



[www.ror.tf.bor.ac.rs](http://www.ror.tf.bor.ac.rs)

## REVALORIZACIJA PLATINSKE GRUPE METALA (PGM) IZ ISTROŠENIH AUTO KATALIZATORA. DEO I: PRIMARNI I SEKUNDARNI IZVORI PGM I NJIHOVA UPOTREBA

### RECOVERY OF PLATINUM-GROUP METALS (PGM<sub>s</sub>) FROM SPENT AUTOMOTIVE CATALYSTS. PART I: THE PRIMARY AND SECONDARY SOURCES OF PGM<sub>s</sub> AND THEIR USE

Mile D. Dimitrijević<sup>#</sup>, Snežana M. Milić, Slađana Č. Alagić, Ana A. Radojević

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

Primljen: 3. novembar 2014.

Prihvaćen: 27. novembar 2014.

**IZVOD** – U radu je prikazano stanje i perspektive u proizvodnji platinske grupe metala iz primarnih i sekundarnih sirovina, kao i njihova primena. Na osnovu ponude i potražnje za PGM ukazano je na značaj i potrebu za povećanjem stepena reciklaže sekundarnih sirovina. Pokazano je da se najveće količine platinskih metala koriste u proizvodnji auto katalizatora i da je njihova reciklaža jako bitna za očuvanje prirodnih resursa.

**Ključne reči:** platinska grupa metala, izdvajanje, auto katalizatori

**ABSTRACT** - This paper presents a review of the present situation and perspectives in the production of platinum-group metals from primary and secondary sources, as well as in their use. The need and significance of recycling have been highlighted in view of the demand and supply of platinum-group metals. It has been shown that platinum-group metals are mostly used for the manufacture of autocatalysis and that their recycling is important for the conservation of natural resources.

**Key words:** platinum-group metals, recovery, automotive catalysts

## UVOD

Platinska grupa metala (PGM) obuhvata platinu, paladijum, iridijum, rodijum, osmijum i rutenijum, od kojih je platina najvažnija pa cela grupa nosi naziv "platinski metali". Platinski metali se odlikuju visokim tačkama topljenja, velikom hemijskom otpornošću, većinom su rastegljivi i kovni, grade brojne legure i komplekse [1].

Platinski metali spadaju u izrazito retke elemente. U izveštaju Evropske Komisije iz 2010. godine [2], 14 siro-

vina u Evropi označeno je kao "kritične" na osnovu ekonomskih parametara i dostupnosti istih, u okviru kojih se nalazi i PGM (pored grupe retkih metala, germanijuma, antimona, galijuma, indijuma, berilijuma, magnezijuma, kobalta, niobijuma, fluorita, volframa, tantala, i grafitu). Navedene sirovine su kritične zbog velikog ekonomskog značaja i velike potražnje što dovodi do nestašica u snabdevanju, kao i zbog niskog stepena reciklaže. U obimnom izveštaju, Eggert i sar. [3] su PGM svrstali među kritičnim sirovinama za Sjedinjene Američke Države. Svetska Organizacija za

<sup>#</sup> Kontakt adresa autora: M.D. Dimitrijević, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija. E-mail: [mdimitrijevic@tf.bor.ac.rs](mailto:mdimitrijevic@tf.bor.ac.rs)

\* Ovaj rad je urađen u okviru Projekta OI 172031 koji je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

ekonomsku saradnju i razvoj (OECD) u svom izveštaju o kritičnim metalima korišćenim u mobilnim telefonima navodi Pt i Pd, pored Sb i Be [4].

Platinski metali, izuzetnih fizičkih i hemijskih osobina, imaju ključnu ulogu u savremenom društvu i oni su posebno značajni za "zelene" tehnologije i visoko-tehnološke uređaje. Najvažnije aplikacije, izvan

poznatih područja katalize hemijskih reakcija, kontrole emisije izduvnih gasova motornih vozila i izrade nakita, uključuju informacione tehnologije, elektroniku za široku potrošnju, održivu proizvodnju energije fotonaponskim i gorivim ćelijama, izradu implantanata i citostatika za medicinske potrebe i druge (Tabela 1.) [5,6].

**Tabela 1.** Primena platinske grupe metala [5]

Primena	Platinska grupa metala				
	Pt	Pd	Rh	Ir	Ru
Katalizatori	✓	✓	✓	✓	✓
Elektronika	✓	✓		✓	✓
Gorive ćelije	✓	✓	✓		✓
Staklo, keramika i pigmenti	✓		✓		
Medicina	✓	✓		✓	
Farmacija	✓	✓			✓
Foto-ćelije					✓
Super legure					✓

Svetska proizvodnja PGM je u stalnom porastu od 1970. godine. Široka i raznovrsna primena uslovljava povećanu potražnju za platinskim metalima. Jedan od načina da se obezbede adekvatne količine je da se poveća istraživanje i eksploatacija rudnih ležišta. Međutim, kako to ne vodi održivom razvoju, naponi su usmereni na povećanju stepena reciklaže sekundarnih sirovina (istrošeni katalizatori, elektronski otpad, amortizovana oprema i sl.) i korišćenju sekundarnih (recikliranih) metala, što je i znatno ekonomičnije [5]. Cilj ovog rada bio je da se prikaže stanje i perspektive u proizvodnji PGM iz primarnih i sekundarnih izvora i njihova upotreba. Kako se daleko najveće količine primarno proizvedene PGM troše u auto katalizatorima, to oni predstavljaju glavni izvor za sekundarnu proizvodnju PGM. Zbog toga će očuvanje prirodnih resursa PGM, kao i životne sredine, u mnogome zavisiti od stepena reciklaže autokatalizatora.

### PRIMARNI IZVORI PGM

Prosečne koncentracije PGM u litosferi su u opsegu od 0,001-0,005 mg/kg za Pt; 0,015 mg/kg za Pd; 0,0001 mg/kg za Rh i Ru; 0,005 mg/kg za Os i 0,001 mg/kg za Ir [7]. Rude sadrže PGM u količini od 1 do 10 g/t (prosečno 5 g/t), dok ih u Cu-Ni rudama ima u nešto manjoj količini od 0,1 do 1 g/t. Flotacijom je moguće povećati sadržaj PGM u rudi na preko 100 g/t. To ukazuje da eksploatacija i prerada ruda PGM ima za posledicu stvaranje velikih količina otpada i emisiju SO<sub>2</sub>

gasu, kao i da zahteva veliki utrošak energije [8,9].

