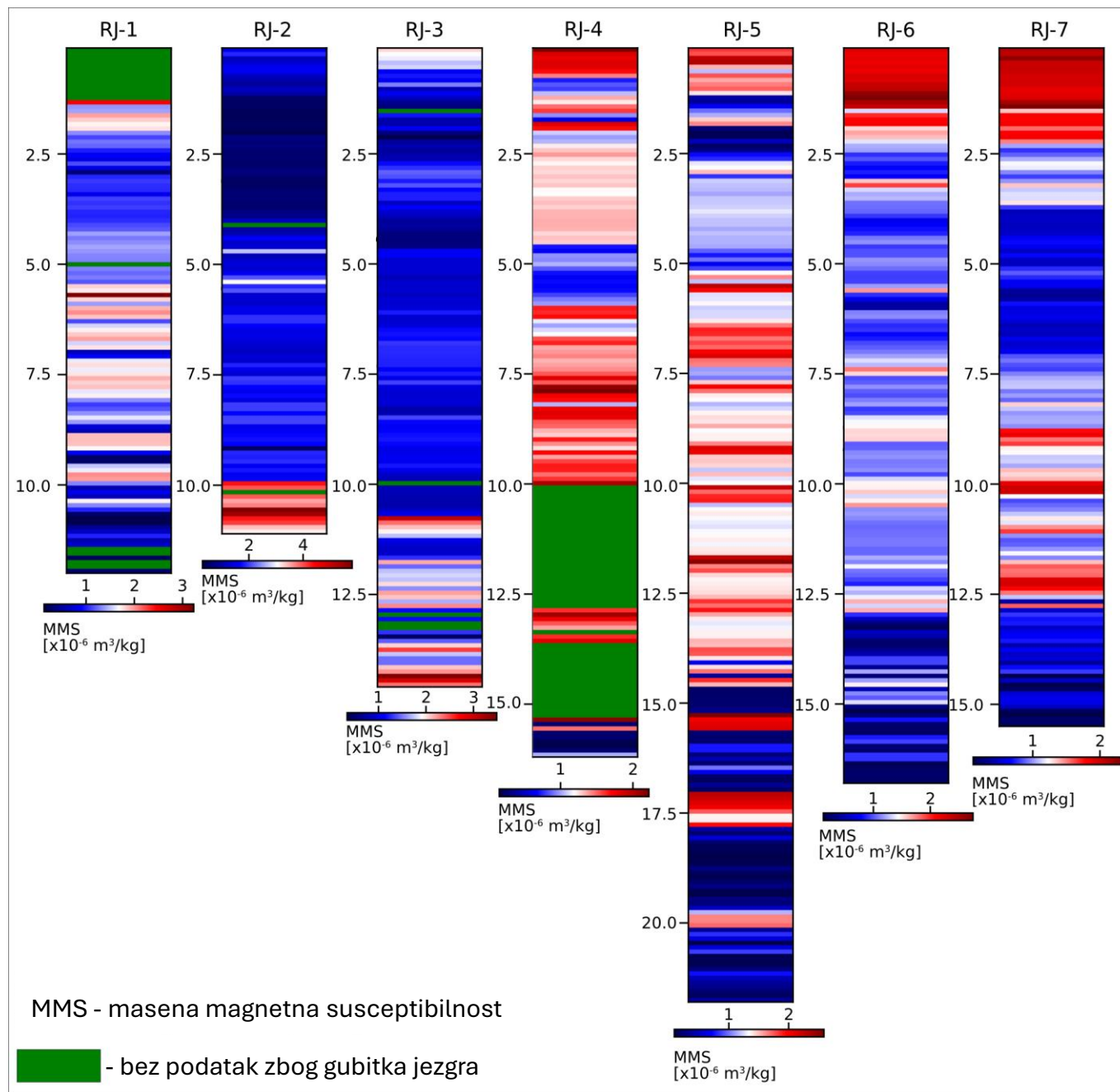




19. КОНГРЕС ГЕОЛОГА
СРБИЈЕ

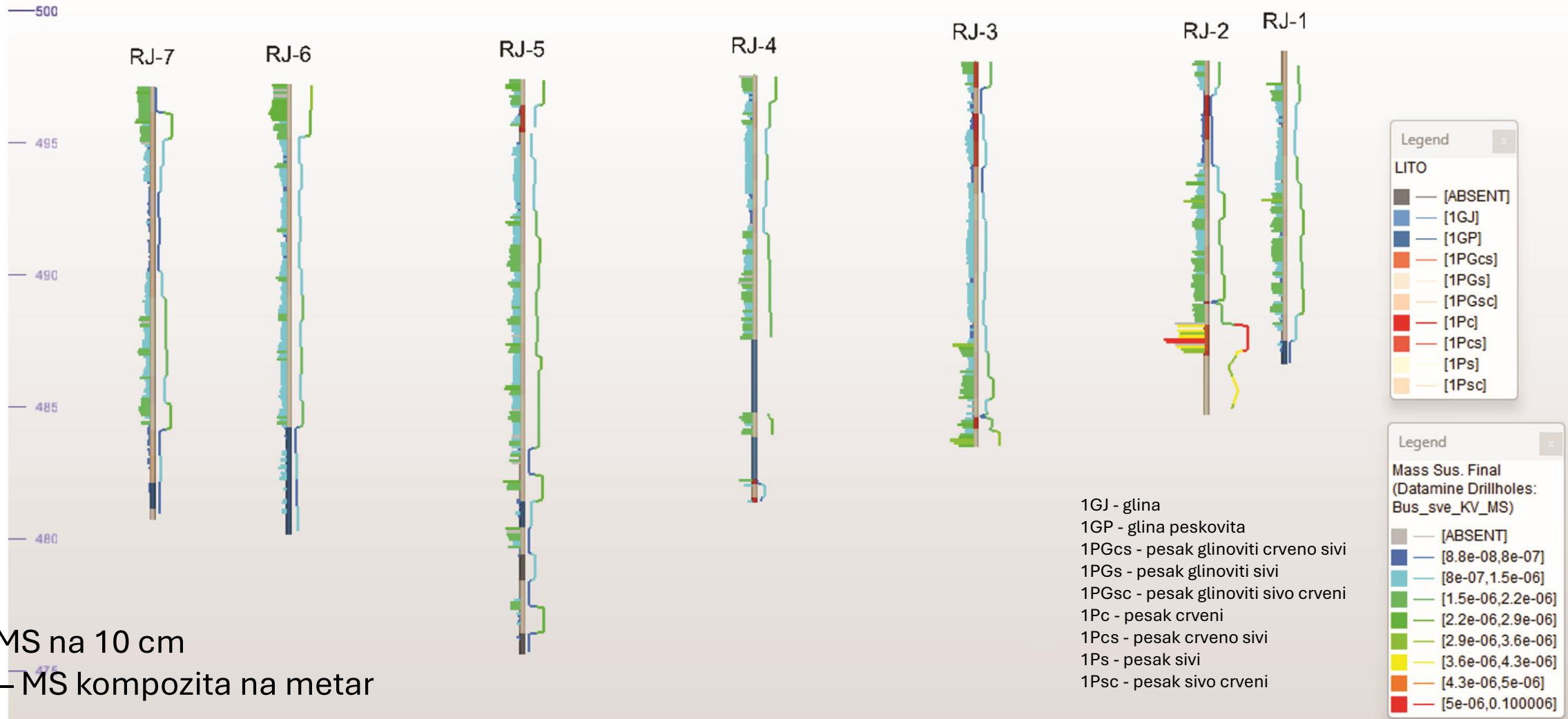
ГЕОЛОГИЈОМ ДО
ОДРЖИВИХ РЕШЕЊА

MERENJA MS UZORAKA IZ BUŠOTINA SA FLOTACIJSKOG JALOVIŠTA RUDNIKA „RUDNIK“





MASENA MS & LITOLOGIJA UZORAKA IZ 7 BUŠOTINA SA FLOTACIJSKOG JALOVIŠTA RUDNIKA „RUDNIK“



- Levo – MS na 10 cm
- Desno – MS kompozita na metar



STATISTIČKA KORELACIJA MS & GEOHEMIJE KOMPOZITI RJ-5

Pirsonov koeficijent korelacije

- Nosioci MS signala:
 - ✓jaka Fe ($r=0,86$), S ($r=0,80$)
- Teški metali:
 - ✓jaka Pb ($r=0,73$), Bi ($r=0,72$),
 - ✓umerena Sr($r=0,68$), Mn ($r=0,68$)
 - Ag ($r=0,61$), Cd ($r=0,55$)