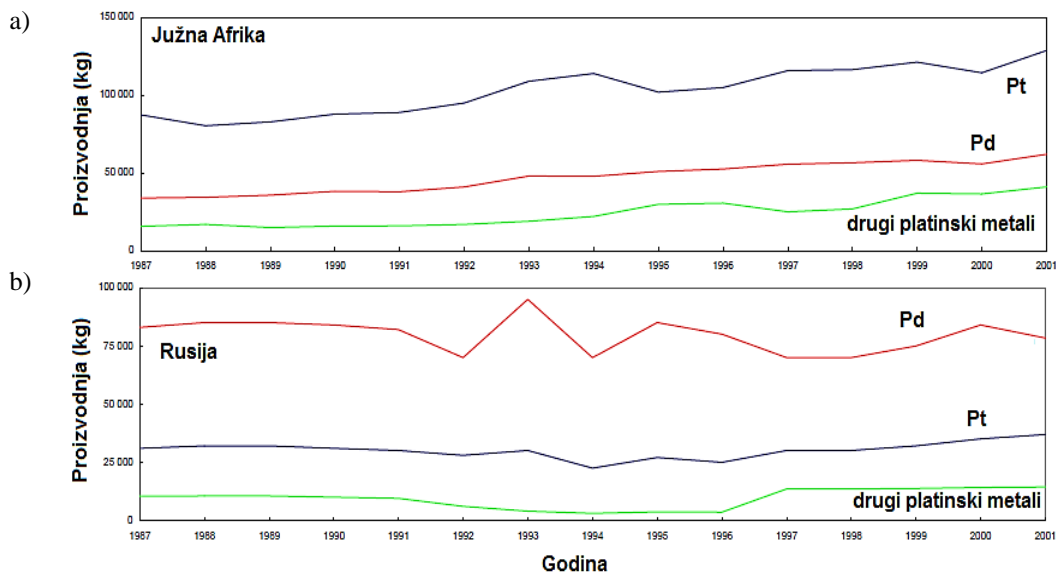
Vrlo često, PGM je prateći produkt iskopavanja i prerade glavnih industrijskih metala (npr. bakra, nikla, cinka, aluminijuma), što znači da u velikoj meri dostupnost PGM zavisi od dostupnosti primarnih sirovina. U retkim slučajevima, kada je dovoljno isplativo, prateći metali se prerađuju kao glavni (kobalt, bizmut, molibden, zlato, srebro, tantal, PGM). U većini slučajeva, grupe srodnih metala prate osnovni metal koji se eksploatiše. Platinska grupa metala je čest pratilac oksidnih ruda hroma, oksidno-sulfidnih ruda nikla i sulfidnih ruda bakra, kao što se može videti sa slike 1 [2].

Najveća primarna prerada ruda koje sadrže PGM ostvaruje se u Južnoj Africi, Rusiji, Kanadi i SAD tako da su ove države i najveći proizvođači pomenutih metala. Odnos Pt i Pd u rudama varira u zavisnosti od ležišta, i kreće se u odnosu 3:1 u J. Africi; 1:3,5 u Rusiji; dok je u SAD i Kanadi odnos Pt prema Pd iznosi 1:3 [10].

Ruda koja sadrži Pt prvi put je otkrivena u Južnoj Africi 1923. godine u okviru *Bushveld Igneous Complex*-a u kome se danas nalaze najveće svetske rezerve PGM (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir i Os, pored Au, Ni i Cu). U okviru kompleksa postoje tri glavne rudne žile [10,11] i to:

- *Merensky* (sadržaj 3-9 g/t PGM; 0,2% Ni; 0,1% Cu),
- *UG2* (3-8 g/t PGM; niži sadržaj Ni i Cu, ali 25-50% više Rh u odnosu na *Merensky*),

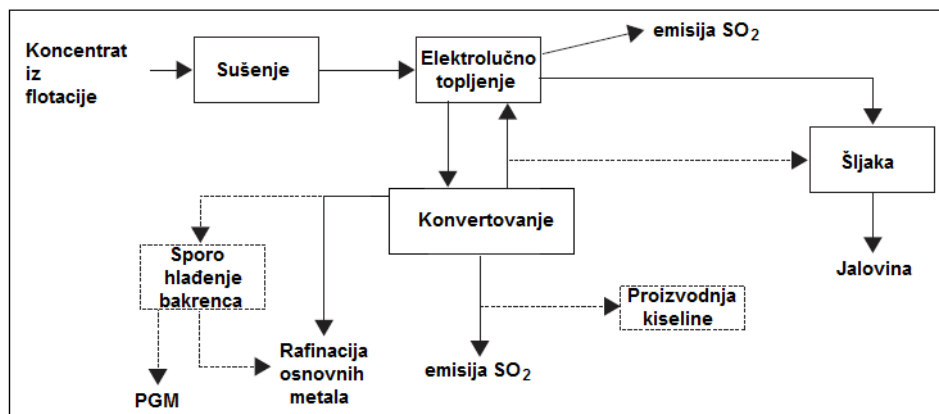




Slika 3. Primarna proizvodnja PGM u rudnicima u J. Africi (a) i Rusiji (b) u period 1987-2001. god. [14].

Tokom 90 godina eksploatacije rude koja sadrži PGM, tehnologija je znatno napredovala u svim sektorima, od iskopavanja, usitnjavanja i prerade rude,

pa sve do rafinacije. Danas se proces prerade uglavnom sastoji od faza prikazanih slikom 4 [11].



Slika 4. Osnovni dijagram prerade koncentrata koji sadrži PGM [11].

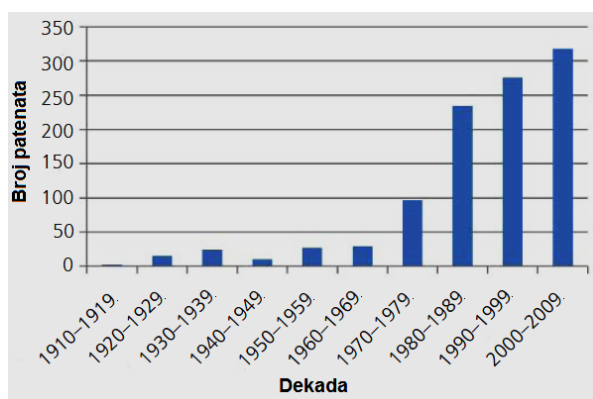
## SEKUNDARNI IZVORI PGM

Tehnologije recikliranja PGM napredovale su poslednjih decenija (Slika 5.), sa tom razlikom da konstantno dolazi do napretka u cilju povećanja iskorišćenja sekundarnih sirovina i proširenja spektra metala koji se istovremeno mogu reciklirati. Najveći izazov koji postoji u lancu reciklaže je prevazilaženje nekontinualnog sakupljanja sekundarnih sirovina kao i različit vek trajanja uređaja koji sadrže PGM. Neki od uslova koji treba da budu ispunjeni da bi proces reciklaže bio efikasan prema Hagelükenu [5] su:

- pristupačnost delova koji se recikliraju (npr. integrisana kola u automobilima nisu jednostavna za rasklapanje kao što su auto katalizatori ili matične ploče računara);
- ekonomska isplativost procesa;
- razvijen lanac prikupljanja delova za reciklažu;
- dobra organizacija procesa reciklaže (kompjutere i mobilne telefone ne treba mešati sa drugim uređajima koji idu na mlevenje pre nego što im se uklone vredni delovi);
- dovoljni kapaciteti pogona za reciklažu.

Istrošeni auto katalizatori u poređenju sa primarnim izvorima PGM predstavljaju bogate sirovine, obzirom da

sadrže prosečno 4 g PGM po katalizatoru [15]. Čak i elektronski otpad sa visokim sadržajem plemenitih metala je manje značajna sirovina u poređenju sa auto katalizatorima [16].

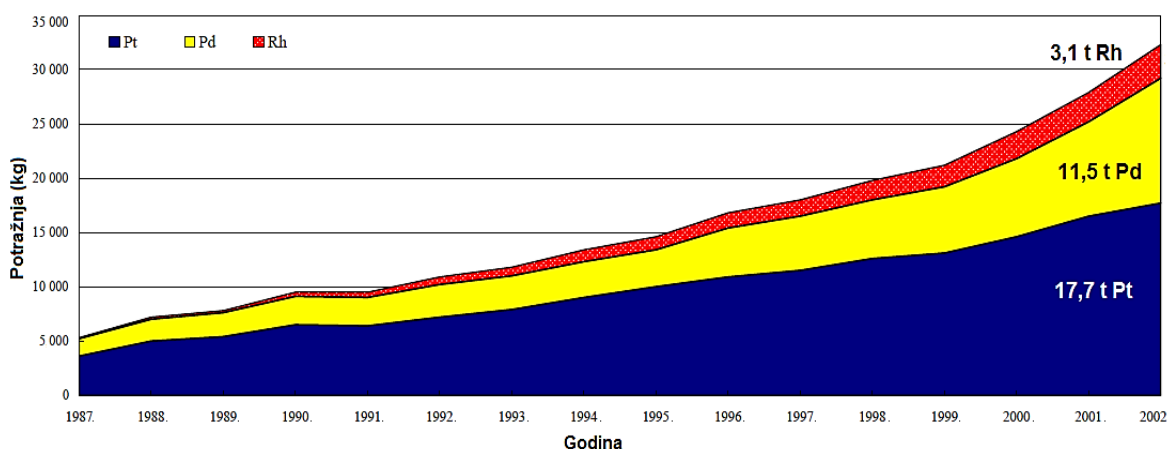


Slika 5. Broj патената za recikliranje PGM u periodu 1910-2009.god. [5]

Svake godine, vozila koja nisu više u voznom stanju (tzv. "end-of-life vehicle") u Evropskoj Uniji stvaraju između 8 i 9 miliona tona otpada koji zahteva odgovarajući tretman, definisan putem Direktive 2000/53/EC [17].

Reciklaža istrošenih auto katalizatora vrši se u najvećim postrojenjima u svetu: *Umicore* (Belgija), *Hereaus* (Nemačka), *BASF/Engelhard* (SAD), *Johson Matthey* (Velika Britanija) i *Nippon/Mitsubishi* (Japan) [18]. *Umicore* je jedno od najvećih postrojenja za reciklažu, gde se godišnje preradi preko 250.000 t sekundarnih sirovina, a proizvede više od 50 t PGM (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru), preko 100 t Au i preko 2.400 t Ag. *Umicore* nakon procesa recikliranja, na tržište "vraća" sedam plemenitih metala, 10 osnovnih i retkih metala. *Johnson Matthey* vrši reciklažu Pt, Pd, Ir, Rh i Ru zajedno sa Au i Ag iz sekundarnih materijala [5].

Količine reciklirane PGM iz auto katalizatora kontinualno rastu poslednje dve decenije (Slika 6.). Godine 1984., oko 1,4 t Pt i 0,6 t Pd je dobijeno recikliranjem istrošenih katalizatora. Početkom 1990-ih godina, unapređenje procesa reciklaže utiče na smanjenje gubitaka što se, uz porast količine sekundara, ogleda u povećanju količine reciklirane PGM (7,9 t Pt; 3,1 t Pd i 0,8 t Rh tokom 1993.). Godine 2002., količina reciklirane Pt je dvostruko, a Pd trostruko veća u odnosu na 1993. godinu, što čini 10%, 7% i 16% ukupnih svetskih rezervi Pt, Pd i Rh, respektivno [14].



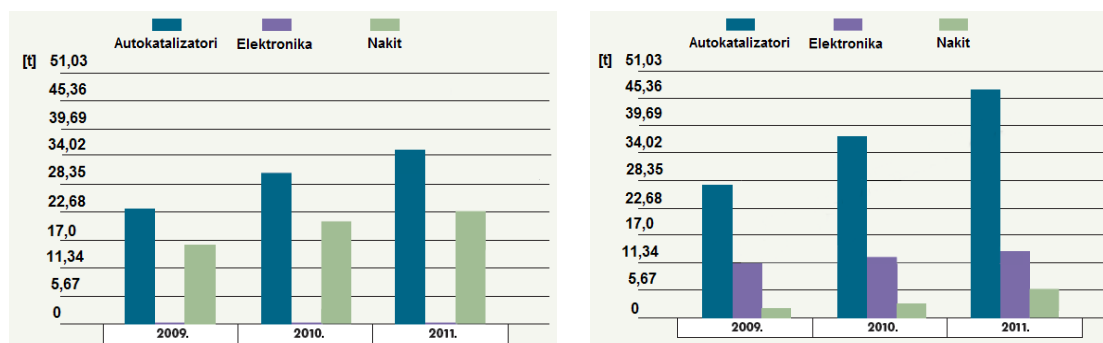
Slika 6. Količina PGM reciklirana iz autokatalizatora u periodu 1987-2002.god. u svetu [14].