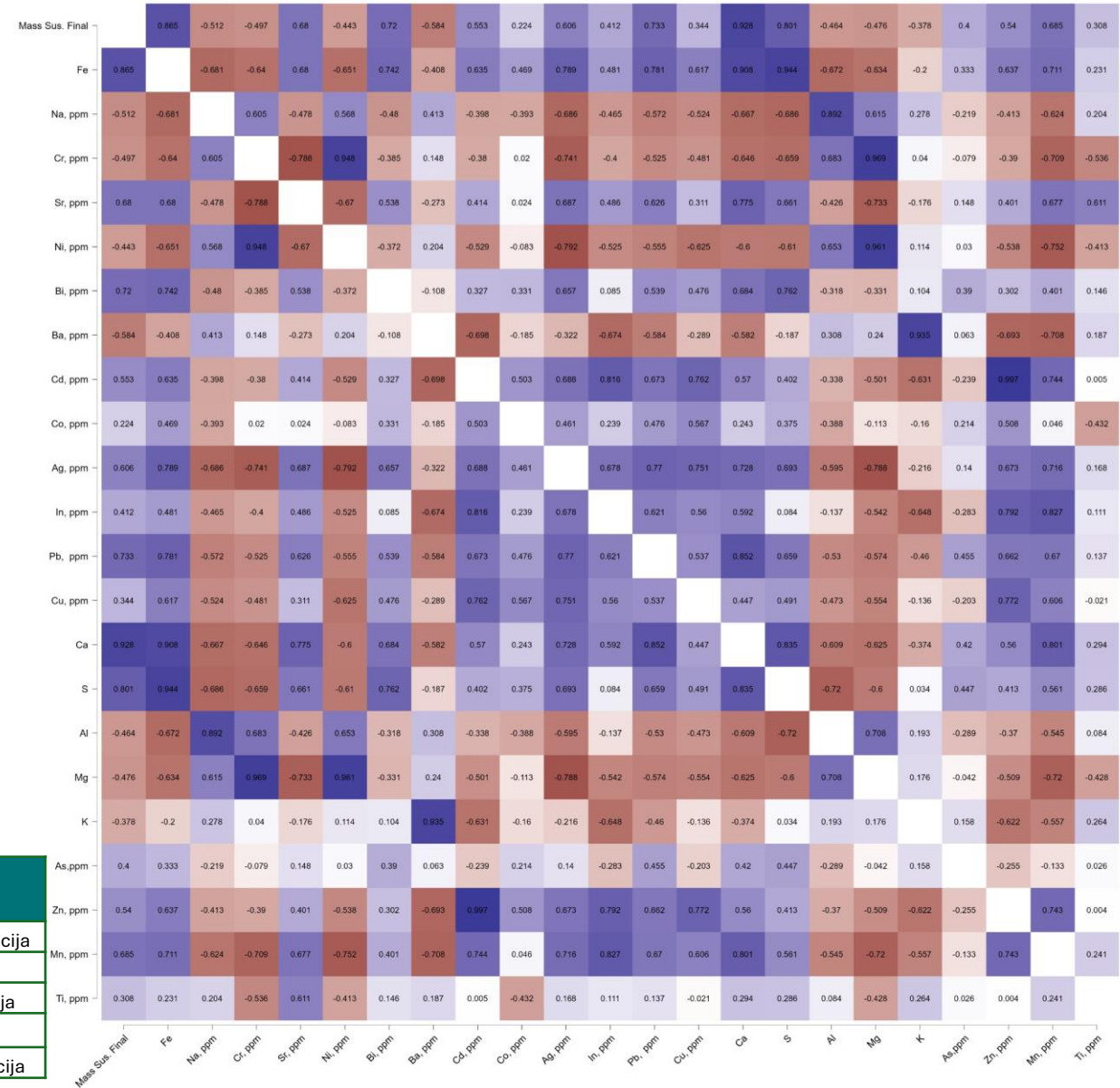
Spirmanov koeficijent korelacije ranga veoma slične vrednosti

Fe ($r=0,86$), S ($r=0,70$)

Pb ($r=0,71$), Bi ($r=0,66$), Sr($r=0,64$)

Mn ($r=0,69$), Ag ($r=0,64$), Cd ($r=0,66$)

Apsolutna vrednost koeficijenta korelacije	Interpretacija
0.00 - 0.10	Zanemarljiva korelacija
0.10 - 0.39	Slaba korelacija
0.40 - 0.69	Umerena korelacija
0.70 - 0.89	Jaka korelacija
0.90 - 1.00	Veoma jaka korelacija





ZAKLJUČAK

- Merenja magnetne susceptibilnost – brz, ekonomičan i nedestruktivan proxy alat za:
 - ✓ Izdvajanje zona obogaćenih teškim metalima
 - ✓ Planiranje dodatnih mineraloških i geohemijskih istraživanja
 - ✓ Pouzdana metodološka osnova za usmeravanje daljih istraživačkih aktivnosti