Na slici 7. uporedno je data količina reciklirane Pt i Pd iz autokatalizatora, elektronskih uređaja i nakita tokom 2009., 2010. i 2011. godine [19].

Najveće količine reciklirane PGM stižu iz SAD. Prema izveštajima, iz SAD-a potiče oko 65% Pt i 70% Pd od ukupno recikliranih količina u svetu, što je dovoljno da pokrije svega 25% potražnje za Pt i 20% Pd u SAD-u [14]. Izvori sekundarne PGM tokom 1998. u

SAD dati su u tabeli 2. Auto katalizatori predstavljaju glavni izvor sekundarne Pt, odnosno oko 25,5 t PGM je bilo dostupno iz ovog izvora 1998. godine samo u SAD-u [10].

Kompjuterske matične ploče sadrže prosečno 200-250 g/t Au i 80 g/t Pd, slušalice za mobilne telefone sadrže do 350 g/t Au i 130 g/t Pd, dok auto katalizatori mogu da sadrže i do 2 kg/t PGM.



Slika 7. Količina reciklirane Pt (grafik lijevo) i Pd (grafik desno) u periodu 2009-2011. god. [19].

To je znatno više nego prosečan sadržaj Au ili PGM u samoj rudi (<10 g/t), što dovodi do glavnog razloga ekonomske isplativosti recikliranja PGM iz auto katalizatora, uz istovremeno smanjenje zagađenja životne sredine i očuvanje prirodnih resursa. Oko 14%

Pt i Pd od ukupne potrošnje tokom 2007. godine, reciklirano je iz mobilnih telefona širom sveta [4]. U Evropskoj Uniji, Direktivom 2002/96/EC [20] reguliše se reciklaža električnog i elektronskog otpada.

Tabela 2. Podaci o sekundarnim materijalima u SAD-u iz 1998. godine [10]

Sekundarni materijal koji sadrži PGM	Količina/vrednost
Nastali materijal	42,70 t
Reciklirani materijal	7,69 t
Vrednost recikliranog materijala	117 mil \$
Efikasnost reciklaže	76%
Ponuda (nastali + uveženi materijal)	48,10 t
Neiskorišćeni kapaciteti reciklaže	8,50 t
Izveženo iz SAD-a	14,31 t
Vrednost izveženog materijala iz SAD-a	200 mil \$

Najisplativija je reciklaža nakita, jer se plemeniti metali nalaze u vrlo čistom stanju [5]. Posljednjih godina, dolazi do povećanja reciklirane PGM i u ovom sektoru (Slika 7.), ali te količine su i dalje male u poređenju sa auto katalizatorima [19]. Saurat i Bringezu [21] ukazuju da posle 2010. godine ponuda PGM ostaje konstantna, ali i da će smanjenje primarne, biti kompenzovano povećanjem sekundarne produkcije PGM.

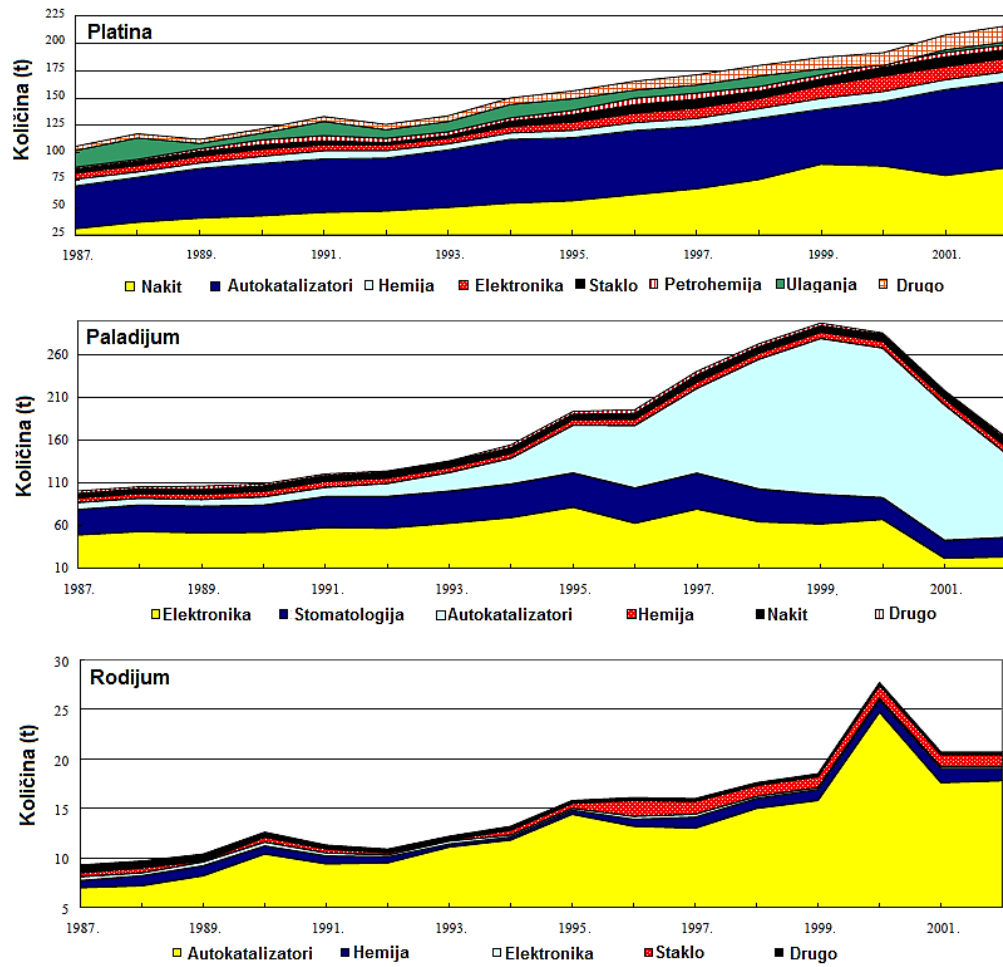
## UPOTREBA PGM

Primarno proizvedena PGM najviše se koristi u automobilske industriji. Tokom 2004. godine preko 75% od 114,8 t primarno proizvedene PGM, uvežene u Evropu, upotrebjeno je za izradu auto katalizatora. U poređenju sa auto-industrijom, industrija stakla i petrohemija, iako zahtevaju velike količine PGM, oslanjaju se na sekundarno proizvedene platinske metale (čak >98%). Tokom 2004. u industriji stakla i

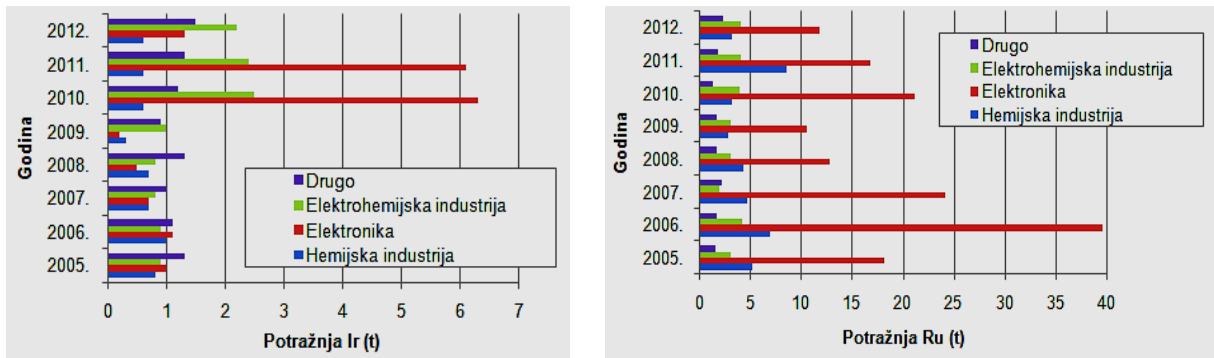
petrohemiji u Evropi upotrebjeno je >70% uvežene količine sekundarne PGM. Takođe, za izradu elektronike u Evropi od 17,2 t PGM, 80% predstavlja sekundarni materijal [9]. Industrijska primena reciklirane PGM u navedenim oblastima predstavlja trenutnu odrednicu za recikliranu količinu metala, jer se upotrebljava od 80 do 90% sekundarne PGM [5].

Na slikama 8 i 9 prikazana je potražnja za Pt, Pd, Rh [14], Ir i Ru [22] prema oblastima upotrebe. Automobilska industrija godinama predstavlja najveće tržište za PGM, ali izrada nakita (Pt), elektronika i stomatologija (Pd, Ir, Ru) takođe predstavljaju značajna tržišta za ove metale. Svetska potrošnja Pt i Rh je duplirana u periodu 1987-2002.god, što može biti posledica povećane potrošnje u Kini i Evropi, dok je upotreba Pd trostruko porasla u periodu 1987-1999., da bi se smanjila do kraja 2002. godine [14]. Detaljni podaci o ponudi i potražnji za Pt i Pd, po oblastima i po regionima u periodu 1980-2012., dati su u tabelama 3 i 4 [22].





Slika 8. Upotreba Pt, Pd i Rh u periodu 1987-2002.god. [14]



Slika 9. Upotreba Ir (grafik levo) i Ru (grafik desno) u periodu 2005-2012.god. [22]

Tabela 3. Godišnja proizvodnja i potrošnja platine (u tonama) u periodu od 1980. do 2012. godine u svetu [22]

Podaci	1980.	1982.	1984.	1986.	1988.	1990.	1992.	1994.	1996.	1998.	2000.	2002.	2004.	2006.	2008.	2010.	2012.	
Proizvodnja	J. Afrika	72,2	61	70,9	73,1	80,2	85,8	85,6	98,3	105,4	114,5	138,4	155,8	164,7	140,4	144,2	127,4	
	Rusija	10,6	11,8	7,8	9	13,7	22,4	23,3	31,4	37,9	40,1	30,5	26,3	28,6	25,1	25,7	24,9	
	S. Amerika	4	3,7	4,7	4,7	6,5	5,8	6,2	6,8	7,5	8,9	8,9	12,1	12	10,7	10,1	6,2	9,2
	Zimbabve	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	5,1	5,6	8,7	10,6
	Ostali	0,9	0,9	1,2	1,2	1,6	2	3,7	4,4	4	4,2	3,3	4,7	7,8	3,3	3,6	3,4	3,4
Potrošnja <sup>a</sup>	Autokataliz.	21,2	20,4	26,1	35,6	40,9	47,4	48,2	58,2	58,5	56	80,6	108,6	121,5	113,7	95,6	100,8	
	Hemija	8,1	8,1	8,1	6,1	5	6,7	6,7	5,9	7,2	8,7	9,2	10,1	10,1	12,3	12,4	13,7	14
	Elektronika	6,5	5,3	5,9	5,6	5,8	6,4	5,1	5,8	8,6	9,3	14,2	9,8	9,3	11,2	7,1	7,2	5,1
	Staklo	4,4	2,6	4,4	2,8	4	4,2	2,5	5	7,9	6,8	7,9	7,3	9	12,6	9,8	12	5,6
	Ulaganja	5	5	10	10,1	19,6	6,2	7,9	12,3	7,4	9,8	-1,9	2,5	1,4	-1,2	17,3	20,4	14,2
	Nakit	17,4	23,8	24,1	26,4	36,7	42,5	47	54,1	61,9	75,6	88	87,8	67,2	68,2	64,1	75,3	86,5
	Petrohemija	4	2	0,5	0,6	1,6	4,4	3,7	2,8	5,8	3,9	3,4	4	4,7	5,6	7,5	5,3	6,2
Potrošnja <sup>b</sup>	Drugo	5,9	5,3	4,2	4	3,7	3,7	4,7	5,9	7,9	9,5	16,8	14,6	7,4	9	9,3	10,6	
	Evropa	9	10,3	12,4	14,6	17	21,9	26,7	29,1	26,1	28,3	35,8	51,3	65,2	80,4	81,2	67	61,6
	Japan	29,2	32,7	35,5	31,4	59,1	57,5	58,2	66,7	62,4	55,8	43,9	43,5	42,3	42,9	54	35,9	35,5
	S. Amerika	30,5	22,1	28,3	37	26,9	24,6	21,9	29,2	36,7	41,2	38,1	33,4	33,9	44,8	35,6	43,5	36,7
	Kina	/	/	/	/	/	/	/	/	/	22	37,5	49,5	36,9	43,4	43,9	63,5	71,7
Ostali	3,7	7,2	5,6	5,3	9,3	11,2	11,8	15,9	29,1	19,7	21,4	23,3	25,2	33,9	33,9	35,9	44,8	

<sup>a</sup> potrošnja po sektorima<sup>b</sup> potrošnja po regionima



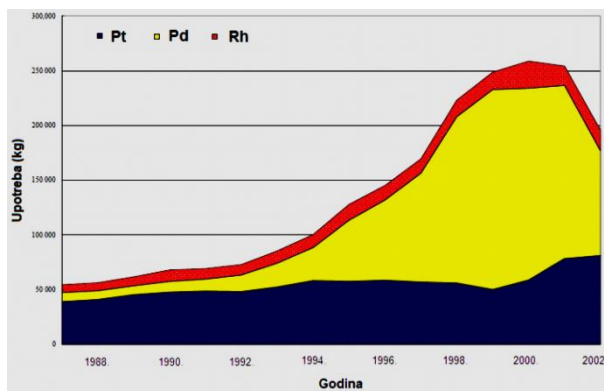
Tabela 4. Godišnja proizvodnja i potrošnja paladijuma (u tonama) u periodu od 1980. do 2012. godine u svetu [22]

Podaci	1980.	1982.	1984.	1986.	1988.	1990.	1992.	1994.	1996.	1998.	2000.	2002.	2004.	2006.	2008.	2010.	2012.	
Proizvodnja	J. Afrika	27,1	25,5	30,5	32,3	34,4	38,3	39,2	46,7	52,6	56,6	67,2	77,1	86,3	75,6	82,1	72,5	
	Rusija	38,6	48,2	52,9	49,8	55,1	58,2	65,3	102,6	174,2	180,4	135	149,3	100,2	84	84,6	81,8	
	S. Amerika	5,3	5,0	5,9	5,9	11,5	11,5	14,0	12,8	14,2	20,5	19,8	26,4	32,2	30,6	28,3	18,4	28,1
	Zimbabve	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	4,2	4,4	6,8	8,2
	Ostali	1,9	2,2	2,8	2,8	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	3,7	3,3	3,7	8,2	4,2	5,3	5,8	5,1
Autokataliz.	9,3	9,0	10,6	8,2	8,1	9,8	15,2	30,3	73,4	152,1	175,4	94,9	117,9	125,8	138,9	173,6	205,7	
Potrošnja <sup>a</sup>	Hemija	/	/	/	4,8	5,4	6,7	6,4	5,8	7,5	7,2	7,9	9,6	13,7	10,9	11,5	16,5	
	Dental	16,2	18,4	28	28,8	30,9	31,7	37,2	39,3	41,1	38,3	25,5	24,4	19,3	19,4	18,5	16,5	
	Elektronika	18,4	26,1	38,3	41,1	53	52,1	56,9	69,4	62,8	64,5	67,2	23,6	28,6	42,6	43,9	37,3	
	Nakit	5,6	6,8	6,5	5,3	5,6	6,1	6,4	6,4	6,7	7,3	0	0	6,2	1,5	13,1	34,1	14,6
	Ulaganja	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	7,9	8,4	28,9	35,4	30,6	18,5	13,8
Drugo	13,7	10,3	9,3	3,6	2,6	2,5	1,9	3,6	4,4	3,6	1,9	2,8	2,8	2,6	2,3	2,8	3,3	
Potrošnja <sup>b</sup>	Evropa	10,3	10,9	16,2	16,8	18,8	18,4	21	27,5	47,4	61,7	49,3	41,1	43,9	55,8	56	63,9	
	Japan	21,5	27,7	38,9	38,3	47,7	47,6	55,4	68,4	58,6	68,9	65,5	41,1	47,9	49	50,5	46	43,9
	S. Amerika	26,1	26,4	30,8	30	31,7	33,6	35,9	44,5	68	114,8	107,2	29,1	57,4	66,6	59,6	93,6	82,4
	Kina	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3,5	7,6	6,3	35,8	47,4	45,1	56	59,3
	Ostali	5,3	5,6	6,2	5,4	5,4	6,7	8,7	11	17,3	18,6	23,5	24,8	21,9	38	46,8	51,2	58,3

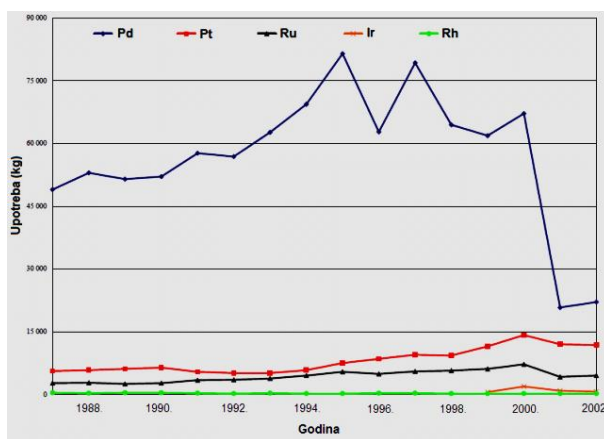
<sup>a</sup> potrošnja po sektorima<sup>b</sup> potrošnja po regionima

Automobilska industrija koristi prosečno 50-60% sekundarne PGM tako da ima prostora za napredak. Problem predstavlja izvoz starih automobila koji ne mogu biti uključeni u proces reciklaže [5]. Jedna tona PGM dovoljna je za izradu oko 285.700 automobila sa benzinskim ili oko 243.900 automobila sa dizel motorima [9]. U poslednjih dvadesetak godina, očigledan je porast upotrebe Pd u izradi autokatalizatora (Slika 10.), što se poklapa sa povećanom proizvodnjom dizel vozila.

Visoka cena Pd u 2001. godini naterala je proizvođače autokatalizatora i elektronskih i električnih uređaja da koriste Pd iz sopstvenih zaliha što se u 2002. godini odrazilo na značajno smanjenje kupovine Pd (Slike 10. i 11.). To je dalo nerealnu sliku budući da se potrošnja paladijuma povećavala jer je 1995. godine odnos Pt:Pd u autokatalizatorima bio 2,9:1 dok je 2002. godine taj odnos bio 1,5:1 [14].



Slika 10. Upotreba primarne i sekundarne PGM za izradu autokatalizatora u periodu 1987-2002.god. [14]



Slika 11. Upotreba PGM za izradu elektronskih i električnih uređaja u periodu 1987-2002.god. [14]

Nova elektronika sadrži svega 5-10% sekundarne PGM, najviše Pd, koji prednjači u odnosu na druge platinske metale (Slika 11.), a ugrađuje se u kompjutere, televizore, mobilne telefone, itd. Mnogi uređaji iz navedene grupe završavaju na otpadu zajedno sa komunalnim otpadom ili se izvoze van Evrope [5].

U većini slučajeva, jedina prava zamena za Pt su ostali platinski metali, koji su manje rasprostranjeni u odnosu na samu Pt. Međutim, u slučaju da se Pt zameni Pd, npr. kod auto katalizatora, uglavnom je potrebno primeniti više Pd nego što je potrebno Pt za istu efikasnost katalizatora [12].

Proizvodnja PGM iz primarnih i sekundarnih izvora

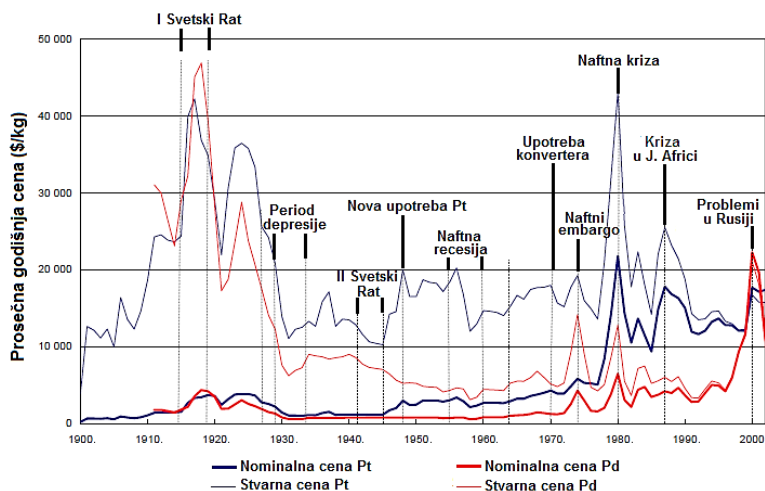
ukazuje da je životna sredina višestruko pogođena u slučaju primarne proizvodnje. Prema jednoj studiji [9] koja uključuje najveće svetske proizvođače PGM, količina emitovanog  $CO_{2eq}$  i  $SO_{2eq}$  kao i količina utrošenih sredstava koja se ulaže u primarnu proizvodnju PGM je 13, 107 i 69 puta veća, respektivno, u odnosu na proizvodnju iz sekundarnih sirovina. Grubom procenom, da bi jedan benzinski odnosno dizel automobil amortizovao emitovanu količinu  $SO_2$ , koji je nastao u proizvodnji PGM za izradu auto katalizatora, potrebno je da pređe 4.616 km, odnosno 94.833 km. Iz navedenih podataka nedvosmisleno je da je jedan od načina kako bi se dodatno povećao pozitivan uticaj na

životnu sredinu i izbeglo stvaranje otpada upotreba sekundarne PGM u izradi auto katalizatora. Trenutno se koristi svega 10% reciklirane PGM od ukupne količine, dok ostatak čini primarno dobijeni PGM. Ovo pokazuje koliko je reciklaža auto katalizatora i reciklaža uopšte značajna za zaštitu životne sredine i održivi razvoj [23].

## CENA KOŠTANJA PGM

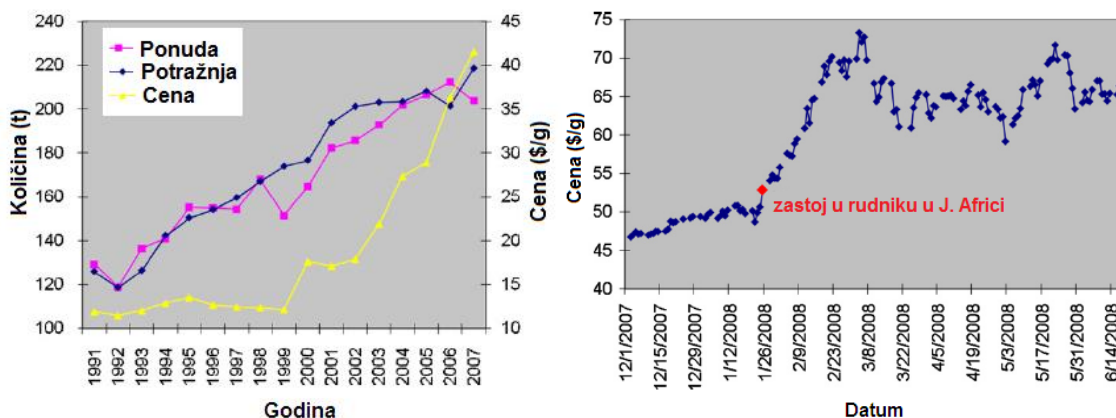
Potreba za Pt raste iz godine u godinu, što dovodi

do velike razlike u ponudi i potražnji, obzirom na relativno male količine koje su u opticaju. Na slici 12 prikazana je promena cene Pt i Pd kao rezultat najvažnijih globalnih ekonomskih, političkih i tehnoloških događaja, kao što su: Prvi svetski rat, Drugi svetski rat, industrijski procvat posle Drugog svetskog rata, uvođenje regulativa o kontroli kvaliteta vazduha sredinom 1970-ih i početkom 1980-ih godina prošlog veka, štrajk u rudniku PGM u J. Africi 1986. godine, itd. [14].



Slika 12. Cena Pt i Pd u periodu 1900-2002.god. na svetskom tržištu [14]  
(cena za Pd od 1900-1910. nije bila dostupna)

Na slici 13 (levo) prikazane su ponuda, potražnja i cena Pt u periodu od 1991. do 2007. godine (reciklirana Pt je izuzeta iz potražnje). Pre 1999. ponuda i potražnja bile su izbalansirane, a cena Pt je bila stabilna. Godine 1999., Rusija u sklopu restrukturiranja privrede ukida izvoz PGM, što dovodi do smanjenja količine Pt na svetskom tržištu za oko 10%, što je uslovalo porast cene Pt za oko 50%. Nakon stabilizacije izvoza i povrtaka Rusije na svetsko tržište cena Pt se nije vratila na predhodni nivo. Tokom 2008. godine zastoj od dve nedelje u rudniku PGM u J. Africi dovodi do pada proizvodnje Pt na svetskom nivou od 3% što je uticalo na rast cene Pt sa 50 na 70 \$/g samo u toku jedne nedelje (slika 13. desno) [12].



Slika 13. Rast cene Pt u skladu sa ponudom i potražnjom u periodu 1991-2007.god. (levo) i promena cene Pt u periodu od 1.12.2007-14.06.2008.god. (desno) [12].

Očekuje se da nove tehnologije na polju gorivih ćelija, katalizatora i desalinizacije vode budu dostupne oko 2030. godine, što će uticati da potražnja za Pt i Pd značajno poraste [2]. Današnje gorive ćelije od 50 kW sadrže oko 46 g platine (cena >2.000 \$). Analitičari očekuju da će dalji razvoj ekoloških automobila uticati na smanjenje sadržaja Pt. Međutim, ako se u budućnosti svi motori sa unutrašnjim sagorevanjem zamene gorivim ćelijama to može uticati na ponovni rast cene Pt, jer će potražnja svakako porasti [24]. U poređenju sa ostalim platinskim metalima, cena Pt je viša zbog njenih boljih osobina [12]. Prosečna cena PGM u \$/unci (1 unca = 28,3495 g) za period januar-maj 2013. godine iznosila je [25]:

- za Pt 1.555 \$/unci,
- za Pd 734 \$/unci,
- za Rh 1.184 \$/unci,
- za In 1.018 \$/unci,
- za Ru 85 \$/unci.

## ZAKLJUČAK

Platinski metali su redak i deficitaran resurs koji ima ključnu ulogu u razvoju savremenih tehnologija zbog široke i raznovrsne primene. Glavni korisnici PGM u Evropi svrstani su u sedam industrijskih sektora i proizvodnih grupa koje čine: elektronska oprema i autokatalizatori, hemijska, naftna i industrija stakla, nakit i stomatologija.

Sadašnji nivo ponude i potražnje, uzimajući u obzir i procene primarnih resursa PGM, ukazuje da proizvodnja PGM iz prirodnih izvora (preradom ruda) mora da bude znatno više podržana proizvodnjom iz sekundarnih izvora (reciklažom sekundarnih sirovina).

Pošto je automobilska industrija najveći korisnik/potrošač PGM, pre svega u proizvodnji auto katalizatora, stepen reciklaže auto katalizatora ima i imaće veliki uticaj na očuvanju eksploatacionih rezervi PGM ali i životne sredine i od ključne je važnosti da se u budućnosti maksimalno poveća.

## LITERATURA

1. Arsenijević, S. Hemija – opšta i neorganska. Naučna knjiga, Beograd, 1994.
2. European Commission (EC), 2010. Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.
3. Eggert, R.G. Minerals., Critical Minerals, and the U.S. Economy. The National Academies Press, Washington, 2007.

4. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Case Study on Critical Metals in Mobile Phones – Final Report, 2012.
5. Hagelüken, C. Recycling the Platinum Group Metals. *A European Perspective Platinum Metals Review* **2012**, 56(1), 29–35.
6. Dubiella-Jackowska, A.; Polkowska, Ž.; Namieśnik, J. Platinum Group Elements: A Challenge for Environmental Analytics – Review. *Polish Journal of Environmental Studies* **2007**, 16 (3), 329–345.
7. Ravindra, K.; Bencs, L.; Van Grieken, R. Platinum group elements in the environment and their health risk – Review. *The Science of the Total Environment* **2004**, 318, 1–43.
8. Chen, J.; Huang, K. A new technique for extraction of platinum group metals by pressure cyanidation. *Hydrometallurgy* **2006**, 82, 164–171.
9. Saurat, M.; Bringezu, S. Platinum Group Metal Flows of Europe, Part 1 Global Supply, Use in Industry, and Shifting of Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology* **2008**, 12(5/6), 754–767.
10. Hilliard, H.E. Platinum Recycling in the United States in 1998 in Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States, Edited by S.F. Sibley, 2004, pp. 17–29.
11. Cramer, L.A. The Extractive Metallurgy of South Africa's Platinum Ores - Overview, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* **2001**, 14–18.
12. Yang, C.J. An impending platinum crisis and its implications for the future of the automobile. *Energy Policy* **2009**, 37, 1805–1808.
13. Wilburn, D.R. Global exploration and production capacity for platinum-group metals from 1995 through 2015 (version 1.1): U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012–5164, 2012.
14. Wilburn, D.R.; Bleiwas, D.I. Platinum-Group Metals – World Supply and Demand, U.S. Geological Survey Open, File Report 1224, 2004.
15. Rumpold, R.; Antrekowitsch, J. Recycling of Platinum Group Metals from Automotive Catalysts by an Acidic Leaching Process, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Platinum 2012, 5th International Platinum Conference “A catalyst for change”, Sun City, South Africa, 17<sup>th</sup>-21<sup>th</sup> September 2012, 695–714.
16. Hagelüken, C. Recycling of Electronic Scrap at Umicore Precious Metals Refining. *Acta Metallurgica Slovaca* **2006**, 12, 111–120.

17. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council, of 18 september 2000, on end-of life vehicles, Official Journal of the European Communities, L 269/34.
18. Jha, M.K.; Lee, J.-C.; Kim, M.-S.; Jeong, J.; Kim, B.-S.; Kumar V. Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy* **2013**, *133*, 23–32.
19. Butler, J. Platinum 2012 - Interim Review, Johnson Matthey Public Limited Company.
20. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), Official Journal of the European Union, L 37/24.
21. Saurat, M.; Bringezu, S. Platinum Group Metal Flows of Europe, Part 2 Exploring the Technological and Institutional Potential for Reducing Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology* **2009**, *13*(3), 406–421.
22. JM Publications, Johnson Matthey - Platinum today. Dostupno na: [www.platinum.matthey.com/publications/market-data-tables](http://www.platinum.matthey.com/publications/market-data-tables) (28.01.2014.)
23. Štrbac, N.; Vuković, M.; Voza, D.; Sokić, M. Održivi razvoj i zaštita životne sredine. *Reciklaža i održivi razvoj* **2012**, *5*, 18–29.
24. Sun, Y.; Delucchi, M.; Ogden, J. The impact of widespread deployment of fuel cell vehicles on platinum demand and price. *International journal of hydrogen energy* **2011**, *36*, 11116–11127.
25. USGS 2013, U.S. Geological Survey, Platinum group of metals, Dostupno na: [www.google.rs/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fminerals.usgs.gov%2Fminerals%2Fpubs%2Fcommodity%2Fplatinum%2Fmis-201305-plati.pdf&ei=dOQiUsTpG8T17Abz6oHQCA&usq=AFQjCNHg9UUqIH-48\\_8FnU35h54X0rthGg&bvm=bv.51495398.d.ZGU](http://www.google.rs/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fminerals.usgs.gov%2Fminerals%2Fpubs%2Fcommodity%2Fplatinum%2Fmis-201305-plati.pdf&ei=dOQiUsTpG8T17Abz6oHQCA&usq=AFQjCNHg9UUqIH-48_8FnU35h54X0rthGg&bvm=bv.51495398.d.ZGU) (10.02.2014.)